

**Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter  
Träger durch die Schubsteifigkeit  
zweiseitig gelagerter Trapezbleche**

**T 3114**

**T 3114**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2006, ISBN 3-8167-7106-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

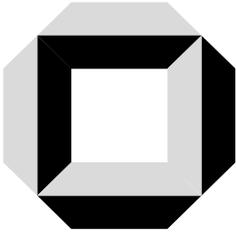
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

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.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)



**Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine**  
(Amtliche Materialprüfungsanstalt)  
Universität Karlsruhe (TH)

Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. J. Blaß und Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Saal

---

**BERICHT**

**Nr.: 051501**

**Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger durch die  
Schubsteifigkeit zweiseitig gelagerter Trapezbleche**

Auftraggeber:

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30L  
10829 Berlin

Grundlage der Prüfung:

Werkvertrag zwischen dem Auftraggeber und der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine vom 31.01.2005

Dieser Bericht umfasst 26 Seiten und 3 Anlagen (5 Seiten).

Karlsruhe, am 31. März 2006

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Markus Dürr

## **Kurzfassung**

Da in den technischen Regeln kein Ansatz zur Berücksichtigung der Schubsteifigkeit eines zweiseitig gelagerten Schubfeldes zur Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger zu finden ist, wurden im Rahmen dieser Untersuchung sowohl experimentelle Untersuchungen als auch numerische Berechnungen mit Hilfe eines Finite-Element-Programmes durchgeführt. Hierbei wurden die Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel am Querrand eines Schubfeldes durch ein vorab bestimmtes nichtlineares Last-Verformungs-Verhalten berücksichtigt. Es wird gezeigt, dass im Gegensatz zur vierseitigen Befestigung unter zweiseitiger Lagerung kein umlaufend konstanter Schubfluss im Randbereich des Schubfeldes vorliegt. Der Einfluss dieser Randstörung ist abhängig von der Breite des Schubfeldes. Die im Rahmen einer parametrischen Untersuchung ermittelten Schubsteifigkeiten werden als Verhältniswerte von zweiseitiger und vierseitiger Lagerung in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses dargestellt. Daraus lässt sich ein einfaches Rechenmodell ableiten, mit dem es möglich ist, die Schubsteifigkeit von zweiseitig gelagerten Schubfeldern aus Trapezblechen in Abhängigkeit der bekannten Schubsteifigkeit unter vierseitiger Lagerung herzuleiten.

## **Abstract**

According to available design codes it is not possible to use the shear stiffness of trapezoidal sheeting which is fastened along two edges only for stabilisation of slender beams against lateral torsional buckling. Therefore the effect of unsupported edges parallel to the span is investigated experimentally and numerically by means of a Finite-Element program. This analysis included the nonlinear flexibility of the fasteners at the edges normal to the span. The investigation shows the non-uniform distribution of the shear forces for diaphragms with only two edges fastened which deviates from the uniform distribution for diaphragms fastened along four edges. The non-uniform distribution is influenced by the width of the diaphragm. The shear stiffness determined by a parametric investigation is given as ratio of two-sided and four-sided support subject to the  $a/b$ -ratio of the diaphragm. From this a simple formula is derived, which gives the shear stiffness for a diaphragm of trapezoidal sheeting supported along two edges in dependence on the known shear stiffness of all-side fastened diaphragms.

## **Résumé**

Les règles techniques ne contiennent aucune méthode qui permet de tenir compte de la résistance au cisaillement d'un panneau appuyé sur 2 côtés pour la stabilisation de poutres contre le déversement. C'est pourquoi dans le cadre de la présente étude des investigations expérimentales ainsi que des calculs analytiques à l'aide d'un programme d'analyse par éléments finis ont été réalisées. La souplesse des éléments d'assemblage sur le côté transversal des panneaux y a été

prise en compte avec un comportement charge/déformation non linéaire. Les résultats montrent que contrairement aux panneaux appuyés sur 4 côtés, les panneaux appuyés sur 2 côtés n'ont pas un flux de cisaillement constant sur leur périmètre. L'influence de cette perturbation aux bords dépend de la largeur du panneau. Les résistances aux cisaillement déterminées par une étude paramétrique sont exprimées en fonction du rapport longueur/largeur sous la forme de quotients appui sur 2 côtés / appuis sur 4 côtés. Cela a permis de formuler une méthode de calcul simple avec laquelle il est possible de déterminer la résistance de panneaux de tôle profilée appuyés sur 2 côtés à partir de la résistance au cisaillement connue d'un panneau appuyé sur 4 côtés.

## **Inhaltsverzeichnis**

Kurzfassung.....	2
Abstract.....	2
Résumé .....	2
1 Vorbemerkung	5
2 Experimentelle Schubfelduntersuchungen	6
2.1 Versuchsaufbau	6
2.2 Versuchsgegenstand	7
2.3 Versuchsdurchführung	8
3 Versuchsauswertung	9
4 Finite-Element-Berechnungen	10
4.1 Beschreibung des Finite-Element-Modells	10
4.2 Verifikation des Finite-Element-Modells	11
4.3 Vergleich des Finite-Element-Modells mit den experimentellen Untersuchungen	12
4.3.1 Allgemeines	12
4.3.2 Vierseitige Lagerung	14
4.3.3 Zweiseitige Lagerung	15
4.4 Parametrische Untersuchungen mit dem verifizierten Finite-Element-Modell	16
4.4.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Profiltypen	16
4.4.2 Einfluss der Schubfeldbreite bei vierseitiger Lagerung und nachgiebigen Verbindungsmitteln	17
4.4.3 Einfluss der Schubfeldbreite bei zweiseitiger Lagerung und nachgiebigen Verbindungsmitteln	19
5 Auswertung der Finite-Element-Berechnungen und Entwurf eines Rechenmodells	23
5.1 Darstellung der Verhältniswerte der Schubsteifigkeit unter zwei- und vierseitiger Lagerung	23
5.2 Entwurf eines Rechenmodells	24
6 Zusammenfassung	25
7 Schrifttum	26

Anlage 1: Grundriss des Schubrahmens

Anlage 2: Abbildungen zur Versuchsdurchführung

Anlage 3.1: Last-Verformungs-Diagramm Versuch 1 (vierseitige Lagerung)

Anlage 3.2: Last-Verformungs-Diagramm Versuch 2 (zweiseitige Lagerung)

## 1 Vorbemerkung

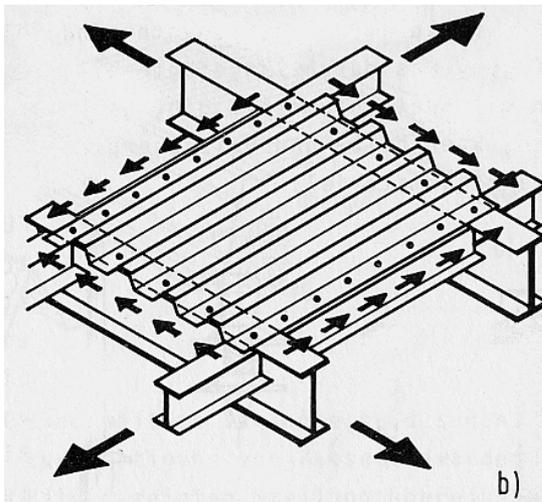
Bei Biegeträgern mit offenen Querschnitten kann das Biegedrillknicken zu einer beträchtlichen Minderung der Grenztragfähigkeit führen. Angrenzende Trapezprofile, die den stabilitätsgefährdeten Druckgurt stützen, steigern die Grenztragfähigkeit, wobei im Grenzfall das Biegedrillknicken ausgeschlossen wird.

Nach [1] darf die Anschlussstelle des Trägers durch die Schubbettung des Trapezbleches als unverschieblich gehalten angesehen werden, wenn für die Schubsteifigkeit  $S$  des Trapezbleches

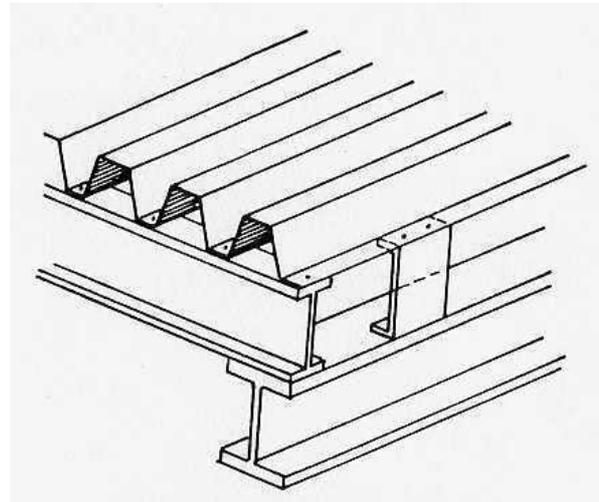
$$S \geq \left( EI_{\omega} \frac{\pi^2}{l^2} + GI_T + EI_z \frac{\pi^2}{l^2} 0,25h^2 \right) \cdot \frac{70}{h^2} \quad (1)$$

gilt. Die mit dieser Bedingung sichergestellte gebundene Drehachse führt zu einer enormen Steigerung der Biegedrillknicklast. Die Schubsteifigkeit  $S$  gemäß [2] und [3], die im Regelfall der Bedingung (1) genügt, darf aber nach dem Beuth-Kommentar zur DIN 18800-2 [4] nur dann angesetzt werden, wenn das Schubfeld an allen Randträgern befestigt ist und die aus der Schubfeldwirkung resultierenden Kräfte aufgenommen werden können.

Eine Befestigung an allen Randträgern erfordert besonderen Aufwand bei der Ausführung der Unterkonstruktion und entspricht nicht der durch die Profilierung bestimmten einachsigen Lastabtragung der Trapezprofile. Die zur Schaffung der in [4] geforderten Lagerung erforderliche Steigerung des Fertigungsaufwandes wird aus den Bildern 1.1 und 1.2 deutlich.



**Bild 1.1: allseitige Befestigung an gurtbündiger Unterkonstruktion**



**Bild 1.2: allseitige Befestigung durch zusätzliche Lasteinleitungsbleche**

In der Praxis werden deshalb Trapezbleche entsprechend ihrem Lastabtragungsverhalten in der Regel nur an den zur Lastabtragungsrichtung rechtwinkligen Rändern an die Unterkonstruktion angeschlossen. Damit kann die vorteilhafte Wirkung der Schubbettung mangels Informationen

über die Bettungswirkung rechnerisch nicht in Anspruch genommen werden. Aus den im folgenden dargestellten Untersuchungen

- a) FE-Berechnungen für vierseitig gelagerte Trapezbleche zur Bestätigung des FE-Modells im Vergleich zu den Lösungen von [2]
- b) FE-Berechnungen für zweiseitig gelagerte Trapezbleche auf der Basis des unter a) bestätigten FE-Modells
- c) Experimentelle Untersuchung zweiseitig gelagerter Trapezprofile zur Überprüfung der unter b) ermittelten Ergebnisse
- d) Parametrische FE-Berechnungen zur Schaffung einer einfachen Regel für die Ermittlung der Schubsteifigkeit von Trapezblech, die nur an den Querrändern gelagert wird. Eine einfache Regel für die Ermittlung der Schubsteifigkeit nur an den Querrändern gelagerter Trapezprofile hergeleitet und damit der in Rede stehende Mangel behoben.

