

**Zeitschrift:** IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

**Band:** 11 (1971)

**Artikel:** Zum Einfluss von verzinkungsabhängigem Vorbeulen auf die Tragfähigkeit von Vollwandträgern

**Autor:** Bürgermeister / Steup, H.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-12063>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.04.2025

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

RAPPORTS INTRODUCTIFS / EINFÜHRUNGSBERICHTE / INTRODUCTORY REPORTS

**Zum Einfluss von verzinkungsabhängigem Vorbeulen auf die Tragfähigkeit von Vollwandträgern**

The Influence of Initial Buckling Due to Galvanization on the Ultimate Strength of Plate Girders

L'influence du voilement initial dû à la galvanisation sur la résistance à la ruine des poutres à âme pleine

BÜRGERMEISTER

Prof. Dr.-Ing. habil.

Dresden, DDR

H. STEUP

Dr.-Ing. habil.

1) Allgemeines

Mit Rücksicht auf eine vereinfachte Herstellungstechnologie werden Vollwandträger teils ohne regelmäßige Anordnung stabilisierender Quersteifen ausgeführt. Solche Lösungen sind besonders gebräuchlich bei Trägern des Leichtbaues mit geringeren Stegblechhöhen. Lediglich im Bereich des Auflagers wird zur Vorbeugung gegen das Krüppeln in stärkerem Maße eine Querversteifung ausgeführt. Derartige Träger ohne nennenswerte Querversteifung sind stabilitätsmäßig eingehender zu betrachten, wobei insbesondere durch Verzinkungsvorgänge mit Wärmeeinwirkung zu relativ größeren Vorbeulungen führen können.

2) Beanspruchung von Vollwandträgern durch thermisch bedingte Nachwirkungen

Vollwandträger mit konventionellem Korrosionsschutz sind bei geschweißter Ausführung mit Schweißeigenspannungen behaftet, die einen reduzierenden Einfluß auf die Tragfähigkeit des Systems besitzen. Im Falle sorgfältiger Ausführung der Schweißnähte bei durchdachtem Schweißfolgeplan bleiben die ungewollten Deformationen aus den aktivierten Schweißeigenspannungen gering. Um die Fertigungstoleranzen hinsichtlich der Schweißvorgänge einzuengen, wird nach dem Standard TGL 13510 (Stahlbauten - Herstellung und Abnahme) das Maß der zulässigen Vorbeulungen, als Amplituden gemessen, auf 4 mm begrenzt.

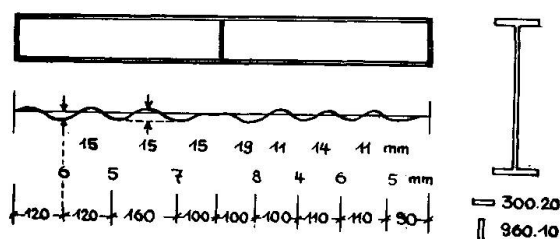
Es ist offensichtlich, daß eine derartig pauschale Festlegung den variablen Einflüssen von Abmessung und Belastung nur in gröberer Weise Rechnung trägt. Hierbei bleibt auch der unterschiedliche Grad von Einspannungsverhältnissen des Stegbleches ohne Einfluß auf die reduzierende Wirkung solcher Vorbeulungen.

Bei dem Korrosionsschutz modernerer Art werden zunehmend auch Vollwandträger größerer Abmessungen tauchverzinkt, wobei nunmehr durch den Verzinkungsvorgang bedingte Vorbeulen größerer Amplituden in Erscheinung treten. Während bei Systemen kleinerer Steg-

höhe (etwa  $h_{St} < 50$  cm) die auftretenden Vorbeulungen den vorgeschriebenen Grenzwert bei der Mehrzahl von Trägern nicht erreichen, werden bei größeren Steghöhen oftmals zu große Werte dann beobachtet, wenn das System nicht periodisch querversteift ist.

### 3) Vorbeulenverteilung bei einem tauchverzinkten Vollwandträger

Bei tauchverzinkten Walzträgern wenigstens mittlerer Steghöhen treten Deformationen durch thermische Effekte (Walzeigen-  
spannungen - Eigenstressungen aus Tauchverzinkung) kaum wahrnehmbar in Erscheinung. Im Gegensatz hierzu werden bei zusammengesetzten Trägern mit nicht zu starken Stegblechen (Plattenschlankheit etwa oberhalb 80) Vorbeulungen deutlich wahrgenommen. Bild 1 zeigt eine Vorbeulenverteilung für einen längeren Vollwandträger ohne innere Querversteifungen periodischer Art mit den Stegabmessungen 1000 x 10 mm und den Flanschen 300 x 20 mm.



