

# Wellstegträger mit größeren Stegblechdicken – Fertigungstechnologie und Tragverhalten

H. Pasternak, J. Robra, V. Bachmann

**Zusammenfassung** Hauptsächlich im Stahlhallenbau kommen in den letzten Jahren Träger mit profilierten Steg, insbesondere mit sinusförmig profilierten Steg, verstärkt zum Einsatz. Wellstegträger werden mit Hilfe spezieller Maschinen vollautomatisch produziert. Durch die ständige Weiterentwicklung des Produktionsprozesses wurde die Produktion von dickeren Wellstegen bis 6 mm möglich. Dadurch gelang es, den möglichen Anwendungsbereich deutlich zu erweitern. Bauteilversuche wurden durchgeführt, um die Anwendbarkeit der bisher üblichen Bemessungsregeln für diese größeren Stegdicken zu überprüfen.

**Sinusoidal corrugated web beams with increased web thickness – manufacturing technology and load carrying capacity**

**Abstract** Especially for the main frames of single-storey steel buildings the use of corrugated web beams, mainly with sinusoidal corrugation, has been increased very much during the last years. Corrugated web beams are fabricated fully automated by special machines. Due to improvements of the automatic fabrication process corrugated webs up to 6 mm thickness became possible. Therefore the field of application of this beam type has been extended considerable. Tests have been carried out to investigate the practicability of the usual dimensioning rules for an increased web thickness.

## 1 Einleitung

Wellstegträger sind geschweißte I-Träger mit dünnwandigen gewellten Stegen und Flaschen aus Breitflachstahl. Verglichen mit den seit den 60er Jahren bekannten Trapezstegträgern ist das Stegblech jedoch sinusförmig profiliert. Das erlaubt eine rein maschinelle Fertigung der Trägerrohlinge und hat außerdem auch gewisse statische Vorteile.

Der optimale Anwendungsbereich von Wellstegträgern (**Bild 1**) ist der Bereich, wo üblicherweise Walzprofile und geschweißte Blechträger mit mehr als 300 mm Trägerhöhe oder Fachwerkträger mit weniger als 1800 mm Trägerhöhe eingesetzt werden. Im Vergleich mit gewalzten oder geschweißten I-Trägern ist der Wettbewerbsvorteil hauptsächlich durch eine erhebliche Materialeinsparung bedingt. Ein Großteil der Einsparung ist direkt eine Folge des schlanken Steges, dessen Dicke bei gleicher Querkrafttragfähigkeit nur ein Bruchteil der Dicke eines flachen Stegbleches beträgt. Ein weiteres, mindestens ebenso großes Einsparungspotential, ergibt sich aus der Möglichkeit der Querschnittsoptimierung. Durch die Wahl eines möglichst hohen Trägers werden die Flanschabmessungen reduziert, wobei, anders als beim ebenen Stegblech, der Materialaufwand für den höheren Steg wegen der geringen Dicke kaum ins Gewicht fällt. Ein weiterer Vorteil gegenüber geschweißten Blechträgern ist dadurch bedingt, dass das Stegblech quasi endlos vom Coil kommt und nicht durch aufwändige Stumpfnähte längs gestoßen werden muss. Verglichen mit Fachwerkträgern ist der Wettbewerbsvorteil von Wellstegträgern hauptsächlich durch die vollautomatische Fertigung bedingt.



**Bild 1. Stahlhalle mit Wellstegträgern**

Fig. 1. Single-storey steel building with sinus web beams

Seit kurzem ist die Produktion von Wellstegen bis 6 mm Dicke möglich. Der mögliche Anwendungsbereich von Wellstegträgern wurde somit deutlich erweitert. Im Auftrag der Firma ZEMAN wurden an der Brandenburgischen Technischen Universität Bauteilversuche durchgeführt, um die Anwendbarkeit der bisher üblichen Bemessungsregeln für Stegdicken bis 6 mm zu überprüfen.