## **2 Experimentelle Schubfelduntersuchungen**

### **2.1 Versuchsaufbau**

Die Versuche wurden auf einem als Vier-Gelenk-Rahmen ausgebildeten horizontalen Schubrahmen durchgeführt (Anlage 1). Das Achsmaß  $a$  des Rahmens beträgt 3000mm und entspricht der Schubfeldlänge, das Achsmaß  $b$  des Rahmens beträgt 6750mm und entspricht der Schubfeldbreite. Die Belastung des Rahmens erfolgt über einen 500kN-Hydraulikzylinder. Mit einem Präzisions-Kraftaufnehmer wird die Belastung kontinuierlich gemessen.

Die Auslenkungen  $v_1$  und  $v_2$  des Rahmens infolge der Belastung werden mit jeweils einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Ebenso werden in unmittelbarer Nähe der Festlager die Verschiebungen  $v_3$  und  $v_4$  gemessen.

Die Schubfeldverformung  $v_s$  ergibt sich aus

$$v_s = \frac{v_1 + v_2}{2} - \frac{a}{b}(v_3 - v_4) \quad (2.1)$$

Die vorab bestimmten Widerstandskräfte des Rahmens gegen Auslenken, beispielsweise infolge von Reibung in den Eckgelenken, waren geringfügig und konnten im Rahmen der Untersuchungen vernachlässigt werden.

2.2 Versuchsgegenstand

Die Versuche wurden mit Trapezprofilen des Typs LS 5/35/1035 der Firma Arcelor Construction France (Bild 2.1) durchgeführt. Die ermittelten Querschnittsabmessungen sind der Tabelle 2.1 zu entnehmen.



**Bild 2.1: Nennabmessungen des Trapezprofils LS 5/35/1035**

Kennwert	1. Rippe	2. Rippe	3. Rippe	4. Rippe	5. Rippe
Profilhöhe	33,5	33,5	34,0	33,2	33,0
Obergurtbreite	124,0	123,0	123,0	124,0	124,0
Untergurtbreite	30,5	30,0	29,5	29,5	30,5
Einlaufbreite	1035				
Auslaufbreite	1033				

**Tabelle 2.1: Abmessungen des Trapezprofils LS 5/35/1035; Istwerte in [mm]**

Die Trapezprofile hatten eine Nennblechdicke  $t_N=1,0\text{mm}$  und entstammten einer Charge der Stahlsorte S350GD+Z. Die mechanischen Eigenschaften des Stahlblechs der Profiltafeln sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen.

Probennummer	Nennblechdicke	Kernblechdicke	$R_{eH}/R_{p0,2}$	$R_m$	$A_{80\text{mm}}$
	[mm]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
LS 5/35/1035_a	1,00	0,95	423	439	21
LS 5/35/1035_b	1,00	0,96	424	438	21
LS 5/35/1035_c	1,00	0,97	425	439	23

**Tabelle 2.2: Werkstoffkennwerte der Trapezprofilbleche**

Die Profiltafeln wurden mit ihrer Längsrichtung parallel zu den kurzen Schenkeln des Rahmens verlegt, so dass die Lasteinleitung rechtwinklig zur Profilierung erfolgte. Die Profiltafeln wurden auf dem Schubrahmen mit Bohrschrauben des Typs EJOT JT2-12-5,5x35 V16 nach [6] befestigt, die am Querrand der Profiltafeln in jedem Untergurt angeordnet waren. Bei der 4-seitigen Lagerung wurden sie zudem mit Bohrschrauben des gleichen Typs entlang der Längsränder im Ab-

stand von  $e_R=150\text{mm}$  verschraubt. Die Verbindung der Profiltafeln miteinander erfolgte stets mit Bohrschrauben des Typs EJOT JT2-4,8x19, die im Längsstoß im Abstand  $e_L=150\text{mm}$  angeordnet waren. Eine Gesamtansicht des eingedeckten Schubrahmens mit Trapezprofilen LS 5/35/1035 unter vierseitiger Lagerung ist Bild 2 der Anlage 2.1 zu entnehmen. Bild 4 der Anlage 2.2 zeigt die Trapezbleche mit zweiseitiger Befestigung.

Da die für die Befestigung der Trapezblechscheiben auf dem Schubrahmen eingesetzten Verbindungsmittel maßgeblich auf Abscheren beansprucht werden, wurden zur Bestimmung des Verhaltens unter dieser Beanspruchung 10 Querkzugversuche nach [5] an Verbindungen von Blechstreifen durchgeführt. Im Hinblick auf die folgenden Schubfeldversuche wurde der Schraubentyp EJOT JT2-12-5,5x35 V16 in Verbindung mit Blechstreifen in Nennblechdicke von 1,00mm und 8,00mm geprüft.

### 2.3 Versuchsdurchführung

Entsprechend Tabelle 2.3 wurden Schubfeldversuche mit zwei- und vierseitiger Lagerung durchgeführt.

**Tabelle 2.3: Versuchsbeschreibung und Ergebnisse**

	Versuch 1	Versuch 2
Lagerungsart	vierseitig	zweiseitig
Belastungsart und Versuchsgeschwindigkeit	zyklische Belastungen mit 0,1 mm/s Vorschubgeschwindigkeit	
Schubfeldlänge a Schubfeldbreite b	3000 mm 6831 mm	3000 mm 6624 mm
Beobachtungen während der Versuchsdurchführung	<p><u>85kN</u>: erste bleibende Verformungen</p> <p><u>100kN</u>: deutlich sichtbare Blechendverwölbung der Profilrippen am Querrand (Bild 3 der Anlage 2.1)</p> <p><u>166kN</u>: Versagen der ersten Verbindungsmittel durch Abscheren</p>	<p><u>55kN</u>: erste bleibende Verformungen</p> <p><u>70kN</u>: deutlich sichtbare Blechendverwölbung der Profilrippen am Querrand</p> <p><u>105kN</u>: Knicke in der druckbeanspruchten Randrippe (Bild 5 der Anlage 2.2)</p> <p><u>220kN</u>: Versagen der ersten Verbindungsmittel durch Abscheren</p>

Die den Versuchen zugehörigen Last-Verformungsdiagramme sind den Anlagen 3.1 und 3.2 zu entnehmen.

### 3 Versuchsauswertung

Die Schubsteifigkeit  $S$  ergibt sich aus den Versuchswerten nach der Formel

$$S = \frac{\Delta T}{\Delta \gamma} = \frac{\Delta F \cdot a}{b \cdot \Delta v_s} \quad (3.1)$$

mit  $\Delta F$  = Lastinkrement  
 $\Delta v_s$  = Inkrement der Schubfeldverformung  
 $a$  = Schubfeldlänge  
 $b$  = Schubfeldbreite

und

$$\Delta T = \frac{\Delta F}{b} \quad \text{Inkrement des Schubflusses} \quad (3.2)$$

$$\Delta \gamma = \frac{\Delta v_s}{a} \quad \text{zugehöriges Inkrement des Schubfeldwinkels} \quad (3.3)$$

Die Schubsteifigkeiten wurden als Sekantensteifigkeit bei dem auf Grundlage der Elastizitätstheorie nach [7] ermittelten kritischen Schubfluss  $T_{crit}$  bestimmt. Dieser ergibt sich für das untersuchte Trapezprofil nach [8] zu:

$$T_{crit} = \min \left\{ \begin{matrix} zulT_1 \\ zulT_2 \\ zulT_3 \end{matrix} \right\} = \min \left\{ \begin{matrix} 3,71kN / m \\ 6,77kN / m \\ 10,89kN / m \end{matrix} \right\} = 3,71kN / m \quad (3.4)$$

Die nach diesem Verfahren ermittelte Schubsteifigkeit  $S$  ist zusammen mit den Versagenslasten in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Versuchs-Nr.	Schubsteifigkeit $S$ bei $T_{crit}$	Versagenslast (Schubtragfähigkeit)	max. Schubfluss $T$	max. Schubfeldverformung $v_s$
	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[mm]
1	7350	165,9	24,3	17,2
2	6185	120,9	19,5	17,3

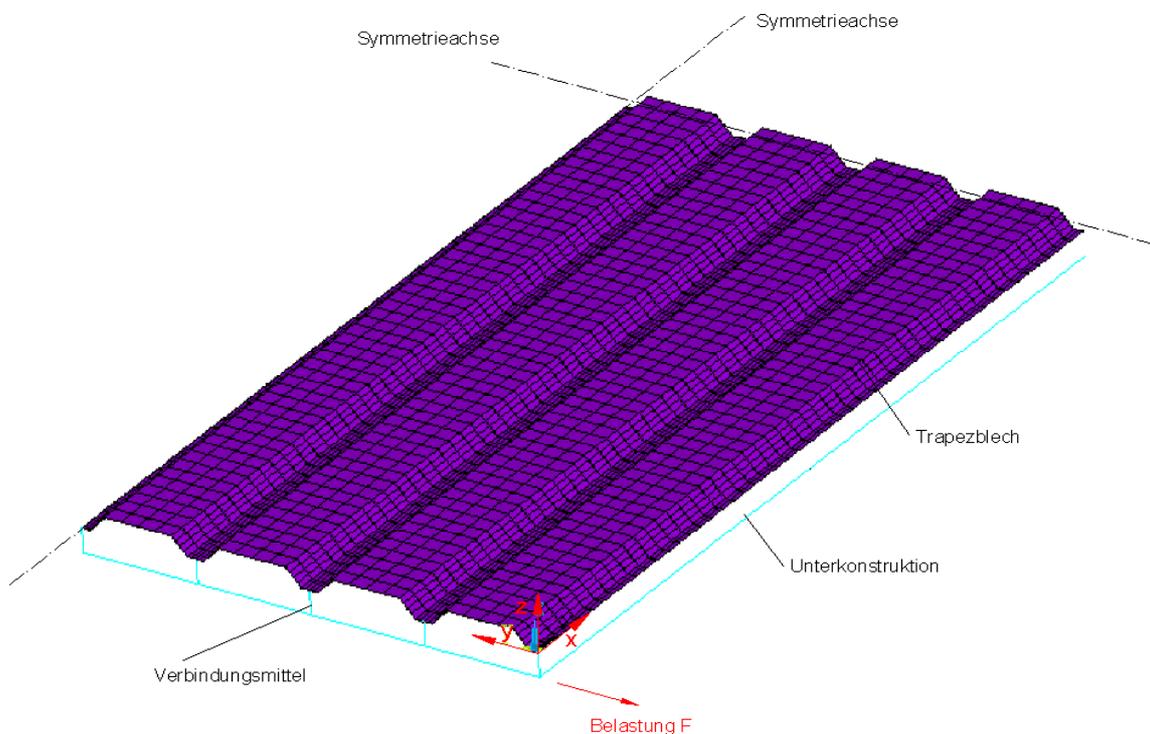
**Tabelle 3.1: Auswertung der experimentellen Untersuchungen**

## **4 Finite-Element-Berechnungen**

### **4.1 Beschreibung des Finite-Element-Modells**

Das Finite-Element-Modell bildet die Trapezprofilscheibe sowie die Unterkonstruktion zur Einleitung der Schubbelastung ab. Der doppelsymmetrische Aufbau der Trapezprofilscheibe sowie die antisymmetrische Belastung wurden dazu genutzt, die Berechnungen an einem Viertelmodell durchzuführen. Die vorab durchgeführten Netz-Konvergenzstudien stellten sicher, dass das Finite-Element-Modell zuverlässige Ergebnisse liefert.

