

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN DÜNNWANDIGEN BALKEN UNTER DAUERSCHWINGBELASTUNG

*István Szatmári**

ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren beschäftigten sich viele Forschungen mit dem Stegblech-Atmen, d.h. mit der Dauerschwingbelastung dünnwandigen Stegen. Diese Untersuchungen erstreckten sich fast ausnahmslos auf das Bereich des versteiften Stegblechs. Es wird im vorhandenen Beitrag zwei Träger mit versteiftem Stegblech und einen Träger mit unversteiftem Kastenquerschnitt vorgestellt, um der Traglast dieser unterschiedlichen Lösungen unter Dauerschwingbelastung zu vergleichen. Das wichtigste Resultat der Untersuchung ist, dass die zwei dünnwandigen Stegen im Kastenquerschnitt die selbe Tragfähigkeit aufweisen kann, wie ein dickerer Steg im I-Querschnitt bei der gleichen Gesamtmenge den Stegen.

1. EINLEITUNG

In den letzten Jahren wurden am Lehrstuhl für Stahlbau der TU Budapest 3 Versuchen für die Erforschung der Ermüdungseigenschaften der dünnwandigen Kranbahnträger durchgeführt.

Die in die Versuche hineingezogene Balken sind mit verschiedenen, zum Teil mit offenen, einwandigen Querschnitt, zum Teil mit Kastenquerschnitt versehen.

Um die Wirkung des durchlaufenden Krans möglichst simulieren zu können, sind zwei elektronisch gesteuerte Arbeitszylindern eingesetzt worden, die mit einer Phasenverschiebung nacheinander den Versuchsträger belastet haben.

Über die Erfahrungen der Versuchen wird es im Beitrag berichtet.

2. DAS PROGRAMM DER VERSUCHEN, DIE AUSGANGSDATEN

2.1. Die Versuchsträger

Bei der Gestaltung der Versuchsträger wurden zwei Ziele gesetzt

- Die einzelnen Konstruktionsteile so gestalten, dass die möglichst besten Ermüdungseigenschaften der Kranbahnträger gesichert werden können.
- Erfahrungen über der Zusammenwirkung des postkritischen Verhaltens und der Ermüdungstragfähigkeit des Stegblechs gewinnen.

* Dipl. Ing., Univ. Dozent, Technische Universität Budapest

Um diese Zielsetzung zu verwirklichen, wurden insgesamt 3 Versuchen durchgeführt, woraus bei 2 Versuchen wurden Träger mit offenem, einwandigem Querschnitt, und bei einem weiteren 4 Versuch - Träger mit steifenlosem Kastenquerschnitt angewandt.

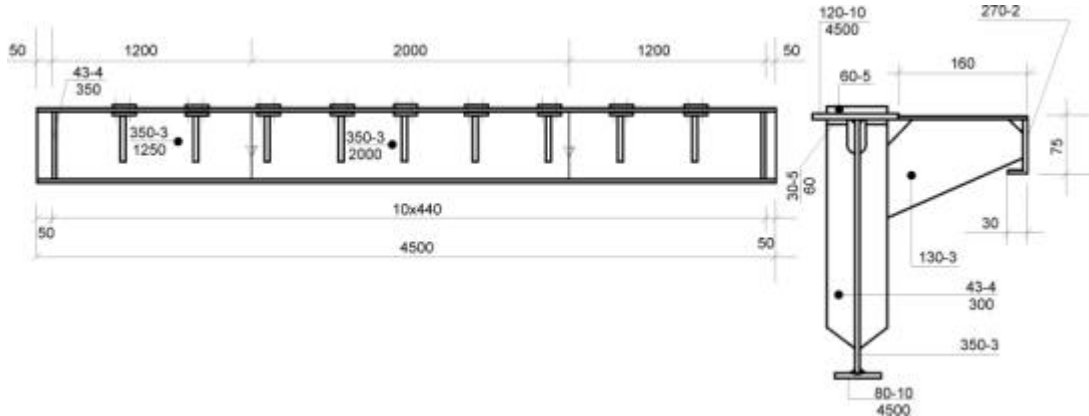


Abb. 1. Versuchsträger DV1.