## 2 Fertigungstechnologie

Die maschinelle Produktion von Wellstegträgern wurde in den 90er Jahren in Österreich von der Firma ZEMAN entwickelt. Die ersten Maschinen waren Halbautomaten, mit deren Hilfe Träger mit konstanter Bauhöhe und einer Stegdi-

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Dipl.-Ing. Volkmar Bachmann

Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau

Brandenburgische Technische Universität

Konrad-Wachsmann-Allee 2

03046 Cottbus

Hartmut.Pasternak@TU-Cottbus.de

Volkmar.Bachmann@TU-Cottbus.de

Dipl.-Ing. Dr. techn. Jörgen Robra

Zeman & Co GmbH

Schönbrunner Straße 213-215, A-1120 Wien

cke zwischen 2 mm und 3 mm produziert werden konnten. Seit dieser Zeit wurde der Prozess ständig verbessert, so dass die Maschinen der jüngsten Generation neben einem größeren Spektrum an Stegdicken auch konische Träger produzieren können. Eventuelle Stegöffnungen werden ebenfalls maschinell ausgeschnitten. Alle Produktionsschritte des Trägerrohrlings, inklusive Schweißprozess, erfolgen inzwischen vollautomatisch. Gegenwärtig sind folgende Trägerabmessungen möglich:

- Flanschbreiten zwischen 120 und 450 mm
- Flanschdicken zwischen 6 und 30 mm
- Stegdicken von 1,5, 2, 2,5, 3, 4, 5 und 6 mm
- Steghöhen von 333, 500, 625, 750, 1000, 1250 und 1500 mm
- Materialgüte bis einschließlich S355

Steghöhen von 1000, 1250 und 1500 mm werden direkt vom Coil produziert. Bei den übrigen Steghöhen wird das Blech in 2 bzw. 3 Streifen gespalten. Die Standardhöhen wurden so gewählt, dass kein Verschnitt entsteht.

Die maximale Länge der Trägerrohlinge beträgt 16 m bei parallelen Flanschen und 12 m bei konischen Trägern.

Zu Beginn des Produktionsprozesses wird das Stegblech vom Coil abgewickelt und durch ein System von Walzen entspannt. In der Schneide- und Spaltanlage wird es auf die benötigte Länge geschnitten und je nach gewünschter Trägerhöhe in Längsrichtung geteilt. Beim anschließenden Durchlauf durch die Profilieranlage wird eine annähernd sinusförmige Profilierung mit einer Periodenlänge von 155 mm und einer Höhe von ca. 40 mm erzeugt. Die fertigen Stegbleche werden dann auf einem Längs- und Querförderer bis zur weiteren Verarbeitung geparkt. In diesem Bereich befinden sich auch spezielle Gurtkörbe, in denen die bereits auf Länge geschnittenen Gurte gelagert werden.

Die vorbereiteten Stegbleche werden nun nacheinander mit den dazugehörigen Gurten in die Schweiß- und Zusammenbaustation befördert (Bild 2). Durch ein hydraulisch gesteuertes Rollensystem wird der Steg mittig zentriert. Gleichzeitig werden mittels hydraulischer Pressen die Gurte ange-drückt.