Bild 4.1 zeigt den schematischen Aufbau des Viertelmodells einer zweiseitig gelagerten Trapezprofilscheibe mit seinen Randbedingungen.



**Bild 4.1: Modellierung der Trapezprofilscheibe (schematisch)**

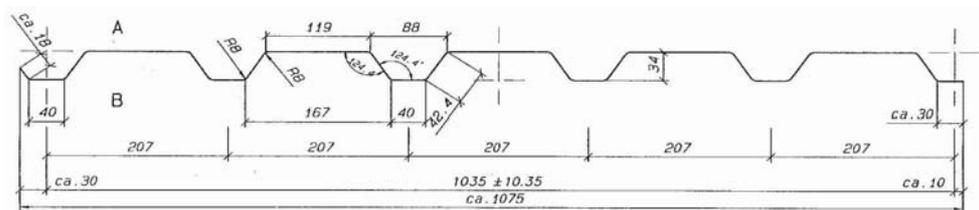
Das Trapezprofil wird durch Schalenelemente des Typs SHELL181 abgebildet. Dieses dreidimensionale Schalenelement besitzt vier Eckknoten mit jeweils drei Verschiebungs- und drei Rotationsfreiheitsgraden. Das Element besitzt Biege-, Membran und Schubsteifigkeiten und erfasst auch nichtlineare Materialeigenschaften. Die Abbildung der Unterkonstruktion erfolgt durch Balkenelemente des Typs BEAM4, die durch zwei Knoten mit jeweils drei Verschiebungs- und drei Rotationsfreiheitsgraden charakterisiert sind. Als Werkstoffverhalten wurde sowohl für die Trapezprofile als auch für die Unterkonstruktion ein bilineares Werkstoffgesetz (linear elastisch, ideal plastisch) angesetzt, wobei nach Überschreiten der Streckgrenze  $f_y$  Fließen ohne Verfestigung einsetzt.

Die Verbindung zwischen Trapezprofil und Unterkonstruktion wird durch das nichtlineare Federelement COMBIN39 abgebildet. Dieses Element wird durch zwei Knoten mit bis zu 3 Translationsfreiheitsgraden sowie der Eingabe eines Last-Verformungsverhaltens in Form eines Linienzugs definiert. Hierbei können nichtlineares Last-Verformungs-Verhalten sowie ein individuelles Entlastungs-Verhalten vom Anwender definiert werden. An den Verbindungsstellen zwischen Unterkonstruktion und Trapezblech waren jeweils zwei Federelemente angebracht, von denen ein Element die Kräfte in x-Richtung und das andere Element die Kräfte in y-Richtung aufzunehmen hatte. Eventuell vorhandene Reibeinflüsse im Bereich der Befestigungsmittel wurden vernachlässigt. Detailliertere Beschreibungen sowie weiterführende Informationen zu den verwendeten Elementtypen können [9] entnommen werden.

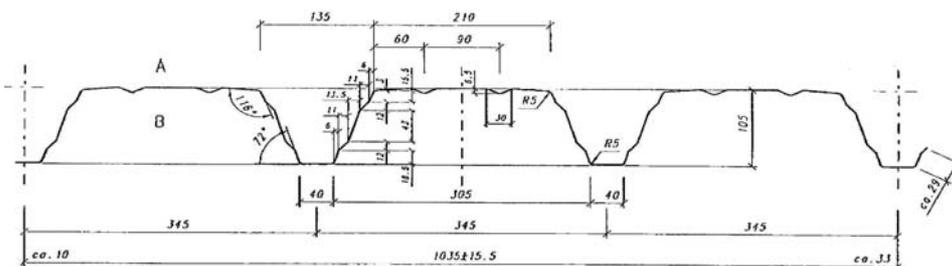
#### 4.2 Verifikation des Finite-Element-Modells

Das zur Bestimmung der Schubsteifigkeiten verwendete Modell wird nachfolgend mit den in [7] erläuterten Berechnungen verifiziert. Hierzu wurden drei ausgewählte Querschnittsgeometrien handelsüblicher Trapezprofile modelliert und mit jeweils drei unterschiedlichen Blechdicken berechnet. Die zur Berechnung verwendeten nominellen Querschnittsabmessungen sind Bild 4.2 zu entnehmen.

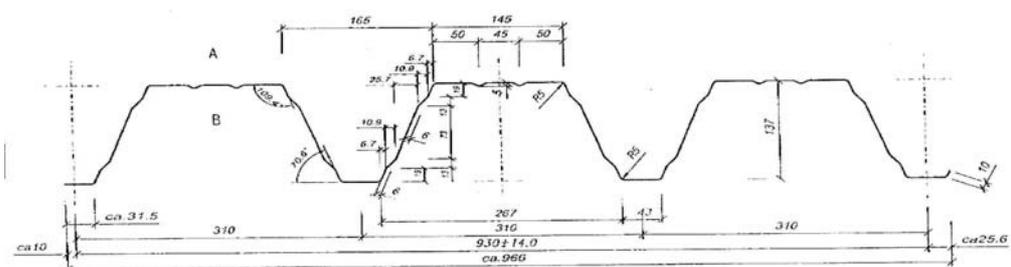
##### Profil 35/207:



##### Profil 105/345:



##### Profil 135/310:



**Bild 4.2: untersuchte Profilgeometrien**

Entsprechend der [2] und [3] zugrunde liegenden Elastizitätstheorie wurden die Vergleichsrechnungen mit einem idealelastischen Werkstoffgesetz unter Berücksichtigung eines Elastizitätsmoduls  $E$  von  $210000\text{N/mm}^2$  sowie einer Querkontraktionszahl  $\nu$  von  $0,3$  durchgeführt. Da in [7] weder Verformungen der Verbindungsmittel noch Nachgiebigkeiten aus der Unterkonstruktion berücksichtigt werden, wurden die im Finite-Element-Modell vorhandenen Federelemente durch starre Kopplungen ersetzt und die Balkenelemente der Unterkonstruktion mit einer unendlich großen Biege- und Dehnsteifigkeit versehen. Stegversätze und Gurtsicken wurden im Rahmen der Finite-Element-Modellierung nicht berücksichtigt.

In Tabelle 4.1 sind die numerisch ermittelten Ergebnisse den Steifigkeiten nach [8] gegenübergestellt.

Profilbezeichnung	Schubfeldlänge $l_s$ [m]	Blechdicke [mm]	Schubsteifigkeiten $S$ [kN/m]		Abweichung [%]
			FE-Berechnung	[8]	
35_207	3,0	0,75	4215	4366	4
		1,00	8621	8831	2
		1,25	15540	14926	4
105_345	6,0	0,75	807	794	2
		1,00	1727	1669	3
		1,25	3039	2941	3
135_310	6,0	0,75	1053	1103	5
		1,00	2198	2306	5
		1,25	3829	4036	5

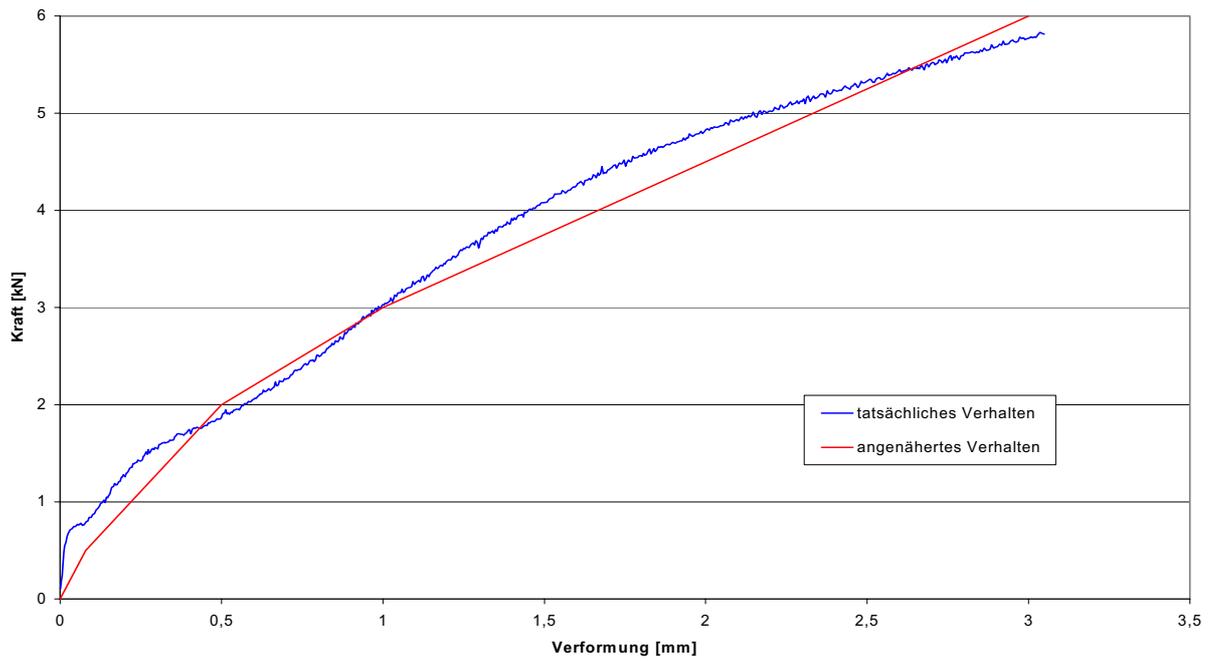
**Tabelle 4.1: Vergleich der Schubsteifigkeiten nach FEM und [8]**

Die geringen Werte der Abweichungen zeigen, dass mit dem Finite-Element-Modell die Schubsteifigkeiten eines vierseitig gelagerten Schubfeldes aus Trapezprofilen berechnet werden können.