In der Abb.1. wird der Versuchsträger DV-1 dargestellt. Um die Ermüdungseigenschaften des Trägers zu verbessern, werden zwei Maßnahmen eingeführt. Die Versteifungsrippen setzen sich nicht auf den unteren Gurt, sondern erstreckt sich nur auf den obersten sechs Siebenteln der Stegblechhöhe. Das Anschluss der Rippen am oberen Gurt wird mit HV Schrauben ausgebaut.

Im Fall den nicht zum Zuggurt erstreckenden Rippen besteht die Frage, ob der Querschnitt steif genug und formtreu werden kann, oder nicht. Es wurde bei den Versuchen festgestellt, dass die Verwendung solcher Rippen keine nennenswerten Nachteile hat. Um die Ermüdungstragfähigkeit des HV-Stoßes zwischen dem Druckgurt und der Versteifungsrippen zu erfahren, wurden Vorversuchen durchgeführt. Aufgrund dieser Erfahrungen konnte die nachteilige Wirkung der Quernaht an den Gurten auf die Tragfähigkeit des Trägers unter Dauerschwingbelastung vermieden werden.

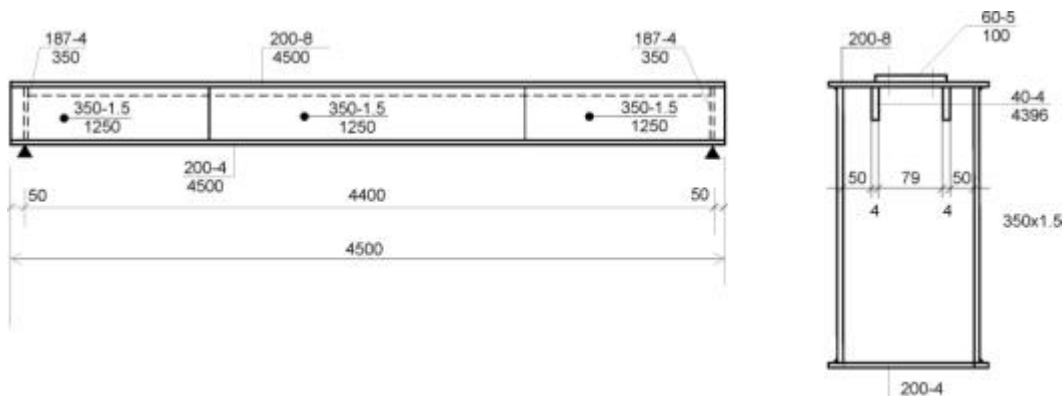


Abb. 2. Versuchsträger DV-3

Die Gestaltung des Versuchsträger DV-2 war ähnlich zum Träger DV-1. Der einzelne Unterschied ist der geschweißte Stoß zwischen dem oberen Gurt und den Versteifungsrippen

Der Versuchsträger DV-3 (s.Abb.2) hat einen Kastenquerschnitt ohne inneren Querscheiben, nur an beiden Enden des Trägers wurden Diaphragmen verwendet. Zur Verteilung der konzentrierten Lasten dienten zwei, mit Längsachse parallel laufende Flachstähle auf der unteren Fläche des Obergurts. Es ist noch bemerkenswert, dass die Gesamtdicke der zwei Stegbleche mit der Stegblechdicke des Trägers mit offenem Querschnitt gleich ist. So besteht die Möglichkeit, die Ermüdungstragfähigkeit des rippenlosen, unversteiften Stegblechs unmittelbar zum gewöhnlich gestalteten Stegblechs (bei DV-1 und DV-2) zu vergleichen.

2.2. Mechanische Materialeigenschaften

In den Vorversuchen wurden die Werte der Zugfestigkeit, der Streckgrenze und der Bruchdehnung bestimmt. Es wurde festgestellt, dass das angewandte Material der Gruppe St-37 entspricht.

2.3. Die Belastung der Versuchsträger

Um die Wirkung eines durchrollenden Krans nachzumachen, wurden zwei elektrohydraulisch gesteuerte Arbeitszylinder in der Anordnung nach Abb.3. eingesetzt. Mit den Zylindern wurden zwei zeitabhängige Kräfte $F_1(t)$ und $F_2(t)$ produziert, wo die Zeitfunktionen in der Abbildung gegeben.

