

Wie wirkungsvoll sind Flanschstreben bei der Stabilisierung von Riegeln? H. Pasternak, D. Hannebauer

Zusammenfassung

Im Stahlhallenbau stellt sich sehr oft die Frage nach der Stabilisierung weitgespannter Tragkonstruktionen. Entscheidend für die Wahl der möglichen Aussteifungskonstruktion sind wirtschaftliche Aspekte. Die Anordnung von Flanschstreben entlang des Rahmenriegels besitzt hierbei einen hohen Wirkungsgrad.

Abstract

How efficient is the lateral support of rafters by stays?

In single-storey steel buildings the problem how to stabilize long-span carrying structures occurs very often. Economic aspects are decisive for the choice of the possible bracing system. The arrangement of stays along the girder has a high degree of effectiveness.

1 Einleitung

Konstruktiv können Träger, die biegedrillknickgefährdet sind, durch Aussteifungen z.B. in Form von Vertikal-, Horizontalverbänden oder Flanschstreben ausgesteift werden. Die seitlichen Halterungen sind an den Stellen am wirkungsvollsten, an denen die Biegedrillknickfigur maximale Verschiebungen aufweist. Vergleicht man Riegel mit Stützensaussteifungen, so stellt man fest, dass das Aussteifen von Riegeln weitaus komplizierter ist als das Aussteifen von Stützen. Riegel sind aufgrund ihrer Spannweiten größeren Biege- und Torsionsbeanspruchungen ausgesetzt. Auf die Aussteifung von Stützen wird im folgenden nicht näher eingegangen.

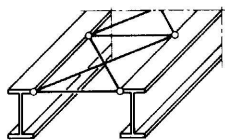
Eine effektive Riegelaussteifung wirkt der Querschnittsverdrehung entgegen. Im allgemeinen wird die Aussteifung in zwei Kategorien eingeteilt: **Torsionsaussteifungen und seitliche Halterungen.**

Die Torsionsaussteifung wirkt gegenüber der seitlichen Halterung der Querschnittsverdrehung direkt entgegen. Beispiele dafür sind Aussteifungen von Längsträgern durch Querträger oder die Ausführung von Vertikalverbänden zwischen zwei benachbarten Riegeln.

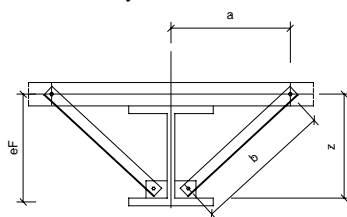
Seitliche Halterungen, welche in Modellen anhand von Translationsfedern ausgedrückt werden können, behindern die Verschiebung eines Bauteils. Die Effektivität der seitlichen Halterungen kann an der Behinderungsstärke der Querschnittsverdrehung gemessen werden.

Aussteifungen durch seitliche Halterungen werden in drei Systeme unterschieden (Bild 1): **horizontale Aussteifungsverbände, diskrete Halterungen und kontinuierliche Aussteifungen [1].**

a – Horizontaler Verband
a – Horizontal bracing system



b – Diskrete Halterungen
b – Stays



c – Kontinuierliche Aussteifungen
c – Continuous bracing system

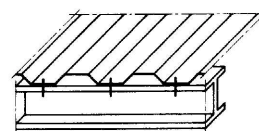


Bild 1 – Halterungen
Figure 1 - Bracings

Die vorliegende Veröffentlichung befasst sich mit der Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Riegel durch diskrete Halterungen. Überlegungen werden an einer 45 m langen Halle mit einer Rahmenspannweite von 25 m und einem Rahmenabstand von 6m, dessen Riegel durch Flanschstreben gegen Biegedrillknicken gehalten werden, durchgeführt (Bild 2).

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak
BTU, Lehrstuhl für Stahlbau,
PF 101344
03013 Cottbus
Dipl.-Ing. Dina Hannebauer, BTU, Lehrstuhl für Stahlbau



Bild 2 - Stabilisierung der Riegel durch Flanschstreben am Beispiel eines Hallenvordaches
Figure 2 – Example for Stays at a steel hall canopy

2 Flanschstreben

Durch die Anordnung von Flanschstreben erfolgt eine Stabilisierung des Rahmens gegen das Biegedrillknicken. Speziell soll untersucht werden, mit welcher Verteilung der Flanschstreben eine optimale Stabilisierung des Rahmenriegels erfolgen kann.