### 4.3 Vergleich des Finite-Element-Modells mit den experimentellen Untersuchungen

#### 4.3.1 Allgemeines

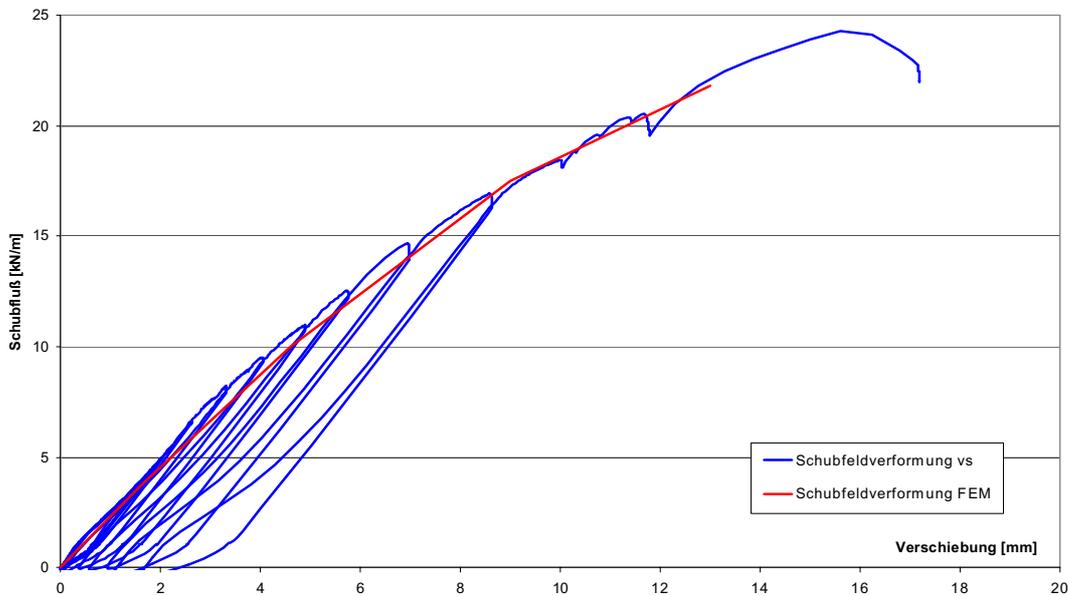
Auf Grundlage des unter Abschnitt 4.2 verifizierten Finite-Element-Modells wurden Berechnungen zum Vergleich mit den unter Abschnitt 2 beschriebenen Schubfeldversuchen am Profil LS 5/35/1035 durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss der Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel am Quer- und Längsrand durch die Elemente COMBIN39 mit einem den nach Abschnitt 2.2 experimentell ermittelten Last-Verformungskurven angenäherten Verhalten berücksichtigt. Hierzu wurde ein charakteristisches Last-Verformungs-Diagramm der Querkugversuche ausgewählt und diese Aufzeichnung mittels eines Linienzuges entsprechend Bild 4.3 angenähert. Für Kernblechdicke sowie Streckgrenze wurden die ermittelten Werte nach Abschnitt 2.2 eingesetzt.



**Bild 4.3: idealisiertes Last-Verformungsdiagramm der Verbindungsmittel**

4.3.2 Vierseitige Lagerung

In Bild 4.4 ist die Schubfeldverformung  $v_s$  nach der Finite-Element-Berechnung der experimentell bestimmten Last-Verformungs-Kurve bei vierseitiger Lagerung gegenübergestellt.



**Bild 4.4: Vergleich der Last-Verformungs-Beziehung nach experimenteller Untersuchung und FEM für vierseitige Lagerung**

Das dargestellte Diagramm zeigt einen nahezu gleichen Verlauf beider Kurven. Die Auswertung der Versuchskurven hinsichtlich der Schubsteifigkeit  $S$  erfolgt beim kritischen Schubfluss von  $3,7\text{kN/m}$  [8]. Dieser Wert liegt innerhalb des linearen Anfangsbereichs, der bei der experimentellen Untersuchung bis zu einem Schubfluss von etwa  $8,5\text{kN/m}$  reicht. Im Rahmen der Finite-Element-Berechnung deutet sich die erste Steifigkeitsänderung ab einem Wert von etwa  $6,5\text{kN/m}$  an. Hierzu ergeben sich nach Gleichung 3.1 die in Tabelle 4.2 aufgeführten Steifigkeiten zu:

	Experimentelle Untersuchung	FE-Berechnung	Abweichung
	[kN/m]	[kN/m]	[%]
Schubsteifigkeit $S$	7350	6781	8
	[kN]	[kN]	[%]
Traglast $F_u$	24,3	21,8	11

**Tabelle 4.2: Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der Finite-Element-Berechnung**

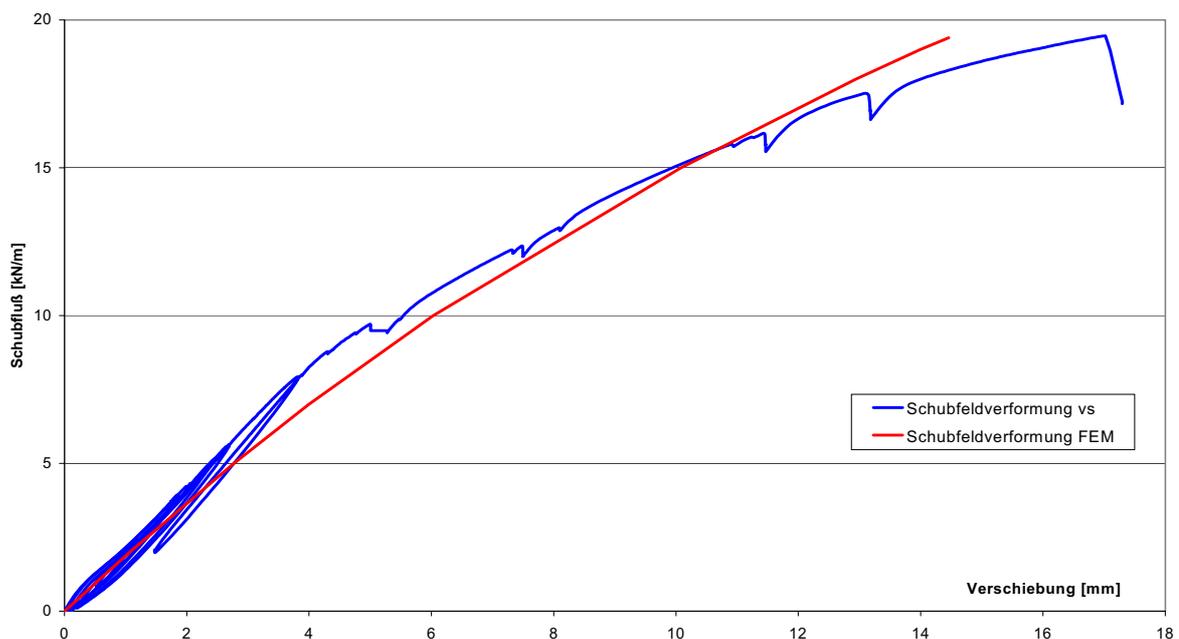
Der Unterschied zwischen den beiden Steifigkeiten beträgt 8%. Damit stimmen experimentelle und numerische Untersuchung gut überein.

Die in Tabelle 4.2 ausgewiesenen Traglasten lagen bei der experimentellen Untersuchung um etwa 11% höher als die nach der Finite-Element-Berechnung ermittelten. Auch in dieser Hinsicht kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Sowohl die experimentelle als auch die

analytische Untersuchung zeigte, dass die Traglast durch die maximal aufnehmbare Schraubenkraft bestimmt ist. Dies äußerte sich bei den experimentellen Untersuchungen durch das Abschneiden der Verbindungsmittel am Querrand im Bereich der Randrippen.

#### 4.3.3 Zweiseitige Lagerung

In Bild 4.5 ist die Schubfeldverformung  $v_s$  nach der Finite-Element-Berechnung der experimentell bestimmten Last-Verformungs-Kurve unter zweiseitiger Lagerung gegenübergestellt.



**Bild 4.5: Vergleich der Last-Verformungs-Beziehung nach experimenteller Untersuchung und FEM für zweiseitige Lagerung**

Das dargestellte Diagramm zeigt für beide Kurven einen qualitativ gleichen Verlauf. Nach einer sehr guten Übereinstimmung des Verlaufes im Anfangsbereich bis zu einem Schubfluss von 5kN/m liefert die Berechnung nach der Finite-Element-Methode im Bereich zwischen 5kN/m und 15kN/m geringfügig größere Verschiebungen. Dies resultiert aus der in der Berechnung nach der Finite-Element-Methode bereits bei etwa 5,0kN/m eintretenden Steifigkeitsänderung. Der lineare Anfangsbereich bei der experimentellen Untersuchung reicht dagegen bis etwa 8,0kN/m. Die Auswertung der Versuchskurven hinsichtlich der Schubsteifigkeit  $S$  erfolgt analog zur vierseitigen Untersuchung bei einem kritischen Schubfluss von 3,7kN/m [8]. Es ergeben sich nach Gleichung 3.1 die in Tabelle 4.3 aufgeführten Steifigkeiten:

	Experimentelle Untersuchung	FE-Berechnung	Abweichung
	[kN/m]	[kN/m]	[%]
Schubsteifigkeit S	6185	5460	13
	[kN]	[kN]	[%]
Traglast Fu	19,5	19,4	1

**Tabelle 4.3: Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der Finite-Element-Berechnung**

Der Unterschied zwischen den beiden Steifigkeiten beträgt 13%. Damit stimmen experimentelle und numerische Untersuchung gut überein.

Die in Tabelle 4.3 ausgewiesenen Traglasten stimmten nahezu exakt miteinander überein. In beiden Fällen war – wie bei den Untersuchungen der vierseitigen Lagerung auch - die Traglast durch die maximal aufnehmbare Schraubkraft der Querrandbefestigungen bestimmt. Die Verbindungsmittel am Querrand versagten an einer Stelle in unmittelbarer Nähe des Eckbereichs, wo nach der Finite-Element-Berechnung mit dem Auftreten von deutlich größeren Kräften als beispielsweise im Bereich der Feldmitte zu rechnen ist (vgl. Abschnitt 4.4.3).