Die Beanspruchungen in notierten Querschnitt gem. Abb. 3. sind die folgenden:

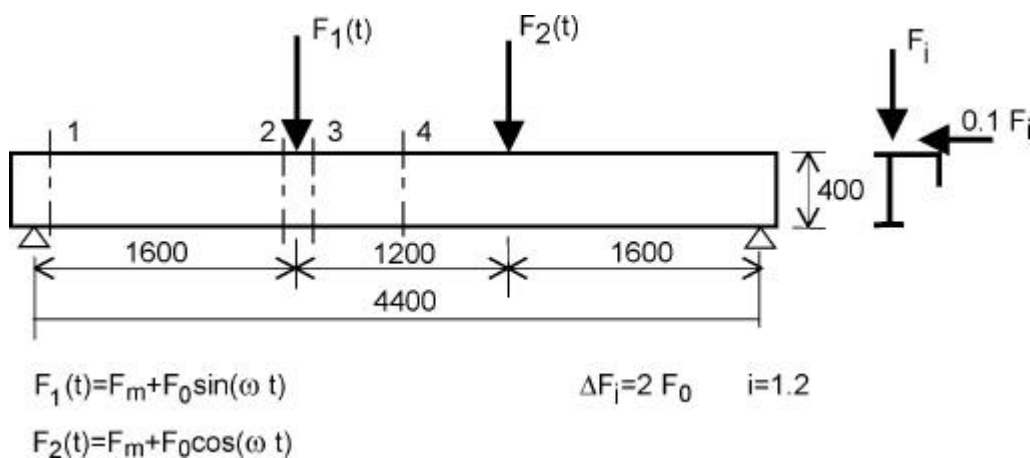


Abb. 3. Anordnung der Versuchen

$$T_1 = T_2 = F_m + F_0 \cdot c_1(t)$$

$$M_2 = M_3 = a(F_m + F_0 \cdot c_1(t))$$

$$T_3 = T_4 = \frac{a}{\ell} \cdot F_0 \cdot c_2(t)$$

$$M_4 = \frac{a}{2} (2F_m + F_0 \cdot c_3(t))$$

wobei

$$c_1(t) = \frac{a+b}{\ell} \cdot \sin \varphi t + \frac{a}{\ell} \cos \varphi t$$

$$c_2(t) = \cos \varphi t - \sin \varphi t$$

$$c_3(t) = \sin \varphi t + \cos \varphi t$$

Die Extremwerte und die Amplitude der Beanspruchungen mit den gegebenen geometrischen Daten und bei $F_m = 0,8 F_o$ sind:

$$T_{1\max} = 1,532 F_o$$

$$T_{1\text{mix}} = 0,068 F_o \quad \Delta T_1 = 0,732 \Delta F$$

$$M_{2\max} = 1,532 a F_o$$

$$M_{2\text{mix}} = 0,068 a F_o \quad \Delta M_2 = 0,732 a \Delta F$$

$$T_{4\max} = 0,514 F_o$$

$$T_{4\text{mix}} = -0,514 F_o \quad \Delta T_4 = 0,514 \Delta F$$

$$M_{4\max} = 1,5071 a F_o$$

$$M_{4\text{mix}} = 0,0929 a F_o \quad \Delta M_4 = 0,7071 a \Delta F$$

Mittels dieser Steuerung erreicht werden konnte, dass der Biegemoment- und Querkraftablauf im mittleren Bereich des Trägers zum wirklichen Durchlauf des Krans sehr ähnlich war.

3. DIE ERGEBNISSE DER DAUERSCHWINGVERSUCHEN

Die Dauerschwingversuche wurden mit stufenweise anwachsender Belastung durchgeführt, und die Auswertung folgte das bekannte Locati- Verfahren. Bei den Versuchen wurden $k=5$ bis 13 Stufen bis zum Erreichen des Bruchzustandes angewandt.