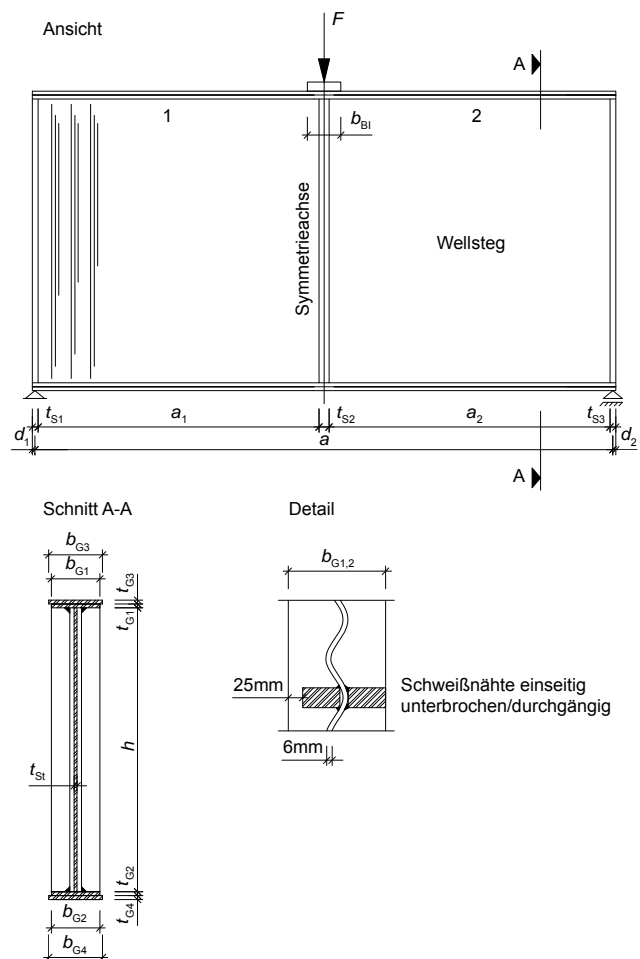


**Bild 2 Schweißen von Wellstegträgern**  
Fig. 2. Welding of sinus web beams

### 3 Versuchsplanung

#### 3.1 Versuchskörper

Für das Versuchsprogramm wurden von der Firma ZEMAN insgesamt drei Wellstegträger vollautomatisch unter Werksbedingungen hergestellt (Bild 3). Eine Besonderheit stellt dabei die beidseitige Verschweißung des profilierten Stegs mit den Flanschen dar. Weiterhin wurden zentrisch beidseitig angeordnete vertikale Lasteinleitungssteifen eingeschweißt. Die Anordnung der beidseitigen Quersteifen teilt den profilierten Steg in zwei gleiche Teilfelder mit einem Seitenverhältnis  $\alpha = a/h = 1$ . Beidseitige Stirnplatten sowie die speziell für den experimentellen Aufbau konstruierte Lagerungspunkte der Fußpunkte wurden ebenfalls direkt ab Werk gefertigt. Die Abmessungen der Versuchskörper gehen aus **Tabelle 1** hervor. Bei Versuchskörper 1 lag das Flansch/Steg- Dickenverhältnis ( $t/s$ - Wert) bei 2. Die Versuchskörper für die Versuche 2 und 3 wiesen ein  $t/s$ - Wert von 4 auf. Dieser wurde durch Aufdopplung der Flansche von 12 auf 24 mm realisiert.



**Bild 3. Versuchskörper**  
Fig. 3. Test specimen

#### 3.2 Versuchsanordnung

Das statische System entspricht somit einem Einfeldträger mit einer mittig platzierten Einzellast. Der Versuchsaufbau wurde so gewählt, daß eine zentrische Lasteinleitung über die Systemachse der Quersteifen realisiert werden konnte. Auf Grund des zu erwartenden Lastniveaus (3MN) wurde eine spezielle Lasteinleitungs-konstruktion benötigt, mit



**Tabelle 1. Geometrische Abmessungen**

Table 1. Geometric dimensions

VK	b <sub>BI</sub>	h	t <sub>st</sub>	b <sub>G1</sub>	t <sub>G1</sub>	b <sub>G2</sub>	t <sub>G2</sub>	b <sub>G3</sub>	t <sub>G3</sub>	b <sub>G4</sub>	t <sub>G4</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	t <sub>s1</sub>	t <sub>s2</sub>	t <sub>s3</sub>
1	298	1498	6	252	12,4	253	12,3	/	/	/	/	1428	1427	199	198	30,3	30,7	30,2
2	298	1502	/	251	12,6	251	12,6	299	12,4	299	12,5	1426	1426	200	200	30,0	30,1	30,2
3	200	1499	/	251	12,2	252	12,2	299	12,3	299	12,4	1425	1442	202	200	30,3	30,6	30,4

