

# **Scheibentragverhalten von Trapezprofilen ohne Schubfeldausbildung**

von Diplom-Ingenieur

**Frank Seidel**

aus Neuenhagen

von der Fakultät VI

- Planen, Bauen, Umwelt -

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Y. Petryna

Gutachter: em. Prof. Dr.-Ing. habil. J. Lindner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. K. Geißler

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 05. Mai 2009

Berlin 2010

D 83



# Zusammenfassung

Die Verwendung von Stahltrapezprofilen als raumabschließende und aussteifende Bauteile hat eine lange Tradition im Bauwesen. Nach dem bisherigen Stand der Normung ist die rechnerische Berücksichtigung der Scheibenwirkung in Form der Schubsteifigkeit  $S$  zum Lastabtrag und zur Aussteifung stets an die Ausbildung eines Schubfeldes gekoppelt. Dies erfordert eine umlaufende vierseitige Befestigung der Trapezprofile auf ihrer Unterkonstruktion. Davon abweichend ist jedoch davon auszugehen, dass auch zweiseitig nur an den Querrändern befestigte Trapezprofile eine aussteifende Wirkung auf die Unterkonstruktion besitzen.

Die vorliegende Arbeit nimmt sich dieser Problematik an. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der aussteifenden Wirkung von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen auf biegedrillknickgefährdete Träger. Das Ziel ist die Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens zur Berücksichtigung dieser aussteifenden Wirkung.

Dazu wurden Traglastversuche an Trapezprofilen durchgeführt. Da den zur Befestigung der Trapezprofile verwendeten Verbindungsmitteln im Bezug auf die Gesamtsteifigkeit eine besondere Bedeutung zukommt, wurden bei den Versuchen neben zwei Trapezprofiltypen auch verschiedene Verbindungsmittel verwendet.

Um eine möglichst allgemeingültige Betrachtung vornehmen zu können, wurde anhand der Traglastversuche ein Finite-Element-Modell entwickelt und kalibriert. Die Berechnungsergebnisse zeigten sehr gute Übereinstimmungen mit den Versuchen und ermöglichten es, das FE-Modell für umfangreiche Parameterstudien zu nutzen.

Um ein breites Spektrum möglicher Systemkonfigurationen abzudecken, wurden folgende Parameter variiert: Trapezprofiltyp, Blechstärke, Profillänge, Länge des auszusteifenden Querträgers, Biegesteifigkeit der Querträger und die Steifigkeiten der Verbindungsmittel an den Profilstößen und auf den Querträgern.

Auf der Grundlage der durchgeführten Parameterstudien wurde ein vereinfachtes Stabwerksmodell entwickelt, mit dessen Hilfe sich die Ersatzschubsteifigkeit  $S$  zweiseitig gelagerter Trapezprofile für den Fall des Biegedrillknickens von Einfeldträgern ermitteln lässt.

Dadurch wurde die Möglichkeit geschaffen, auch zweiseitig gelagerte Trapezprofile für die Aussteifung biegedrillknickgefährdeter Träger rechnerisch heranzuziehen. Damit eröffnet sich ein weiterer Weg, um zu wirtschaftlicheren Konstruktionen zu gelangen.

# Abstract

Trapezoidal steel sheetings have long been used as space-enclosing and stiffening structural elements in civil engineering. According to the present state of standardization, the design of the shear panel must be taken into account when calculating the in-plane action on the basis of shear stiffness  $S$  associated with load transfer and stiffening. This makes it necessary to fix the trapezoidal steel sheetings on all four sides on their substructure. Nevertheless, it may be assumed that also those trapezoidal steel sheetings fixed only on two sides with their crossbeams have a stiffening effect on their substructure.

The present paper deals with this problem, focussing on the stiffening effect of trapezoidal steel sheetings supported on two sides by beams susceptible to lateral-torsional buckling. The objective is to develop a simplified calculation method that considers this stiffening effect.

This was achieved by load-bearing testing of trapezoidal steel sheetings. The tests were carried out on two different types of trapezoidal steel sheetings using different joining elements, as these have an important impact on the overall stiffness of the construction.

In order to allow for broadly valid observations, a finite element model of the test results was developed and calibrated. The calculated results showed excellent agreement with the experimental results, making it possible to use the FE model for extensive parameter studies.

In order to cover a broad spectrum of possible system configurations, the following parameters were varied: type of trapezoidal steel panel, sheet thickness, profile length, length of the cross beams to be stiffened, bending stiffness of the crossbeams and stiffness of the joining elements situated at the profile joints and on the crossbeams.

The findings of the parameter studies were used to develop a simplified strut model allowing to determine the alternative shear stiffness  $S$  of trapezoidal steel sheetings supported on two sides for the case of lateral-torsional buckling in simple beams.

This made it possible to consider trapezoidal steel sheetings supported on two sides when calculating the stiffening of beams susceptible to lateral-torsional buckling. The use of such sheetings will pave the way to more economical constructions.

# Danksagung

Während meiner Zeit als Doktorand am Fachgebiet Stahlbau, später Metall- und Leichtbau, der Technischen Universität Berlin habe ich viele Kolleginnen und Kollegen kennen und schätzen gelernt, die mich bei dieser Arbeit in vielfältiger Weise unterstützt haben, wofür ich mich bei allen an dieser Stelle herzlich bedanken will.

In besonderer Weise möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Lindner bedanken, der mir nicht nur die Anregung zu diesem Thema gegeben hat, sondern auch durch seine stete Unterstützung, fachliche Begleitung und kritische inhaltliche Hinterfragung und Diskussion erheblich zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein ausdrücklicher Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Geißler für die Übernahme des zweiten Gutachtens, die fachlichen Gespräche zum Thema und sich daraus ergebende alternative Denkanstöße.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Y. Petryna danke ich für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Im Besonderen möchte ich mich auch bei der Konrad-Adenauer-Stiftung e.V. bedanken. Erst durch die Gewährung eines Promotionsstipendiums wurde mir die Möglichkeit gegeben, meine Dissertation zu verfassen.

Mein weiterer Dank gilt den Firmen Arcelor Bauteile GmbH, EJOT Baubefestigungen GmbH und der Firma Hilti AG für die Unterstützung durch das zur Verfügung stellen der Materialien für meine Versuche.

Bedanken will ich mich weiterhin bei meinen Kolleginnen Frau Dr.-Ing. Pieplow, Frau Dr.-Ing. Gläßer und Frau Theuer sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich Bamm, meinen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Heyde, Herrn Dr.-Ing. Hylla, Herrn Dr.-Ing. Holberndt, Herrn Dr.-Ing. Glitsch, Herrn Dipl.-Ing. Mager, Herrn Dipl.-Ing. Krohn und Herrn Dipl.-Ing. Wenke, die am Fachgebiet meine Arbeit begleitet und durch Diskussionen, Anregungen und ein angenehmes Arbeitsklima ebenfalls sehr zum Gelingen beigetragen haben.

Bei Herrn Fröhlich, Herrn Schmidt und Herrn Zimmer aus unserer Werkstatt bedanke ich mich für die Unterstützung bei der Konstruktion des Versuchsstandes.

Es ist mir bewusst, dass die liebevolle und vor allem nimmermüde Unterstützung meiner Freundin und meiner Familie diese Arbeit erst möglich gemacht hat. Dafür bin ich ihnen von ganzem Herzen dankbar.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Bezeichnungen</b> .....	III
<b>Kapitel 1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit .....	3
<b>Kapitel 2 Stand der Technik und Forschung</b> .....	5
2.1 Allgemeines .....	5
2.2 Biegedrillknicken .....	5
2.3 Verbindungsmittel .....	9
2.4 Schubfeldberechnungen .....	12
2.4.1 Allgemeines .....	12
2.4.2 Verfahren nach Steinhardt/Einsfeld .....	15
2.4.3 Berechnungsmethode nach Schardt/Strehl .....	18
2.4.4 Methode nach Bryan/Davies .....	23
2.4.5 Vergleich der Berechnungsverfahren .....	27
2.5 Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu bestehenden Untersuchungen .....	29
<b>Kapitel 3 Experimentelle Untersuchungen an Trapezprofilen</b> .....	35
3.1 Allgemeines .....	35
3.2 Voruntersuchungen .....	36
3.2.1 Zugversuche .....	36
3.2.2 Verbindungsmittel .....	37
3.3 Großversuche an Trapezprofilen .....	42
3.3.1 Allgemeines .....	42
3.3.2 Versuchsaufbau .....	42
3.3.3 Versuche .....	45
<b>Kapitel 4 Beschreibung und Verifizierung eines FE-Modells</b> .....	55
4.1 Allgemeines .....	55
4.2 Beschreibung des Finite-Element-Modells .....	55
4.3 Verifizierung des implementierten FE-Modelles .....	58
4.3.1 Vergleich mit den theoretischen Schubsteifigkeiten nach Strehl aus [44] .....	58
4.3.2 Verifizierung anhand der durchgeführten Großversuche .....	59
4.3.3 Vergleich mit den von Dürr in [33] beschriebenen Versuchen .....	64
4.3.4 Vergleich mit von Walter in [45] beschriebenen Versuchen .....	65
<b>Kapitel 5 Numerische Voruntersuchungen</b> .....	69
5.1 Allgemeines .....	69
5.2 Trapezprofilkonstruktionen unter Schubbelastung .....	69
5.2.1 Einfluss von zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln .....	69
5.2.2 Einfluss von Profilüberständen auf Schubfelder unter einer Schubbelastung ...	71

5.2.3	Vergleich zwei- und vierseitig starr gelagerter Profile bei Schubbelastung . . .	75
5.2.4	Vergleich von nachgiebiger/ starrer vierseitiger Lagerung bei Schubbelastung	77
5.2.5	Zweiseitig nachgiebig gelagerte Trapezprofile bei Schubbelastung . . . . .	82
5.3	Trapezprofilkonstruktionen unter Einfeldträgerbelastung . . . . .	85
5.3.1	Vierseitige starre Lagerung - Einfeldträger- /Schubbelastung $S_{E4s}/S_{S4s}$ . . . . .	85
5.3.2	Starre zwei-/ vierseitiger Lagerung $S_{E2s}/S_{E4s}$ bei Einfeldträgerbelastung . . . . .	88
5.3.3	Vierseitige nachgiebige/ starrer Lagerung $S_{E4n}/S_{E4s}$ bei Einfeldträgerbelastung	92
5.3.4	Zweiseitige nachgiebige/ starre Lagerung $S_{E2n}/S_{E2s}$ bei Einfeldträgerbelastung	95
5.3.5	Nachgiebige zwei-/ vierseitigen Lagerung $S_{E2n}/S_{E4n}$ bei Einfeldträgerbelastung	97
5.3.6	Nachgiebige zweiseitige Lagerung unter Einfeldträgerbelastung/ Steifigkeiten nach Strehl $S_{E2n}/S_{Strehl}$ . . . . .	99
<b>Kapitel 6</b>	<b>Parametrische Untersuchungen.</b> . . . . .	<b>103</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	103
6.2	Parameterstudien. . . . .	104
6.2.1	Allgemeines . . . . .	104
6.2.2	Profil HSA 39/183 . . . . .	107
6.2.3	Profil 35/207 . . . . .	113
6.2.4	Profil UB 85/280 . . . . .	114
6.2.5	Profil 106/250 . . . . .	115
6.2.6	Profil 135/310 . . . . .	116
6.2.7	Profil 150/280 . . . . .	117
6.2.8	Profil EKO 160/250 . . . . .	118
<b>Kapitel 7</b>	<b>Mechanisches Modell und vereinfachte Berechnung.</b> . . . . .	<b>119</b>
7.1	Mechanisches Modell . . . . .	119
7.2	Bestätigung des vereinfachten Balkenmodells . . . . .	125
7.3	Statistische Betrachtung . . . . .	141
7.4	Beispielrechnung. . . . .	143
7.5	Einfluss einer Schubsteifigkeit S anhand eines Beispiels. . . . .	145
<b>Kapitel 8</b>	<b>Verallgemeinertes Verfahren</b> . . . . .	<b>147</b>
8.1	Allgemeines . . . . .	147
8.2	Verallgemeinertes Modell. . . . .	147
8.3	Bestätigung des verallgemeinerten Berechnungsmodells. . . . .	150
8.4	Statistische Betrachtung . . . . .	157
8.5	Beispielrechnung. . . . .	159
<b>Kapitel 9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.</b> . . . . .	<b>163</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>165</b>
	<b>Anhang A - Versuche</b> . . . . .	<b>169</b>
	<b>Anhang B - Parameterstudien.</b> . . . . .	<b>199</b>

# Bezeichnungen

## Großbuchstaben

A	Fläche der Querträger
$A_q$	Schubfläche der Querträger
$B_R$	Länge einer Profilperiode
$C_{ges}$	Resultierende Ersatzfedersteifigkeit des Ersatzbalkens mit $S^*$ [ $kN/cm$ ]
$C_Q$	Federsteifigkeit der Querrandverbindungsmittel [ $kN/cm$ ]
$C_Q^*$	modifizierte Federsteifigkeit der Querrandverbindungsmittel [ $kN/cm$ ]
$C_{Quer}$	Resultierende Federsteifigkeit der Verbindungsmittel am Querrand [ $kN/cm$ ]
$C_{Stoß}$	Resultierende Federsteifigkeit der Verbindungsmittel im Profilstoß [ $kN/cm$ ]
$C_{Trapez}$	Resultierende Federsteifigkeit der Trapezprofile [ $kN/cm$ ]
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft [ $kN$ ]
$F_{Amp}$	Amplitude der Sinuslast am Einfeldträger [ $kN/cm$ ]
G	Schubmodul
$G_s$	Schubmodul eines Schubfeldes [ $kN/m$ ]
I	Flächenträgheitsmoment
$I_T$	Torsionssteifigkeit
$I_T^*$	ideelle Torsionssteifigkeit
$I_w$	Wölbträgheitsmoment
$I_z$	Flächenträgheitsmoment um die schwache Trägerachse
L	Länge der Querträger
$L_s$	Stützweite der Trapezprofile
$M_{Ki}$	ideales Biegedrillknickmoment
$M_{pl,y}$	plastisches Moment des Trägers um die starke Biegeachse
S	Ersatzschubsteifigkeit

$S^*$	Schubsteifigkeit des Ersatzträgers am vereinfachten elastisch gekoppelten Stabwerk (aus Trapezprofil, Stoßsteifigkeit und Querrandsteifigkeit)
$S_{id}$	entspricht $S$
$S_{FE-Strehl}$	errechnete Schubsteifigkeit aus der FE-Nachrechnung von $S_{Strehl}$
$S_{2-dim}$	errechnete Schubsteifigkeit bei zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln ohne Profilüberstand
$S_{E2n}$	errechnete Schubsteifigkeit zweiseitig befestigter Trapezprofile unter Einfeldträgerbelastung mit nachgiebigen Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{E2s}$	errechnete Schubsteifigkeit zweiseitig befestigter Trapezprofile unter Einfeldträgerbelastung mit starren Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{E4n}$	errechnete Schubsteifigkeit vierseitig befestigter Trapezprofile unter Einfeldträgerbelastung mit nachgiebigen Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{E4s}$	errechnete Schubsteifigkeit vierseitig befestigter Trapezprofile unter Einfeldträgerbelastung mit starren Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{S2n}$	errechnete Schubsteifigkeit zweiseitig befestigter Trapezprofile unter Schubbelastung mit nachgiebigen Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{S2s}$	errechnete Schubsteifigkeit zweiseitig befestigter Trapezprofile unter Schubbelastung mit starren Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{S4n}$	errechnete Schubsteifigkeit vierseitig befestigter Trapezprofile unter Schubbelastung mit nachgiebigen Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{S4s}$	errechnete Schubsteifigkeit vierseitig befestigter Trapezprofile unter Schubbelastung mit starren Verbindungsmitteln mit 50mm Profilüberstand
$S_{Stab}$	resultierende Schubsteifigkeit nach dem vereinfachten Berechnungsverfahren am Stabwerk
$S_{Strehl}$	theoretische Schubsteifigkeit nach <i>Strehl</i> [43]
$T$	Schubfluss [ $kN/m$ ]
$T_i$	zulässige Schubflüsse nach Strehl ( $i=1$ bis $3$ )
$V$	resultierende Schubkraft

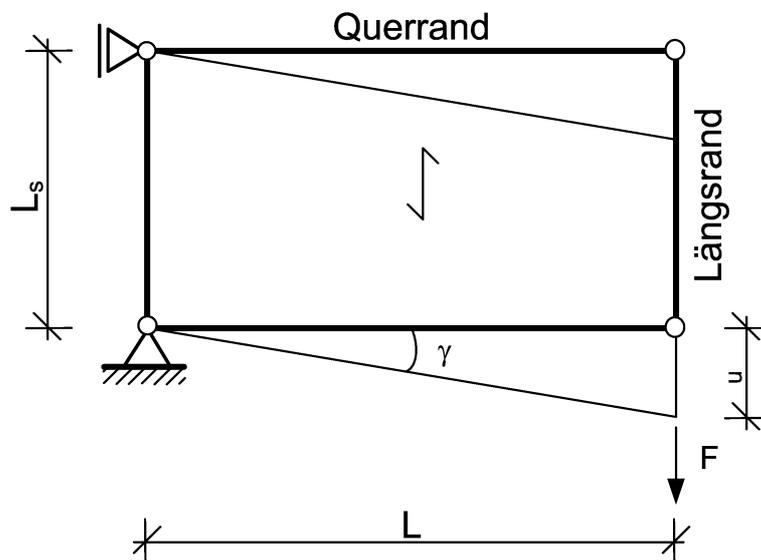
## Kleinbuchstaben

a, b, c	Koeffizienten zur rechnerischen Ermittlung der Schubsteifigkeit $S_{S4s}$
$c_g$	Drehfedersteifigkeit
$c_{gA}$	Drehbettung aus der Anschlussverformung
$c_{gM}$	Drehbettung aus der Biegesteifigkeit des abstützenden Bauteils
$c_{gP}$	Drehbettung aus der Profilverformung
$c_S$	Federsteifigkeit der Verbindungsmittel in den Profilstößen [ $kN/cm^2$ ]
$c_y$	Bettungssteifigkeit der Wegfeder senkrecht zum Träger [ $kN/cm^2$ ]
$e_L$	Abstand der Verbindungsmittel am Längsrand
$e_Q$	Abstand der Querrandverbindungsmittel
$e_s$	Abstand der Verbindungsmittel an den Profilstößen
$f_{y,k}$	Streckgrenze
h	Trägerhöhe
$k_g$	Drehbettungsbeiwert
$l_{gr}$	Grenzstützweite, ab welcher die Trapezprofile nicht mehr zum Lastabtrag herangezogen werden dürfen
m, n	Koeffizienten für die Modifizierung von $C_Q$
t	Blechdicke der Trapezprofile
$t_N$	Nennblechdicke der Trapezprofile
u	Verschiebung

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Seitenverhältnis des Schubfeldes $L_s/L$
$\beta$	Beiwert für die Ermittlung der resultierenden Ersatzschubsteifigkeit $S$
$\gamma$	Schubwinkel
$\gamma_g$	globaler Sicherheitsbeiwert
$\gamma_F$	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand
$\overline{\lambda}_M$	Bezogener Schlankheitsgrad
$\mu$	Querdehnzahl

## Schubfeldbezeichnungen



$F$	Kraft [ $kN$ ]
$L$	Länge der Querträger
$L_s$	Stützweite der Trapezprofile
$\gamma$	Schubwinkel
$u$	Verschiebung

---

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Allgemeines

Stahltrapezprofile besitzen als raumabschließende und lastabtragende Bauteile ein breites Anwendungsspektrum im Bauwesen. Als vorrangiges Anwendungsgebiet sind vor allem der Hallen- und Industriebau zu nennen.

Die Basis für die Herstellung und breite Anwendung von Trapezprofilen wurde in den 50er und 60er Jahren mit der Entwicklung der Bandverzinkung und dem kontinuierlichen Rollformverfahren gelegt. Damit wurde es möglich, verschiedenste Profile in großen Längen und ausreichender Stückzahl unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu produzieren.

Mit der zunehmenden Verbreitung der Trapezprofile erweiterte sich auch deren Einsatzgebiet. Die Profile wurden nicht mehr nur zum Abtrag senkrecht zu ihrer Ebene wirkender Lasten sondern auch zur Aufnahme von Aussteifungs- und Stabilisierungskräften in der Profilebene eingesetzt. Diese Form des Lastabtrags ist auch Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit.

Die Voraussetzung, um Trapezprofile mit ihrer aussteifenden Wirkung berücksichtigen zu können, ist nach dem Stand der Normung die Ausbildung als Schubfeld erforderlich, siehe [48]. Die Profile müssen dazu untereinander und an allen vier Rändern mit der Unterkonstruktion verbunden sein. Dies ist oft mit einem erhöhten Konstruktionsaufwand verbunden, da nicht immer alle Randprofile in einer Ebene liegen bzw. vorhanden sind und eine allseitige Befestigung dadurch nicht ohne Weiteres problemlos möglich ist.

Mit der verstärkten Anwendung der Profile wurde auch die Entwicklung analytischer Berechnungsmethoden vorangetrieben. Das erste im deutschsprachigen Raum angewendete rechnerische Verfahren wurde in den 60er Jahren von *Steinhardt/Einsfeld* entwickelt. Durch die Einschränkungen denen das Verfahren unterlag, wurde aufgrund der Neuentwicklung weiterer Profilformen vor allem in den 70er Jahren eine Erweiterung der Berechnungsmethoden erforderlich. *Schardt/Strehl* entwickelten das bis heute angewandte Berechnungsverfahren, welches auch in die Normung [48] Eingang gefunden hat.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der Schubsteifigkeit zweiseitig gelagerter Trapezprofile. Das Augenmerk liegt auf der aussteifenden Wirkung der Profile für biegedrillknickgefährdete Träger. Dabei soll der Einfluss von nachgiebigen Verbindungsmitteln berücksichtigt werden.

Um sich dem Thema zu nähern, ist zunächst die Auseinandersetzung mit den theoretischen Grundlagen zum Biegedrillknicken und zu den angewandten Schubfeldtheorien erforderlich. Insbesondere ist hierfür das Verfahren nach *Schardt/Strehl*, als das in der Normung [48] angewandte Verfahren, von Bedeutung.