Der annähernd periodische Aufbau der Vorbeulungen hinsichtlich des Beulenrasters läßt vermuten, daß eine Eigendruckspannung etwa entsprechend einer mittleren gleichförmigen Achsialbeanspruchung in den einzelnen Abschnitten zur Deformation geführt hat. Auch die verwandten Vorbeulformen einer Reihe in den Abmessungen gleichartiger Vollwandträger sowie verkleinerter Modellträger zeigen deutlich eine gleich-

Bild 1

artige Entwicklung.

### 4) Die Wechselbeziehungen Eigenspannungen - Vorbeulungen

Unter Wirkung von Eigendruckspannungen beanspruchte Bereiche eines Systems versuchen sich dem Zwang zur Kompression durch Ausbeulen zu entziehen, wobei der Wechsel vom labilen zum stabilen überkritischen Zustand durch die Steifigkeit des Systems unter Beachtung der Randbedingungen erfolgt. In der Differentialgleichung des Problems sind die Terme mit Eigenspannungsanteilen denen der aus der äußeren Belastung herrührenden Membranspannungen gleichwertig.

Liegen bei gedrunghenen Blechen die Beulspannungen in der Nähe der Proportionalitäts- bzw. Fließgrenze, so werden Vorbeulungen bei kleinen Eigenspannungswerten im Verhältnis zur Fließgrenze kaum sichtbar sein. Bilden sich unter dem Zwang der Eigenspannungen Beulfiguren des überkritischen Bereiches aus, so führt dies zu einer Reduktion der örtlichen Membranspannungen infolge der Verkürzung der zu den Beulwellen gehörigen Projektionslängen. Ein gleichzeitiges Auftreten von Eigenspannungen und Beulungen ist also nur beschränkt möglich, das Stegblech entspannt sich selbst.

Das infolge ursprünglicher Eigenspannungseffekte vorgebeulte System stellt aber einen neuen Ausgangszustand für weitere Belastungsaufnahme dar und bestimmt das weitere Tragverhalten in Abhängigkeit der Zuordnung von Vorbeulungen und überkritisch wirkenden Idealbeulen, d.h. bei Vernachlässigung von Vorbeuleffekten.

Sind bei Stegblechen gedrunghener Abmessungen nicht aktivierte

Eigenstressen ohne sichtbare Vorbeulungen wirksam, so nimmt die Eigenstressverteilung Einfluß auf das Beulverhalten bei Eintragung äußerer Lasten. Die Berücksichtigung einer üblichen Eigenstressverteilung mit ausgeprägten Zugstressen im Bereich der Schweißnaht zwischen Steg und Gurt intensiviert die Druckstressen im mittleren Stegblechbereich und wirkt sich daher stabilitätserniedrigend besonders bei Eintragung gleichförmig verteilter Druckkräfte aus. Der Effekt tritt merklich zurück, wenn anstelle gleichförmiger Druckkräfte über den Querschnitt linear veränderliche Kräfte infolge Biegung auftreten.

##### 5) Zwängungen infolge der Wärmebehandlung durch Tauchverzinken

Nach Eintauchen der Trägerelemente in das Verzinkungsbad und Erwärmung auf etwa 450° C wird zunächst eine geringe Kompensation der durch den Schweißvorgang bedingten Eigenstressen erzielt. (Eine vollständige Spannungs- und Gefügenormalisierung erfolgt bekanntlich erst bei etwa 920° C, ein Spannungsausgleich kann jedoch schon bei etwa 600° C erreicht werden)

Sofern die Abkühlung der Träger bei längerer Zeitdauer gleichmäßig erfolgt, könnte dieser eigenstressmäßig verbesserte Zustand beibehalten werden. Da die meist verwendeten Technologien zumindest bei Systemen größerer Abmessungen eine derart verlangsamte Abkühlung der wärmekapazitiveren Flansche und der leichter wärmeabgebenden Stegbleche nicht zulassen, kommt es zu Verspannungen. Das rascher abkühlende Stegblech bewirkt plastische Stauungen der Flansche, welche schließlich bei Abkühlung des Gesamtsystems eine zusammendrückende Wirkung auf den Steg ausüben. Diese Phasen sind in Bild 2 schematisch veranschaulicht.

Die über Randschubkräfte vor allem der Randzonen an den Trägerenden bewirkte Zusammendrückung des Steges bewirkt eine Faltung, die etwa der eines in der Achsenrichtung gedrückten Stegbleches entspricht.