welcher es möglich war, die hohe Last konstruktiv als Punktlast in den Versuchskörper einleiten zu können. Durch die Anordnung eines normal zur Bauteillängsachse ausgerichteten Traversenbalkens war es möglich die drei hydraulischen Prüfzylinder (1MN) so auszurichten, das eine zentrische Lasteinleitung konstruktiv realisiert werden konnte. Die Rückverankerung der Prüfzylinder erfolgte über einen Lastrahmen. (Bild 4). Die zentrische Lasteinleitung erfolgte bei den Versuchen 1 und 2 direkt über die Traverse – Lasteinleitungsfläche 300 mm x 250 mm. Bei Versuchskörper 3 wurde ein zusätzliches „Wipplager“ eingebaut, um eine bessere Rotationsfreiheit um die Bauteillängsachse zu gewährleisten (Bild 5- Mitte). Auf Grund der kardanischen Lagerung der Prüfzylinder wurde ein vertikales Gleitlager an der Traverse angebracht, um poltreue Lastwirkungslinien der drei parallelen Prüfzylinder zu gewähren (Bild 5 - links). Die statisch bestimmte Lagerung der Prüfkörper erfolgte durch je ein Fest- und Gleitlager. Zur Gewährleistung der des horizontalen Freiheitsgrads wurde durch eine „Rollenlagerung“ welches aus einem Blech und drei Rollen bestand eingebaut (Bild 5 – rechts). Das Kippen (Drillknicken) während des Versuches wurde durch seitliche Abstützungen (gabelförmige Führung) an den Auflagerbereichen verhindert.

### 3.3 Versuchsprogramm

Die Traglastversuche wurden weggeregelt, mit einer Wegrampe von 0,25mm/min, und einer 5 Hz Abtastrate durchgeführt. Hierfür wurden jedoch aus versuchstechnischen und regelungstechnischen Gründen verschiedene Zyklen (Last-rampen) angewandt. Regelungstechnisch war es nicht möglich, alle drei Prüfzylinder kraft- oder weggeregelt anzusteuern. Somit wurde ein spezieller zweistufiger Belastungsalgorithmus programmiert. Bei Versuchskörper Nr. 1 wurden zwei Zyklen angewandt. Im ersten Zyklus wurde allein durch den mittleren Prüfzylinder eine Last von ca. 500 kN aufgebracht. Im zweiten Zyklus wurde die Last im mittleren Prüfzylinder konstant gehalten und der Versuchskörper weggeregelt durch die beiden äußeren Prüfzylinder bis zum Erreichen der Traglast beansprucht. Bei Versuch Nr. 2 (t/s- Wert = 4,0) wurden ebenfalls zwei Zyklen bis zum Erreichen der Traglast benötigt. Der Versuchsaufbau- und die Durchführung erfolgte analog zu Versuchskörper Nr. 1 jedoch wurde im ersten Zyklus durch den mittleren Prüfzylinder eine Kraft von 950 kN auf den Versuchskörper aufgebracht, bevor in den zweiten Zyklus übergegangen wurde. Der Traglastversuch Nr.3 (t/s- Wert = 4,0) wurde zuerst mehrmals zyklisch weggeregelt be- und entlastet. Ingesamt wurden drei verschiedene Lastzyklen durchgeführt. Die Anzahl der Zyklen betrug je Teilversuch 10. Im Versuch Nr. 3.1 wurde mit einer maximalen Last von 500 kN (durch mittleren Prüfzylinder) der Versuchskörper be- und anschließend vollständig entlastet. Die Abtastrate wurde mit 2 Hz für die weggeregelte Versuchsdurchführung von 0,25 mm/min aufgezeichnet. Versuch Nr. 3.2 und Nr. 3.3 unterschieden sich nicht prinzipiell im Versuchsablauf von Versuch Nr. 3.1. Bei beiden Versuchen wurde jedoch die Versuchslast (1000 kN und 1500 kN) durch die beiden äußeren Prüfzylinder realisiert. Um die hohe Ver-