Das Verfahren beruht auf einem analytischen Lösungsansatz für regelmäßige periodisch aufgebaute Falwerke. Als wichtigste Randbedingung für das Verfahren ist die vierseitige starre Lagerung der Profile zu nennen. Nachgiebigkeiten aus Verbindungsmitteln oder Profilstößen werden vollständig vernachlässigt. Als Belastung wird eine reine Schubverformung auf das Schubfeld aufgebracht.

Das Verfahren unterliegt verschiedenen Einschränkungen. So stellt die Vernachlässigung der Verbindungsmittelnachgiebigkeiten einen erheblichen Unsicherheitsfaktor dar. Sie besitzen einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Steifigkeit von Schubfeldern. Dies wird auch aus anderen Untersuchungen deutlich, siehe *Walter* [45], *Saal et al.* [33] und *Baehre* [3].

Als weitere Einschränkung ist die erforderliche Ausbildung eines Schubfeldes zu nennen. Bei ausschließlich zweiseitiger Befestigung der Trapezprofile darf deren Schubsteifigkeit nach angewandter Norm [48] nicht angesetzt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden der Einfluss der Verbindungsmittelnachgiebigkeiten und der Lagerungsart auf die Gesamtsteifigkeit von Trapezprofilkonstruktionen berücksichtigt. Es werden verschiedene Trapezprofile mit unterschiedlichen Verbindungsmittelkonfigurationen und Lagerungsarten untersucht. Die Untersuchungen werden mit Hilfe eines Finite-Element-Modells geführt. Zur Verifizierung des Modells werden sowohl eigene als auch in der Literatur beschriebene Versuche herangezogen. Die eigenen Versuche werden an zweiseitig gelagerten Trapezprofilen durchgeführt.

Da im Rahmen der Arbeit vorrangig die aussteifende Wirkung für biegedrillknickgefährdete Träger untersucht werden soll, ist die Art der Belastung der Konstruktion von großer Bedeutung. Im Falle des Biegedrillknickens treten keine reinen Schubverformungen an

den Trapezprofilen auf. Vielmehr entstehen Abtriebskräfte, welche näherungsweise der seitlichen Biegelinie der Träger folgen. Um dies genauer zu betrachten, wird neben der reinen Schubbelastung auch eine Einfeldträgerlast mit der Form eines Sinusverlaufs untersucht.

Die zuvor beschriebenen Betrachtungen werden als Grundlage für die durchzuführenden Parameterstudien verwandt. Es werden Berechnungen an insgesamt sieben verschiedenen Trapezprofilen mit jeweils vier Blechdicken  $t_N$  durchgeführt. Als Variationsparameter sind die Trapezprofillänge  $L_s$ , die Querträgerlänge  $L$ , die verschiedenen Verbindungsmittelsteifigkeiten und die Biegesteifigkeit der Querträger zu betrachten.

Mit Hilfe der durchgeführten Parameterrechnungen wird im Anschluss ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für die Schubsteifigkeit  $S$  zweiseitig gelagerter Trapezprofile mit nachgiebigen Verbindungsmitteln unter einer Einfeldträgerbelastung entwickelt und vorgestellt.

Auf diese Weise lässt sich die positive Wirkung der Schubsteifigkeit  $S$  der Trapezprofile auch bei fehlender Schubfeldausbildung für den Nachweis des Biegedrillknickens berücksichtigen.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Im ersten Teil der Arbeit, Kapitel 2, wird der Stand der technischen Regeln und der Forschung dargelegt. Die notwendige Einordnung in diesen Bereich soll ebenfalls erfolgen.

Im anschließenden Kapitel 3 werden im Rahmen der Arbeit durchgeführte Versuche an verschiedenen Trapezprofilen beschrieben. Bei den Versuchen handelt es sich zum ersten um Zugversuche an Materialproben aus den verwendeten Trapezprofilen. Als zweites werden Abscherversuche zur Untersuchung des nichtlinearen Last-Verformungsverhaltens mit verschiedenen Verbindungsmitteln durchgeführt. Als drittes sind an zwei Trapezprofiltypen durchgeführte Großversuche beschrieben.

Ein Finite-Element-Modell, welches für weitere Untersuchungen verwendet werden soll, wird in Kapitel 4 beschrieben und anhand verschiedener Versuche verifiziert.

In Kapitel 5 sind verschiedene Vorbetrachtungen erläutert. Es werden Berechnungen an Schubfeldern und an nur zweiseitig befestigten Profilen durchgeführt. Die Belastung der Modelle erfolgt sowohl durch eine Schubbelastung als auch durch eine Abtriebskräfte widerspiegelnde Sinuslast.

Im Kapitel 6 sind Parameterstudien an zweiseitig befestigten Trapezprofilen unter einer sinusförmigen Streckenlast beschrieben. Es werden sieben verschiedene Profile mit jeweils vier Blechdicken  $t_N$  und verschiedenen Abmessungs- und Verbindungsmittelkonfigurationen untersucht.

Eine vereinfachte Berechnungsmethode wird in Kapitel 7 abgeleitet und vorgestellt. Es wird ein vereinfachtes Stabwerksmodell entwickelt, mit welchem sich mit Hilfe verschiedener Parameter auf einfachem Wege die Ersatzschubsteifigkeit  $S$  für die Trapezprofile bestimmen lässt. Anschließend wird das Verfahren anhand der in Kapitel 6 beschriebenen Parameterstudien verifiziert. Zur Veranschaulichung ist die Vorgehensweise anhand eines Rechenbeispiel noch einmal dargestellt.

Für die praktische Verwendung des in Kapitel 7 beschriebenen vereinfachten Berechnungsverfahrens sind für jeden Trapezprofiltyp verschiedene Parameter erforderlich. Da diese Parameter in Kapitel 7 nur für die betrachteten sieben Trapezprofiltypen ermittelt wurden, steht keine allgemein gültige Berechnungsmethode für beliebige Profiltypen zur Verfügung. Um diese Lücke zu schließen, wird in Kapitel 8 ein verallgemeinertes Verfahren auf der Grundlage des vereinfachten in Kapitel 7 beschriebenen Verfahrens vorgestellt.

In Kapitel 9 wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

## Kapitel 2

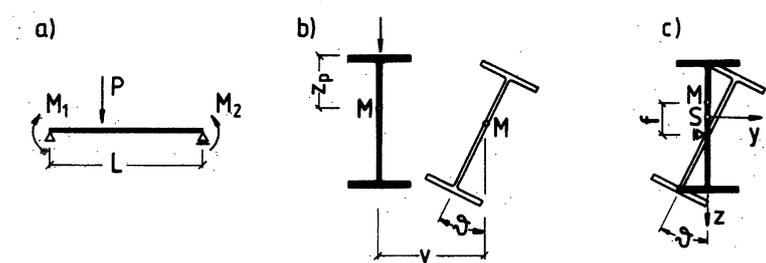
### Stand der Technik und Forschung

#### 2.1 Allgemeines

Um die aussteifende Wirkung von zweiseitig gelagerten Stahltrapezprofilen beurteilen zu können, ist es zunächst erforderlich, sich mit den bereits bekannten theoretischen Hintergründen näher zu befassen. Deshalb werden in diesem Kapitel nähere Ausführungen zum Biegedrillknicken, zu Trapezprofilen, ihren Verbindungsmitteln und der bisherigen Berücksichtigung der aussteifenden Wirkung von Trapezprofilen gemacht. Daneben wird auch auf neuere Untersuchungen zu dem Thema eingegangen.

#### 2.2 Biegedrillknicken

Beim Biegedrillknicken handelt es sich um eine Form des Stabilitätsversagens von biegebeanspruchten Bauteilen. Bei dieser Versagensform treten unter einer kritischen Last seitliche Verschiebungen und Verdrehungen auf, siehe Bild 2.1.

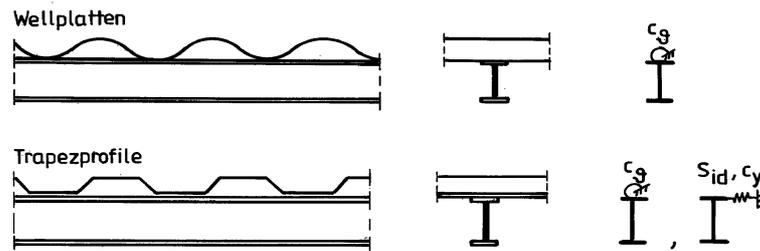


**Bild 2.1** Verformungsmöglichkeiten beim Biegedrillknicken a) System, b) freie Drehachse, c) gebundene Drehachse, *Lindner et al.* [26]

Der allgemeine Fall ist im Bild 2.1b) dargestellt. Es treten Verdrehungen und seitliche Verformungen gleichzeitig auf. Unter bestimmten Randbedingungen kann aber auch der Fall entstehen, dass ein beliebiger Querschnittspunkt seitlich unverschieblich gehalten ist, siehe Bild 2.1c). Man spricht dann von einer gebundenen Drehachse.

Da beim Stabilitätsversagen die plastische Tragfähigkeit der Querschnitte nicht erreicht wird, ist man aus Wirtschaftlichkeitsgründen bestrebt, diese Versagensform nach Möglichkeit zu vermeiden. Aus diesem Grund ist man bestrebt, die steifigkeitserhöhende Wirkung angrenzender Bauteile zu berücksichtigen. Rechnerisch lassen sich diese Bauteile durch die Anordnung von Drehfedern bzw. -bettungen  $c_\varphi$  und/oder Wegfedern bzw. -bettungen  $c_y$  bzw. Schubsteifigkeiten  $S_{id}$  an den Querschnitten erfassen. Im Bild 2.2 ist bei-

spielhaft die Wirkung von Wellplatten und Trapezprofilen dargestellt. Die Berücksichtigung angrenzender Bauteile ist im Besonderen im Stahlhochbau üblich, zu nennen ist hier unter anderem der Hallenbau. Die vorhandene Außenhülle einer Halle, beispielsweise in Form von Trapezprofilen, kann tragfähigkeitserhöhend in Ansatz gebracht werden. Für die vorliegende Arbeit sind Trapezprofile von besonderem Interesse. Sie zeichnen sich durch eine gemeinsame Wirkung von Dreh- und Wegbettung bzw. Schubsteifigkeit aus.



**Bild 2.2** Stabilisierung von Trägern durch angrenzende Bauteile, *Lindner et al.* [27]

In den nationalen [47] und internationalen [50], [51] Normen haben diese Effekte bereits Eingang gefunden. Für den Ansatz der Drehbettung sind bereits umfangreiche Untersuchungsergebnisse vorhanden, die im Besonderen auf zahlreiche am Fachgebiet Stahlbau der TU Berlin durchgeführte Versuche zurückzuführen sind, siehe hierzu *Lindner* [22], *Lindner et al.* [25], *Lindner* [20] und *Lindner et al.* [24].

Für die Nachweisführung stehen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Verfügung. Als erstes besteht die Möglichkeit des Nachweises über eine vorhandene Mindestdrehsteifigkeit. Wird die Mindestdrehsteifigkeit  $\text{erf } c_g$  erreicht, kann ein weiterer Nachweis entfallen. Hierzu ist die Beziehung (2.1) unter Berücksichtigung von (2.2) und (2.3) auszuwerten.

$$\frac{\text{erf } c_g}{\text{vorh } c_g} \leq 1 \quad (2.1)$$

$$\text{erf } c_g = k_g \frac{M_{pl,y}^2}{EI_z} \quad (2.2)$$

$$\text{vorh } c_g = \frac{1}{\frac{1}{c_{gM}} + \frac{1}{c_{gA}} + \frac{1}{c_{gP}}} \quad (2.3)$$

mit

$c_{9M}$  [kNm/m]theoretische Drehbettung aus der Biegesteifigkeit des abstützenden Bauteils

$c_{9A}$  [kNm/m]Drehbettung aus der Verformung des Anschlusses

$c_{9P}$  [kNm/m]Drehbettung aus der Profilverformung

Der Beiwert  $k_9$  ist auf der Grundlage der Biegedrillknickkurve nach DIN 18800-2 für die freie und die gebundene Drehachse beispielsweise in [47] und [51] angegeben. Weitere Angaben zum Momentenbeiwert  $k$  sind in der Literatur enthalten, siehe hierzu *Roik et al.* [32] und *Dickel et al.* [9].

Sollte dieser Nachweis nicht erfüllt werden können, besteht die Möglichkeit, die vorhandene Drehbettung  $c_9$  bei der Berechnung des idealen Biegedrillknickmomentes  $M_{Ki}$  zu berücksichtigen. Dies kann am einfachsten über die näherungsweise Berücksichtigung einer ideellen St. Venantschen Torsionssteifigkeit  $I_T^*$  nach (2.4) erfolgen.

$$I_T^* = I_T + \text{vorh } c_9 \frac{L^2}{\pi^2 G} \quad (2.4)$$

Die Berücksichtigung einer vorhandenen Schubsteifigkeit  $S_{id}$  erfolgt etwas anders. Nach DIN 18800-2 wird für einen Träger die Schubsteifigkeit gesucht, für die sich eine gebundene Drehachse am Querschnitt einstellt. Vereinfacht wird eine gebundene Drehachse als erreicht angesehen, wenn das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{Ki}$  95% des Wertes annimmt, der zum Erreichen einer gebundenen Drehachse nötig ist. Dies gilt als erfüllt, wenn Gleichung (2.5) gilt.

$$S \geq \left( EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_T + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2} \quad (2.5)$$

Der in der Gleichung enthaltene Wert 70 gilt für das Mittelfeld eines Durchlaufträgers unter einer Querlast, wenn die Schubsteifigkeit und die Querlast am Obergurt des Trägers angreifen. Er liegt für alle übrigen Fälle auf der sicheren Seite und kann damit für alle Lastfälle verwendet werden. Es können aber auch günstigere Werte berücksichtigt werden, z.B. gilt für Träger ohne Querlast der Wert 20.

Eine andere Methode geht auf Untersuchungen, insbesondere von *Heil*, aus Karlsruhe zurück. Danach wird beschrieben, dass das Tragmoment  $M_{pl,y}$  von biegebeanspruchten Trägern als erreicht angesehen werden kann, wenn die Schubsteifigkeit  $S = S_u$  Gleichung (2.6) erfüllt, siehe *Heil* [16] und *Sauer et al.* [34].

$$S_u \geq \frac{10,2 M_{pl,y}}{h} \quad (2.6)$$

Gleichung (2.6) wurde für einen Einfeldträger unter einer konstanten Gleichstreckenlast abgeleitet. Die auftretenden seitlichen Verformungen  $v$  und die Querschnittsverdrehungen  $\vartheta$  werden durch einen einwelligen Sinusverlauf beschrieben.

Die erforderliche Schubsteifigkeit  $S_u$  wird darin so definiert, dass der bezogene Schlankheitsgrad  $\overline{\lambda}_M$  gerade den Wert  $\overline{\lambda}_M = 0,4$  erreicht und ein gesonderter Biegedrillknicknachweis somit entfallen kann. Bei Gleichung (2.6) handelt es sich um eine obere Grenze für den Belastungsfall einer konstanten Streckenlast. Sie gilt für beliebige Trägerlängen. Bei kurzen Trägern genügen in Realität zum Teil deutlich geringere Schubsteifigkeiten  $S_u$ , um eine ausreichende Sicherheit gegen Biegedrillknicken zu gewährleisten.

Für andere Lastfälle und Durchlaufträger kann die Gleichung nur bedingt eingesetzt werden. Vor allem bei durchschlagenden Momentenverläufen können die Werte deutlich auf der unsicheren Seite liegen. Die Ergebnisse der Gleichung (2.6) sind stets mit größter Sorgfalt zu betrachten.

In *Lindner* [23] werden zu dem Thema weiterführende Ausführungen zu den Randbedingungen und damit verbundenen Einschränkungen der Gültigkeit dieser Gleichung gemacht.

Aus *Heil* [16] geht ebenfalls klar hervor, dass sich bereits relativ geringe Schubsteifigkeiten sehr positiv auf das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{Ki}$  auswirken. Diese Wirkung sollte also auf jeden Fall ausgenutzt werden.

Für beide Vorgehensweisen ist mit  $S$  bzw.  $S_u$  die Schubsteifigkeit gemeint, die durch ein ideales Schubfeld nach [48] erzeugt wird. Dies bedeutet, dass die Trapezprofile untereinander und mit ihren Rändern schubfest verbunden sind. Des Weiteren müssen die Profile in jeder Sicke mit der Unterkonstruktion verbunden werden. Ist bloß jede zweite Sicke angeschlossen, sind nach [47] näherungsweise nur noch 20% der theoretischen Schubsteifigkeit anzusetzen.

Lassen sich beide Gleichungen nicht erfüllen, kann die vorhandene Schubsteifigkeit  $S$  analog zur Drehbettung  $c_\vartheta$  bei der Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes  $M_{Ki}$  berücksichtigt werden. Es gibt allerdings keine einfachen allgemein gültigen Formeln für beliebige Lastfälle, mit deren Hilfe sich die idealen Biegedrillknickmomente bestimmen lassen. In der Regel muss für diese Fälle auf Computerprogramme, z.B. *Bamm et al.* [6],

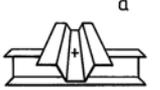
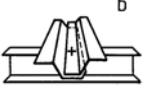
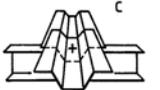
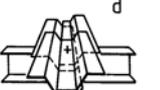
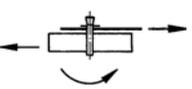
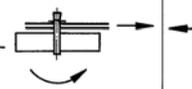
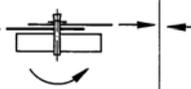
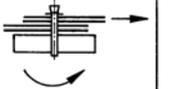
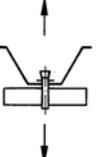
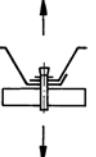
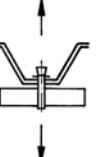
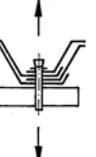
zurückgegriffen werden. Für einzelne Lastfälle werden aber auch Lösungen in der Literatur angegeben, siehe beispielsweise *Roik et al.* [32], *Dickel et al.* [9] und *Fischer* [15].

Weitere Erläuterungen zum Biegedrillknicken, den zugehörigen Nachweisformen und der Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes sind auch in *Lindner* [21], *Petersen* [30] und *Lawson et al.* [19] enthalten.

### 2.3 Verbindungsmittel

Für die Verbindung von Trapezprofilen mit ihrer Unterkonstruktion oder untereinander an den Profilstößen sind eine Reihe verschiedener Verbindungsmitteltypen vorhanden. Es werden im Regelfall zwei Bauteile miteinander verbunden, wobei das Profil mit der geringeren Blechdicke allgemein als Bauteil I und das dickere mit Bauteil II bezeichnet wird.

Die Belastung von Befestigungsmitteln erfolgt durch Scher- und/oder Längskräfte. In [49] sind die prinzipiellen Belastungsarten und Befestigungstypen definiert, siehe Bild 2.3.

Verbindungstypen	 einfache Verbindung	 Längsstoß	 Querstoß	 Längs- und Querstoß
Querbelastrung z.B. durch Wind, Temperatur, Schnee, Eigengewicht, Deckenlasten				
Zugbelastrung z.B. durch Windsog				

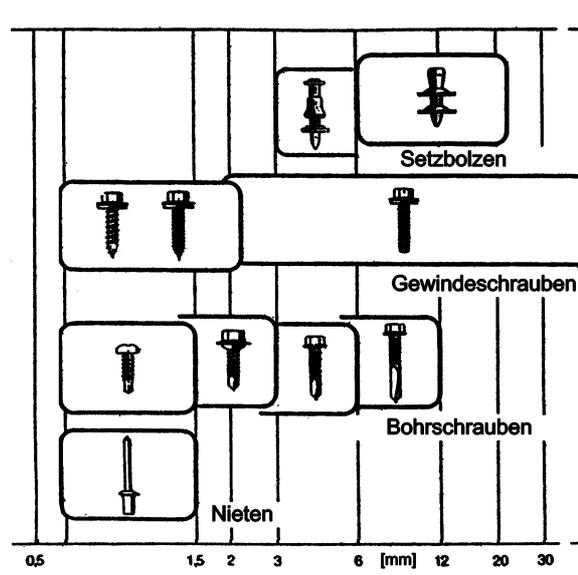
**Bild 2.3** Belastungsarten und Befestigungstypen nach [49]

Die Bemessung erfolgt über die Angabe zulässiger Beanspruchungen, welche mit Hilfe von Versuchen ermittelt werden. Die zulässigen Kräfte für das Versagen auf Abscheren bzw. Längskräfte (Zug) sind in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für die einzelnen Verbindungsmittel zusammengestellt, siehe *DIBt* [17]. Im Falle einer kombinierten Beanspruchung aus Abscheren und Zugbeanspruchung sind in den Zulassungen Interaktionsgleichungen angegeben. Im Gegensatz zu Stahlbauverbindungen, bei denen die Ver-

bindungsmittel und die zu verbindenden Bauteile getrennt nachgewiesen werden, erfolgt die Bemessung für dünnwandige Konstruktionen anhand zulässiger Kräfte für die gesamte Verbindung. Eine normative Regelung für die Durchführung von Zulassungsversuchen ist in [49] dargestellt. Neben dem Entwurf der DIN 18807-4 wurden auch auf europäischer Ebene Regelungen für die Durchführung von Versuchen an Verbindungsmitteln zusammengestellt. Neben den Tests werden in den „Recommendations for Steel Constructions“ des *ECCS* Konstruktionsprinzipien und zulässige Steifigkeiten für verschiedene Verbindungsmittel angegeben, siehe *ECCS* [11] und *ECCS* [13].

Die Wahl des für die Verbindung am besten geeigneten Verbindungsmittels erfolgt anhand der zu übertragenden Beanspruchungen, der gewünschten Verbindungssteifigkeit und der zu verbindenden Bauteile. Als die wichtigsten mechanischen Verbindungsmittel sind Gewindeschrauben, Setzbolzen, Blindnieten und Bohrschrauben zu nennen. Die verschiedenen Einsatzgebiete in Abhängigkeit von der Profildicke der Unterkonstruktion sind in Bild 2.4 dargestellt.