Für den letztgenannten Fall ist die Rasterteilung der Beulfelder bei Annahme gelenkig gelagerter Ränder  $a/b = 1$  und bei Annahme voller Einspannungen  $0,67$ . Gegenüber dem Beulfall mit  $k = 4$  sind wegen der notwendigen stetigen Eigenstressverteilung über den Querschnitt die Kontaktzonen des Stegbleches am Flansch noch zugbeansprucht. Im übrigen wird das resultierende Eigenstressbild auch aus den schweißbedingten Zwängungen mit ausgeprägten Zugstressen im Nahtbereich bestimmt. Eine Veränderlichkeit der Eigenstressen in der Trägerlängs-

achse kann bei jeweils konstanten Abkühlungszeitintervallen der Stegzone und Flanschzonen bis auf den Randstörungsbereich an den Trägerenden nicht in Erscheinung treten, da auf Grund der Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbeziehungen ein Spannungsausgleich der resultierenden Zug- und Druckkräfte nur an den Rändern des Trägers, etwa im Sinne von Endscheiben erfolgt. Dies hat nun zur Folge, daß bei nichtausgebeultem Zustand im inneren Bereich zwi-

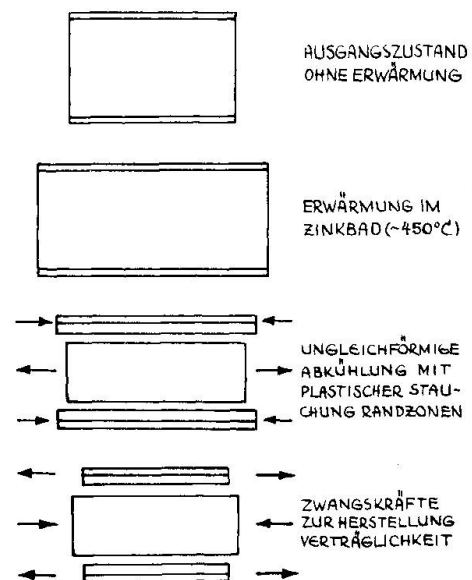


Bild 2

schen Steg- und Flanschzonen keine Schubkräfte übertragen werden. Eine theoretisch zufriedenstellende Behandlung des Problems der Eigenspannungsverteilung liegt u.W.noch nicht vor.

Die Verteilung der aus Zwängungen herrührenden Kräfte im einfachsten Fall zweier elastisch dehnbarer aber biegestarrer schubfest verbundener Stäbe zeigt Bild 3.

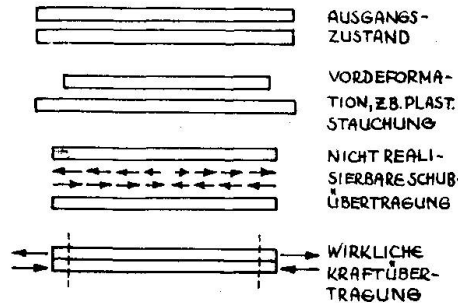


Bild 3

### 6) Bewertung der Vorbeulungen

Der Vorbeulungseinfluß infolge der Verzinkungseffekte auf das Beulverhalten wird ungünstig sein, wenn eine dominierende Axialbeanspruchung wie etwa bei Rahmenstielen vorliegt. Die Affinität zwischen Vorbeul- und Beulfigur des nicht vordeformierten Grundsystems mit relativ starker Übereinstimmung bewirkt eine Er-

höhung der Druckspannungsintensität in den Randzonen des Stegbleches. Bei Voraussetzung scharniergelagerter Ränder entsprechend NAVIERSchen Randbedingungen sind diese Verhältnisse hinreichend erforscht und können z.B. durch die mittragenden Breiten formuliert werden.

Im Falle  $v_{o,max} / t = 1$  ergibt sich bspw. für die zu einer mittleren Nennspannung führenden Überschreitung  $\xi = 1,5$  der fiktiven beulkritischen Spannung  $\sigma_k$  bei Annahme normalspannungsfreier Längsränder das Verhältnis der mittragenden Breite zur Stegblechbreite  $b_m / b = 0,53$ . Dies bedingt eine Erhöhung der Randspannung um 89 %. Nun sind aber die Gurtungen selbst an der Kraftübertragung beteiligt und bedingen infolge ihrer Kapazität hinsichtlich der Kraftaufnahme eine Zunahme der mittragenden Breite in Abhängigkeit des Gurtaufwandes  $f_g = F_g / bt$ . Der reziproke Wert des Verhältnisses  $b_m / b$  kann als Multiplikator der Randnennspannungen betrachtet werden, welcher die erhöhte Randspannung im Gurt  $\sigma_r$  erzeugt, wobei gilt

$$\frac{b_m}{b} = \frac{\xi \cdot \sigma_k}{\sigma_r} \quad c = \frac{\sigma_r}{\xi \cdot \sigma_k}$$