suchslaufzeit zu reduzieren, wurde die beiden Versuche mit einer Wegsteuerung von 0,5mm/min (ca. 3,1 kN/s) durchgeführt. Von einer weiteren Steigerung der Versuchsgeschwindigkeit wurde abgesehen, um eine mögliche Resonanz in den Prüfzylindern sowie regelungstechnische Grenzwerte des Versuchsablaufes auszuschließen.



**Bild 4 Versuchsordnung**

Fig. 4. Test set-up



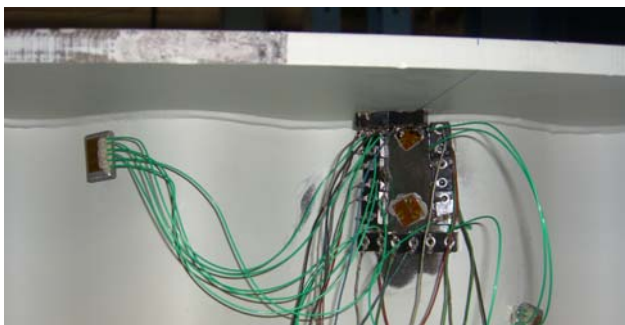
**Bild 5 Details (Gleitlager, Wipplager, Rollenlager)**

Fig. 5. Details (slide bearing, wiped bearing, roller bearing)

### 3.4 Belastung- und Messtechnik

Die Versuchslast wurde über drei baugleiche hydraulische Prüfzylinder realisiert. Zum Einsatz kamen Prüfzylinder der Firma MTS (Modell 240.60) mit einer Nennkraft vom 1000 kN und Hub von 400 mm. Die Lastverteilung wurde durch zwei Kraftmesszellen an den Auflagerpunkten aufgezeichnet. Dazu wurden an diesen Stellen zwei 1500 kN-Kraftmessdosen (Firma HBM, Typ C6A, 2MN) verwendet. Die Durchbiegungen wurden mittels Wegaufnehmern gemessen. Die Wegaufnehmer wurden beidseitig an der Lasteinleitungssteife, im Abstand von ca. 600mm von der hori-

zontalen Bezugsebene (Aufspannfeld) angebracht. Horizontale Wegmessungen erfolgten bei alle Versuchskörpern in halber Trägerhöhe, sowie zusätzlich bei Versuchskörper Nr. 3 im Anschlussbereich von Obergurt und Untergurt, einseitig an der vertikalen Quersteife. Kontrollmessungen im Bereich der Auflager, am Obergurt in Bauteillängsrichtung sowie an der Lastverteilungstraverse wurden ebenfalls mittels Wegaufnehmer durchgeführt. Bei allen Wegmessungen wurden Wegtaster und Aufnehmer mit losen Tauchanker der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik HBM, Darmstadt, Typ WA mit einem Messbereich 0...50 mm und 0...300 mm eingesetzt. Das Materialverhalten des Trägers wurde über Messungen der Dehnungen auf beiden Seiten der Gurtungen und Stegen durch Dehnungsmessstreifen - DMS (Typ R und RY von der Firma HBM) erfaßt (**Bild 6**). Die gesamte Datenerfassung erfolgte über das digitale Messverstärkersystem DMCplus der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik ausgerüstet mit der Software DIADEM 9.1.



**Bild 6 Dehnungsmessung**  
Fig. 6. Strain measurement

## 4 Versuchsergebnisse

### 4.1 Experimentelle Untersuchungen

Ziel der experimentellen Untersuchungen war, eine Klärung der Anwendbarkeit der bisher üblichen Bemessungsregeln auch für Stegdicken bis 6 mm zu erlangen. Hierfür sollte der Einfluß der Schnittkraftfelder M und V geprüft werden. Auf Grund des variablen t/s- Wertes, war es möglich, bei gleicher Versuchskörperlänge sowohl ein Versagen auf Grund von Biegemoment als auch Querkraft zu erzeugen. Die erreichten Traglasten sind in Tabelle 2 aufgeführt. **Bild 7** zeigt die Last-Verformungskurven der durchgeführten Versuche.