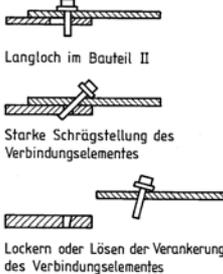
Für den Nachweis ihrer Tauglichkeit müssen die Verbindungsmittel verschiedene mechanische Grundvoraussetzungen erfüllen. Da für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Versuche aufgrund der Scheibenbeanspruchung der Trapezprofile lediglich die Scherfestigkeit der Verbindungsmittel von Bedeutung ist, werden nachfolgend nur die für Schertests erforderlichen Angaben kurz dargestellt.



**Bild 2.4** Einsatzbereich von Befestigungselementen in Abhängigkeit von der Dicke der Stahlunterkonstruktion (Bauteil II), *Walter* [45]

Für das Verbindungsmittelversagen können verschiedene Mechanismen verantwortlich sein. Eine Übersicht kann Bild 2.5 entnommen werden. Die Versagenslast wird als die maximal erreichte Kraft bei einer Verschiebung bis 3 mm definiert. Die maximale Kraft kann bereits vor der Verformung von 3 mm erreicht werden. Das Erreichen der 3 mm Verschiebung ist hierbei nicht zwingend erforderlich. Für Konstruktionen, bei denen die Belastungen aus konstruktionsbedingten Zwängen (z.B. Temperaturbelastung), siehe *Schwarze et al.* [39], bei der Bemessung berücksichtigt werden, kann man dieses Verformungskriterium vernachlässigen. Es wird allerdings für alle Verbindungsmittel eine Mindestduktilität gefordert. Sie wird über eine Mindestverschiebung von 0,5 mm definiert. Auf diese Weise soll das plötzliche und spröde Versagen der Verbindungen verhindert werden. In *ECCS* [13] werden dafür detaillierte Ausführungen gemacht.

Die beiden darin definierten Anforderungen sind im Wesentlichen auch in den Normentwurf zu DIN 18807-4 [49] eingeflossen. Allerdings wird für die konstruktive Absicherung temperaturbedingter Beanspruchungen nur eine Verschiebungskapazität von 2 mm gefordert. Die maximal aufnehmbare Kraft wird aber weiterhin bis zu einer Verschiebung von 3 mm ermittelt.

Belastungsart	Versagendes Teil		
	Bauteil I	Verbindungselement	Bauteil II
Querbelastung	 <p>Langloch im Bauteil I</p>	 <p>Bruch des Verbindungselementes</p>	 <p>Langloch im Bauteil II</p> <p>Starke Schrägstellung des Verbindungselementes</p> <p>Lockern oder Lösen der Verankerung des Verbindungselementes</p>
Zugbelastung	 <p>Ausreißen, Ausstanzen des Bauteils I</p>  <p>Überziehen des Bauteils I</p>	 <p>Bruch des Verbindungselementes</p>	 <p>Auszug des Verbindungselementes</p>

**Bild 2.5** Versagensarten für Verbindungsmittel [49]

Zur Ermittlung der zulässigen Kräfte werden aus den durchgeführten Versuchen die 5% Fraktilwerte ermittelt. In den Zulassungen wird für die ermittelten Werte ein globaler

Sicherheitsbeiwert  $\gamma_g = 2,0$  festgelegt. Um der Verwendung des probabilistischen Sicherheitskonzeptes Rechnung zu tragen, ist für diese Berechnungsvariante zusätzlich ein Sicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 1,33$  definiert worden. Berücksichtigt man, dass die für die Bemessung relevanten Lastfälle mit Ausnahme des Eigengewichtes im Regelfall mit einem Sicherheitsbeiwert  $\gamma_F = 1,5$  belegt werden, ergibt sich ein ähnliches Sicherheitsniveau wie beim globalen Sicherheitskonzept.

Für weitere Ausführungen zur Versuchsdurchführung und den Charakteristika verschiedener Verbindungsmittel sei hier auf Abschnitt 3.2.2 verwiesen.

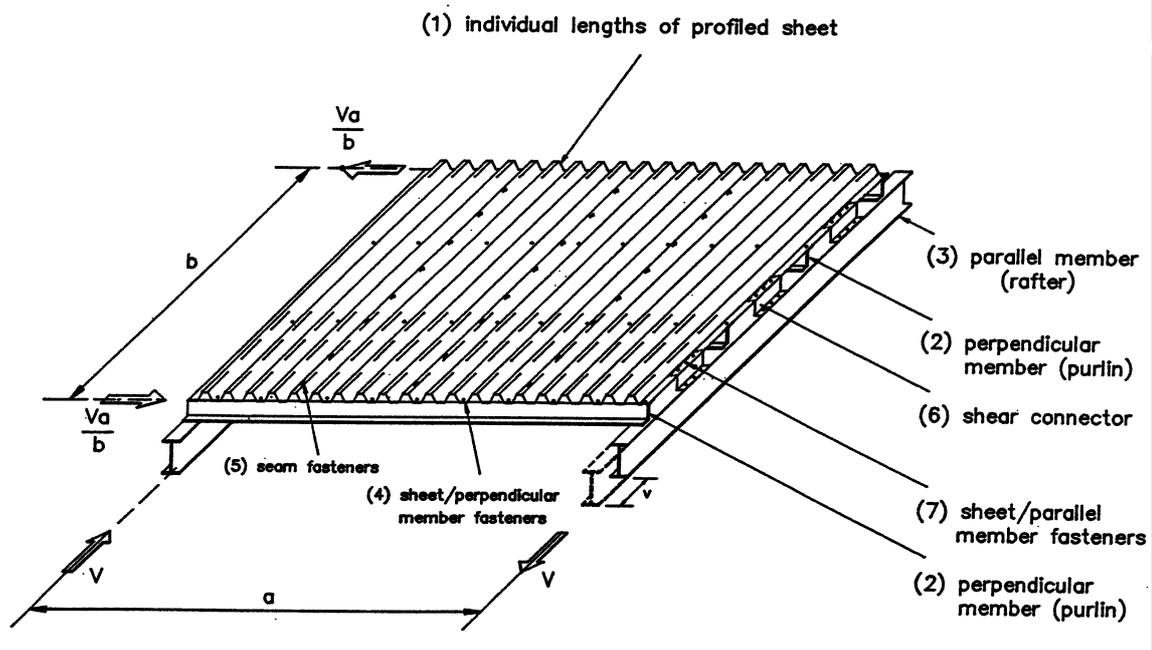
## 2.4 Schubfeldberechnungen

### 2.4.1 Allgemeines

Bei den zu untersuchenden Stahltrapezprofilen handelt es sich um periodisch aufgebaute regelmäßige Falwerke. Herstellerseitig werden verschiedenste Profilgeometrien angeboten, z.B. *Arcelor* [2]. Die Blechdicken bewegen sich zwischen einer Nennblechdicke  $t_N = 0,63$  mm und  $t_N = 1,5$  mm. Die Auswahl der Profilform erfolgt je nach dem gewünschten Einsatzgebiet. Die Profile finden unter anderem im Hallenbau Verwendung, wo sie als raumabschließende Bauteile eingesetzt werden.

Die Profile werden einerseits zum Abtrag senkrecht zu ihrer Ebene wirkenden Lasten, z.B. Schnee auf einer Dachfläche, eingesetzt. Erläuterungen zu diesem Thema können unter anderem [48], *Baehre et al.* [4], *Schwarze* [38], *Schwarze et al.* [40], *Möller et al.* [29] und *Maass* [28] entnommen werden. Auf detaillierte Ausführungen soll im Rahmen dieser Arbeit aber verzichtet werden, da diese Form des Lastabtrags nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

Des Weiteren ist die in dieser Ausarbeitung wichtigere Form des Lastabtrags in der Profilebene der Trapezprofile zu nennen. In diesem Fall können die Profile beispielsweise die Aufgaben von Windverbänden übernehmen. Zusätzlich werden sie, wie bereits unter Abschnitt 2.2 erwähnt, zur Stabilisierung von stabilitätsgefährdeten Trägern herangezogen. In *Schwarze et al.* [41] sind ausführliche Erläuterungen zu Lastannahmen und Bemessung für Schubfelder und auch zur Biegedrillknickaussteifung vorhanden. Wie bereits beschrieben wurde, besteht dafür nach dem bisherigen Stand der Normung die Notwendigkeit zur Ausbildung eines echten Schubfeldes. Nur unter dieser Voraussetzung darf die aussteifende Wirkung angesetzt werden. Eine Ausbildungsvariante für ein Schubfeld, bei dem Längs- und Querträger nicht in einer Ebene, ist in Bild 2.6 dargestellt.



**Bild 2.6** Variante einer Schubfeldkonstruktion, ECCS [11]

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass die Ausbildung eines Schubfeldes einen erhöhten Konstruktionsaufwand erfordert. Um alle vier Profilränder befestigen zu können, ist die Herstellung einer einheitlichen Lagerungsebene für die Trapezprofile erforderlich. In der in Bild 2.6 dargestellten Konstruktionsvariante erfolgt dies durch die Anordnung zusätzlicher Ausgleichselemente an den Längsrändern der Profile. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Querträger zwischen die Längsträger zu setzen. Dies würde jedoch zahlreiche aufwendige Anschlüsse erfordern.

Das erzeugte Schubfeld kann für den Abtrag von Schubkräften, dargestellt durch die Kraft  $V$ , oder zur Aussteifung der vorhandenen Querträger herangezogen werden. In diesem Fall ist die resultierende Schubsteifigkeit  $S_{id}$  des Gesamtfeldes auf alle auszusteifenden Träger zu verteilen. Die Verbindungsmittel sind für die zu übertragenden Kräfte zu bemessen. In Bild 2.7 ist noch einmal die schematische Abbildung eines klassischen Schubfeldes als ausgesteifter Viereckrahmen dargestellt. Die angegebenen Bezeichnungen werden auch in den nachfolgenden Kapiteln verwendet.

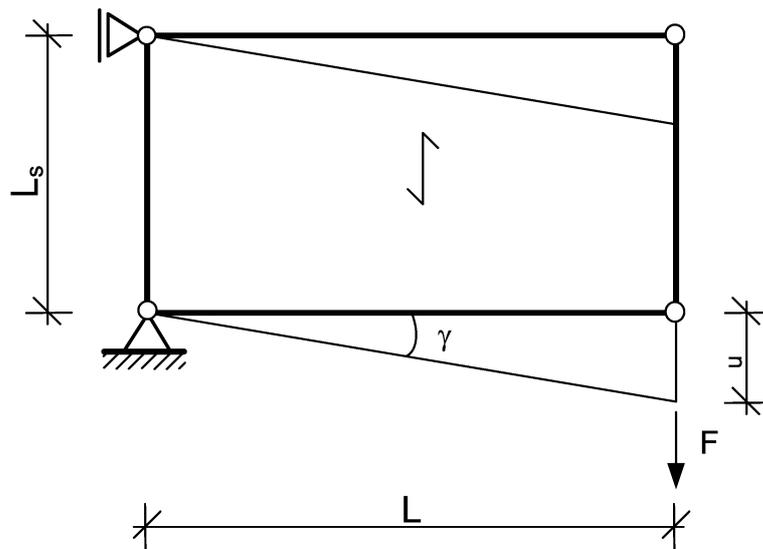


Bild 2.7 Schubfeldbezeichnungen

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\gamma = \frac{u}{L}$$

$$\gamma = \frac{F}{S_{id}} = \frac{F}{G_s L_s} = \frac{T}{G_s}$$

mit	$\gamma$	→	Schubwinkel [-]
	$F$	→	aufgebrachte Schubkraft [kN]
	$S_{id}$	→	Ideelle Schubsteifigkeit des Schubfeldes [kN]
	$L_s$	→	Stützweite der Trapezprofile [m]
	$L$	→	Breite des Schubfeldes [m]
	$G_s$	→	Schubmodul des Schubfeldes [kN/m]
	$T$	→	sich aus F ergebender Schubfluß [kN/m]

Die Ermittlung der Schubsteifigkeit ist für die Bemessung der Schubfelder von entscheidender Bedeutung. Bei dieser Steifigkeit handelt es sich per Definition um die Kraft, die nötig ist, um einen Schubwinkel von  $\gamma = 1$  zu erzeugen. Hierfür wurden verschiedene Untersuchungen und Lösungsansätze ermittelt, welche die Tragwirkung und Steifigkeit von Trapezprofilscheiben unter statischen Lasten beschreiben. Hier sind insbesondere *Strehl*, *Steinhardt* und *Bryan/Davies* zu nennen, siehe auch *Strehl* [43], *Steinhardt et al.* [42] und *Bryan* [7]. Die Untersuchungen führten zu verschiedenen Bemessungsmethoden.

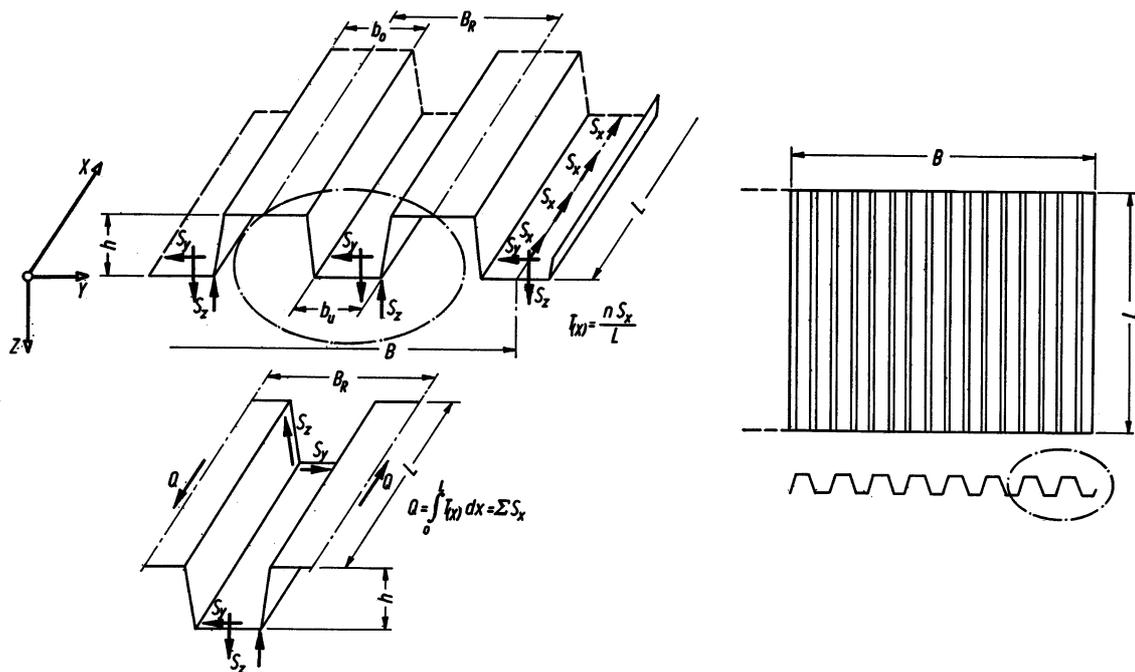
Im deutschsprachigen Raum hat sich das Modell *Schardt/Strehl* durchgesetzt, während im angelsächsischen und skandinavischen Raum das Modell von *Bryan/Davies* verbreitet ist. In den nachfolgenden Abschnitten sollen die einzelnen Verfahren erläutert und kurz beschrieben werden.

### 2.4.2 Verfahren nach Steinhardt/Einsfeld

Bei der Berechnungsvariante nach *Steinhardt/Einsfeld* handelt es sich um einen der ersten analytischen Lösungsvorschläge für die Berechnung periodischer Falwerke. Sie stellte Anfang der 70er Jahre das übliche Berechnungsverfahren dar und wird in *Steinhardt et al.* [42] folgendermaßen beschrieben:

Um Trapezprofile als Aussteifung eines Viereckrahmens ansetzen zu können, müssen die Profile ausreichend mit der Unterkonstruktion verbunden sein. Sie sind in jedem Untergurt, an den Längsrändern und in ausreichender Zahl an den Stößen der Profiltafeln miteinander zu verbinden. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, sind die Profile in der Lage die aufgebracht Schubkräfte durch Umlagerungen aufzunehmen. Der Lastabtrag erfolgt in erster Linie durch:

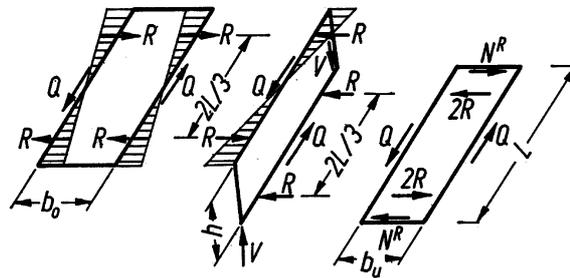
- a) Biegung in Querschnittsebene
- b) Torsion der ebenen Profile
- c) Schubbeanspruchung in der Ebene der Profile



**Bild 2.8** System: Querschnitt und Scheibenbelastung der Trapezprofile *Steinhardt et al.* [42]

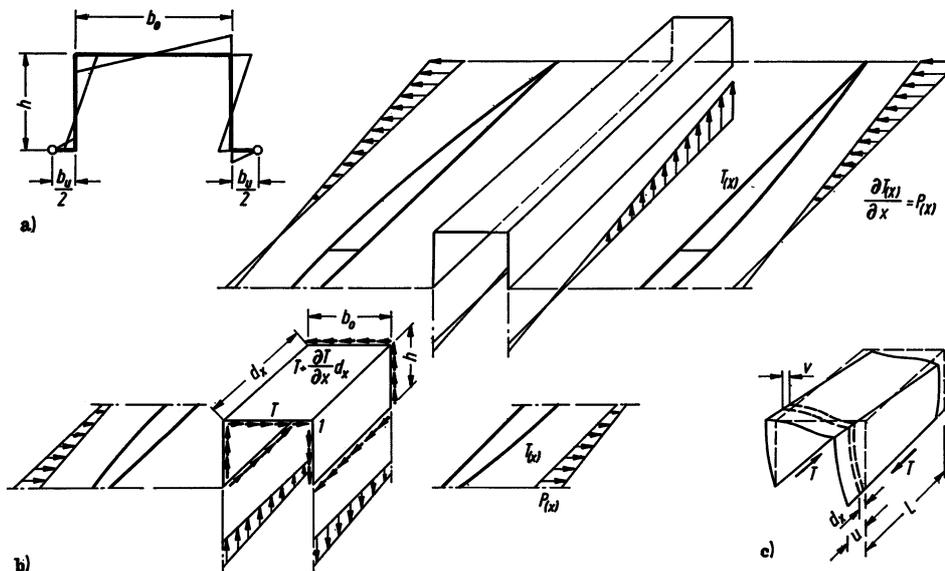
Im Bild 2.8 sind die in *Steinhardt et al.*[42] angenommenen Systemgrößen dargestellt. Darin ist ein Ausschnitt eines Trapezprofils unter einer Schubbeanspruchung abgebildet. Der Darstellung ist auch zu entnehmen, dass die Kontaktkräfte zwischen den Profilstege und der Unterkonstruktion in den Berechnungen erfasst werden. Zusätzlich ist eine einzelne Profilrippe mit den berücksichtigten Schnittgrößen abgebildet.

*Steinhardt* betrachtet eine Profilperiode der Breite  $B_R$  als symmetrisches System unter einer antimetrischen Belastung. Im Bild 2.9 sind die angenommenen Schnittgrößenverteilungen für die einzelnen Querschnittsteile dargestellt.



**Bild 2.9** Schnittgrößen für die einzelnen Querschnittsteile: Obergurt, Steg, Untergurt, *Steinhardt et al.*[42]

*Steinhardt* beschreibt in *Steinhardt et al.* [42] auch, dass der Einfluss der Schubverformung im Verhältnis zu den Verformungen aus Querbiegung und Torsion der Einzelquerschnitte lediglich einen geringen Anteil zu den Gesamtverformungen beiträgt. Im Bild 2.10 sind die prinzipiellen Verformungsverläufe sowie die Schnittgrößen abgebildet.



**Bild 2.10** Schnittkräfte und Verformungen der Rippe [42]

Der Einfluss aus den vorherrschenden Verformungen (Biegung und Torsion) wird anhand des Stückes einer Rippe der Länge  $dx$  untersucht. Dabei werden von *Steinhardt* verschiedene Vereinfachungen vorgesehen. Als erstes werden die Biege- und Torsionsspannungen im Profiluntergurt vernachlässigt. Gleiches trifft für die Neigung der Stege zu, wie auch schon aus den Abbildungen zu ersehen ist. Des Weiteren wird für das Rahmenbiegemoment ein linearer Verlauf angesetzt. Damit verbunden ist auch ein parabolischer Verlauf der Schubspannungen im Obergurt. In den Stegen und im Untergurt wird wegen der direkten Lasteinleitung eine konstante Schubspannungsverteilung vorausgesetzt.