#### 4.4 Parametrische Untersuchungen mit dem verifizierten Finite-Element-Modell

##### 4.4.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Profiltypen

Die nachfolgend dargestellten parametrischen Berechnungen wurden für fünf unterschiedliche Profiltypen durchgeführt. Die Auswahl dieser Profiltypen erfolgte aus handelsüblichen Trapezprofilen in der Hinsicht, dass ein Bereich der Profilhöhe von 30mm bis 153mm und damit auch ein möglichst breiter Bereich hinsichtlich der Schubsteifigkeit abgedeckt war und schloss das Profil LS 5/35/1035 ein. Bei diesem Profil wurden die gemessene Profilgeometrie sowie die ermittelten Werkstoffkennwerte zugrunde gelegt. Die bei den anderen Profilen zur Berechnung verwendeten nominellen Querschnittsabmessungen, Kernblechdicken und Schubfeldlängen sind in Tabelle 4.4 angegeben. Die Schubsteifigkeit wurde für jedes Profil beim jeweiligen kritischen Schubfluss  $T_{crit}$  nach [8] ermittelt. Die Berechnungen wurden mit der Last-Verformungsbeziehung nach Bild 4.3 für die Verbindungsmittel und dem bilinearen Werkstoffgesetz mit  $E= 210000\text{N/mm}^2$  und  $f_y=320\text{N/mm}^2$  durchgeführt.

Profilbezeichnung	30/221	40/183	59/225	105/345	153/280
Kernblechdicke [mm]	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Profilhöhe [mm]	30	40	59	105	153
Obergurtbreite [mm]	120	119	140	210	119
Untergurtbreite [mm]	40	40	35	40	40
Rippenbreite [mm]	221	183	225	345	280
Schubfeldlänge [mm]	3000	3000	3000	5000	5000
T <sub>crit</sub> nach [8] [kN/m]	4,1	3,7	3,0	1,8	2,5
S nach [8] [kN/m]	11389	5640	2940	1378	1898

**Tabelle 4.4: nominelle Querschnittsabmessungen der untersuchten Profiltypen**

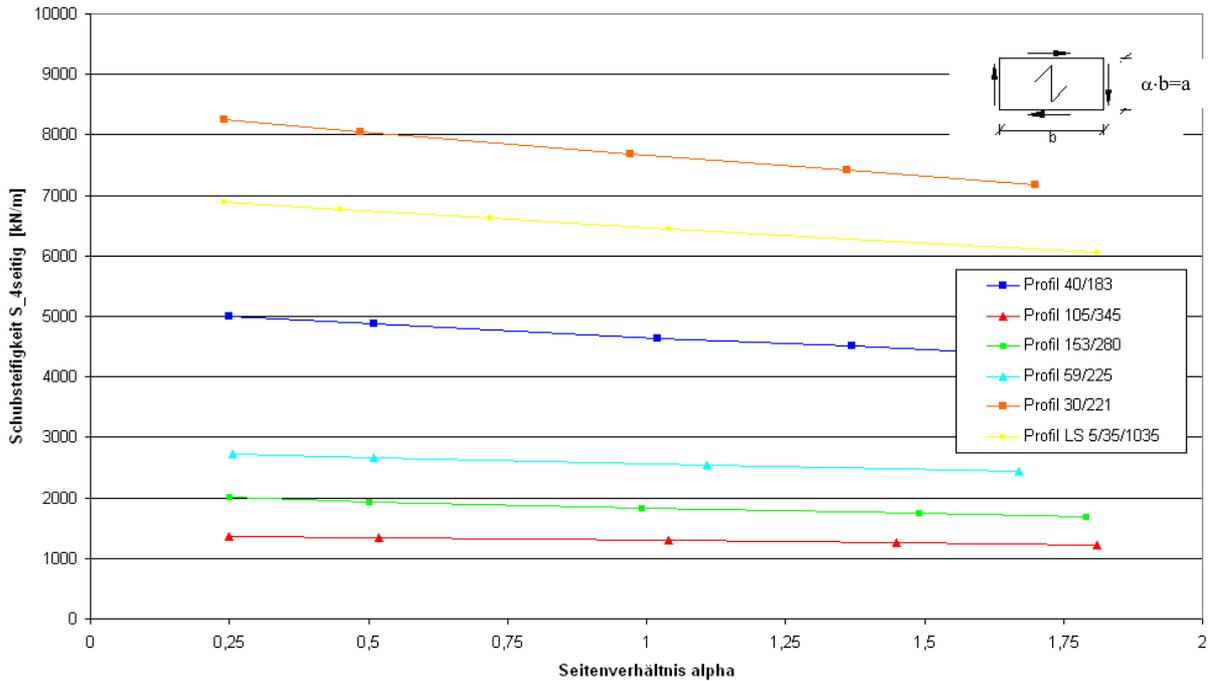
#### 4.4.2 Einfluss der Schubfeldbreite bei vierseitiger Lagerung und nachgiebigen Verbindungsmitteln

Mit den in Abschnitt 4.4.1 aufgeführten Profiltypen wurden Berechnungen mit einer variierten Anzahl von Profilrippen durchgeführt, um den Einfluss der Schubfeldbreite auf die Schubsteifigkeit zu bestimmen. sind die ermittelten Schubsteifigkeiten bei vierseitiger Lagerung in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses  $\alpha$  des Schubfeldes dargestellt, wobei sich das Seitenverhältnis zu

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{a}{n \cdot b_r} \quad (4.1)$$

mit a Schubfeldlänge  
b Schubfeldbreite  
n Rippenanzahl  
b<sub>r</sub> Rippenbreite

berechnet.



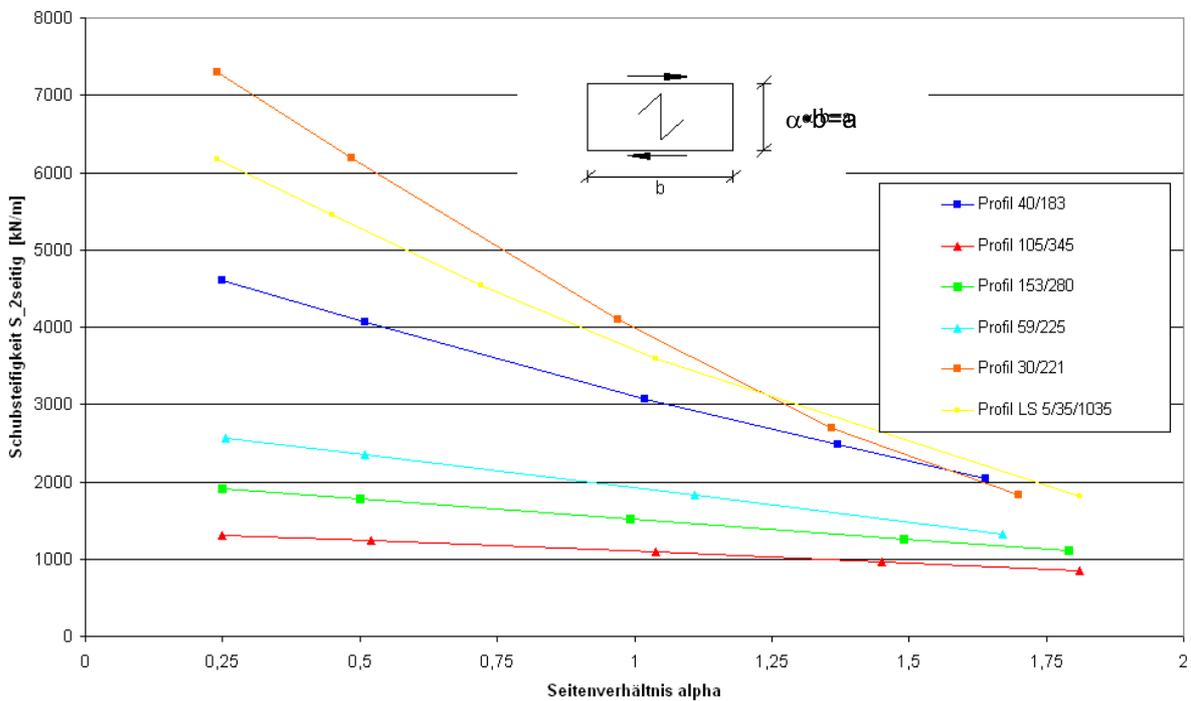
**Bild 4.6: Einfluss des Seitenverhältnisses  $\alpha$  auf die Schubsteifigkeit unter vierseitiger Lagerung**

Es ist zu erkennen, dass der Einfluss des Seitenverhältnisses  $\alpha$  mit steigender Profilhöhe und damit fallender Schubsteifigkeit abnimmt. Der Einfluss des Seitenverhältnisses, der beim Profil 30/221 für den untersuchten Bereich bis zu 12% betragen kann, ist auf die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel in Verbindung mit einer Überlagerung von Längs- und Querkraften im Eckbereich zurückzuführen. Durch Verformungen im Profilquerschnitt entziehen sich die Verbindungsmittel der schubweichen Profile der Lastaufnahme. Dies ist bei den steifen Profilen nicht in gleichem Maße möglich. So entstehen bei diesen Profilen speziell in den Eckbereichen, insbesondere durch die Überlagerung von Längs- und Querkraften, größere resultierende Kräfte. Diese Kräfte wachsen bei einer Reduzierung der Schubfeldbreite verhältnismäßig stark an und verursachen damit eine größere Nachgiebigkeit.

Bei unnachgiebigen Verbindungsmitteln sind die zwischen Trapezblech und Unterkonstruktion übertragenen Kräfte und damit auch die Steifigkeit des Schubfeldes unabhängig von der Schubfeldbreite (vgl. Berechnungen Abschnitt 4.2).