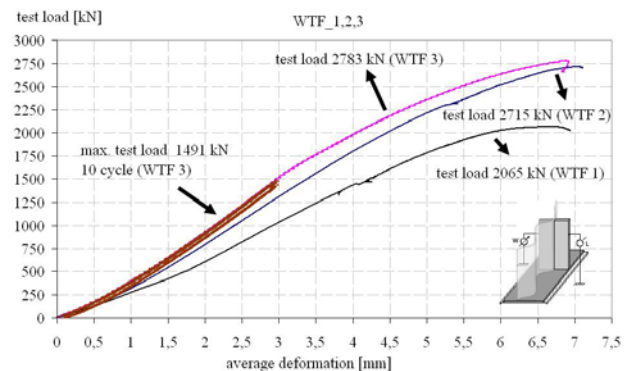
Versuch 1 (t/s- Wert = 2): Hier wurde die Traglast Gurtfließen erreicht (**Tab.2, Bild 9**). Der Ausnutzungsgrad des Wellsteges durch Querkraft lag dabei ca. bei 2/3 des maximalen Querkraftniveaus. Die Last - Verformungskurve strebt dabei asymptotisch gegen das empirisch gewonnen Grenzmoment.

Versuch 2 und 3 (t/s- Wert = 4): Mit dem Erreichen der Traglast gegen die Querkraft des Steges riss plötzlich die Last- Verformungskurve ab. Auf Grund der schlagartigen Umlagerungen im Versuchskörper auf diesem hohen Lastniveaus schaltete sich die Sicherheitsdetektion der Versuchsanlage ein und stoppte den Versuch. Dennoch läßt sich erkennen, daß die Traglastkurve sich gut an die empirisch ermittelte Grenzquerkraft annähert. Der Ausnutzungsgrad der Flansch durch das Biegemoment lag dabei bei ca. 60%. Bei Versuchskörper 3 sind leichte lokale plastische Verformungen im Flansch zu erkennen, was als mögliche Interaktion von Biegemoment und Querkraft gewertet wurde (**Bild 9**).

Bei den im elastischen Bereich durchgeführten Belastungszyklen bei Versuch 3 konnte kein Einfluss auf das Traglastniveau festgestellt werden.

**Tabelle 2. Versuche und ihre Versagensart**  
**Table 2. Tests and their failure modes**

WTF	t/s- Wert	Last-zyklen	Experimentelle Traglast [mm]	Durchbiegung bei Traglast [mm]	Versagensform
1	2	1	2065	8,1	lokales Plastizieren des Obergurtes im Lasteinleitungsbereich
2	4	1	2715	7,1	Schubversagen des Steges und lokale plastische Verformungen im Lasteinleitungsbereich
3_1	4	10	483	1,3	elastisches Verhalten
3_2	4	10	965	2,1	elastisches Verhalten
3_3	4	10	1491	3	elastisches Verhalten
3	4	1	2783	6,9	Schubversagen des Steges



**Bild 7 Last- Verformungskurven**  
Fig. 7. Load Deflection Curve

### 4.2 Berechnungen

In Ergänzung der durchgeführten Versuche wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 3** zusammenfassend dargestellt.

Aus Tabelle 4, Spalte 2, ist erkennbar, dass der Versuchskörper WTF 1 (t/s = 2) durch das Überschreiten der Momententragfähigkeit versagte.