Die Horizontalkraft, welche die Rahmenbiegung erzeugt, ergibt sich nach (2.7) zu:

$$p(x) = \frac{1}{2} b_o \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.7)$$

Das Moment für den  $dx$  tiefen Rahmen ergibt sich zu

$$M_y = \frac{1}{2} b_o h \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (2.8)$$

und die Verschiebung des Punktes 1 (obere Rahmenecke, siehe Bild 2.10) in Querrichtung ist

$$v = \left( \frac{h^2}{3} + \frac{b_o h}{6} \right) \frac{M_y}{EI} = \frac{2b_o h^3 + b_o^2 h^2}{12EI} \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (2.9)$$

Die vertikalen Kräfte werden durch die Profilstege direkt zu den Auflagern der Profile übertragen. Werden die „Arbeitsanteile“ aus der elastischen Einspannung der Stege im Untergurt und die örtliche Biegung der Untergurte bei den Verbindungen vernachlässigt, ergibt sich für das Element der Länge  $dx$  der innere Arbeitsanteil zu:

$$dA_i = \frac{1}{2} \left( b_o \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) v = \frac{1}{2} \left( \frac{2b_o^2 h^3 + b_o^3 h^2}{12EI} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial x} dx \right)^2 \quad (2.10)$$

Der parabolische Schubverlauf im Obergurt infolge des linearen Momentes führt zu folgender Darstellung:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{8T_{max}}{L^2} \left( \frac{L}{2} - x \right); \quad T_{max} = \frac{3}{2} T_{mittel} \quad (2.11)$$

Daraus folgt

$$dA_i = \frac{1}{2} \left( \frac{144b_o^2 h^2 (2h + b_o)}{Et^3 L} \right) T_{mittel}^2 \left( \frac{1}{4L} - \frac{x}{L^2} + \frac{x^2}{L^3} \right) dx \quad (2.12)$$

Ermittelt man nun alle inneren Formänderungsarbeiten (Biegung in der Querschnittsebene, parabolische Schubverteilung im Obergurt und konstanter Schubfluß in den Stegen und im Untergurt) und addiert diese, ergibt sich folgende innere Arbeit für jede Rippe:

$$A_i = \frac{1}{2} T_{\text{mittel}}^2 (1, 2b_o + 2h + b_u) \frac{L}{tG} + \frac{12h^2 b_o^2 (2h + b_o)}{Et^3 L} \quad (2.13)$$

Unter Berücksichtigung der äußeren Arbeit mit (2.14)

$$A_a = \frac{1}{2} T_{\text{mittel}} Lu \quad (2.14)$$

lässt sich die Schubverformung  $u$  und daraus letztlich der Scheibenmodul des Schubfeldes bestimmen. Der Scheibenmodul  $G^*$  ist in (2.15) angegeben.

$$G^* = \frac{1}{\frac{1, 2b_o + 2h + b_u}{GtB_R} + \frac{12h^2 b_o^2 (2h + b_o)}{Et^3 L^2 B_R}} \quad (2.15)$$

Mit dem ermittelten Wert  $G^*$  kann die Schubsteifigkeit für verschiedene Profile berechnet werden. Die Ergebnisse unterliegen allerdings den zuvor genannten Vereinfachungen. Um die Qualität der ermittelten Lösung zu überprüfen, wurden Versuche an verschiedenen Trapezprofilen durchgeführt. Die gemessenen Ergebnisse konnten anschließend mit den errechneten Werten verglichen werden. Die dargestellte Berechnungsmethode wurde allerdings nur durch wenige Versuche verifiziert. Die Entwicklung der Stahlleichtbauweise insbesondere in den 60er und 70er Jahren, siehe *Pöter* [31] und *Schwarze et al.* [40], führte zur Entwicklung und bauaufsichtlichen Zulassung weiterer neuer Profiltypen. Die im Verfahren gemachten Vereinfachungen konnten für diese Profile nicht mehr angewendet werden. Es wurde dadurch die Entwicklung eines erweiterten Berechnungsverfahrens notwendig.

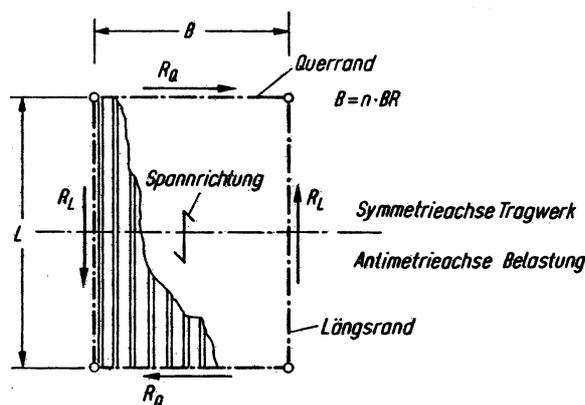
### 2.4.3 Berechnungsmethode nach Schardt/Strehl

Als zweites und für den deutschsprachigen Raum gegenwärtig wichtigstes Berechnungsverfahren sollen nun die Ansätze nach *Schardt/Strehl* näher erläutert werden. Bei dem genannten Verfahren handelt es sich um die der aktuellen Normung zu Grunde liegende Berechnungsmethode, siehe [48].

*Strehl* entwickelte das Berechnungsverfahren im Rahmen seiner Dissertation *Strehl* [43] zu regelmäßig periodisch aufgebauten Faltenwerken unter Schubbelastung. Das Verfahren baut auf der Theorie von *Schardt* auf. Er legte mit *Schardt* [35] die Grundlagen für die heute gültigen Berechnungsmethoden. Weitere Ausführungen zum Vorgehen sind auch in *Schardt et al.* [36] enthalten.

Für die Anwendung der Methode sind nach *Schardt et al.*[37] folgende Voraussetzungen zu erfüllen: Die verwendeten Trapezprofile weisen eine regelmäßige periodische Profilform auf. Eine Periode verläuft von Untergurtmitte bis Untergurtmitte. Die beiden Gurte müssen parallel zueinander liegen. Die Trapezprofilscheibe ist auf einem Viergelenkrahmen allseitig befestigt und die Schubfeldbreite und damit die Anzahl der Perioden  $n$  so groß, dass Randstöreinflüsse aus der Befestigung an den Längsrändern in einem mittleren Bereich abgeklungen sind ( $n$  sollte größer als 10 sein). Die Schubfeldlänge kann zwar beliebig sein, sollte jedoch in einem vernünftigen Verhältnis zur Schubfeldbreite stehen ( $<4$ ).

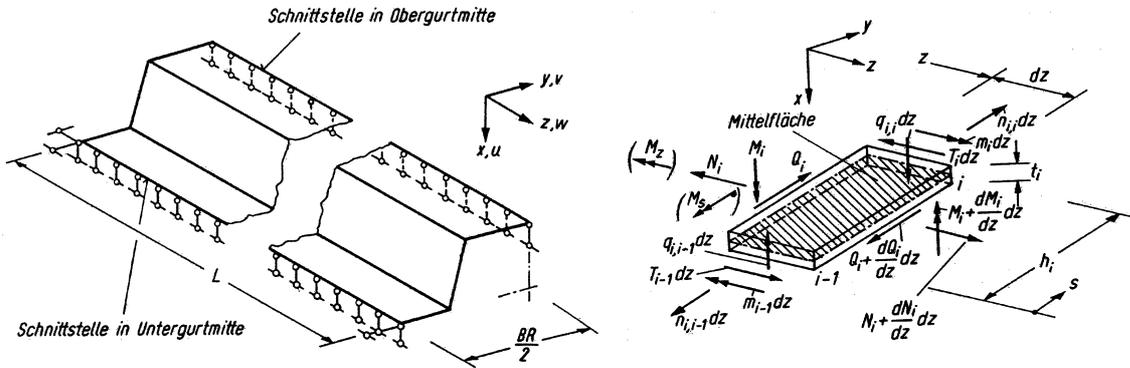
Im Bild 2.11 sind die antimetrisch zur Symmetrieachse wirkenden Schubkräfte  $R_L$  und  $R_Q$  näherungsweise gleichmäßig über die Ränder bzw. die Querrandverbindungen verteilt. Mit Hilfe der gleichmäßigen Verteilung ist die Betrachtung einer einzelnen Profilperiode möglich. Die Randbedingungen ergeben sich aus den Übergangsbedingungen zwischen den Profilperioden.



**Bild 2.11** Belastung der Trapezprofilscheibe durch Schubkräfte, *Schardt et al.*[37]

Im Bild 2.12 ist auf der linken Seite das sich aus den Rand- und Übergangsbedingungen ergebende Berechnungsmodell einer halben Profilperiode abgebildet. Auf der rechten Seite sind die berücksichtigten Schnittgrößen an einem Scheibenelement dargestellt. Die Blechdicke  $t$  ist wesentlich kleiner als die Länge und Breite aller Teilscheiben. Aus diesem Grund werden die Drillmomente von vornherein vernachlässigt. Der Einfluss aus der Ver-

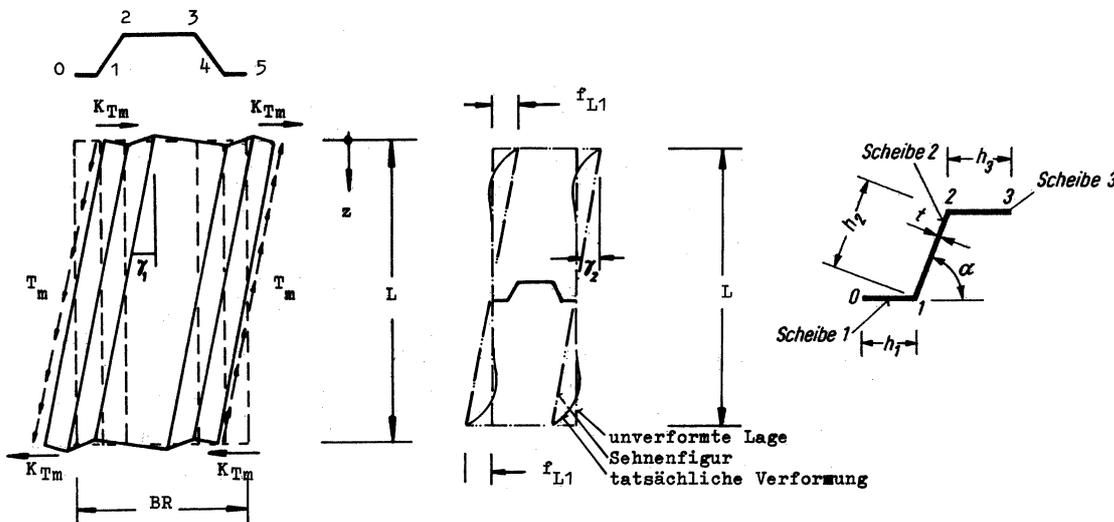
nachlässigung ist gering. Er wird in einer Abschätzung nach *Strehl* [43] mit etwa 3% angegeben. Des Weiteren werden die Biegemomente  $M_s$  und die Torsionsmomente  $M_z$  vernachlässigt. Daraus folgt, dass die Normalspannungen in z-Richtung über die Scheibendicke konstant sind.



**Bild 2.12** Berechnungsmodell mit Randbedingungen an einer halben Periode (links) und Schnittgrößen an einer Teilscheibe (rechts), *Strehl* [43]

Die Belastung erfolgt über die Kräfte an den Verbindungsmitteln der Tiefsicken. Die Schubflussverteilung ist noch nicht bekannt und kann deshalb nicht angesetzt werden. Zur Vereinfachung definiert *Strehl* aber einen mittleren Schubfluss  $T_m$ , welcher allerdings einen beliebigen Funktionsverlauf besitzt.

Aus den Gleichgewichtsbedingungen an der Einzelscheibe und mit Berücksichtigung der Übergangs- und Randbedingungen an den einzelnen Falten lassen sich dann die Verformungen an der halben Periode bestimmen. Die resultierende Schubverformung setzt sich dabei aus zwei Anteilen zusammen, siehe Bild 2.13.



**Bild 2.13** Schubwinkel  $\gamma_1$  aus Schubverformung und  $\gamma_2$  aus Querbiegung, *Strehl* [43]

Bei dem ersten Anteil links im Bild handelt es sich um die Verformungen aus Scheibenschub in den einzelnen Querschnittsteilen. Der Schubwinkel  $\gamma_1$  berechnet sich nach Gleichung (2.16). Bei den Werten  $h_i$  handelt es sich um die Höhen der drei Einzelscheiben einer halben Profilperiode, siehe Bild 2.13.

$$\gamma_1 = \frac{T_m 2(h_1 + h_2 + h_3)}{Gt BR} \tag{2.16}$$

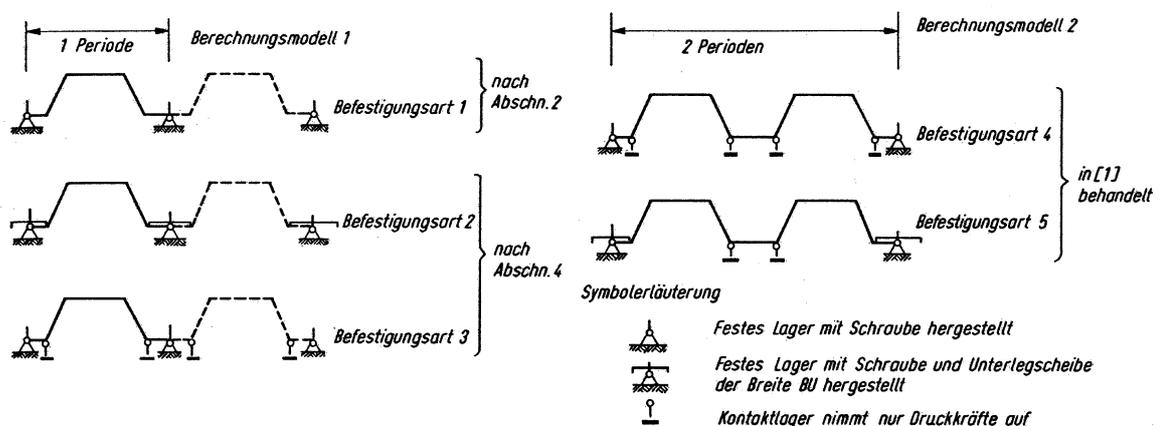
Bei dem zweiten Verformungsanteil handelt es sich um die Querbiegungen, welche vorrangig an den Querrändern entstehen und bei ausreichender Profillänge im mittleren Bereich abgeklungen sind, siehe Bild 2.13 rechte Abbildung. Der Winkel  $\gamma_2$  berechnet sich allgemein nach Gleichung (2.17).

$$\gamma_2 = \frac{2f_{L1}}{L} T_m \tag{2.17}$$

Der resultierende Schubwinkel und damit die ideale Schubsteifigkeit  $S_{id}$  ergibt sich aus der Summe der beiden Einzelwinkel, Gleichung (2.18).

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \tag{2.18}$$

Als letztes ist noch die Anpassung der ermittelten Lösung an die in der Realität vorliegenden Randbedingungen nötig. Hierbei werden das Aufsetzen der Profilstege auf die Unterkonstruktion oder die Verwendung von großen Unterlegscheiben berücksichtigt, welche das Abheben der Profilstege komplett verhindern. Die von *Strehl* berücksichtigten Randbedingungen sind in noch einmal in Bild 2.14 zusammengefasst.

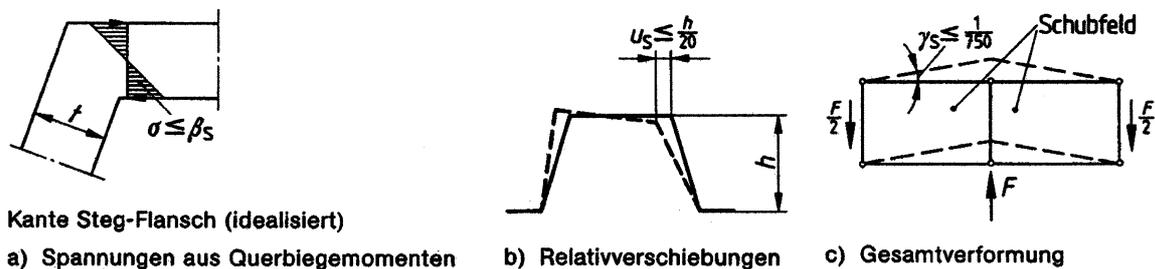


**Bild 2.14** Befestigungsarten an den Querrändern der Trapezprofile, *Schardt et al.* [37]

In *Steinhardt et al.* [42] wurden bereits drei Versagenskriterien für Trapezprofile definiert. Diese Kriterien können auch für die Berechnungsmethode nach *Strehl* angewendet wer-

den. Sie haben mit DIN 18807 auch Eingang in die aktuelle Normung gefunden. Die drei Kriterien sind in Bild 2.15 grafisch dargestellt.

Die praktische Darstellung der drei Kriterien erfolgt über die Angabe dreier zulässiger Schubflüsse  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$ . Jeder der drei Schubflüsse beschreibt eine mögliche Versagensform. Interessant ist an dieser Stelle, dass es sich lediglich bei dem ersten Kriterium um eine echte Tragfähigkeitsbegrenzung handelt. Die anderen beiden beschreiben lediglich eine Verformungsbegrenzung und damit die Gebrauchstauglichkeit. Die Werte haben also empirische oder auch „willkürliche“ Ursachen.



**Bild 2.15** Definition der Versagensarten nach DIN 18807-1 [48]

Das erste Versagenskriterium in Bild 2.15a) begrenzt die Spannungen aus Querbiegemomenten. Es stellt gleichzeitig auch die einzige wirkliche Tragfähigkeitsbegrenzung dar. Die sich ergebenden Spannungen dürfen danach nicht größer als die Streckgrenze des Stahlblechs sein. Bestimmt wird dieses Versagen über den zulässigen Schubfluss  $T_1$ .

Die zweite Begrenzung wird über den zulässigen Schubfluss  $T_2$  definiert. Mit ihm wird die zulässige Relativverschiebung zwischen dem Ober- und dem Untergurt des Profils in horizontaler Richtung auf  $1/20$  der Profilhöhe begrenzt. Dieses Kriterium ist jedoch lediglich für auf Profilen verklebte Dachaufbauten von Interesse. Mit ihm soll verhindert werden, dass sich die Verklebung zwischen Trapezprofil und Dachhaut ablöst. Ist kein Dachaufbau vorhanden, darf dieses Kriterium vernachlässigt werden.

Als drittes erfolgt noch die Begrenzung der Verformung des Gesamtschubfeldes, siehe Bild 2.15c). Der zulässige Schubwinkel wird auf  $\gamma_s = 1/750$  begrenzt. Dieser Wert kann als frei gewählt angesehen werden, kann aber als Begrenzung der Verformung der Gesamtkonstruktion interpretiert werden, durch die z. B. die aus dieser Verformung folgende mögliche Schiefstellung von Stützen begrenzt wird.

Nachgiebigkeiten aus den verwendeten Verbindungsmitteln werden im Rahmen des beschriebenen Verfahrens komplett vernachlässigt.

Auf der Grundlage der von Strehl entwickelten Berechnungsmethode werden im Rahmen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung die für jeden einzelnen Trapezprofiltyp erforderlichen Bemessungsparameter zur Verfügung gestellt. Die anzugebenden Werte sollen abschließend kurz genannt werden.

- zul  $T_1$ : Schubfluss, ab welchem die Randspannung aus Querbiegemomenten den Wert der Streckgrenze des Stahlblechs erreicht
- zul  $T_2$ : Schubfluss, bei welchem sich eine Relativverschiebung von  $h/20$  zwischen Ober- und Untergurt der Profile einstellt
- zul  $T_3$ : zulässiger Schubfluss, der die Schubverformung des Gesamtfeldes auf den Winkel  $1/750$  begrenzt
- $G_s$ : ideeller Schubmodul des Trapezprofils
- min  $L_s$ : Ab dieser Länge weichen die Schubfeldwerte für das unendlich lange Schubfeld nur noch 3% von den genauen Werten der jeweiligen Schubfeldlänge ab. Für geringere Schubfeldlängen müssen die Schubfeldwerte im allgemeinen nach in der Zulassung angegebenen Formeln abgemindert werden.
- $L_G$ : Grenzlänge, ab der zul  $T_3$  nicht nachgewiesen werden muss, da dann min (zul  $T_1$ , zul  $T_2$ ) maßgebend wird
- $k_1$ : Verformungsbeiwert, welcher die reine Schubverzerrung der ebenen Querschnittsteile berücksichtigt
- $k_2$ : Verformungsbeiwert, welcher die Verformung aus der Profilendverwölbung berücksichtigt
- $k_3$ : Beiwert zur Erfassung des Zusammenwirkens von Schubfluss und Auflagerkraft in den Stegen des Trapezprofils

#### 2.4.4 Methode nach Bryan/Davies

Die Berechnungsmethode nach *Bryan/Davies* ist im angelsächsischen und skandinavischen Raum verbreitet. Das Verfahren geht im Wesentlichen auf Untersuchungen von *Bryan*, *Baehre*, *Davies* und *Lawson* zurück. Es wurden in diesem Rahmen sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen vorgenommen. Es handelt sich im Gegensatz zu den zuvor behandelten Methoden von *Steinhardt/Einsfeld* und *Schardt/Strehl* um eine sich mehr an den praktischen Verhältnissen orientierende Methode. Mit ihr besteht die Möglichkeit neben den Verformungen der Trapezprofile auch die Nachgiebigkeit der

verwendeten Verbindungsmittel zu erfassen. Erläuterungen zu der Methode sind unter anderem in *Baehre et al.* [5], *Bryan* [7], *Walter* [45] und *Davies et al.* [8] enthalten. Mit Hilfe der gewonnenen Ergebnisse wurde 1977 die „European Recommendations for the Stressed Skin Design of Steel Structures“ der Europäischen Konvention für Stahlbau *ECCS* [14] herausgegeben. In *Baehre* [3] sind unter anderem detaillierte Berechnungen an Beispielen und Versuchsbeschreibungen enthalten. Nachfolgend sollen die groben Züge des Verfahrens beschrieben werden.

Im Rahmen der Berechnungen sind folgende Nachweise zu erbringen:

1. Tragfähigkeitsbegrenzung durch das Beulen des gesamten Schubfeldes
2. Nachweis der verwendeten Verbindungsmittel auf ihre Tragfähigkeit
3. Nachweis des Stegversagens der Trapezprofile infolge kombinierte Beanspruchung aus Auflast und Schubfluss
4. Ermittlung der Verformung des Schubfeldes in seiner Ebene (Ermittlung der Schubsteifigkeit)

Als erstes ist bei der Methode ein Beulnachweis für das gesamte Schubfeld zu erbringen. Der Nachweis wird über einen globalen kritischen Schubfluss bzw. eine Schubkraft nach (2.19) erbracht und ist in *Baehre* [3] beschrieben.

$$T_{crit} = \frac{36^4 \sqrt{D_x D_y^3}}{L_s^2} \quad \left[ \frac{kN}{m} \right] \quad (2.19)$$

mit

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)} \frac{b_R}{u} \quad \text{und} \quad D_y = \frac{EI_y}{b_R}$$

$u$  = geometrische Abwicklung einer Profilrippe

$I_y$  = Trägheitsmoment einer Profilrippe

$b_R$  = Periodenbreite

Im Rahmen des zweiten Nachweises sind die verwendeten Verbindungsmittel zu bemessen. Die Bemessung erfolgt über die rechnerisch vorhandenen Schubflüsse. Die Kräfte werden, wie im Verfahren nach *Schardt/Strehl*, entsprechend der Anzahl der angeordneten Verbindungsmittel verteilt. Bei den Verbindern in den Längsstößen werden allerdings zusätzlich die angrenzenden Querrandverbindungsmittel mitberücksichtigt. Ihnen werden

anteilig Kräfte zugeordnet. Dies führt zu einer erhöhten Belastung einzelner Querrandverbinder, was über einen zusätzlichen Sicherheitsbeiwert für diese Befestigungen erfasst wird.