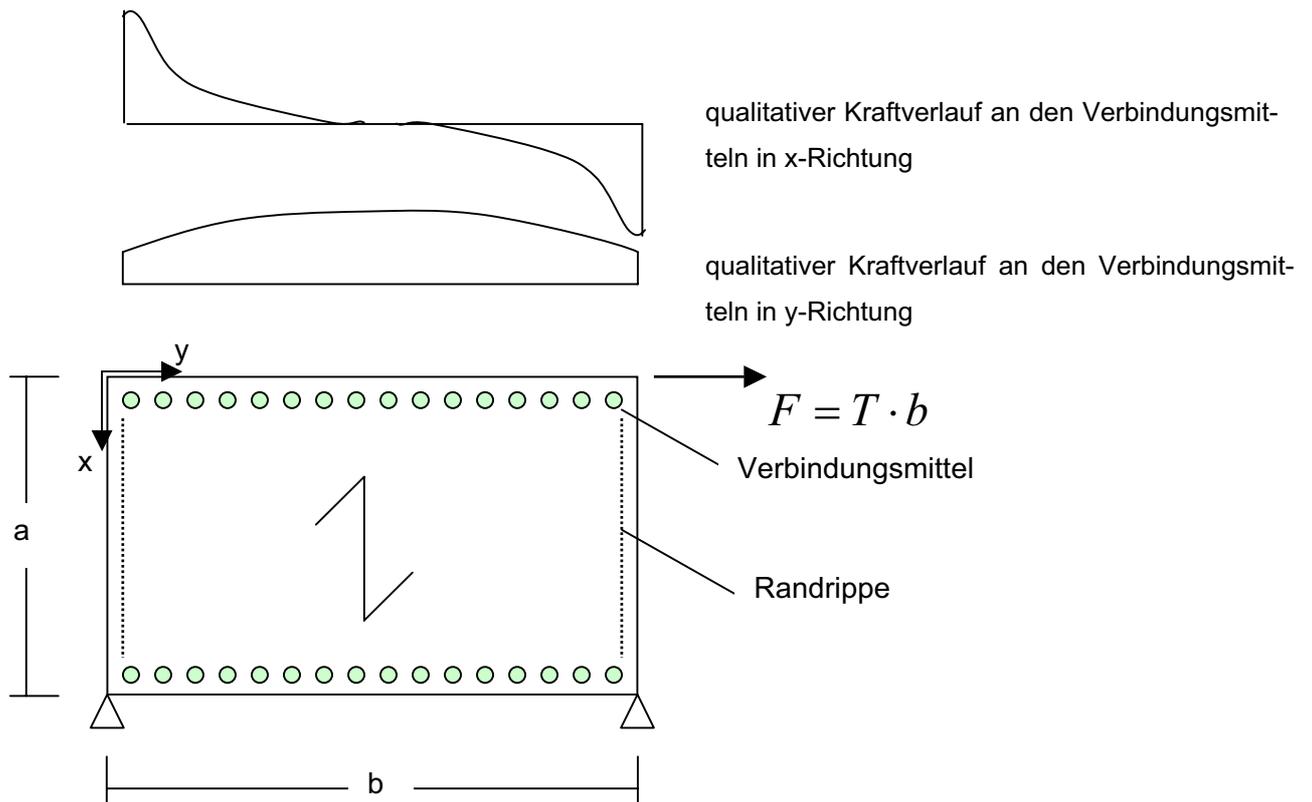
**4.4.3 Einfluss der Schubfeldbreite bei zweiseitiger Lagerung und nachgiebigen Verbindungsmitteln**

Analog zu Abschnitt 4.4.2 wurden Untersuchungen an zweiseitig gelagerten Trapezprofilen unter Schub durchgeführt. Hierzu wurde das Finite-Element-Modell durch Entfernen aller Federelemente am Längsrand modifiziert. Der Lastabtrag der Schubkräfte in Richtung der Trapezprofilierung muss deshalb durch die verbleibenden Federelemente am Querrand erfolgen. Unter Berücksichtigung im übrigen identischer Randbedingungen wie in Abschnitt 4.4.2, ergeben sich die Schubsteifigkeiten bei zweiseitiger Lagerung in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses  $\alpha$  wie in Bild 4.7 dargestellt.



**Bild 4.7: Einfluss des Seitenverhältnisses  $\alpha$  auf die Schubsteifigkeit unter zweiseitiger Lagerung**

Wie zu erkennen ist, nimmt die Schubsteifigkeit aller Profile mit steigendem Seitenverhältnis  $\alpha$  kontinuierlich ab. Die Abnahme ist bei den Profilen mit geringer Profilhöhe deutlicher ausgeprägt als bei den Profilen mit großer Profilhöhe. Dieser Effekt lässt sich durch Betrachtung eines zweiseitig gelagerten Systems nach Bild 4.8 wie folgt erklären:



**Bild 4.8:** Darstellung eines zweiseitigen Schubfeldes mit qualitativem Kraftverlauf an den Verbindungsmitteln

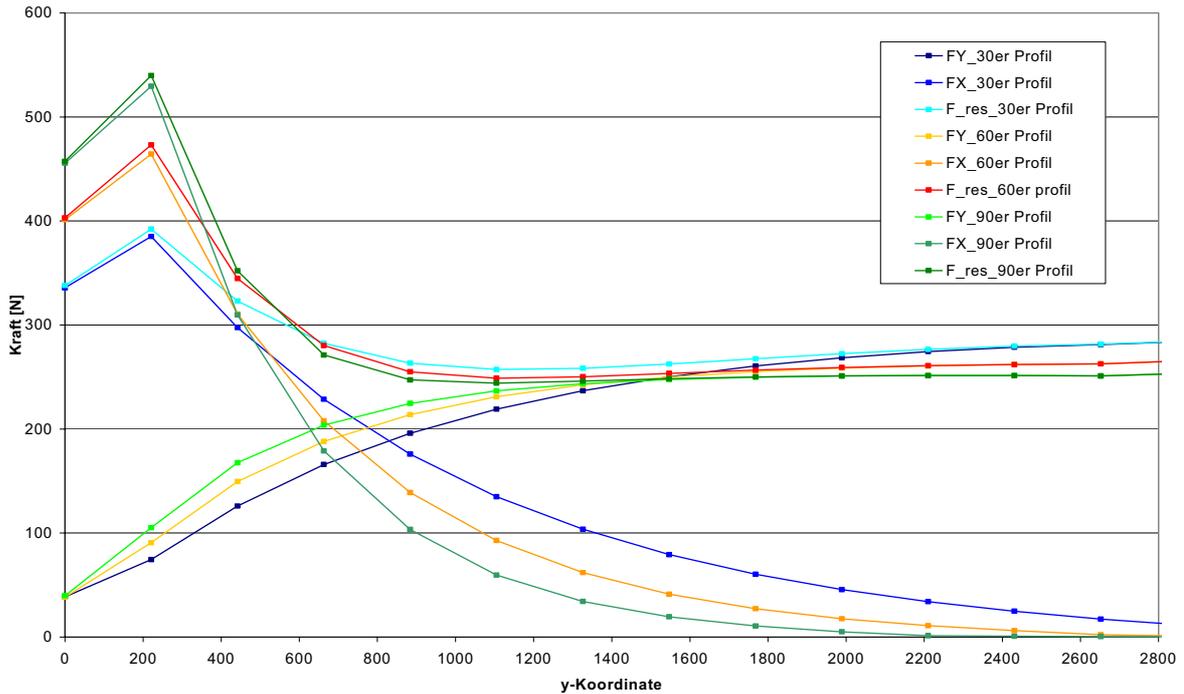
Die Belastung  $F$  verteilt sich in  $y$ -Richtung anwachsend vom Eckbereich so auf die Verbindungsmittel, dass im mittleren Bereich des Querrandes ein annähernd konstanter Schubfluss vorliegt. Die Kraft, die infolge des Wegfalls der Verbindungsmittel am Längsrand durch die Randrippe auf die Verbindungsmittel am Querrand übertragen werden muss, berechnet sich zu

$$F_{X\_Randrippe} = T \cdot a \quad (4.2)$$

und ist unabhängig von der Schubfeldbreite.

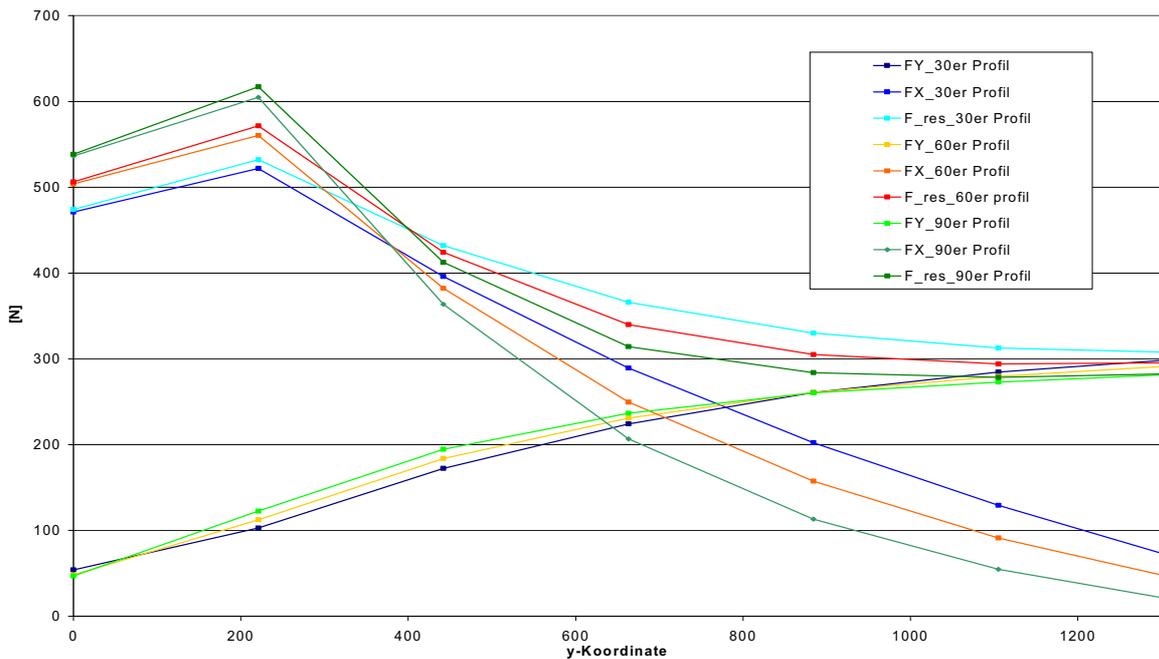
Mit einer verminderten Schubfeldbreite nimmt auch die Anzahl der Verbindungsmittel ab, die die Kraft  $F_{X\_Randrippe}$  abtragen können. Die aus dieser Überlagerung resultierenden Kräfte vergrößern die Nachgiebigkeiten und mindern damit die Steifigkeit des Schubfeldes.

Die Abnahme der Steifigkeit mit steigendem Seitenverhältnis  $\alpha$  rührt auch daher, dass sich im Eckbereich des Schubfeldes größere resultierende Kräfte infolge der Lastübertragung durch die Randrippe einstellen und diese mit zunehmendem Seitenverhältnis zunehmen wie der Vergleich von Bild 4.9 und Bild 4.10 zeigt. Dort sind die Schraubenkräfte am Querrand für drei Profile dargestellt, deren Profilhöhe bei sonst identischen Parametern zwischen 30mm und 90mm variiert wurde.