Die Auswertung wurde mit den beobachteten Werte-Paaren η und ΔF_i nach der Formel

$$X_i = 3 (A-1 g \Delta F_i) \quad N_i = 10^{X_i}$$

durchgeführt. Der Konstant A ist aus der Bedingung

$$\sum_{i=1}^k \frac{u_i}{N_i} = 1,0$$

zu bestimmen.

Die Dehnungen wurden auch im begrenzten Maß bestimmt, um die Spannungsverteilung im postkritischen Bereich besser kennen zu lernen.

Das Resultat der Auswertung kann in der Abb. 4. gesehen werden.

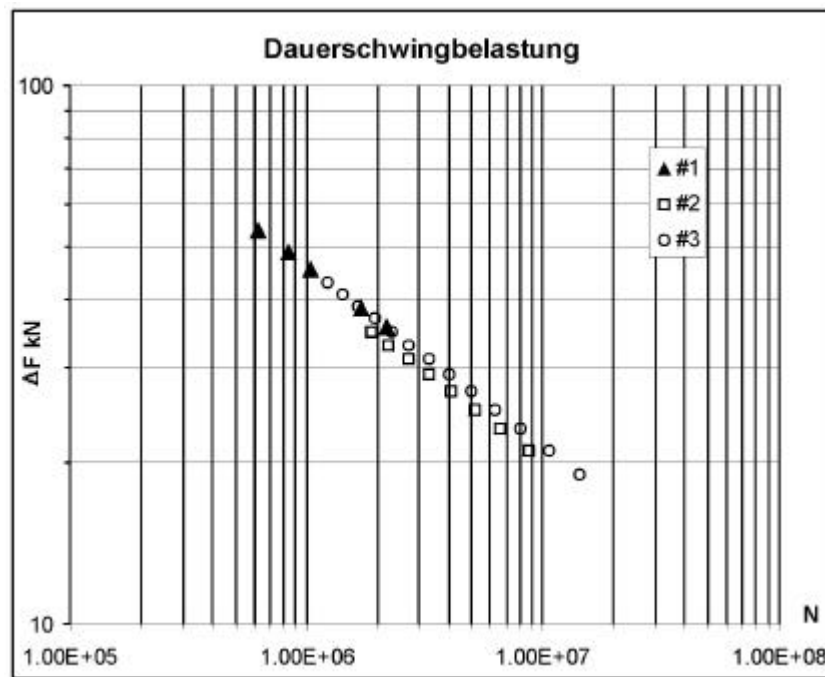


Abb. 4. Das Resultat des Locati- Verfahrens

Bei dem Versuch DV-1 war maßgebend für Ermüdungsbruch das Bereich der unteren Kehlnaht im mittleren Teil des Trägers. Die Schwellfestigkeit für Halsnaht hatte sich im Werte von 115 MPa gegeben. Die Amplitude der Belastungskräfte zur $N=2 \cdot 10^6$ Bruchwiederholungszahl war je

$$\Delta F_{2,0} = 36,66 \text{ kN.}$$

Das Rissbild ist eindeutig aus der Halsnaht in das Stegblech und in den Gurt hinausgelaufen, und ist beiderseitig mit Fließzonen begrenzt.

Beim Versuch DV-2 war der Versagensmechanismus sehr ähnlich zum DV-1. Die Schwellfestigkeit für Halsnaht war 107 MPa, die Amplitude die zum Bruch führende Belastungskraft lag in der Höhe von

$$\Delta F_{2,0} = 34,24 \text{ kN.}$$

Bei dem Versuch von Träger DV-3 war die Situation etwas komplizierter. Den ersten Riss haben wir im Zugbereich des Stegblechs unter einem der Belastungskräfte erfahren. Die Richtung des Risses war näherungsweise senkrecht auf die Richtung der Zugspannungen nach der Zugfeldstheorie. Die Spannungsamplitude dieser Laststufe in Zugzone-Haupttrichtung betrug etwa 130 MPa nach der Rechnung von Zugfeldstheorie. Das Vorhanden dieses Risses bedeutete aber nicht die Erschöpfung der Tragfähigkeit des Trägers, weil durch eine mutmaßliche Umlagerung des Spannungszustandes im Stegblech konnte der Träger weitere Belastung aufnehmen. Die Amplitude dieser Belastungskraft betrug