Der Nachweis des Stegversagens erfolgt über die Angabe zulässiger Auflagerkräfte. Sie sind abhängig von der Blechdicke  $t_N$ , den Profilabmessungen, den Auflagerlängen, den Materialkennwerten und den vorhandenen Lasten (vertikale und horizontale Belastung). In den Profiltabellen sind für die verschiedenen Profiltypen zulässige Auflagerkräfte angegeben. Die Ermittlung der vorhandenen Lagerkraft ist in *Baehre et al.* [5] angegeben.

Der letzte und für die vorliegende Arbeit wichtigste Teil ist die Ermittlung der Gesamtsteifigkeit des Schubfeldes. Die Steifigkeit setzt sich aus sechs Anteilen zusammen:

1. Verformung aufgrund der Profilendverwölbung

$$f_{1,1} = \frac{ab_R^{2,5}\bar{K}}{Et^{2,5}L_s^2}V \quad [mm] \quad (2.20)$$

mit	$f_{i,j} \rightarrow$	Verformungsanteil [mm]
	$a \rightarrow$	Schubfeldbreite, entspricht L [mm]
	$b_R \rightarrow$	Periodenlänge der Profile [mm]
	$\bar{K} \rightarrow$	Profilkonstante in Abhängigkeit der Querrandbefestigung [-], siehe <i>Baehre</i> [3]
	$E \rightarrow$	E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]
	$t \rightarrow$	Kernblechdicke des Profils [mm]
	$L_s \rightarrow$	Schubfeldlänge [mm]
	$V \rightarrow$	vorhandene Schubkraft [kN]

Die Profilkonstante wird über mehrparametrische Ritz-Ansätze mit Hilfe der Potentialmethode ermittelt. Dieser Verformungsanteil entspricht dem Wert  $k_2$  des Verfahrens nach *Schardt/Strehl*.

## 2. Verformung aus Schubverzerrungen der ebenen Querschnittsteile

$$f_{1,2} = \frac{2a(1 + \mu)u/b_R}{EtL_s} V \quad [mm] \quad (2.21)$$

mit  $\mu \rightarrow$  Querdehnzahl [-]

$u \rightarrow$  geometrische Abwicklung einer Profilperiode [mm]

Dieser Anteil entspricht dem Wert  $k_1$  nach *Schardt/Strehl*.

## 3. Verformung aus Nachgiebigkeit der Befestigungsmittel am Querrand

$$f_{2,1} = \frac{2a_s s_p e_Q}{L_s^2} V \quad [mm] \quad (2.22)$$

mit  $s_p \rightarrow$  Nachgiebigkeit der Befestigungen, sind in *ECCS* [11] enthalten [mm/kN]

$e_Q \rightarrow$  Abstand der Querrandverbindungsmittel [mm]

## 4. Verformung aus Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel am Längsstoß

$$f_{2,2} = \frac{2s_s s_p (n_{sh} - 1)}{2n_s s_p + \beta_1 n_p s_s} V \quad [mm] \quad (2.23)$$

mit  $s_s \rightarrow$  Nachgiebigkeit der Befestigungen am Profilstoß aus *ECCS* [11] [mm/kN]

$n_{sh} \rightarrow$  Anzahl der nebeneinanderliegenden Profiltafeln [-]

$n_s \rightarrow$  Anzahl der Verbindungsmittel im Längsstoß [-]

$\beta_1 \rightarrow$  Beiwert zum Herstellen der Kompatibilität zw. Längsstoßverschiebung und Bewegungen an den Verbindungsmitteln mit der Pfette

$n_p \rightarrow$  Anzahl der Querunterstützungen bzw. Pfetten

## 5. Verformung aus Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel am Längsrand

$$f_{2,3} = \frac{2s_{sc}}{n_{sc}} V \quad [mm] \quad (2.24)$$

mit  $s_{sc} \rightarrow$  Nachgiebigkeit der Befestigungen aus *ECCS* [11] [mm/kN]

$n_{sc} \rightarrow$  Anzahl der Befestigungen am Längsrand [-]

## 6. Verformung aus Dehnungen der Querträger

$$f_3 = \frac{a^3}{3EAL_s^2/2} V \quad [mm] \quad (2.25)$$

mit  $A \rightarrow$  Querschnittsfläche der Querträger

Die Gesamtverformung und die daraus resultierende Steifigkeit ergibt sich aus der Summe aller Einzelverformungen nach (2.26).

$$f_{ges} = \sum f_{i,j} \quad (2.26)$$

Die Verformungsanteile aus den Punkten 3 und 4 sind in der Regel verformungsmaßgebend und stellen einen erheblichen Verformungsanteil. Die Anteile 5 und 6 aus den Längsrandbefestigungen und der Randträgerdehnung sind dagegen vernachlässigbar.

Für die vorgestellte Berechnungsmethode sind noch Tragfähigkeitsgrenzen für die Trapezprofile selbst zu definieren. In *Baehre et al.* [5] schlägt *Baehre* die Begrenzung auf einen zulässigen Schubwinkel, sowie die Begrenzung der horizontalen Relativverschiebung zwischen Ober- und Untergurt der Profile analog zu *Schardt/Strehl* vor.

### 2.4.5 Vergleich der Berechnungsverfahren

Die drei vorgestellten Berechnungsverfahren weisen zum Teil wesentliche Unterschiede in ihren Ansätzen auf. Während die im deutschsprachigen Raum üblichen Verfahren nach *Schardt/Strehl* bzw. ursprünglich *Steinhardt/Einsfeld* lediglich die reinen Verformungen der Trapezprofile erfassen, werden nach dem Verfahren von *Bryan/Davies* zusätzlich die Nachgiebigkeiten der Verbindungsmittel erfasst.

Beide Verfahren haben zur Bedingung, dass die Gesamtkonstruktion als Schubfeld ausgebildet ist (vierseitige Befestigung der Profile). Nach der Methode von *Bryan/Davies* wird zwar prinzipiell die Möglichkeit einer zweiseitigen Lagerung beschrieben, allerdings gilt dies nur für Teilschubfelder. Für das Gesamtschubfeld ist auch hier wieder eine vierseitige Lagerung von Nöten, siehe *Baehre* [3].

Die Berücksichtigung der Profilverformungen erfolgt bei den vorrangigen Verfahren nach *Schardt/Strehl* und *Bryan/Davies* nach weitgehend gleichen Prinzipien. Es werden jeweils Verformungsanteile aus der reinen Schubverzerrung und der Profilendverwölbung erfasst.

Zur Begrenzung der Tragfähigkeit der Trapezprofile wird bei beiden Verfahren die Verwendung zulässiger Schubflüsse vorgeschlagen. So wird in *Baehre et al.* [5] vorgeschlagen, die nach *Schardt/Strehl* angegebenen zulässigen Schubflüsse  $T_2$  und  $T_3$  als Tragfähigkeitsbegrenzung für nach *Bryan/Davies* berechnete Konstruktionen zu übernehmen. Der zulässige Schubfluss  $T_1$  zur Erfassung der Querbiegemomente in den Profilecken, siehe Bild 2.15a), wird dagegen nicht übernommen. In *Baehre et al.* [5] wird darauf verwiesen, dass sich dieser Wert mit Versuchen nicht bestätigen ließ. Vielmehr lagern sich die auftretenden Lasten bei Erreichen eines plastischen Zustandes in andere Querschnittsteile der Profile um. Der Wert, welcher die einzige wirkliche Tragfähigkeitsbegrenzung nach *Schardt/Strehl* darstellt, wird damit in Frage gestellt.

Der Ermittlung der Gesamtsteifigkeit kommt bei beiden Verfahren eine besondere Bedeutung zu. Die Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten aus den Verbindungsmitteln erscheint in jedem Fall sinnvoll, da sie eine realistischere Abschätzung der Steifigkeit verspricht und nicht zu einer Überschätzung der selbigen bei der Konstruktion führt.

Um einen direkten Vergleich zwischen den einzelnen Verfahren ziehen zu können, ist in Tabelle 2.1 ein Beispiel dargestellt. Als Referenz wird ein in *Walter* [45] durchgeführter und beschriebener Versuch an einem Schubfeld verwendet. Im Rahmen der von *Walter* durchgeführten Untersuchungen wurde ebenfalls dieser Vergleich angestellt.

Bei dem Versuch wurden Trapezprofile des Typs Hoesch E40 mit einer Blechdicke von  $t_N = 1 \text{ mm}$  verwendet. Das Schubfeld besitzt die Abmessungen  $L_s/L = 3440 \text{ mm}/2750 \text{ mm}$ . Die Randbefestigungen des Schubfeldes wurden mit Setzbolzen der Firma Hilti vom Typ ENP2 hergestellt. Die Befestigung erfolgte am Querrand in jeder Sicke und an den Längsrändern in einem Abstand von  $e_L = 430 \text{ mm}$ . Die Profilstöße wurden mit Bohrschrauben THB im Abstand von  $e_s = 287 \text{ mm}$  verbunden.

**Tabelle 2.1** Vergleich der Berechnungsverfahren mit Versuch 3 nach *Walter* [45]

Verformungsanteil	Steinhardt/Einsfeld [mm/KN]	Schardt/Strehl [mm/KN]	Bryan/Davies [mm/KN]	Versuch Walter [mm/KN]
Schubverformung	0,0178 (13%)	0,0137 (11%)	0,0137 (7%)	-
Verwölbung	0,1190 (87%)	0,1106 (89%)	0,0861 (41%)	-
Befestigung Querrand	-	-	0,0102 (5%)	-
Befestigung Blechstoß	-	-	0,0636 (31%)	-
Befestigung Längsrand	-	-	0,0343 (16%)	-
Gesamtnachgiebigkeit	0,1368 (100%)	0,1243 (100%)	0,2079 (100%)	0,103 (100%)

Für die Verbindungsmittelnachgiebigkeiten nach dem Verfahren von *Bryan/Davies* werden für die Setzbolzen ENP2  $s_p = 0,12 \text{ mm/kN}$  und für die Bohrschrauben THB  $s_s = 0,35 \text{ mm/kN}$  (Angaben aus *Walter* [45]) angesetzt.

Der Tabelle kann man entnehmen, dass die beiden deutschen Verfahren in etwa die gleichen Werte für die Nachgiebigkeiten liefern. Verbindungsmittel werden nicht erfasst. Die Berechnung nach *Bryan/Davies* ist im Vergleich zu den beiden anderen deutlich weicher. Die Nachgiebigkeit ist etwa 60% größer. Die Verformungsanteile aus reiner Schubverformung sind bei allen drei Verfahren in etwa gleich groß. Währenddessen liefert bei der Profilendverwölbung das Verfahren nach *Bryan/Davies* deutlich geringere Nachgiebigkeiten. Die Verbindungsmittel tragen mit etwa 52% mehr als die Hälfte zur Gesamtverformung bei.

In der letzten Spalte ist die von *Walter* in *Walter* [45] angegebene Nachgiebigkeit eingetragen. Es zeigt sich, dass der Versuch mit seiner Steifigkeit zum Teil deutlich über den theoretischen Modellen liegt. Für das Verfahren nach *Bryan/Davies* ließe sich dies zum Teil mit den sehr konservativen Annahmen für die Verbindungsmittelnachgiebigkeiten erklären. Aber auch hier liefert die reine Profilverformung Werte in der Größenordnung des Versuches.

Der größere Wert im Versuch muss demzufolge andere Ursachen haben. Als erste Erklärung können vernachlässigte Profilüberstände an den Randverbindungsmitteln, eine Blechdicke von mehr als  $t = 0,96 \text{ mm}$  (wurde für die Berechnung verwendet, siehe [48]) und ein Lastabtrag, welcher nicht hundertprozentig den Modellen entspricht, genannt werden. Die Berücksichtigung von Profilüberständen an den Verbindungsmitteln ist bei allen Berechnungsverfahren nicht möglich. Die Befestigungen sind jeweils als Randbedingungen für die Ermittlung der Profilverformungen definiert.

Insgesamt liefern alle drei Verfahren ähnliche Verformungswerte (Verwölbung und Schubverformung) für die Trapezprofile dieses Beispiels.

## 2.5 Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu bestehenden Untersuchungen

Zum Scheibentragverhalten von Trapezprofilen gibt es eine größere Anzahl von Untersuchungen, wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert wurde. Nach diesen Untersuchungen können die Trapezprofile auch zur Aussteifung von biegedrillknickgefährdeten Biegeträgern herangezogen werden. Allerdings gilt für alle beschriebenen Berechnungsverfahren die Voraussetzung der Schubfeldausbildung. Die Trapezprofile müssen also an allen vier Rändern mit der Unterkonstruktion verbunden sein. Dies ist jedoch wie bereits

erwähnt meistens mit einem erhöhten Konstruktionsaufwand verbunden. In bestimmten Fällen ist die Ausbildung eines Schubfeldes auch aus konstruktiven Gründen nur bedingt möglich. Im Bild 2.16 ist ein solches Beispiel dargestellt. Infolge des Lichtbandes ist kein vollständiges Schubfeld vorhanden und die Trapezprofile sind nur zweiseitig mit ihrer Unterkonstruktion verbunden.



**Bild 2.16** Stahlhalle der Fa. Goldbeck mit Lichtband

Nach dem Verfahren von *Bryan/Davies* wird zwar, wie bereits in Abschnitt 2.4.5 erwähnt, die prinzipielle Möglichkeit einer zweiseitigen Lagerung an den Querrändern der Profile erwähnt, allerdings gilt dies nur für innere Teilschubfelder. An den Randschubfeldern wird hingegen wieder eine Befestigung am Längsrand gefordert. Es ist demnach auch in diesem Fall eine Schubfeldausbildung von Nöten. Es bleibt also die Frage, welche Steifigkeit die Profile besitzen, wenn ausschließlich eine zweiseitige Lagerung an den Querrändern vorliegt.

Die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel, welche einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit haben (siehe Tabelle 2.1), wird in dem in der deutschen Normung verwendeten Verfahren nach *Schardt/Strehl* völlig vernachlässigt. *Bryan/Davies* berücksichtigen diese Verformungsanteile über konstante Steifigkeitswerte für verschiedene Verbindungsmitteltypen. Diese Vorgehensweise wird auch für die hier durchzuführenden Untersuchungen gewählt.

Des Weiteren wird für die Ermittlung der Schubsteifigkeit  $S_{id}$  in allen Fällen zweckmäßigerweise eine Schubverformung auf das System aufgebracht. Es wird in den in Abschnitt 2.4 erläuterten drei Verfahren von einem konstanten Schubfluss in der Gesamtkonstruktion ausgegangen. Bei der Aussteifung von biegedrillknickgefährdeten Trägern tritt aber

keine Schubverformung mit einem konstanten Schubfluss auf. Vielmehr ergibt sich am Einfeldträger ein näherungsweise sinusförmiger Verlauf der beim seitlichen Ausweichen entstehenden Abtriebskräfte. Dieser Verlauf soll in den durchgeführten Betrachtungen verwendet werden.

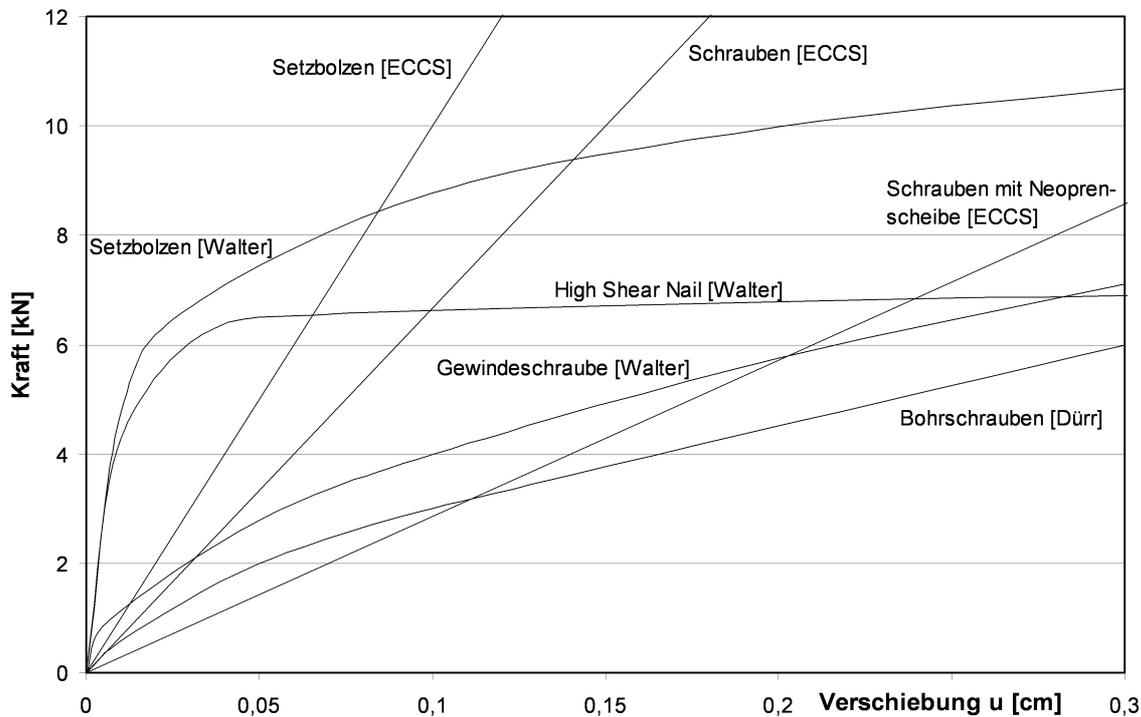
Neuere Untersuchungen versuchen den Einfluss der Verbindungsmittelnachgiebigkeiten auf die Gesamtsteifigkeit genauer zu erfassen. *Walter* untersucht in *Walter* [45] beispielsweise Schubfelder unter Berücksichtigung des nichtlinearen Lastverformungsverhaltens der Verbindungsmittel. Er führte eine Reihe von Versuchen und Berechnungen mit verschiedenen Verbindungsmittelkonfigurationen und Trapezprofilen durch. Als Belastung wurde ebenfalls eine reine Schubverformung aufgebracht. Eine bemessungsrelevante systematische Bewertung nimmt er allerdings nicht vor.

Weitere Untersuchungen speziell zur Aussteifung biegedrillknickgefährdeter Biegeträger werden von *Dürr* in *Saal et al.* [33] beschrieben. Er untersucht dabei verschiedene Trapezprofile auch unter zweiseitiger Lagerung an den Querrändern. Als Belastung bringt aber auch er eine Schubverformung auf, die über eine Kraft in Richtung der Querränder erzeugt wird. Ein möglicher Einfluss der Randträgersteifigkeit lässt sich auf diese Weise nicht erfassen.

Die Randverbindungsmittel werden in den von *Dürr* durchgeführten Parameteruntersuchungen mit ihrem, mittels Versuchen ermittelten, nichtlinearen Lastverformungsverhalten berücksichtigt. Untersucht werden Bohrschrauben des Typs EJOT JT2-12-5,5x35 V16 an den Rändern und Bohrschrauben EJOT JT2-4,8x19 an den Profilstößen. Es werden verschiedene Profiltypen mit einer Blechdicke  $t_N = 1$  mm betrachtet. Mit Hilfe eines entwickelten FE-Modells werden Parameterrechnungen durchgeführt. Die Nachgiebigkeiten der Profilstoßverbindungen werden bei den FE-Berechnungen vernachlässigt. Mit den Ergebnissen wird eine einfache Berechnungsmethode für die Schubsteifigkeit bei nachgiebiger zweiseitiger Lagerung in Abhängigkeit von der nachgiebigen vierseitigen Lagerung der Trapezprofilkonstruktionen ermittelt. Es wird eine einfache Geradengleichung für das Verhältnis aus beiden Steifigkeiten angegeben.

Als Versagenskriterium begrenzt *Dürr* den zulässigen Schubfluss analog zu *Strehl* [43] über die in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für die einzelnen Profile angegebenen zulässigen Schubflüsse  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$ . Bei Erreichen des kritischen Schubflusses erfolgt dann die Ermittlung der in diesem Zustand vorhandenen Schubsteifigkeit. Man

befindet sich in diesem Zustand auf einem beliebigen Punkt des nichtlinearen Last-Verformungsverlaufs.



**Bild 2.17** Last-Verformungsverläufe verschiedener Verbindungsmittel bei  $t_N = 1 \text{ mm}$

Diese Vorgehensweise erscheint nach Meinung des Verfassers eher problematisch, da das nichtlineare Verhalten der Verbindungsmittel einer Vielzahl von Einflüssen unterliegt. In Abhängigkeit von der vorhandenen Streckgrenze des Trapezprofils, der Blechdicke des Profils und der Unterkonstruktion, dem gewählten Verbindungsmittel und dessen Querschnitt stellt sich jeweils ein anderes Verformungsverhalten ein. Aus diesen Einflüssen ergibt sich für jede Befestigungsvariante eine andere Steifigkeit und damit ein anderes Lastverformungsverhalten der Gesamtkonstruktion, was dementsprechend auch jedesmal einen anderen Zustand für die Steifigkeitsermittlung ergibt. In Bild 2.17 sind beispielhaft experimentell ermittelte Last-Verformungsverläufe verschiedener Verbindungsmittel bei einer Blechdicke von  $t_N = 1 \text{ mm}$  aufgetragen. Es werden Abscherversuche von *Dürr et al.* [10] und *Walter* [45] verwendet. Zusätzlich werden die vom *ECCS* in [11] festgelegten konstanten Federwerte zum Vergleich dargestellt. Man kann sehr gut erkennen, dass jedes der gewählten Verbindungsmittel ein eigenes charakteristisches Last-Verformungsverhalten aufweist. Die Verläufe gelten ferner nur für eine Blechdicke und ein definiertes Blechmaterial. Für andere Blechdicken und Materialien stellen sich wieder andere Verläufe ein.

Die Formulierung einer allgemeinen Aussage, ohne gesonderte Betrachtung der Verbindungsmittel ist praktisch nicht möglich.