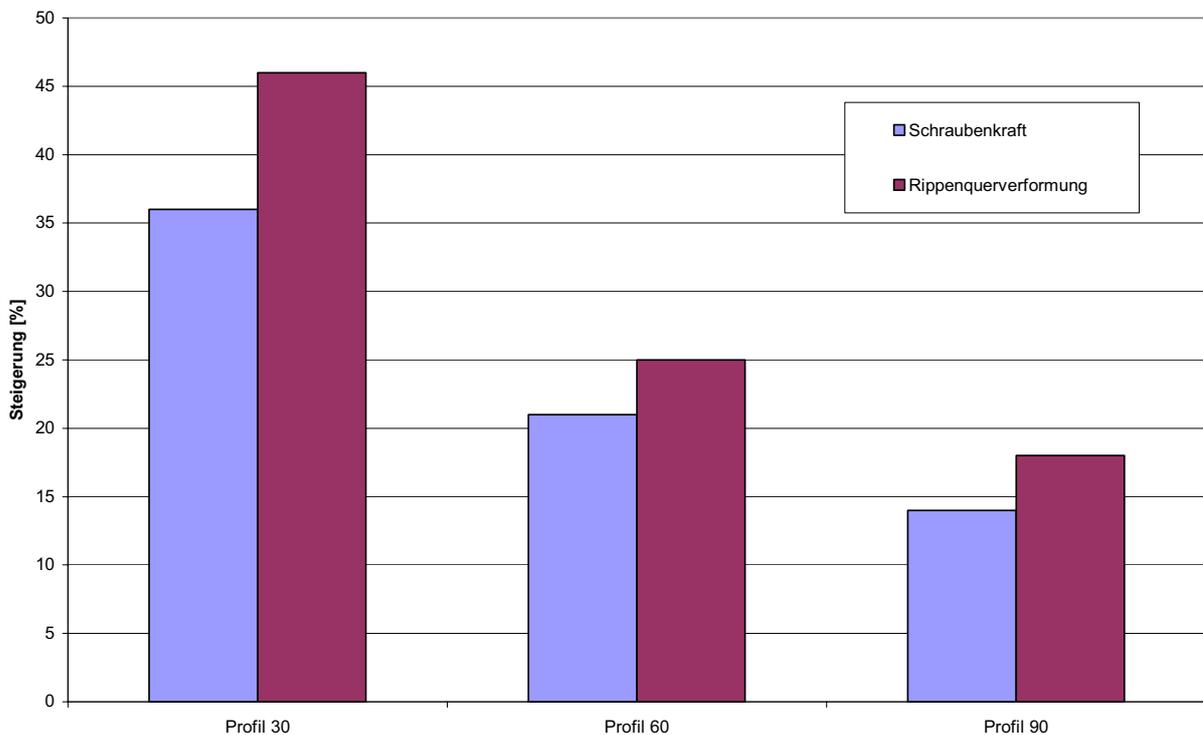
**Bild 4.9: Schraubenkräfte am Querrand für  $\alpha=0,5$**

Während der Kraftverlauf in y-Richtung für alle drei Profile nahezu identisch ist, zeigt sich bei den Kräften in x-Richtung mit zunehmender Profilhöhe eine Umlagerung zum Eckbereich. Dieses resultiert daraus, dass sich die hohen Profile aufgrund ihrer geringeren Steifigkeit und ihres großen Verformungsvermögen einer Lastaufnahme entziehen. Erfolgt die Lastabtragung auf einem kleineren Bereich, müssen die in diesem Bereich übertragenen Kräfte größer sein, da die Summe der zu übertragenden Kräfte unabhängig von der Profilform ist.



**Bild 4.10: Schraubenkräfte am Querrand für  $\alpha=1,0$**

Zudem fällt auf, dass diese Eckkräfte für die niedrigen Profile deutlich stärker zunehmen als die der hohen Profile. Bild 4.11 verdeutlicht die prozentualen Zunahmen der maximalen Schraubenkräfte im Eckbereich sowie die daraus resultierenden Verschiebungen bei Änderung des Seitenverhältnisses  $\alpha$  von 0,5 auf 1,0. Diese Zunahme ist umso größer, je kleiner die Profilhöhe des Profils ist.



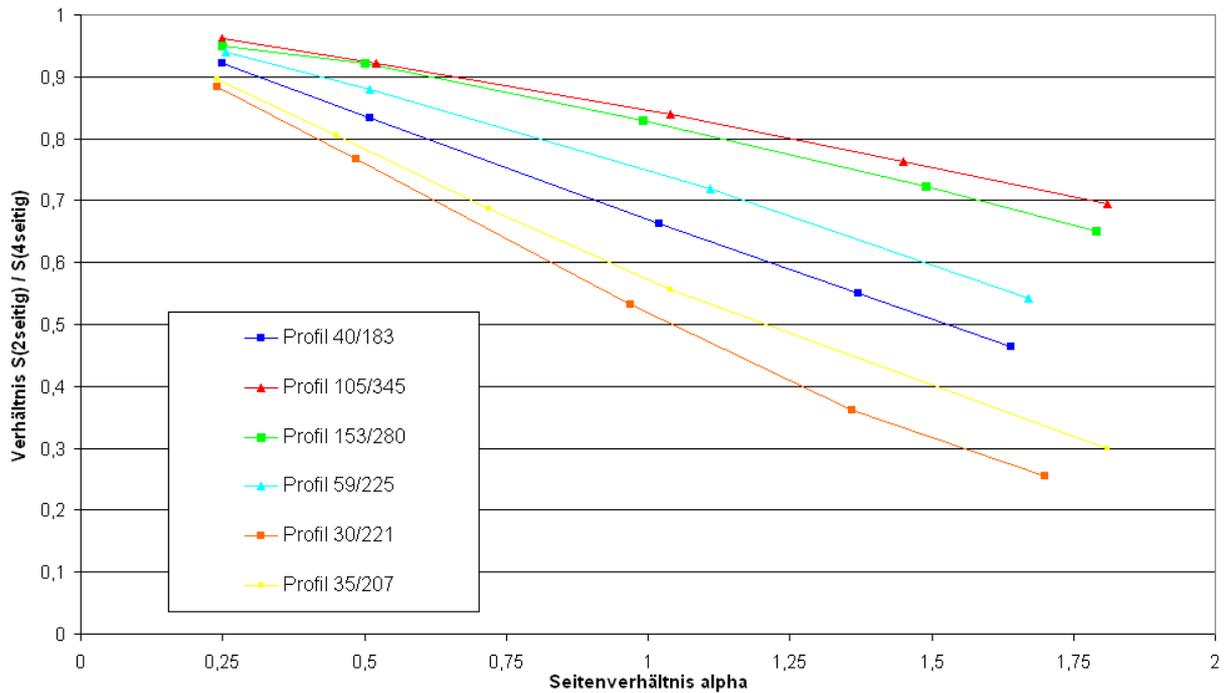
**Bild 4.11: Prozentuale Steigerung der maximalen Schraubenkräfte im Eckbereich sowie der Rippenquerverformung bei Änderung des Seitenverhältnisses  $\alpha$  von 0,5 auf 1,0**

Die vorangegangenen Diagramme verdeutlichen, dass sich bei zweiseitiger Lagerung des Schubfeldes ein Randstörproblem ergibt. Im Vergleich zu einer vierseitigen Lagerung, wo zwischen allen Profilrippen ein konstant umlaufender Schubfluss vorliegt, liegt diese Beobachtung bei einem zweiseitig gelagerten System lediglich in ungestörter Form in Feldmitte vor. Im Gegensatz dazu stehen die Randrippen, bei denen infolge einer fehlenden Befestigung der Lastabtrag über den Längsrand nicht möglich ist. Dadurch entstehen speziell in der Randrippe erhöhte Spannungen, die sich über die benachbarten Rippen in Richtung Feldmitte abbauen. Mit steigender Rippenanzahl verliert diese Randstörung an Bedeutung hinsichtlich der Gesamtsteifigkeit des Schubfeldes. Bei einem Schubfeld, das unter vierseitiger Lagerung eine hohe Grundsteifigkeit aufweist, wirkt sich dieser lokale Effekt dementsprechend in einer deutlich größeren Abminderung der Steifigkeit aus als bei einem Schubfeld mit geringerer Grundsteifigkeit.

## **5 Auswertung der Finite-Element-Berechnungen und Entwurf eines Rechenmodells**

### **5.1 Darstellung der Verhältniswerte der Schubsteifigkeit unter zwei- und vierseitiger Lagerung**

Die im vorangegangenen Abschnitt ermittelten und in Bild 4.6 und Bild 4.7 dargestellten Schubsteifigkeiten bei zwei- und vierseitiger Lagerung sind im nachfolgenden Bild 5.1 als Verhältniswerte in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses  $\alpha$  dargestellt.



**Bild 5.1: Verhältniswerte der Schubsteifigkeit unter zwei- und vierseitiger Lagerung in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses**

Aus diesem Diagramm wird deutlich, dass ein Schubfeld mit zweiseitiger Lagerung und unendlicher Länge (Seitenverhältnis  $\alpha \rightarrow 0$ ) die gleiche Schubsteifigkeit wie ein umlaufend gelagertes Schubfeld aufweist. Diese Beobachtung bestätigt, dass eine an den Randrippen vorliegende Randstörung mit steigender Schubfeldbreite an Einfluss hinsichtlich der Schubsteifigkeit verliert. Wie unter Abschnitt 4.4 gezeigt, ist zudem die Größe des Steifigkeitsabfalls bei zweiseitiger Lagerung von der Schubsteifigkeit abhängig, die das Profil unter umlaufender Befestigung aufweist.