$$\Delta F = 35 \text{ kN}$$

Nach Einsatz weiteren Belastungsstufen war die Tragfähigkeit der Ermüdung erreicht. Die Ursache des Versagens war die Rissbildung im totalen Stegblechquerschnitt neben der Endversteifung. Nach der Zugfeldstheorie berechnete reduzierte Spannung erreichte inzwischen einen Wert von

$$156 \text{ MPa}$$

Die gleichzeitige Belastungskraft-Amplitude war

$$\Delta F = 43 \text{ kN}$$

Die Bruchlastamplitude zur $2 \cdot 10^6$ Wiederholungszahl konnte bei diesem Träger

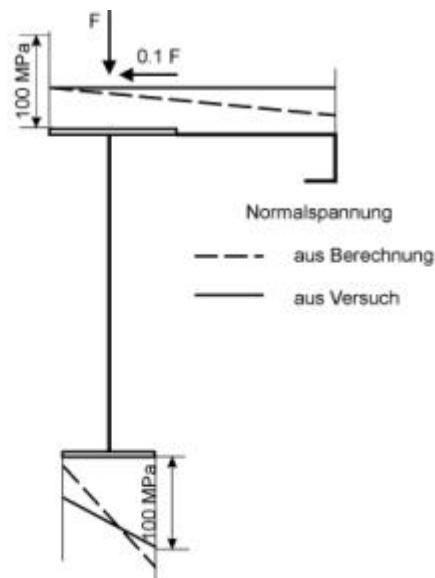
$$\Delta F_{2,0} = 36,56 \text{ kN}$$

ausgerechnet werden.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Erfahrungen der durchgeführten Versuche können im Folgenden zusammengefasst werden.

1. Im Fall von Kranbahnträger mit offenem Querschnitt und versteiften Stegblech:
 - a) Die neue Gestaltung des Querschnitts hat sich als einwandfrei gezeigt. Das steif gekoppelte Fußgängerblech kann wirksam mit dem Kranbahnträger zusammenarbeiten. Die Versteifungsrippen sich nicht in der totalen Höhe des Stegblechs erstreckend, können den notwendigen Formbestand des Querschnitts sichern.



$\tau_y = 144 \text{ MPa}$	Fliessgrenze für Schubspannung
$\tau_{kr} = 109 \text{ MPa}$	Verzweigungsintensität der Schubspannung
$\Delta\sigma_{2,0} = 115 \text{ MPa}$	Spannungsamplitude im unteren Halsnaht ($N = 2 \times 10^6$)

Abb. 5. Die Spannungen am Träger DV-1

- b) Die Spannungsberechnung aufgrund der Wölbkrafttorsion des offenen, formbeständigen Querschnitts kann die wirkliche Spannungsverteilung gut annähern, aber die ausgerechnete Werte überschreiten ein wenig die tatsächliche Spannungen. (S. Abb. 5.)
- c) In beiden Fällen war die Ursache der Erschöpfung der Tragfähigkeit die Rissbildung im Bereich der gezogenen Halsnaht. (Die Schwellfestigkeit hat ein Wert von $\Delta\sigma = 115$ MPa bzw. 107 MPa.) Die ziemlich niedrige Festigkeitswerte fördern Beweise dafür, dass die nicht am besten Qualität hergestellte Schweißnähte in Längsrichtung können nicht höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen, als die Kehlnähte in Querrichtung.
- d) Bei den zwei Träger, wo das Breite-Dicke-Verhältnis des Stegblechs $b/t = 117$ war, und so die Beanspruchungen traten nicht in das postkritische Bereich ein, die Amplitude der Ermüdungslast (zu $N = 2.0 \cdot 10^6$) die Werte von $\Delta F = 36,66$ bzw. 34,24 kN hatte. Die entsprechenden Spannungen sind auch in der Abb. 5 dargestellt worden.
2. Im Fall von Kranbahnträger mit steifenlosem Kastenquerschnitt sind am wichtigste Erfahrungen die folgende.
- a) Die ausgerechneten Spannungen des steifenlosen Kastenquerschnitts aus schiefwinkliger, zweiachsiger Biegemoment weichen nicht wesentlich von den gemessenen Spannungen ab, aber ist es zweckmäßig die Spannungen aus Wölbkrafttorsion in Rechnung zu nehmen. (S. Abb. 6.)