In Bild 3 ist eine Rahmenriegelhälfte mit der entsprechenden Pfetten- sowie Flanschstrebennummerierung dargestellt. Die Pfetten bzw. Flanschstreben sind von der Traufe bis zum First von 1 bis 10 durchnummeriert.

Folgende Flanschstrebenverteilungen (V) werden dabei untersucht:

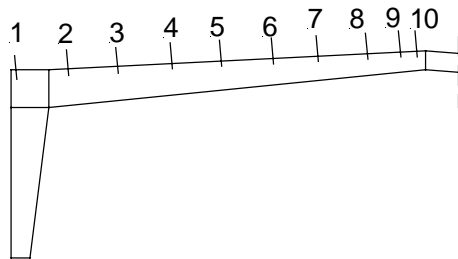


Bild 3 – Pfettennummerierung
Figure 3 – Numbering of purlins

- V1: Zum Vergleich der Ergebnisse wird die Traglast des Ausgangsrahmens ohne Ausbildung von Flanschstreben ermittelt.
- V2: Die Flanschstrebenanordnung erfolgt an jeder zweiten Pfette, also an den Pfetten 2, 4, 6, 8 und 10. Hierbei sind die Pfettennummern aufsteigend von der Traufe zum First hin von eins bis zehn nummeriert.
- V3: Die Flanschstreben sind an den Pfetten 2, 3, 5, 7 und 10 ausgebildet.
- V4: Die Flanschstreben sind an den Pfetten 2, 3, 4, 6, 8 und 10 ausgebildet.
- V5: An jedem Pfettenauflagerpunkt 1 bis 10 befindet sich eine Flanschstrebe.

Die Ermittlung der Traglast mittels einer nichtlinearen Finite-Elemente-Berechnung bildet dabei die Grundlage zur weitestgehend genauen Erfassung der vorhandenen Konstruktion. Die Berechnungen erfolgen mit dem Programmpaket ABAQUS/STANDARD 6.1. Die Modellierung der Tragkonstruktion sowie die grafische Auswertung aller Ergebnisse erfolgte mit dem Programm MSC PATRAN der Fa. MSC Software.

Angaben zur Modellierung der Geometrie, FEM, Rand- und Lagerungsbedingungen sind /2/ zu entnehmen. Im folgenden wird die Modellierung der Flanschstrebe sowie die Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeiten der Flanschstreben näher betrachtet. Ziel ist die Aussteifung gegen globales Versagen. Bild 4 zeigt die auf der Grundlage des kleinsten positiven Eigenwertes gewonnene Einheitsverformungsfigur.

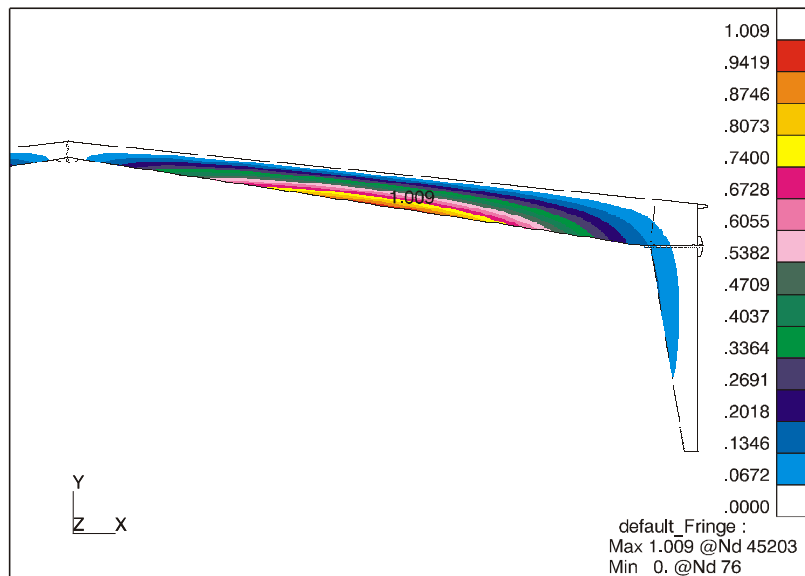


Bild 4 – Einheitsverformungsfigur des Systems V1
Figure 4 – Buckling shape of System V1

3 Ersatzfedersteifigkeit

Es besteht die Möglichkeit, die Steifigkeiten eines Stabes z. B. Dehnsteifigkeit EA und Biegesteifigkeit EI durch Federn zu ersetzen, welchen bestimmte Eigenschaften des Baustahls zugewiesen werden.