5.2 Entwurf eines Rechenmodells

Auf Grundlage von Bild 5.1 lässt sich durch Linearisierung der dargestellten Kurven die Schubsteifigkeit unter zweiseitiger Lagerung in Abhängigkeit der Schubsteifigkeit unter vierseitiger Lagerung in der Form

$$S_{2seitig} = \beta \cdot S_{4seitig} \quad (5.1)$$

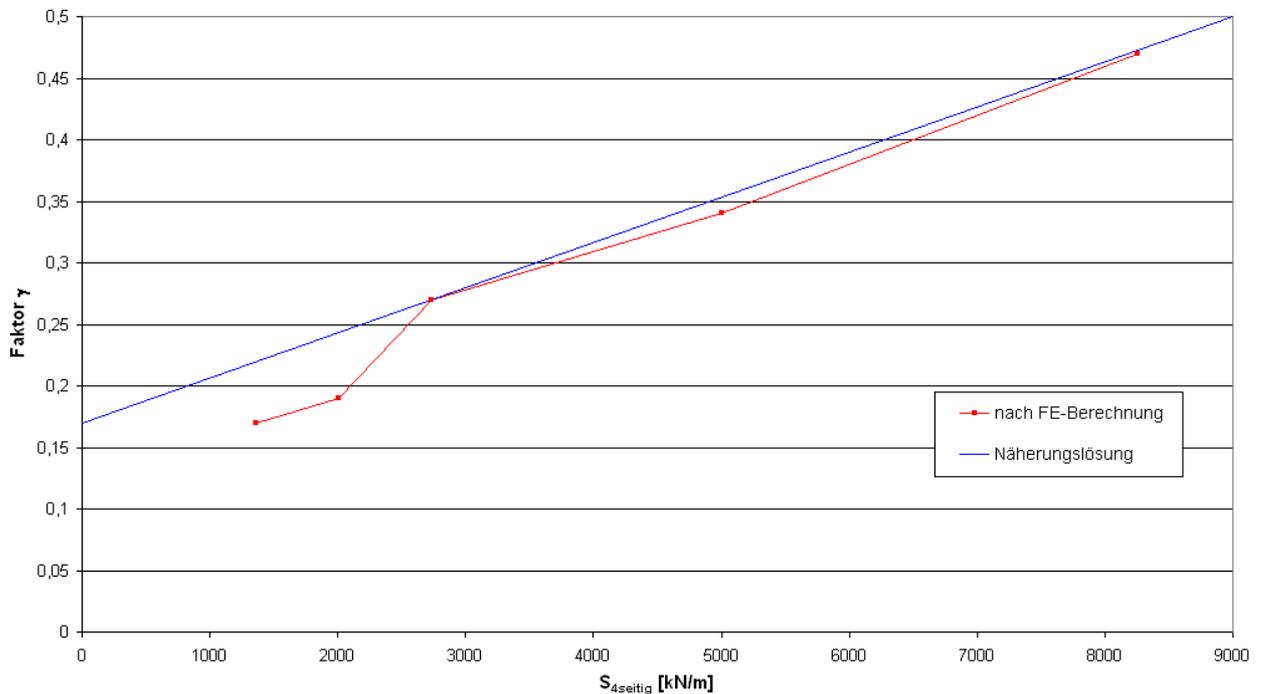
$$\text{mit } \beta = 1 - \gamma \cdot \alpha \quad (5.2)$$

darstellen,

mit  $\alpha$  Seitenverhältnis des Schubfelds

und  $\gamma$  nach Bild 5.2 oder als vorsichtige Näherung nach Gleichung 5.3

$$\gamma = 0,17 + 0,33 \left( \frac{S_{4seitig}}{9000 \text{ kN/m}} \right) \quad (5.3)$$



**Bild 5.2: Faktor  $\gamma$  in Abhängigkeit der Schubsteifigkeit unter vierseitiger Lagerung**

Die Schubsteifigkeit  $S_{2seitig}$  bei zweiseitiger Lagerung von Stahltrapezprofilen mit Profilhöhen von 35 mm bis 175 mm nach [8] kann mit den Gleichungen (5.1) und (5.2) für Seitenverhältnisse  $\alpha \leq 1,75$  berechnet werden, wenn die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel nicht größer ist als die in Bild 4.3 dargestellte.

## **6 Zusammenfassung**

Die experimentelle und rechnerische Untersuchung von Schubfeldern aus Trapezblechen zeigt, dass die Schubsteifigkeit bei alleiniger Lagerung an den Querrändern, d.h. zweiseitiger Lagerung, aus der Schubsteifigkeit  $S$  bei allseitiger Lagerung mit einfachen Abminderungsfaktoren ermittelt werden kann, wobei die Abminderung mit der Steifigkeit des allseits gelagerten Schubfeldes und dem Längenverhältnis  $\alpha$  von nicht gelagertem Rand zu gelagertem Rand linear zunimmt.

Dies ist das Ergebnis parametrischer Untersuchungen mit einem Finite-Element-Modell, das durch Vergleich mit den Ergebnissen von [2] und Versuche mit Schubfeldern mit vierseitiger Lagerung verifiziert wurde. Auch für die Versuche mit zweiseitiger Lagerung ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Versuch und Finite-Element-Berechnung. Aufgrund des Umfangs der Untersuchung gilt die vorgeschlagene Abminderungsfunktion nur für Stahltrapezprofile nach [8] mit einem Längenverhältnis  $\alpha \leq 1,75$  und Profilhöhen von 35 mm bis 175 mm, deren Verbindungsmittel wenigstens die gemäß Bild 4.3 in der Berechnung angesetzte Steifigkeit im Querkzugversuch aufweisen. Die Abminderungsfaktoren für die Schubsteifigkeit wurden auf dem Niveau der Bemessungslast nach [8] ermittelt. Das in den Berechnungen ermittelte und durch die Versuche bestätigte Last-Verformungsverhalten ist bei beiden Lagerungsarten bis zu dieser Laststufe linear, und die experimentellen und rechnerischen Grenztragfähigkeiten betragen bei abnehmender Steifigkeit ein Vielfaches dieser Last.

Karlsruhe, am 31. März 2006

Der Bearbeiter

Der Projektleiter

gez. Dipl.-Ing. M. Dürr

gez. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Saal

## **7 Schrifttum**

- [1]** DIN 18800 Teil 2, Stahlbauten – Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken. Berlin, November 1990
- [2]** Schardt, R., Strehl, C.: Stand der Theorie zur Bemessung von Trapezblechscheiben. Der Stahlbau 49 (1980), S. 325-334
- [3]** Baehre, R., Wolfram, R.: Zur Schubfeldberechnung von Trapezprofilen. Stahlbau 55 (1986), S. 175-179
- [4]** Beuth-Kommentare Stahlbauten, Kommentar zu DIN 18800-1, bis -4, Ausgabe 1998-05
- [5]** Entwurf zu DIN 18807 Teil 4,: Trapezprofile im Hochbau – Verbindungen zwischen Stahltrapezprofilen und Bauteilen aus Stahl – Ermittlung der Tragfähigkeit durch Versuche. Berlin, Dezember 1999
- [6]** Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.1-4, Verbindungselemente zur Verbindung von Bauteilen im Metalleichtbau, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, September 2005
- [7]** Strehl, C.: Berechnung regelmäßig periodisch aufgebauter Falterwerksquerschnitte unter Schubbelastung am Beispiel des Trapezblechs, Dissertation, Darmstadt, 1976
- [8]** DIN 18807 Teil 1, Trapezprofile im Hochbau – Stahltrapezprofile – Allgemeine Anforderungen, Ermittlung der Tragfähigkeitswerte durch Berechnung. Berlin, Juni 1987
- [9]** ANSYS Release 8.1; Manuals; ANSYS, Inc.; CAD-FEM GmbH, München, 2004

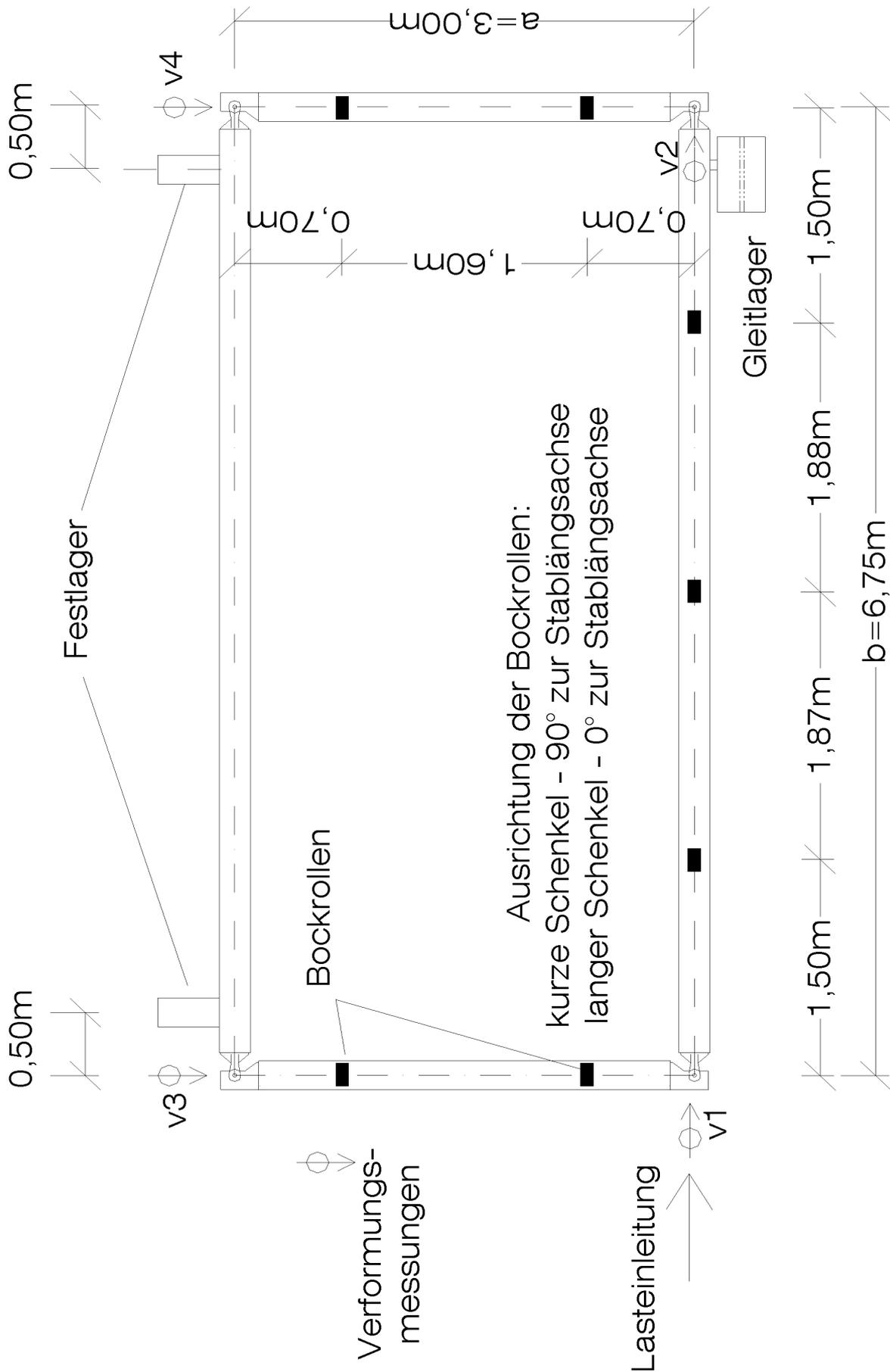


Bild 1: Grundriss des Schubrahmens



**Bild 2: eingedeckter Schubrahmen mit vierseitig gelagertem Trapezblech**



**Bild 3: deutliche Blechendverwölbung beim Trapezprofil unter einer Belastung von etwa 150kN**



**Bild 4: eingedeckter Schubrahmen mit Trapezblech unter zweiseitiger Lagerung**



**Bild 5: deutliche Verformung der druckbeanspruchten Randrippe bei etwa 105kN**