In Spalte 6 und 10 sind die Abminderungsfaktoren für globales Stabilitätsversagen nach [1], [2] bzw. [3],[4] aufgeführt. Die daraus abgeleiteten Schubtragfähigkeiten sind in Spalte 8 und 11 enthalten. Die Spalten 9 und 12 geben das Verhältnis der maximalen aufnehmbaren Querkraft aus dem Versuch und der vollplastischen Querkraft an. Ergänzend sind die experimentellen Untersuchungen und Berechnungen nach [2] und [4] in **Bild 8** mit aufgetragen. Man erkennt, dass die Versuche WTF 2 und 3 auf dem Fließplateau liegen, d.h. ein globales Stabilitätsversagen tritt nicht auf. Da lokales Stegbeulen ebenfalls nicht auftritt, kann die Interaktion von globalem und lokalem Beulen ausgeschlossen werden.

### 4.3 Numerische Untersuchungen

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden numerische Modelle der untersuchten Versuchskörper mittels des Programmpaketes ABAQUS ® erstellt.

Tabelle 3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Table 3. Summary of the results

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	remark
VK	t/s	$M_e/M_R^*$	shear capacity*									$f_y = 297 \text{ N/mm}^2$ $E = 198379 \text{ N/mm}^2$
			$V_{exp}$ [kN]	$V_{pl}$ [kN]	$\lambda_{pi}$	$\chi_{c,g}$ [3]	$V$ [3] [kN]	$V_{exp}/V$	$\kappa_r$ [1]	$V$ [1] [kN]	$V_{exp}/V$	
WTF1	2	> 1,0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
WTF2	4	0,61	1357,5	1337	0,983	1	1337	1,02	1	1337	1,02	
WTF3	4	0,63	1391,5	1337	0,983	1	1337	1,04	1	1337	1,04	

$\alpha = 1,0$ ,  $h = 1500 \text{ mm}$ ,  $s = 6,0 \text{ mm}$ ,  $\lambda_{pi}$  = relative web slenderness,  $\chi_c$  bzw.  $K_T$ - reduction factor,

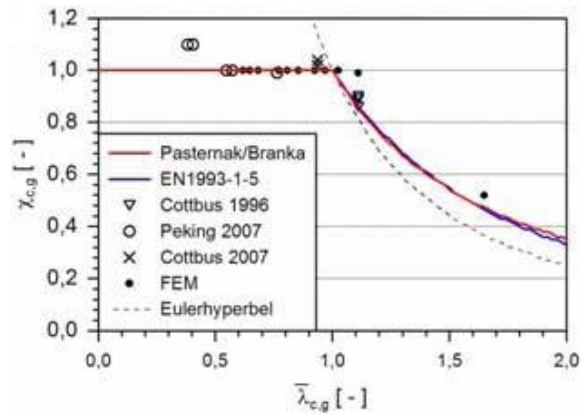


Bild 8 Abminderungsfaktor in Abhängigkeit vom bezogenen Schlankheitsgrad [1]-[4]

Fig.8. Reduction factor versus relative slenderness according to [1]-[4]

Hiermit sollte es möglich sein, das experimentelle Tragverhalten numerisch abzubilden. Neben den Berechnungen an der perfekten ebenen Struktur wurden ergänzende Berechnungen mit geometrischen Imperfektionen einer vorangestellten Beulanalyse mit einer Amplitude von 6 mm durchgeführt. Aus Tabelle 4 sowie Bild 9 oben ist ersichtlich, dass bei dem Versuch WTF 1 (t/s- Wert 2) Versagen durch das Plastifizieren des Flansches (Momententragfähigkeit) der Einfluss der Imperfektionen des profilierten Stegbereiches keinen signifikanten Einfluss auf die Traglast besitzt. Bei den Versuchskörpern WTF 2 und 3 (Bild 9 unten) mit dem t/s- Wert = 4 ist ein deutlicher Einfluss der Imperfektionen auf die Traglast zu erkennen. Somit konnte mit den ersten numerischen Modellen das Querkraftversagen (Schubtragfähigkeit) dieser Versuchsserie bestätigt werden