Für das ebene Blech kann die erhöhte mittragende Breite bzw. der reduzierte Spannungsmultiplikator  $c$  in Abhängigkeit des Gurtaufwandes  $f_g$  der Art angesetzt werden

$$c_{red} = 1 + (c - 1) \cdot \beta_g$$

Dabei genügt der Gurteinflußparameter  $\beta_g$  einer Approximation entsprechend

$$\beta_g = 1 / (1 + 2,5 f_g + 1,27 f_g^2)$$

Bei spezieller Berücksichtigung des Vorbeuleneinflusses, zunächst unter Außerachtlassung einer Gurtflächenreduktion wird in verwandter Form

$$c'_{red} = 1 + (c - 1) \cdot \beta_v$$

Eine Annäherung für die Umlagerung der Randspannungen ist mit der Beziehung gegeben

$$c_{\text{red}} = 1 + (c - 1) \cdot \beta_g \cdot \beta_v$$

Mit dem Gurtaufwand  $f_g = 0,6$  und damit bei Reduktion  $\beta_g = 0,34$  wird im vorliegenden Falle des vorgebeulten Trägers erhalten

$$\bar{\sigma}_r = 1,5 \cdot 0,76 \cdot (1 + 0,89 \cdot 0,34) = 1,48 \text{ Mp/cm}^2.$$

Die überhöhten Randdruckspannungen werden zu einem Teil durch die wirksamen Eigenspannungen reduziert, jedoch ist zu beachten, daß mit der Entspannung der thermisch bedingten Zwängungen auch die Reaktionszugkräfte in den Randzonen nachlassen. Man wird also vorteilhafterweise auf eine günstige Entlastung der Randbereiche verzichten.

Ist die äußere Belastung vom Fall des mittleren Druckes abweichend, so ist der spannungserhöhende Effekt der zur Achse symmetrischen Vorbeulungen auf Grund beschränkter Affinität zur fiktiven Beulfigur des vorbeulungsfreien Zustandes geringer. Bei Orthogonalität der Vorbeulungen kann das System sogar stabilisiert werden. Da die festigkeitsmäßige Beanspruchung solcher Systeme angesichts der relativ höheren Stabilitätsgrenze weitergehend ist, wird man die verzinkungsbedingten Vorbeulungen unter der Bedingung in Kauf nehmen, daß eine zusätzliche Stabilitätsreserve im Spannungsnachweis der Theorie I. bzw. II. Ordnung gegeben ist und darüber hinaus ein vorzeitiges Versagen des für das Stegverhalten fundamentalen Gurttes durch Kippung ausgeschlossen bleibt.

Einer Lockerung der Toleranzbeschränkungen von Vorbeulungen sollte bei steifenlosen Trägern mit Rücksicht auf die angestrebte Vollausslastung und die noch nicht genauer zu erfassende Gefahr von periodischen Deformationswechseln bezüglich der Materialfestigkeit bis zum Abschluß weiterer Untersuchungen nicht zugestimmt werden.

## ZUSAMMENFASSUNG

Verzinkte Träger ohne Quersteifen weisen oftmals periodische Vorbeulungen auf, die nach den bislang üblichen Toleranzbeschränkungen unzulässig sind. Es wird eine Bewertung derartiger Imperfektionen vorgenommen, wobei ungeachtet der überkritischen Tragreserven einer Lockerung derartiger Vorschriften nur dann zugestimmt wird, wenn die versteifende Gurtung einen erhöhten Sicherheitsspielraum gegen festigkeits- und stabilitätsmäßiges Versagen aufweist.

## RESUME

Les poutres sans raidisseurs transversaux présentent souvent, après galvanisation, des déformations périodiques qui dépassent les tolérances usuelles. Les auteurs évaluent l'influence de ce cloquage initial; malgré les réserves de résistance post-critiques, un dépassement des tolérances ne peut être accepté que lorsque les membrures présentent une marge de sécurité élevée par rapport à la résistance et à la stabilité.

## SUMMARY

Galvanized girders without web stiffeners show often periodical buckles that overstep the usual tolerance limits. Such insufficiencies are examined in the present paper. In spite of the post-critical load reserves an overstepping of these limits will only be accepted if the stiffening flanges show a higher margin of security against resistance and stability dependant break-down.