Die Modellierung der Aussteifung des Riegeluntergurttes durch Flanschstreben ist in der FEM auf zwei Wegen möglich.

Einerseits kann die Eingabe der Flanschstrebe direkt erfolgen, d. h. die Flanschstreben, welchen die jeweiligen Werkstoffeigenschaften zu zuordnen sind, werden als Stäbe mit Anschlusspunkten am Riegeluntergurt und Pfette modelliert. Infolge der notwendigen Modellierung sämtlicher Pfetten und Rahmen ist hier die geometrische Eingabe mit einem erhöhten Aufwand verbunden.

Andererseits kann man die Flanschstrebe durch eine Ersatzfedersteifigkeit ausdrücken, welche den Riegeluntergurt im Druckbereich stabilisiert.

Für die folgenden Betrachtungen ist das Verhalten des Riegeluntergurttes maßgebend. Aus diesem Grund werden sämtliche Belastungen, die eine Verschiebung des Riegeluntergurttes bewirken, über eine Ersatzlast ausgedrückt. Diese Ersatzlast greift in horizontaler Richtung an der Oberkante des Riegeluntergurttes an.

Im folgenden werden verschiedene Varianten der Riegeluntergurtverschiebung am vereinfachten System (siehe Bild 5) untersucht. Diese Betrachtungen sollen darüber Aufschluss geben, welche Ersatzkraftangriffsorte die ungünstigsten für die Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeiten darstellen.

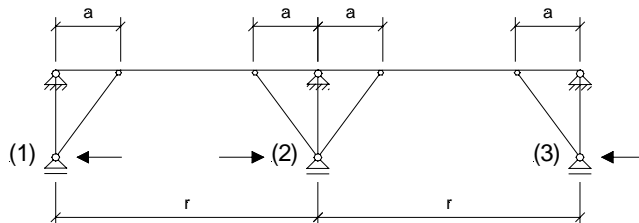


Bild 5 – Vereinfachtes System
Figure 5 – Simplified System

Es wurde das Ausweichen aller Riegeluntergurtte am vereinfachten System untersucht, wobei drei Varianten möglicher Ersatzkrafteinwirkungen betrachtet wurden.

In Bild 6 sind die möglichen Pfettenverformungen und die daraus resultierenden Riegelverschiebungen zu erkennen. Die größten Verformungen sind bei der Verschiebung 1 des Riegeluntergurttes zu verzeichnen. Hier ändern die Ersatzkräfte ihren Richtungssinn an jedem Riegeluntergurt.

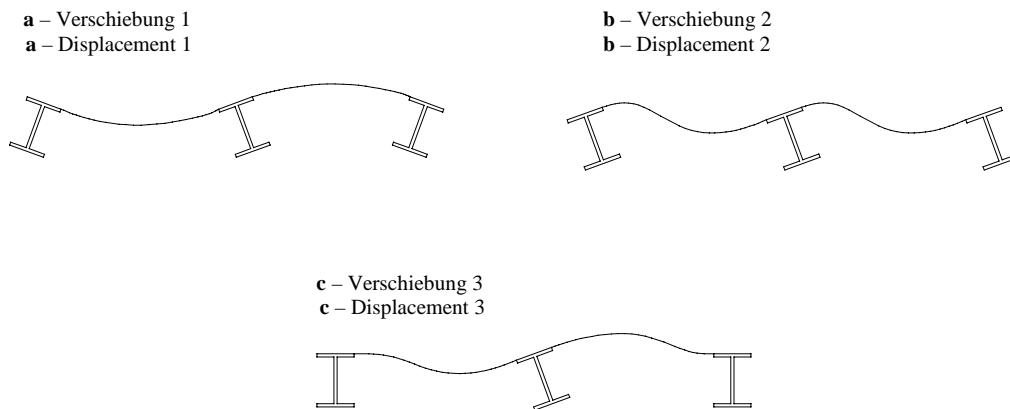


Bild 6 – Verformungsbild infolge der Riegeluntergurtverschiebung
Figure 6 – Shape of deflection due to displacement of lower flange of the rafter