Zudem verteilen sich die Kräfte in den Befestigungsmitteln nicht gleichmäßig. Jedes Befestigungsmittel befindet sich also auf einem anderen Punkt seines nichtlinearen Lastverformungsverlaufs. Die Kraftverteilung in den Verbindungsmitteln ist wiederum von den Abmessungen  $L$  und  $L_s$  der Gesamtkonstruktion abhängig. In Anbetracht dieser großen Anzahl von Einflussparametern wäre für diese Vorgehensweise eine genaue Kenntnis aller Konstruktionsbestandteile mit ihren genauen Eigenschaften erforderlich, welche jeweils neu berechnet werden müssten.

Für die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen soll deshalb eine andere Vorgehensweise gewählt werden. Als Belastung wird für die untersuchten Konstruktionen eine sinusförmige Streckenlast aufgebracht, welche die beim Biegedrillknicken entstehenden Abtriebskräfte realistischer erfasst. Durch diese Form der Belastung besteht auch die Möglichkeit, den Einfluss der Randträgersteifigkeit mitzuerfassen.

Für die Befestigungsmittel werden konstante Steifigkeiten berücksichtigt. Verwendet werden die in *ECCS* [11] angegebenen Werte für die verschiedenen Befestigungsmittel. Die Profilstöße werden mit ihren Nachgiebigkeiten ebenfalls erfasst.



## Kapitel 3

### Experimentelle Untersuchungen an Trapezprofilen

#### 3.1 Allgemeines

Zur Beurteilung der Schubsteifigkeit von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen sollen im Rahmen dieser Arbeit Versuche an verschiedenen Systemkonfigurationen vorgenommen werden. Bei den zu untersuchenden Konstruktionen handelt es sich um komplexe Anordnungen, welche aus verschiedenen Bestandteilen bestehen. Hier sind im Besonderen die Trapezprofile selbst, die Randträger und die Profilstoß- sowie Querrandverbindungs- mittel zu nennen.

Die Vielzahl der einzelnen Konstruktionskomponenten liefert ein breites Spektrum an Kombinationsmöglichkeiten. Aus diesem Grund ist die Untersuchung auf experimenteller Basis nur für ein beschränktes Spektrum möglich. Für die Untersuchungen werden folgende Bauteile verwendet:

Trapezprofile:	Arcelor HSA 39/183 $t_N = 0,75$ mm Arcelor UB 85/280 $t_N = 0,75$ mm
Randverbinder:	Setzbolzen Hilti ENP 19L15 Bohrschrauben EJOT-JT2-8-5,5-V16
Profilstoßverbinder:	Blindniet EJOT $\varnothing 4,8$ aus Stahl

Um das Gesamtverformungsverhalten besser beurteilen zu können, ist es notwendig, sich neben den Großversuchen auch mit dem Tragverhalten der einzelnen Bauteile zu befassen. Zu diesem Zweck werden zusätzlich zu den Großversuchen, Abscherversuche mit den verwendeten Verbindungsmitteln und Zugversuche mit dem Blechmaterial durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse können dann für weitergehende Betrachtungen herangezogen werden.

Die einzelnen Versuche werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

## 3.2 Voruntersuchungen

### 3.2.1 Zugversuche

Stahltrapezprofile werden durch Kaltwalzen hergestellt. In [48] wird für die zur Herstellung der Profile verwendeten Stähle eine Mindeststreckgrenze von  $f_{y,k} = 280 \text{ N/mm}^2$  vor der Kaltverformung gefordert. Die meisten Hersteller garantieren für ihre Profile jedoch höhere Streckgrenzen. In den für die Versuche verwendeten Profilen der Firma Arcelor wird in den Zulassungen eine Streckgrenze von  $f_{y,k} = 320 \text{ N/mm}^2$  angegeben.

Für die Versuche wurden Proben gemäß [52] verwendet. Um eventuell auftretende Unterschiede im Materialverhalten innerhalb der Profilgeometrie erfassen zu können, wurden den verwendeten Profilen Materialproben sowohl aus den Stegen, als auch aus den Gurten entnommen. Aus Bild 3.1 kann das Spannungs-Dehnungsverhalten einer repräsentativen Auswahl der Zugproben entnommen werden.

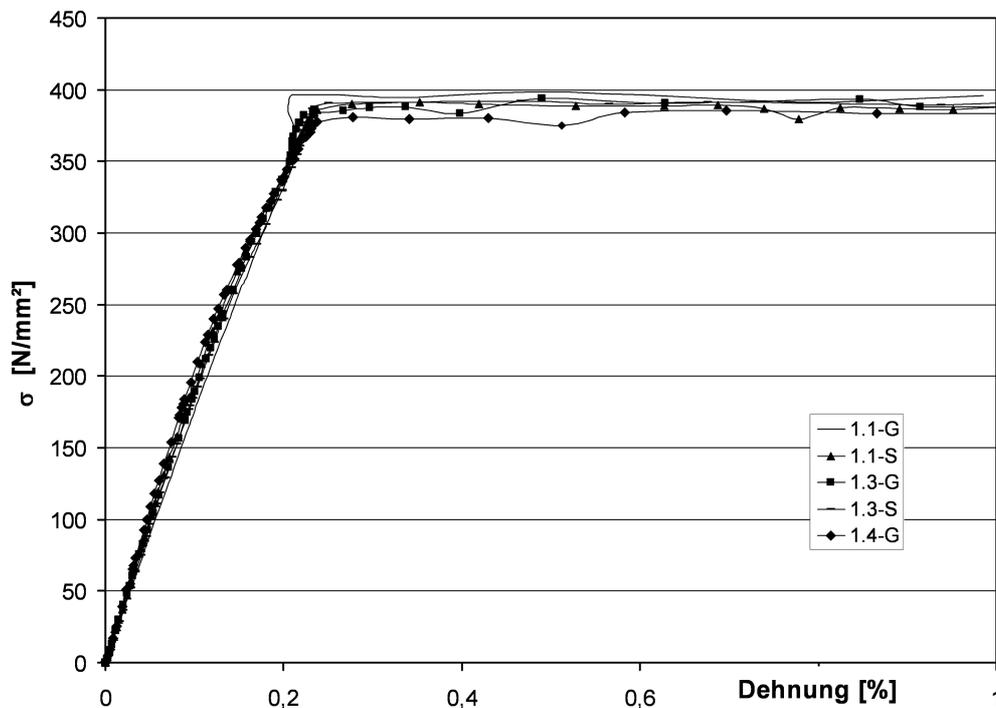


Bild 3.1  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm einiger Zugversuche

Die Spannungs-Dehnungsverläufe zeigen deutlich den charakteristischen Verlauf von kaltverformten Stählen. Die vorhandene Streckgrenze liegt über den angegebenen Werten von  $f_{y,k} = 320 \text{ N/mm}^2$ . Es sind auch keine Unterschiede im Dehnungsverhalten zwischen den Gurt- und den Stegproben zu erkennen. Die dargestellten Dehnungsverläufe beziehen sich auf eine mittlere Blechdicke von  $t = 0,75 \text{ mm}$ . Auf eine genauere Ermittlung der Kernblechdicke soll hier verzichtet werden, da die ermittelten Werte nur für die in Kapitel 4 durchgeführten Berechnungen Verwendung finden sollen. Die Bestimmung

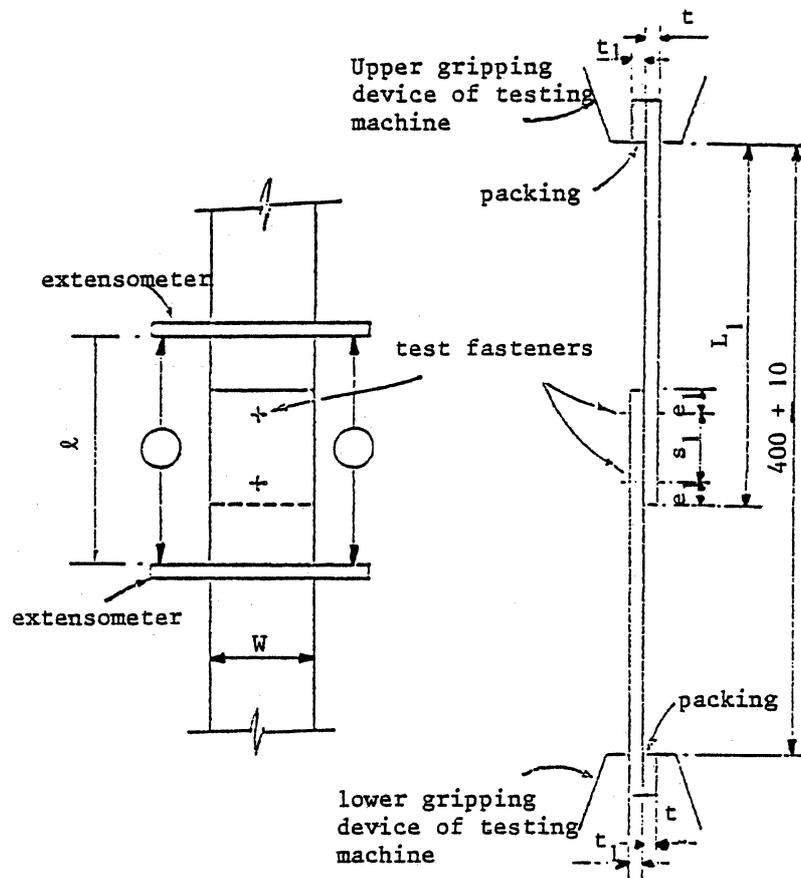
einer mittleren Steifigkeit unter der Annahme einer gleichmäßigen Blechdicke und unter Vernachlässigung der Zinkschichtdicken ist dafür ausreichend genau.

Als Werkstoffeigenschaften können aus den Versuchen folgende Werte angegeben werden  $f_{y,k} = 390 \text{ N/mm}^2$  und  $E = 195000 \text{ N/mm}^2$ . Der E-Modul wurde näherungsweise als Sekantenmodul zwischen den Spannungen  $0 \text{ N/mm}^2$  und  $150 \text{ N/mm}^2$  bestimmt.

Die Abbildungen einer Zugprobe und einer in die Zugmaschine eingebauten Probe können den Abbildungen Bild A.1 und Bild A.2 im Anhang entnommen werden.

### 3.2.2 Verbindungsmittel

Für die Befestigung von Trapezprofilen steht eine große Anzahl verschiedener Verbindungsmittel zur Verfügung. Als die Wichtigsten sind Setzbolzen, Schrauben und Nieten zu nennen. Jedes dieser Verbindungsmittel hat sein eigenes charakteristisches Last-Verformungsverhalten. Maßgebend für das Verformungsverhalten und damit die Steifigkeit sind die Materialien der zu verbindenden Bauteile und deren Dicke, das Material der Verbinder und deren Querschnitt, sowie die Art der Befestigung.

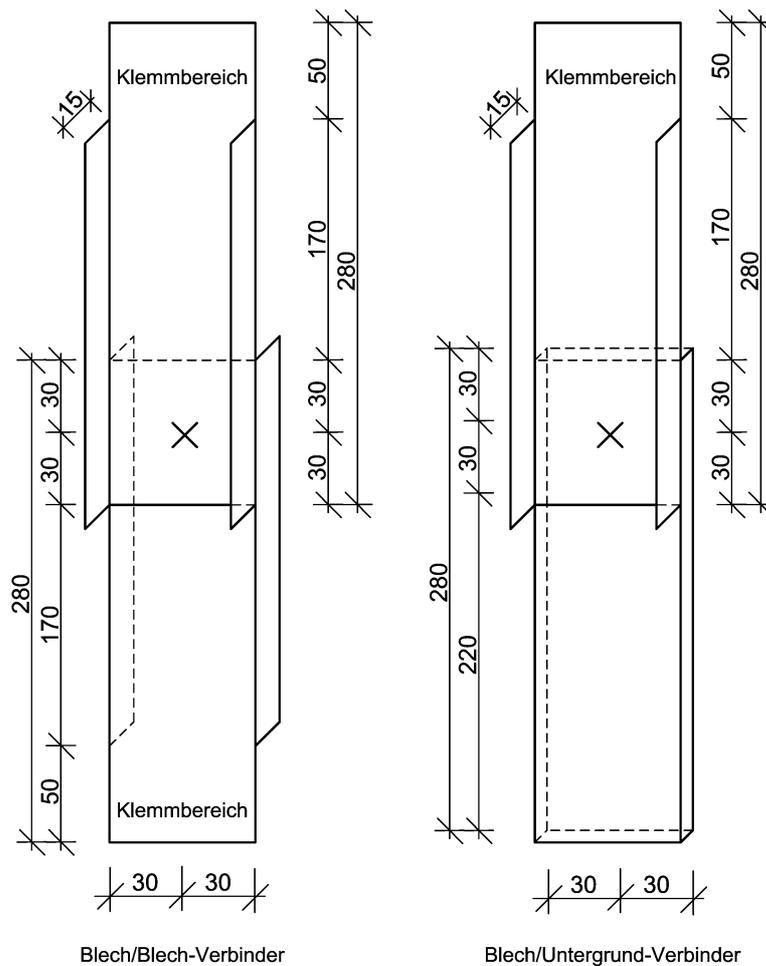


**Bild 3.2** Versuchsaufbau für Abscherversuche nach *ECCS* [12] und *ECCS* [13]

Für die durchzuführenden Untersuchungen ist lediglich die Steifigkeit unter einer Schubbelastung von Interesse. Es wurde also nur das Abscherverhalten der Verbindungsmittel näher untersucht. Der Last-Verformungsverlauf von Verbindungsmitteln unter einer Scherbelastung ist im Regelfall durch einen nichtlinearen Verlauf gekennzeichnet. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen soll das genaue Steifigkeitsverhalten der für die Großversuche verwendeten Verbindungsmittel untersucht werden.

In *ECCS* [12] und *ECCS* [13] werden Versuchsaufbauten zur Bestimmung des Tragverhaltens von Verbindungsmitteln angegeben. In Bild 3.2 ist der vorgeschlagene Versuchsaufbau dargestellt.

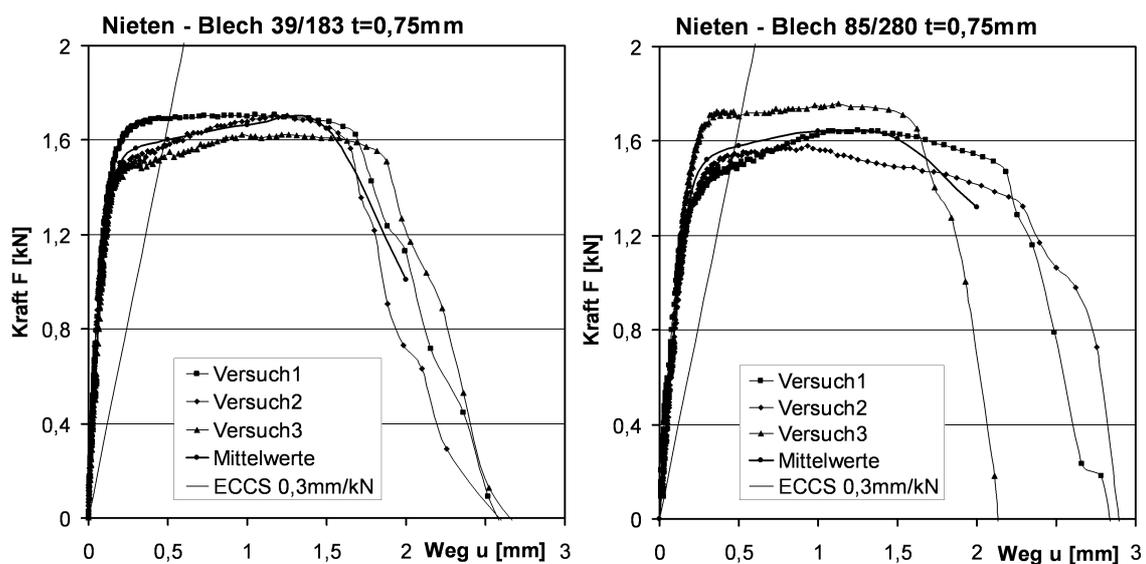
Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde der Aufbau leicht modifiziert. Dies erfolgte in Anlehnung an die in *Walter* [45] verwendeten Anordnungen. Der genaue Aufbau wird in Bild 3.3 dargestellt.



**Bild 3.3** Verwendete Versuchsaufbauten

Der Vorteil dieses Aufbaus liegt in der realistischeren Abbildung der Verbindungsmittel im Zusammenspiel mit den Trapezprofilen. Die Aufkantungen stehen für die Profilstege und verhindern ein Ausknöpfen des Bleches an den Verbindungsmitteln, was bei Trapezprofilen auch nicht ohne weiteres möglich ist. Die Verformungen wurden über zwei extern angebrachte Stabpotentiometer gemessen. Die aufgenommenen Wege wurden gemittelt und ergaben so die resultierende Verformung. Eine direkte Messung der Wege über den Traversenweg der Prüfmaschine war nicht möglich, da sich innerhalb der Aufhängung zu große Nachgiebigkeiten einstellten. Die Meßlänge der Potentiometer, auf welcher die Verschiebungen gemessen wurden, betrug 100 mm. Da die Verformungen vorrangig aus den Verschiebungen unmittelbar an den Verbindungsmitteln resultieren, war diese Messlänge ausreichend.

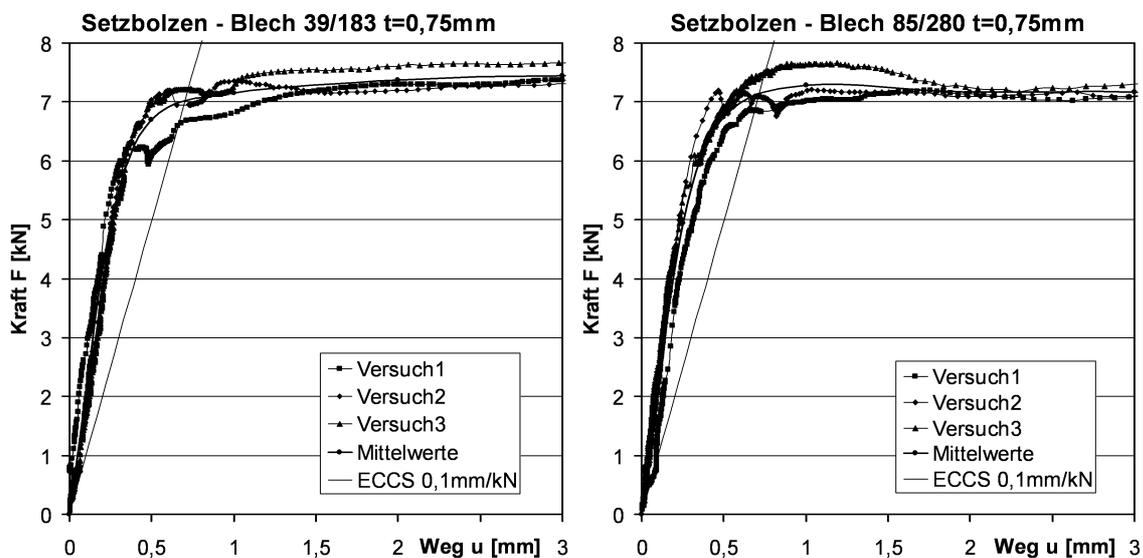
Mit jedem der drei unter Abschnitt 3.1 genannten Verbindungsmittel wurden drei Abscherversuche pro Profiltyp durchgeführt. Es ergeben sich somit neun Versuche pro Profiltyp. Die grafische Darstellung der ermittelten Verläufe kann den Abbildungen in Bild 3.4 bis Bild 3.6 entnommen werden. In *ECCS* [11] werden für die verschiedenen Verbindungsmittelarten rechnerisch ansetzbare Federsteifigkeiten angegeben. Bei diesen Werten handelt es sich um Mindestwerte, welche für alle Blechdicken gelten und für Berechnungen verwendet werden dürfen. Die Werte werden zum Vergleich ebenfalls in den Diagrammen dargestellt.



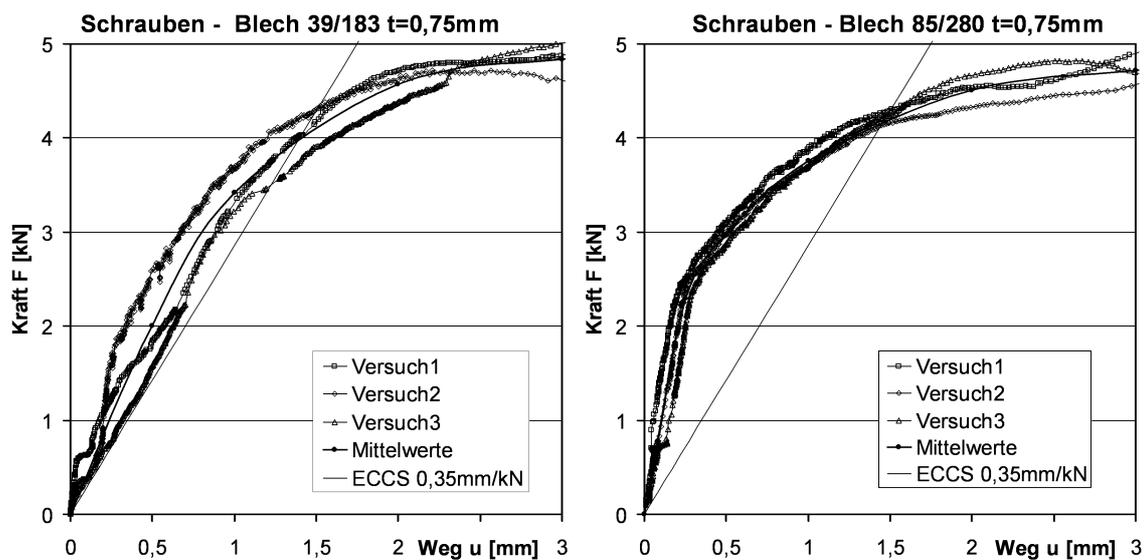
**Bild 3.4** Lastverformungsverlauf für Blindniet EJOT  $\varnothing$  4,8 aus Stahl (Blech/Blech-Stoß)

Zwischen den beiden Profiltypen lassen sich bei den Nietverbindungen keine signifikanten Unterschiede erkennen. Die Nieten reagieren für das Profil 39/183 geringfügig steifer als für das Profil 85/280. Die einzelnen Versuche streuen vor allem in den plastischen Bereichen recht erheblich. Das Versagen trat in allen Fällen durch das Abscheren der Nieten auf. Eine Langlochbildung war mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen. Die in *ECCS* [13] geforderte Verschiebungskapazität von 3mm erreichten alle Versuche nicht. Damit ist in jedem Fall eine Verwendung der Nieten nur unter Berücksichtigung von Nebenbeanspruchungen wie etwa Temperaturlasten zulässig. Dieser Fakt ist auch in der Zulassung angegeben. Der vom *ECCS* in *ECCS* [11] angegebene Wert von 0,3 mm/kN für eine rechnerisch ansetzbare Federsteifigkeit wird bei allen Versuchen überschritten. Der Wert liegt demnach auf der sicheren Seite.