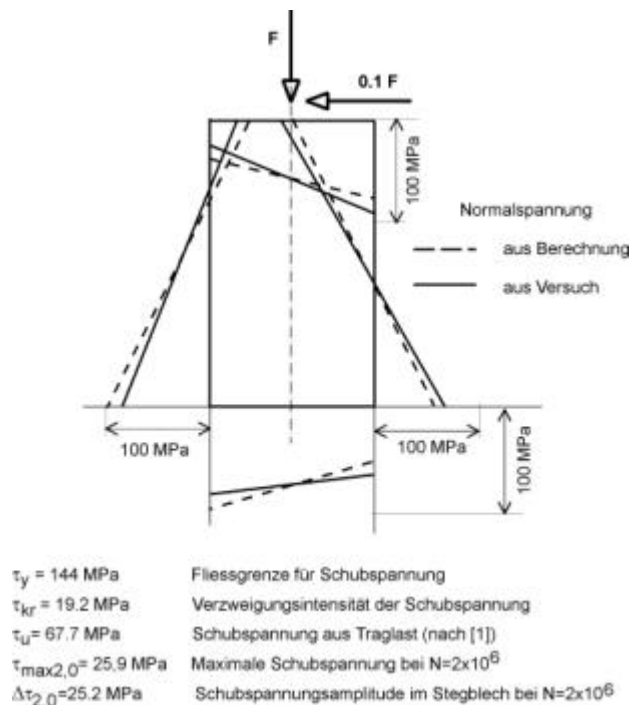


Abb. 6. Die Spannungen am Träger DV-3

- b) Die Ursache der Erschöpfung der Ermüdungstragfähigkeit war eindeutig die Stegblechspannung im postkritischen Bereich. (Das b/t Verhältnis des Stegs war 234.) Die Belastungsamplitude (zu 2 Millionen Bruchwiederholungszahl) betrug einen Wert von $\Delta F = 36,56$ kN. Das bedeutet keine Abminderung gegen den gleichen Wert beim einwandigen Träger mit gleichem Stegquerschnitt, wo die Schubspannung liegt innerhalb des kritischen Bereiches.
- c) Bei der Untersuchung der Ermüdungstragfähigkeit des dünnwandigen Stegblechs spielt die Relation unter der kritischen Schubspannung, der Schubschwellfestigkeit und der postkritischen Schubtragspannung eine wichtige Rolle. Diese Relation hat die Bedeutung, dass die Ermüdungsschubfestigkeit (zu 2 Millionen Bruchwiederholungszahl) überschreitet im wesentlichen Maß die kritische Schubspannung, und die postkritische Reserve kann mindestens zum Teil auch bei Dauerschwingbelastung ausgenutzt werden. (S. die Spannungen in der Abb.6.) Gleichzeitig ist es bemerkenswert, dass dieses Versuchsergebnis mit etwa 14% niedriger ist, als der Wert nach [2] für versteiftes Feld ausgerechnet werde. Andererseits ist es klar, dass die kraftvolle Spannungumlagerung im postkritischen Bereich bei steifenlosem Stegblech die Ermüdungstragfähigkeit abmindert, und diese Tatsache bei der Berechnung solches Stegs abweichend der Berechnung versteiftes Stegblechs im Kauf genommen werden muss.

Die genauere Festlegung der Zusammenwirkung der postkritischen Tragverhalten und der Ermüdungserscheinung bei dem unversteiften Stegblech soll den Gegenstand der zukünftigen Erforschungen sein.

LITERATUR

- [1] Szatmári I: Postkritischer Biegebruch dünnwandiger Vollwandträgern, *Periodica Polytechnica Civ. Eng.*, 1979. No. 3- 4. pp. 265-277
- [2] Maquoi-Škaloud: Fatigue Assessment of Slender Webs Breathing under Repeated Loading, *Proc. of the 2nd Conf. On Steel Structures Eurosteel' 99*, Praha PP 79-82