Somit erfolgt die Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeiten mit dem Ansatz des Ersatzkraftbildes der Verschiebung 1. Die Größe der Pfettenverformung wirkt sich auf die Riegelverschiebung aus. Mit steigender Riegeluntergurtverschiebung verringert sich die ansetzbare Ersatzfedersteifigkeit. Das Verhalten des Hallenrahmens bei globalem Stabilitätsversagen kann nicht im Voraus bestimmt werden. Demzufolge wird der ungünstigste Versagensfall, zur Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeiten angesetzt. Die Ermittlung der Federsteifigkeiten erfolgt nach dem Prinzip der virtuellen Kräfte. Die angenommene Ersatzkraft des vereinfachten Systems/Variante 1 beträgt

$$F_{B2} = 1kN \quad F_{B1,3} = 0,5kN$$

Die virtuellen Kräfte F_v werden in Richtung der angenommenen Verschiebung des Riegeluntergurtes angesetzt und nehmen dieselben Werte an wie die angenommene Ersatzkraft F_B .

Es entstehen die identischen Momentenflächenbilder M_B (das Moment infolge der äußeren Belastung F_B) bzw. M_v (das Moment aus der virtuellen Belastung F_v)

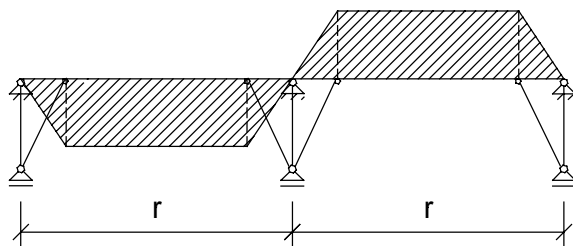


Bild 7 – Momentenflächenbild M_B bzw. M_v
Figure 7-Bending moment M_B and M_v

Anhand der folgenden Gleichungen werden die Verschiebungen durch Integration über die Momenten- und Normkraftflächen ermittelt.

$$f_M = \int \frac{M_B * M_v}{E * I_{pf}} \quad f_N = \int \frac{N_B * N_v}{E * A_F}$$

Die Gesamtverschiebung des Riegeluntergurtes setzt sich aus einem Verschiebungsanteil f_N infolge der Dehnsteifigkeit der Flanschstrebe (EA_F) mit der dazugehörigen Federsteifigkeit k_N und einem Verschiebungsanteil f_M infolge der Pfettenbiegesteifigkeit (EI_{pf}) mit der dazugehörigen Federsteifigkeit k_M zusammen.

$$f_M = \frac{\left(-\frac{4}{3} * a + r\right) * \frac{eF^2}{2}}{E * I_{pf}} \quad f_N = \frac{2 * b * \left(\frac{b}{z} * \frac{eF}{2 * a}\right)^2}{E * A_F}$$

Die Gesamtfedersteifigkeit k_G beträgt demzufolge:

$$k_G = \frac{1}{f_M + f_N}$$

4 Einflussparameter der Ersatzfedersteifigkeit

Betrachtet wird ein leichter Hallenrahmen mit veränderlichem Querschnitt und kaltgeformten Pfetten und Flanschstreben. Die Flanschstreben bestehen aus gleichschenkligen Winkelprofilen der Größe L 50x3,2. Aus **Tabelle 1** ist zu erkennen, dass die Federsteifigkeit infolge der Dehnsteifigkeit der Flanschstrebe einen viel größeren Wert aufweist als infolge der Biegesteifigkeit der Pfette. Somit unterliegt die Pfette bei entsprechender Belastung sehr großen Verformungen. Diese Verformungen werden an die Flanschstrebe weitergegeben. Die Ersatzfedersteifigkeit des Systems wird demzufolge von der Biegesteifigkeit der Pfette bestimmt. Sollen größere Ersatzfedersteifigkeiten erzielt werden, so ist es angebracht, die Biegesteifigkeit der Pfette zu erhöhen. In **Bild 8** ist die Federsteifigkeit der Flanschstreben in Abhängigkeit des Trägheitsmomentes der Pfetten dargestellt.

Pfetten-Nr.	Federsteifigkeit [N/mm]	Federsteifigkeit [N/mm]	Ersatzfedersteifigkeit [N/mm]
	Anteil Biegesteifigkeit	Anteil Dehnsteifigkeit	1/(f _M +f _N)
2	513	46826	507
3	597	53290	591
4	705	60631	697
5	845	34435	835
6	1034	38909	1020
7	1290	43757	1271
8	1654	48743	1626
9	2069	52613	2029
10	2266	53980	2219

Tabelle 1 - Ersatzfedersteifigkeiten der beidseitigen Flanschstreben (Innenfeld)
Table 1 – Equivalent spring stiffnesses of doubleside Stays