Bei den Setzbolzenverbindungen lassen sich zwischen den beiden Profiltypen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede erkennen. Die Ergebnisse sind in Bild 3.5 dargestellt. Die einzelnen Versuche streuen vor allem in den plastischen Bereichen recht erheblich. Die Verbindungen versagten in allen Fällen durch eine Langlochbildung. Es wurden dabei stets Verformungen deutlich über 3mm erreicht. Die in *ECCS* [13] geforderte Verschiebungskapazität von 3mm erreichen damit alle Versuche. Somit ist eine Verwendung der Setzbolzen unter Vernachlässigung von Nebenbeanspruchungen wie etwa Temperaturlasten zulässig. Der vom *ECCS* in *ECCS* [11] angegebene Wert von 0,1 mm/kN für eine rechnerisch ansetzbare Federsteifigkeit wird bei allen Versuchen überschritten. Der Wert liegt damit auch hier auf der sicheren Seite.



**Bild 3.5** Lastverformungsverlauf für Setzbolzen Hilti ENP 19L15 (Blech/Untergrund-Verbinder)



**Bild 3.6** Lastverformungsverlauf für Bohrschrauben EJOT-JT2-8-5,5-V16 (Blech/Untergrund-Verbinder)

Bei den Schraubenverbindungen sind im Gegensatz zu den Niet- und Setzbolzenverbindungen Unterschiede im Last-Verormungsverhalten zwischen den beiden Profiltypen zu erkennen. Die Verbindungen des Profils 85/280 zeigen im elastischen Bereich ein wesentlich steiferes und gleichmäßigeres Verhalten. Bei dem Profil 39/183 streuen die Werte über den gesamten Lastverformungsverlauf relativ stark. Beide Profiltypen erreichten aber die gleichen Versagenslasten. Die Verbindungen versagten in allen Fällen durch eine Langlochbildung. Die in *ECCS* [13] geforderte Verschiebungskapazität von 3 mm wurde von allen Versuchen erreicht und sogar deutlich überschritten. Damit ist eine Verwendung der Setzbolzen unter Vernachlässigung von Nebenbeanspruchungen wie Temperaturlasten zulässig. Der vom *ECCS* in *ECCS* [11] angegebene Wert von 0,35 mm/kN für eine rechnerisch ansetzbare Federsteifigkeit wird bei allen Versuchen überschritten. Der Wert liegt also auch hier auf der sicheren Seite.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich für alle Versuche Steifigkeiten ergaben, die oberhalb der vom *ECCS* in *ECCS* [11] angegebenen Werte liegen. Für alle größeren Blechdicken werden die Werte ebenfalls eingehalten, da ein stärkeres Blech auch eine höhere Verbindungsmittelsteifigkeit erwarten lässt. Die Tatsache, dass die Gerade der angegebenen Federwerte alle Versuchskurven vor dem Erreichen des „3 mm - Kriteriums“ schneidet, wird als nicht maßgebend erachtet. Bei einem globalen Sicherheitsbeiwert für die Verbindungsmittel von  $\gamma_g = 2$  liegt dieser Schnittpunkt deutlich oberhalb der

Bemessungslasten. Die Werte können damit durchaus als vereinfachte Annahme für weitere Betrachtungen herangezogen werden. Des Weiteren besitzen alle Versuche die in *ECCS* [13] geforderte Mindestverformungskapazität von 0,5 mm, welche nötig ist, um eine gewisse Grundduktilität der Verbindung zu gewährleisten. Sie stellt eine weitere Voraussetzung für die Verwendung der Verbindungsmittel dar.

### **3.3 Großversuche an Trapezprofilen**

#### **3.3.1 Allgemeines**

Großversuche werden bei neueren Untersuchungen in der Regel begleitend und unterstützend bei der Erstellung von Berechnungsmodellen eingesetzt. Hierbei ist es nötig, sich mit der Versuchsanordnung möglichst dicht dem zu untersuchenden Problem zu nähern. Bevor die numerische Analyse komplexer Tragstrukturen mit Hilfe der Finiten-Element-Methode möglich wurde, konnten ausschließlich Versuche zur Verifizierung entwickelter Berechnungsmodelle herangezogen werden. Dies erforderte eine große Anzahl von Versuchen und erheblichen materiellen und personellen Aufwand. Mit der Einführung der Finiten-Element-Methode in der Tragwerksanalyse hat diesbezüglich eine deutliche Verschiebung stattgefunden. Neuere Untersuchungen basieren auf nur einigen wenigen Versuchen, welche zur Bestätigung von Finite-Element-Modellen verwendet werden. Mit der FE-Methode können dann umfangreichere Parameter- und Variantenstudien durchgeführt werden. Dieser Weg wird auch in der vorliegenden Arbeit beschritten.

#### **3.3.2 Versuchsaufbau**

Untersucht werden soll die aussteifende Wirkung von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen für deren Unterkonstruktion. Das besondere Augenmerk liegt hierbei auf dem seitlichen Ausweichen der Lagerträger, welches beim Knicken oder Biegedrillknicken auftritt. Bei diesen Versagensformen kommt es zu einer Einfeldträgerverformung des Trägersobergurts bzw. des gesamten Trägers. Diese Betrachtung soll auch die Grundlage für die gewählte Versuchsanordnung bilden. Beim Stabilitätsversagen kommt es zu Abtriebskräften, welche näherungsweise parabelförmig längs des Trägers in Richtung der schwachen Trägerachse verlaufen. Eine parabelförmige Belastung lässt sich aber nicht ohne weiteres im Rahmen eines Versuches erzeugen. Da die gewonnenen Ergebnisse im Wesentlichen zur Bestätigung des entwickelten FE-Modells verwendet werden sollen, wird die Belastung in Form dreier Einzellasten in den Viertelpunkten der Träger aufgebracht. In erster

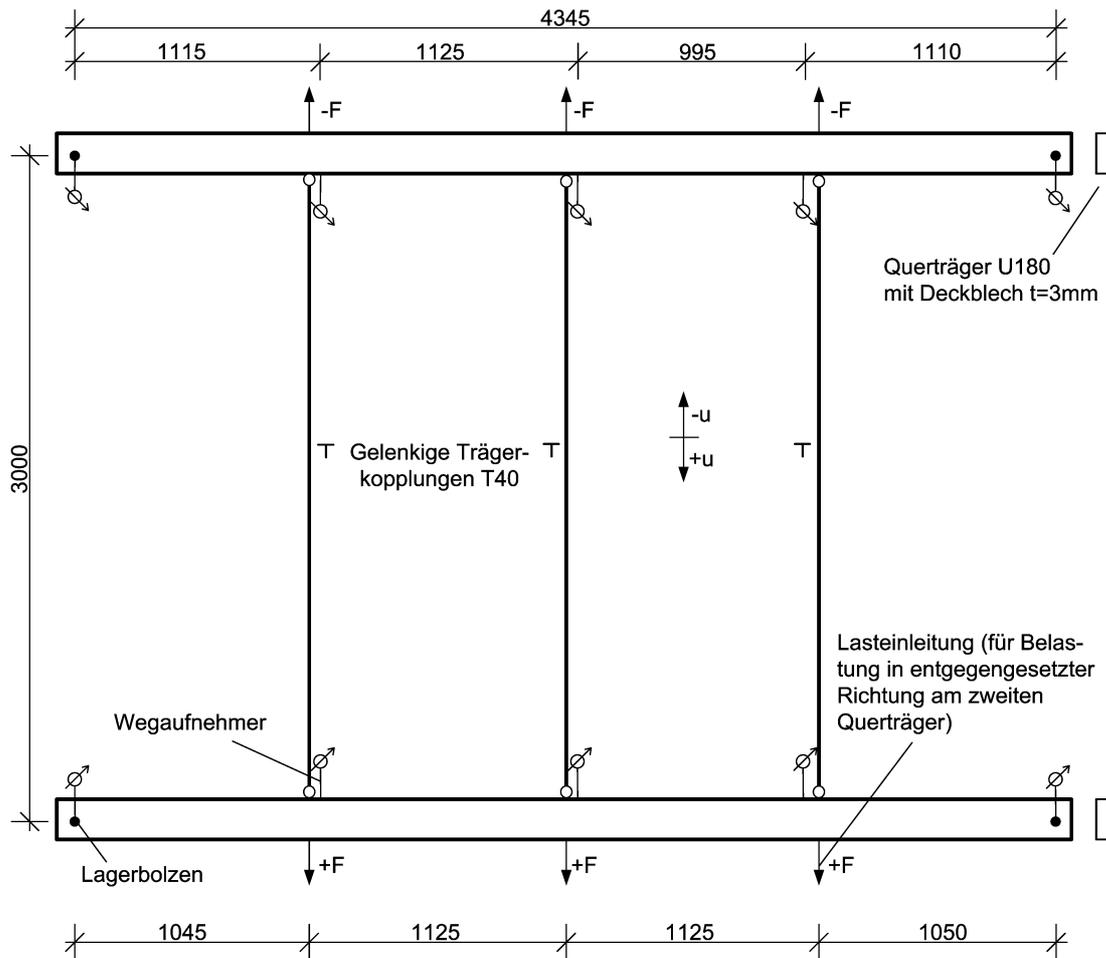
Näherung kann dies als Streckenbelastung angesehen werden. Grundlegend andere Ergebnisse als für eine konstante Streckenlast sind daraus nicht zu erwarten.

Die Grundlage für die bisherigen auch neueren Betrachtungen bildete stets die Schubverformung eines rechteckigen Viereckenrahmens, welcher durch Kräfte zu einem Parallelogramm verformt wird. Die Profile wurden dabei zwei- oder vierseitig auf dem Rahmen befestigt. Entsprechende Versuche wurden unter anderem in *Walter* [45], *Dürr et al.* [10] und *Saal et al.* [33] durchgeführt und beschrieben. Diese Art der Belastung entspricht aber nicht den tatsächlich auftretenden Einwirkungen bei seitlich ausweichenden Querschnitten und soll deshalb hier keine Verwendung finden.

In den Abbildungen Bild 3.7 und Bild 3.8 ist der Aufbau des verwendeten Versuchstandes dargestellt.



**Bild 3.7** Verwendeter Versuchstand



**Bild 3.8** Abmessungen und Aufbau des Versuchsstandes ohne Trapezprofile

Das Grundgerüst des Versuchsrahmens bestand aus einer steifen Fachwerkscheibe, welche aus I-Profilen gebildet wurde. Eine Verformung innerhalb der Unterkonstruktion, welche die Ergebnisse verfälschen könnte, wurde so vermieden. Die beiden Querträger, auf denen die Trapezprofile befestigt waren, wurden in einem Achsabstand von 3 m mit Paßbolzen an der Unterkonstruktion befestigt. Mit Hilfe der Bolzen konnte eine rein gelenkige Lagerung erzeugt werden. Um eventuell auftretende Zwängungen in Trägerlängsrichtung bei Belastung zu minimieren, wurden die Bohrungen für die Paßbolzen an den beiden Trägern an einem Ende als Langloch aufgeweitet. Die freie Verdrehbarkeit der Auflager wurde durch Kugellager gewährleistet. Die beiden Querträger bestanden aus einem flachgelegten Profil U180, welches mit einem Deckblech der Dicke  $t = 3$  mm zu einem Hohlkasten geschlossen wurde. Der Hintergrund dieser Maßnahme war die Erhöhung der Torsionssteifigkeit und damit die Verhinderung der Verdrehung des Trägers. Der Schubmittelpunkt des Trägers befand sich dann in etwa in Höhe der Lasteinleitung. Da im Rahmen der

Untersuchungen ausschließlich die Steifigkeit der Profile in der Profilebene untersucht wurde, war es zwingend erforderlich, die Verdrehung der Profile möglichst vollständig zu unterbinden. Wäre dies nicht geschehen, hätten die Ergebnisse auch größere Anteile aus einer Drehbettung beinhaltet, welche die Ergebnisse verfälscht hätten. Die beiden Querträger wurden mittels dreier T-Profile an den Lasteinleitungen gelenkig gekoppelt. Auf diese Art und Weise wird das gleichzeitige Ausweichen beider Träger simuliert.

Parallel zu den beiden belasteten Trägern wurde an den Außenseiten jeweils ein Lasteinleitungsträger angeordnet, an welchen die hydraulischen Pressen angebracht wurden. Die drei Pressen wurden über einen Verteiler parallel geschaltet, so dass sich in jeder Presse die gleiche Kraft einstellen konnte. Die Lasteinleitung in die Querträger erfolgte über zuvor geeichte Gewindestangen. Damit war eine genaue Messung der eingeleiteten Kräfte an jeder Gewindestange möglich. Die Verformung der Querträger wurde über Stabpotentiometer erfasst, die ebenfalls an den Lasteinleitungen angeordnet waren.

### 3.3.3 Versuche

Für die Versuche wurden die beiden unter Abschnitt 3.1 genannten Profiltypen verwendet. Da nur eine begrenzte Anzahl von Profiltafeln zur Verfügung stand, wurden die Profile mehrfach benutzt. Zu diesem Zweck wurden Profile mit einer größeren Länge als dem Trägerabstand von 3 m verwendet. Nach jedem Versuch wurden die Profile um 10 cm versetzt und erneut getestet. Um die Reproduzierbarkeit der Versuche sicherzustellen, wurden von jeder Versuchskonfiguration mindestens zwei Anordnungen geprüft.

Die Versuche wurden als zyklische Tests durchgeführt. Hierbei wurde die Last wechselseitig aufgebracht und kontinuierlich gesteigert. Bis das Versagen von Teilen der Versuchsanordnung eintrat, wurde die Belastung kontinuierlich gesteigert.

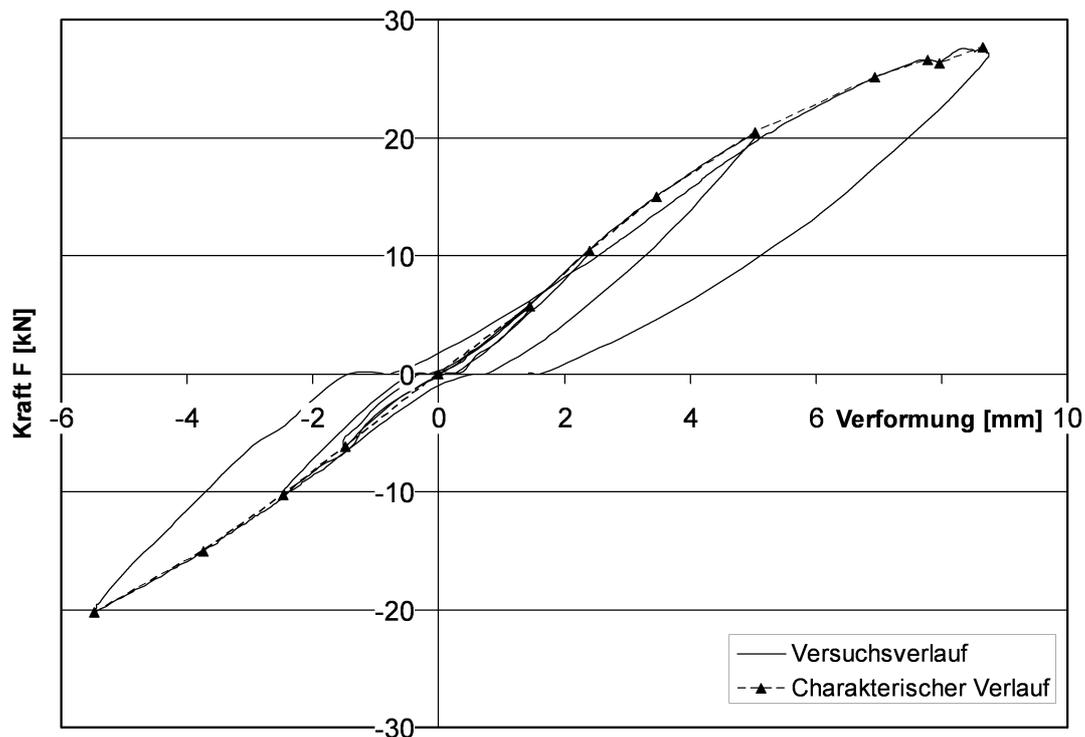
Für die Großversuche wurden die verwendeten Profile und Verbindungsmittel in unterschiedlicher Weise kombiniert. Die Profile wurden bei allen Versuchen in jeder Sicke auf den Querträgern befestigt. Der nachfolgenden Tabelle 3.1 können die untersuchten Kombinationen entnommen werden. Eine genaue Beschreibung jedes einzelnen Versuchs kann dem Anhang entnommen werden.

Im Bild 3.9 ist beispielhaft der Lastverformungsverlauf des Versuchs 1.2 dargestellt. Die Belastung wurde in diesem Fall mit einer Schrittweite von zunächst 5 kN und anschließend 10 kN gesteigert. In der Grafik ist die Verformung in Trägermitte als gemittelter Wert beider Querträger über den drei Einzellasten aufgetragen. Es lässt sich erkennen,

dass im Bereich der linearen Verformungen der Graph bei Wiederbelastung den Punkt des vorigen Maximums erneut erreicht. Erst im nichtlinearen Bereich treten Verschiebungsdifferenzen auf. Trotz der geringfügigen Differenzen ist es möglich, eine charakteristische Kurve für den gesamten Versuch anzugeben. Hierzu werden jeweils die Maxima der Versuchskurve als Stützpunkte berücksichtigt. Der sich daraus ergebende Verlauf ist ebenfalls in dem Diagramm dargestellt.

**Tabelle 3.1** Untersuchte Systemkonfigurationen

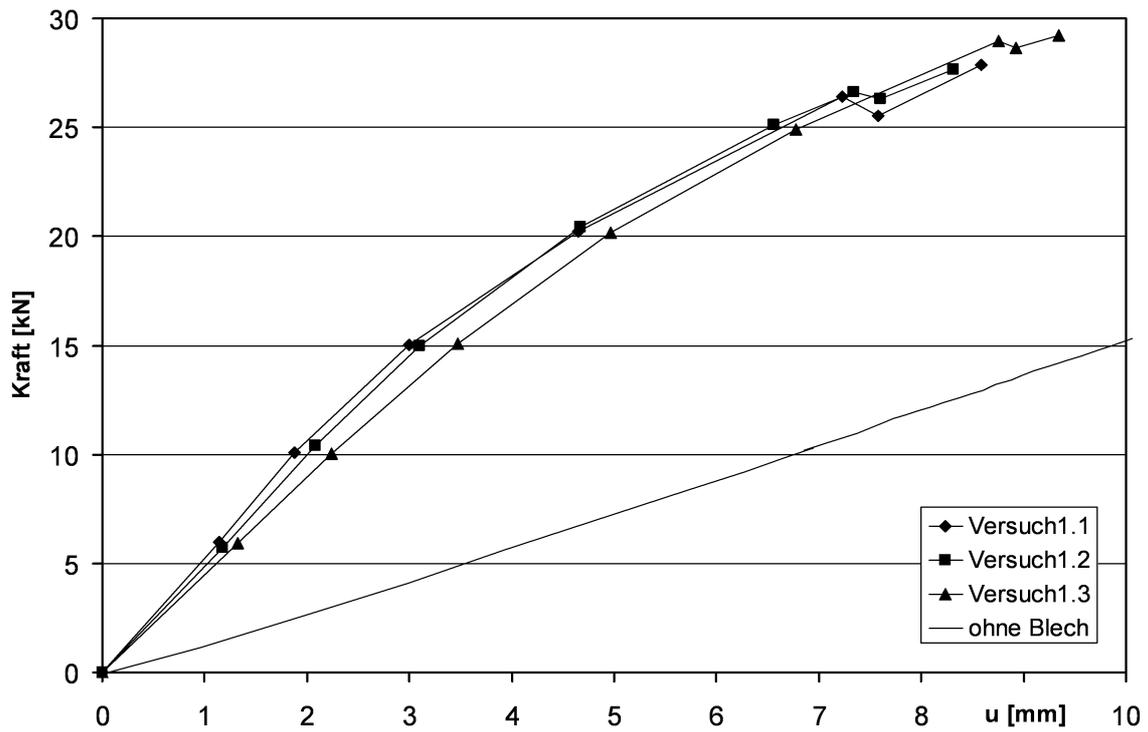
Nr.	Blechtyp	Lage	Blechlänge [mm]	Überstand [mm]	Verbinder		
					Querrand	Längsstoß	Abstand [mm]
1.1	39/183 t=0,75mm	positiv	3600	350	Setzbolzen	Nieten	500
1.2	39/183 t=0,75mm	positiv	3600	450	Setzbolzen	Nieten	500
1.3	39/183 t=0,75mm	positiv	3600	550	Setzbolzen	Nieten	500
2.1	39/183 t=0,75mm	positiv	3300	150	Bohrschrauben	Nieten	300
2.2	39/183 t=0,75mm	positiv	3300	250	Bohrschrauben	Nieten	200
3.1	39/183 t=0,75mm	negativ	3600	200	Setzbolzen	Nieten	300
3.2	39/183 t=0,75mm	negativ	3600	300	Setzbolzen	Nieten	300
3.3	39/183 t=0,75mm	negativ	3600	400	Setzbolzen	Nieten	300
4.1	85/280 t=0,75mm	positiv	3600	50	Setzbolzen	Nieten	300
4.2	85/280 t=0,75mm	positiv	3600	150	Setzbolzen	Nieten	300
5.1	85/280 t=0,75mm	positiv	3600	250	Bohrschrauben	Nieten	300
5.2	85/280 t=0,75mm	positiv	3600	350	Bohrschrauben	Nieten	300