Tabelle 4. Vergleich der Traglasten für FE-Modelle mit und ohne geometrischer Imperfektion

Table 4. Comparison of load capacities with and without geometrical imperfections

VK	1	2	3
$\bar{P}_{exp}$ [kN]	2065	2715	2783
$\bar{P}_{FE}^{perf}$ [kN]	2388	3032	
$\bar{P}_{FE}^{imp}$ [kN]	2387	2966	
$\bar{P}_{FE}^{perf} / \bar{P}_{exp}$	1,16	1,12	1,09
$\bar{P}_{FE}^{imp} / \bar{P}_{exp}$	1,16	1,09	1,06

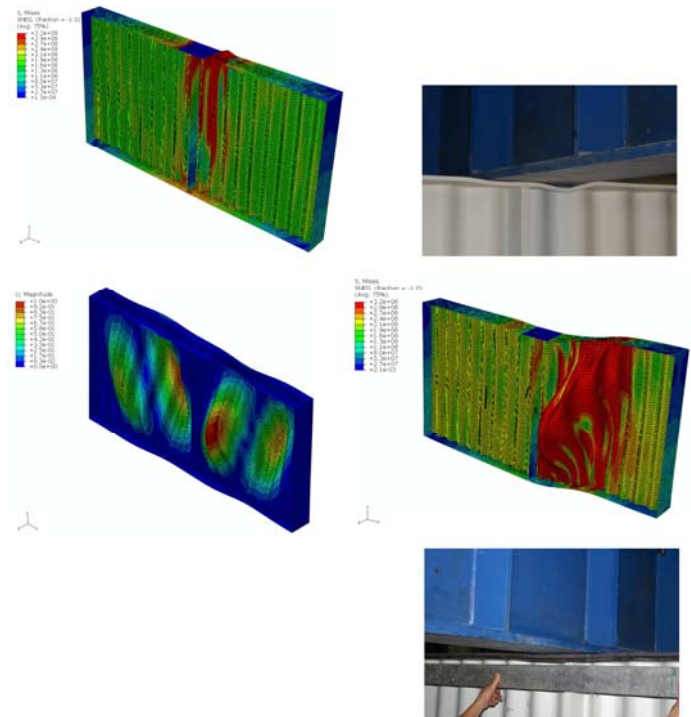


Bild 9 Numerische Untersuchungen verglichen mit Versuchsbeobachtungen

Fig. 9. Numerical results versus test observation

## 5 Schlussfolgerung

Die durchgeführten Versuche an den Wellstegträgern zeigen bei einem t/s- Wert = 2,0 ein Versagen durch lokales Fließen des Obergurtes im Lasteinleitungsbereich. Bei den Versuchen am Wellstegträger mit einem t/s- Wert = 4,0 zeigte sich ein Schubversagen des Wellsteges, welches aber mit lokal plastischen Verformungen im Lasteinleitungsbereich interagiert. Bei allen Traglasten wurde eine Durchbiegung der Versuchskörper von ca. 7,0 mm beobachtet. Es konnte bestätigt werden, dass bei Wellstegträgern mit Stegdicken von 6 mm nicht Stabilitäts- sondern Spannungsversagen für das Querkraftversagen kennzeichnend ist.

### Literatur

- [1] Pasternak, H.; Branka, P.: Zum Tragverhalten von Wellstegträgern. *Bauingenieur* 73 (1998), S. 437-444.
- [2] Gutachtliche Stellungnahme zur Querkrafttragfähigkeit von Wellstegträgern; Univ.-Prof. H. Pasternak, Braunschweig/ Cottbus 1996
- [3] EN 1993-1-5:2006(D), Anhang D: Bauteile mit profilierten Stegblechen, Stand Feb.2007
- [4] Pasternak H., Robra J., Kubieniec G.: Plate girders with corrugated webs. "Stability and Ductility of Structures" Baltic Session of the International Colloquium. Vilnius (Litauen) 2009