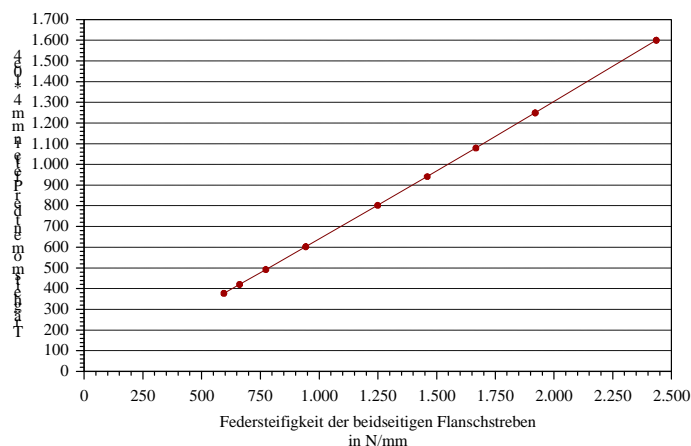


Bild 8 - Federsteifigkeit in Abhängigkeit des Trägheitsmomentes der Pfette
Figure 8 – spring stiffness depending on the moment of inertia of purlins

Das völlig unausgesteifte Ausgangssystem V1 zeigt, dass der Rahmen vor Erreichen der eigentlich vorhandenen Belastung versagt, der Traglastfaktor beträgt 0,48. Das maßgebende Stabilitätsversagen ist das Biegedrillknicken. Die erste Eigenform des Systems ist das Ausbilden einer Sinushalbwellen, welche sich von der Rahmenecke bis hin zum First erstreckt. Um das globale Stabilitätsversagen zu verhindern bzw. das Ausweichen des Riegels senkrecht zur Rahmenebene zu behindern, werden Flanschstreben angeordnet. Das Biegedrillknicken kann somit in Abhängigkeit der Größe der Ersatzfedersteifigkeiten der Flanschstreben und der jeweiligen Verteilung der Flanschstreben entlang des Riegels verhindert werden. Die Größe der Ersatzfedersteifigkeit der Flanschstreben steht in Abhängigkeit zur Biegesteifigkeit der Pfette. Mit steigender Biegesteifigkeit erhöht sich die Steifigkeit der Flanschstrebenersatzfeder proportional (Bild 8). Die Erhöhung der Traglast durch eine Erhöhung der Pfettenbiegesteifigkeit wird hier nicht näher betrachtet.

Betrachtet man die Ergebnisse der Flanschstrebenanordnung V2 ist eine deutliche Traglaststeigerung (Traglastfaktor 1,07) zu verzeichnen. Demgegenüber ist eine gezielte Ausbildung bzw. Verteilung der Flanschstreben wirkungsvoller. Bei den Verteilungen 3 und 4 wurde eine weitere Erhöhung des Traglastfaktors auf 1,14 erzielt. Bei einer Flanschstrebenanordnung an jeder Pfette wird dagegen im Vergleich zu den Verteilungen 3 und 4 keine wesentliche Laststeigerung erzielt. Der Traglastfaktor beträgt hier 1,15.

5 Schluß

Abgesehen vom unausgesteiften System, welches infolge Biegedrillknicken versagt, weisen alle anderen betrachteten Systeme mit der Ausbildung beidseitiger Flanschstreben lokale Versagensbereiche in den Rahmeneckbereichen auf. Es kommt zum lokalen Beulen im Stegbereich des Riegels und Plastizieren des Riegeluntergurtes im Rahmeneckbereich.

Die optimale Verteilung der Flanschstreben in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit stellen die Flanschstrebenanordnungen 3 und 4 dar. Wird jedoch das lokale Beulen in den Rahmeneckbereichen durch zusätzliche Aussteifungen verhindert, kann eine weitere Traglaststeigerung des Rahmens erzielt werden.

Die Erhöhung der Steifigkeit eines System ist demzufolge nicht mit einer möglichen Erhöhung der Traglast gleichzusetzen. Vielmehr kommt es darauf an, die Verschiebung des Riegeluntergurtes an den richtigen Stellen entlang des Riegels zu behindern.

Literatur

- /1/ Stahl im Hochbau, 14. Auflage Band1/Teil2; Düsseldorf, 1986
- /2/ Pasternak, H. u. Müller, L.: Zur FE-Modellierung leichter Hallenrahmen, Stahlbau 70 (2001), S. 53-58