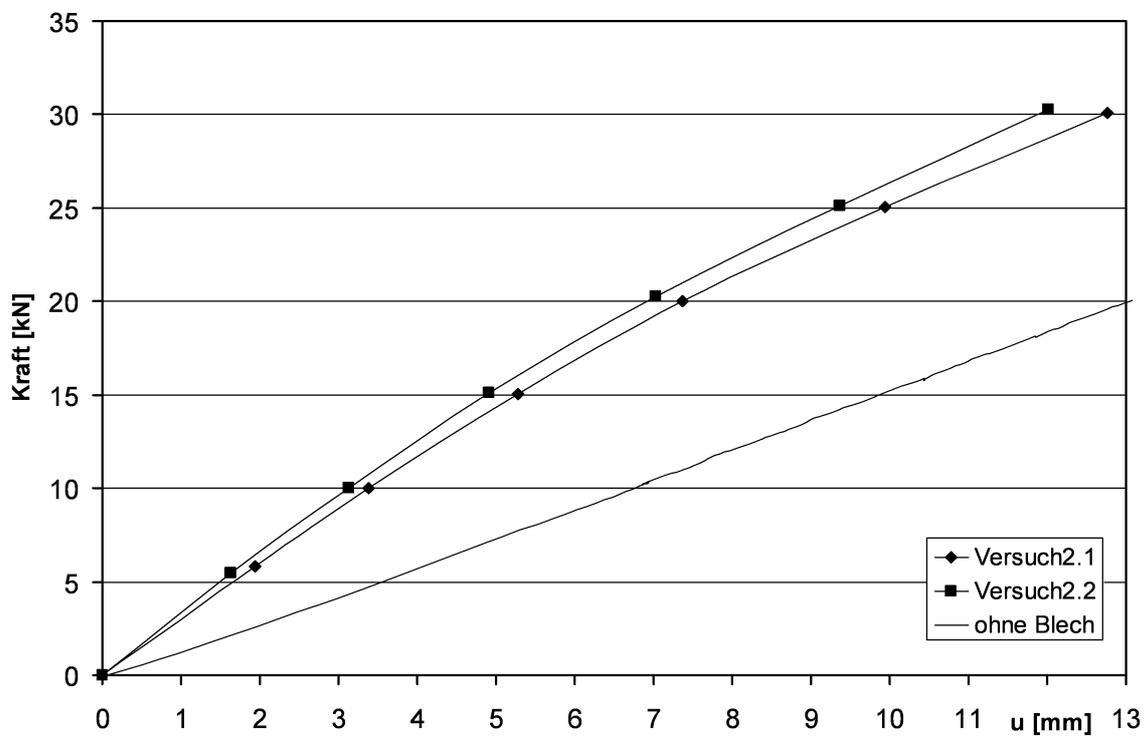
**Bild 3.9** Last-Verformungsverlauf Versuch 1.2

Aus dem Diagramm lässt sich erkennen, dass auch schon bei geringen Beanspruchungen bei einer Entlastung bleibende Verformungen entstehen. Diese resultieren im linearen Bereich vor allem aus Nachgiebigkeiten der gelenkigen Lager und sich einstellenden Reibungseffekten. Im nichtlinearen Bereich kommen noch plastische Einflüsse hinzu. Mit relativ geringen Lasten lassen sich diese Verformungen bei entgegengesetzter Belastung aber wieder „herausziehen“. Die Versagensursache in diesem Versuch war das plötzliche Abscheren aller Niete eines Blechstoßes bei  $F = 27 \text{ kN}$ . Man kann ebenfalls erkennen, dass die Kurven im positiven und negativen Kraftbereich qualitativ gleiche Verläufe aufweisen. Die geringen Differenzen resultieren aus den bereits erwähnten Nachgiebigkeiten der Trägerlager und den Reibungseffekten innerhalb der Konstruktion.

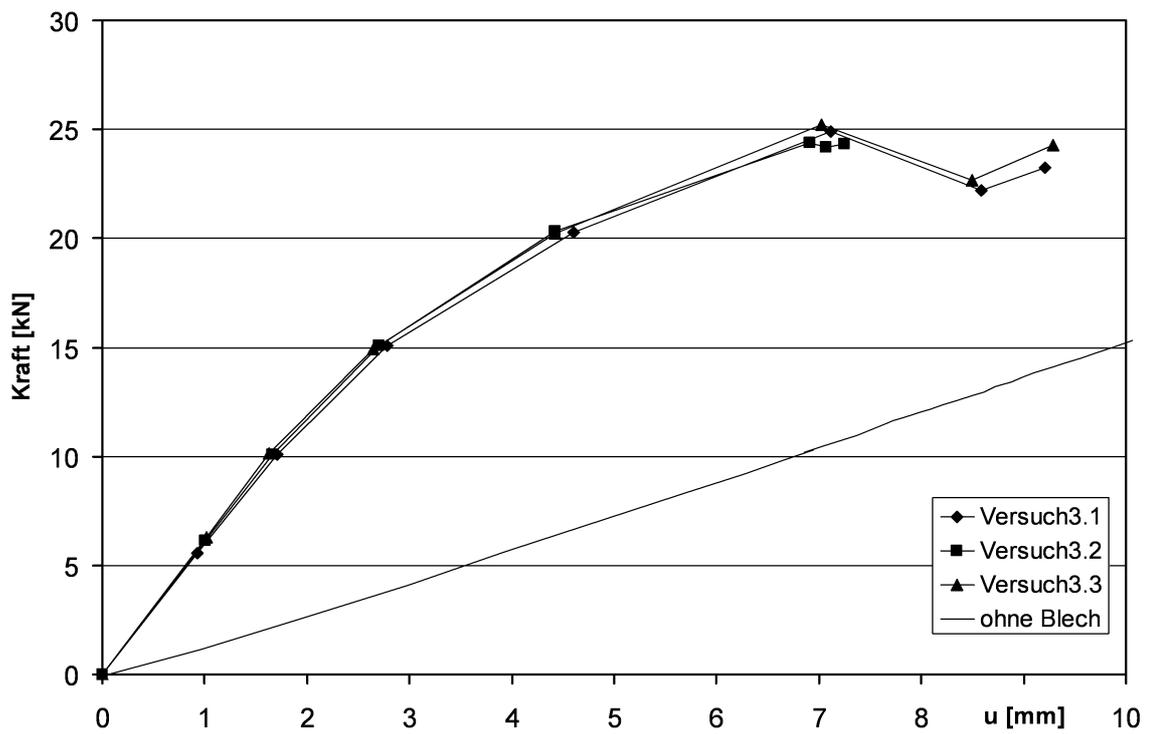
Bei allen durchgeführten Versuchen zeigen sich die gleichen Charakteristiken. Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Diagrammen in den Abbildungen Bild 3.10 bis Bild 3.14 an dieser Stelle nur die charakteristischen Verläufe dargestellt, wobei gleiche Versuchskonfigurationen zusammen in einem Diagramm abgebildet sind. Alle abgebildeten Verläufe sind bereits um die Effekte aus der nachgiebigen Lagerung bereinigt. Auf die Darstellung des negativen Lastbereiches soll verzichtet werden, was mit der Symmetrie der Verläufe begründet wird. Die einzelnen Versuche mit ihren genauen Last-Verformungsverläufen und Angaben zum Versuchsverlauf können dem Anhang A.2 entnommen werden. Zusätzlich zu den aufgenommenen Versuchskurven wird als Vergleich noch der Last-Verformungsverlauf der beiden Querträger ohne befestigte Trapezprofile dargestellt. Der Steifigkeitszuwachs lässt sich daran sehr deutlich erkennen.



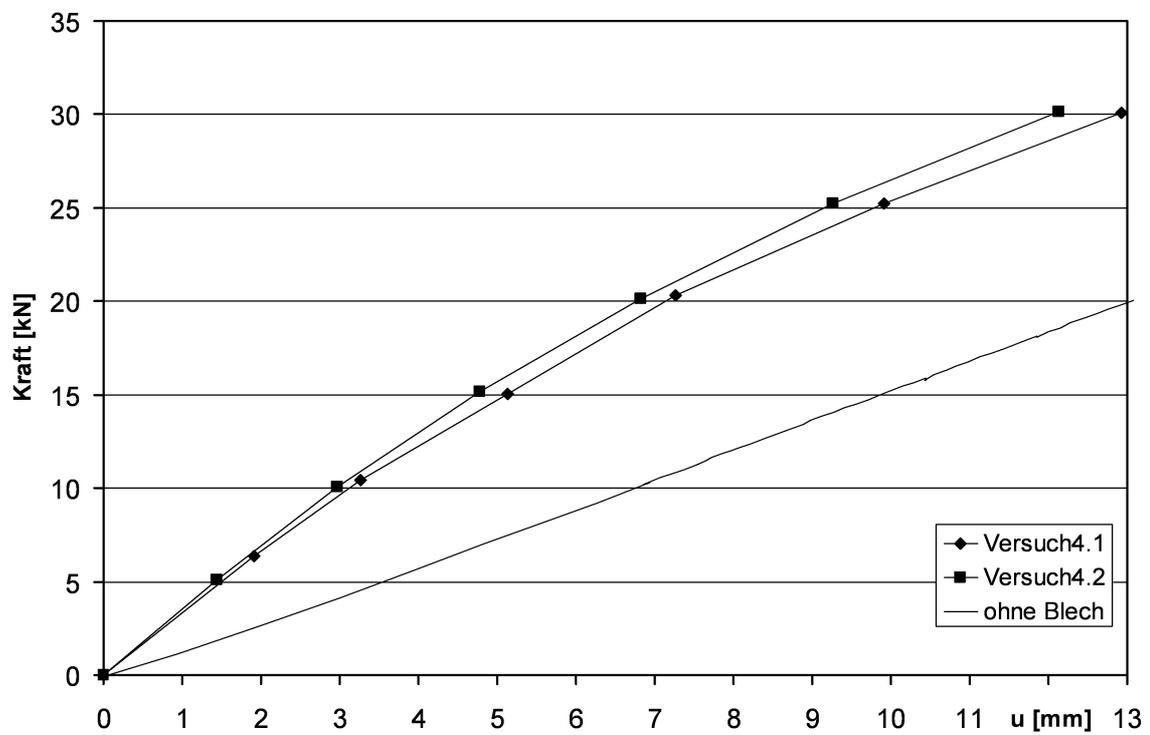
**Bild 3.10** Last-Verformungsverlauf Versuche 1.1, 1.2 und 1.3



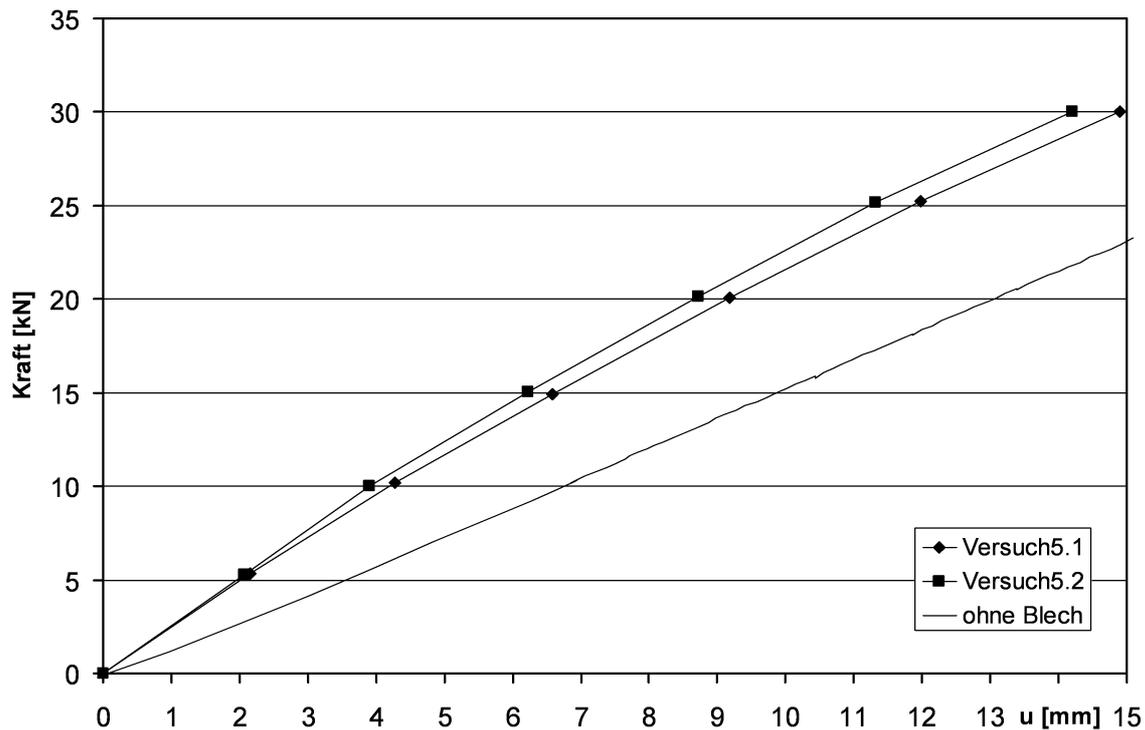
**Bild 3.11** Last-Verformungsverlauf Versuche 2.1 und 2.2



**Bild 3.12** Last-Verformungsverlauf Versuche 3.1, 3.2 und 3.3



**Bild 3.13** Last-Verformungsverlauf Versuche 4.1 und 4.2

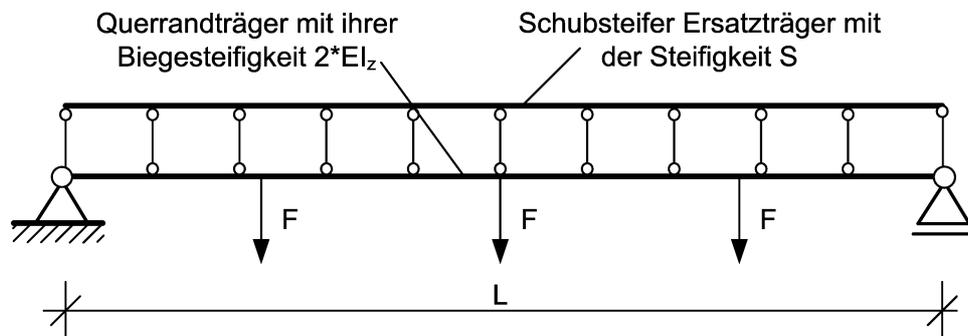


**Bild 3.14** Last-Verformungsverlauf 5.1 und 5.2

Aus den Last-Verformungsverläufen lassen sich bereits erste Schlussfolgerungen ziehen. Der erste wichtige Punkt ist, dass die Versuchsergebnisse reproduzierbar sind. Die aufgenommenen Kurven liegen für jede Konfiguration relativ dicht beieinander und zeigen keine signifikanten Unterschiede in ihren Versagensmechanismen. Für alle Versuche gilt, dass die zweiseitig befestigten Trapezprofile eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit gegenüber den beiden einfachen Querträgern zur Folge haben. Des Weiteren besitzen Setzbolzenverbindungen erwartungsgemäß eine höhere Steifigkeit als Schraubenverbindungen, wie die Vergleiche zwischen Bild 3.10 und Bild 3.12 mit Bild 3.11 bzw. Bild 3.13 mit Bild 3.14 deutlich zeigen. Eine Verdichtung der Verbindungsmittel an den Profilstößen zeigt ebenfalls eine steifigkeitserhöhende Wirkung, vergleiche hierzu Bild 3.10 mit Bild 3.12. Dieser Effekt ist trotz der Verwendung der Profile in Negativlage bei den Versuchen 3.1 bis 3.3 deutlich sichtbar. Die beiden Profiltypen zeigen auch untereinander deutliche Unterschiede, wobei das schubsteifere Profil 39/183 erwartungsgemäß ein steiferes Verhalten als das schubweichere Profil 85/280 zeigt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll unter anderem ein Vergleich zwischen den theoretischen Schubsteifigkeiten für eine starre vierseitige Lagerung nach *Strehl* [43] und den Steifigkeiten der in der Realität nachgiebigen Konstruktionen vorgenommen werden. In

Tabelle 3.2 werden aus diesem Grund für die verschiedenen Versuche Ersatzschubsteifigkeiten für die Trapezprofile ermittelt, welche anschließend mit den theoretischen Steifigkeiten eines echten Schubfeldes nach *Strehl* [44] verglichen werden. Grundlage für die Berechnung ist die Annahme eines schubsteifen Ersatzträgers als Stützung der Querträger. Die Darstellung des Ersatzsystems kann Bild 3.15 entnommen werden. Der Ersatzträger für die Trapezprofile und der Querträger sind dabei starr gekoppelt. Über den Abgleich der Verformungen in Trägermitte lässt sich so eine äquivalente Schubsteifigkeit bestimmen. Die Ersatzsteifigkeiten werden bei einer Last von etwa 10 kN ermittelt, da sich die Versuche bei dieser Last noch näherungsweise im linearen Bereich befinden. Die dafür verwendeten Kräfte mit ihren zugehörigen Verformungswerten können den Abbildungen Bild 3.10 bis Bild 3.14 entnommen werden.



**Bild 3.15** Statisches Ersatzsystem für die Berechnung der Schubsteifigkeit

**Tabelle 3.2** Erreichte Schubsteifigkeiten in den Versuchen

Nr.	Blechtyp	Stützweite $L_s$ [mm]	Überstände		F [kN]	$u_{\text{Trägermitte}}$ [mm]	$S_{\text{Strehl}}$ [kN]	$S_{\text{Versuch}}$ [kN]
			$\ddot{u}_{\text{unten}}$ [mm]	$\ddot{u}_{\text{oben}}$ [mm]				
1.1	39/183 t=0,75mm	3000	350	250	10,38	1,85	10280	12150
1.2	39/183 t=0,75mm	3000	450	150	10,04	2,07	10280	10733
1.3	39/183 t=0,75mm	3000	550	50	10,04	2,19	10280	9315
2.1	39/183 t=0,75mm	3000	150	150	9,98	3,10	10280	5054
2.2	39/183 t=0,75mm	3000	250	50	10,04	3,00	10280	5427
3.1	39/183 t=0,75mm	3000	200	400	10,11	1,77	11192	15147
3.2	39/183 t=0,75mm	3000	300	300	10,16	1,69	11192	16200
3.3	39/183 t=0,75mm	3000	400	200	10,16	1,66	11192	16767
4.1	85/280 t=0,75mm	3000	50	550	10,07	3,19	4787	6480
4.2	85/280 t=0,75mm	3000	150	450	10,07	2,89	4787	7371
5.1	85/280 t=0,75mm	3000	250	350	10,02	4,08	4787	3499
5.2	85/280 t=0,75mm	3000	350	250	10,02	3,72	4787	4236

In den Versuchsanordnungen waren die vorhandenen Profillängen größer als die Stützweite der Trapezprofile. Diese Längen werden für den Vergleich bewusst vernachlässigt, da für die Steifigkeitsberechnung von Schubfeldern die Befestigungsmittel die Begrenzung des Schubfeldes bestimmen. Überstände der Profile werden bei den theoretischen Betrachtungen stets vernachlässigt. Der dadurch begangene Fehler soll an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Die berechneten Werte sollen nur die auftretenden Differenzen und die Notwendigkeit weiterer Betrachtungen verdeutlichen.

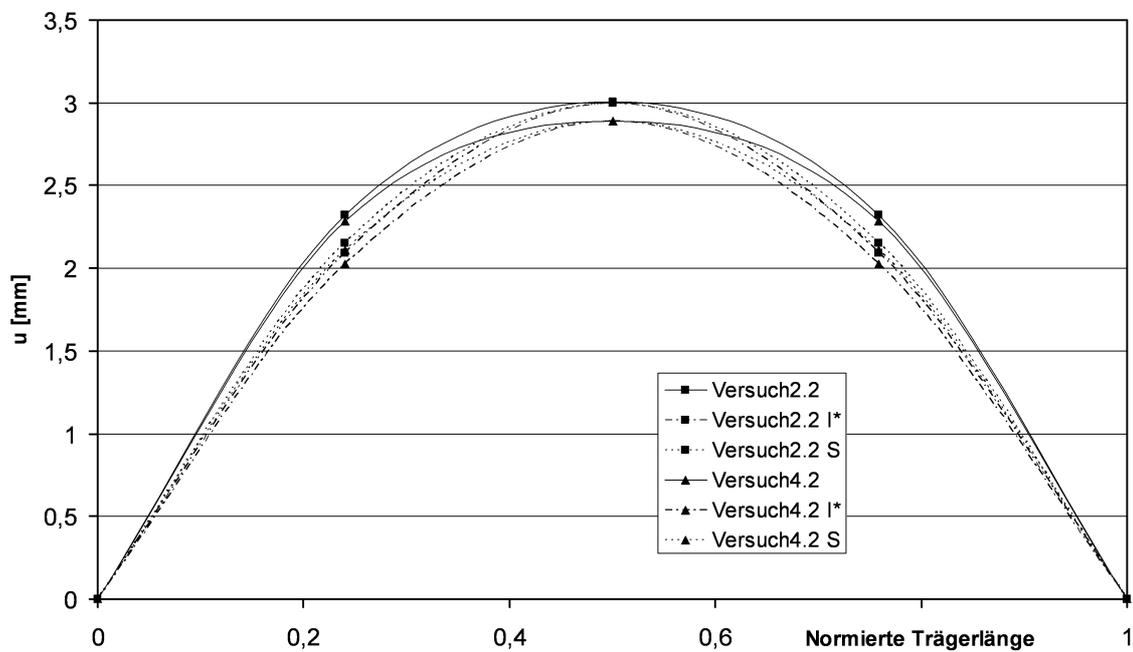
Beim Vergleich der Steifigkeiten kann man deutlich erkennen, dass nur fünf der durchgeführten 12 Versuche kleinere Schubsteifigkeiten als die theoretischen Werte für ein echtes Schubfeld nach *Strehl* liefern. Den Extremfall bildet hier Versuch 2.1, wo nur etwa 49% der Steifigkeit erreicht werden. Die übrigen sieben Versuche aus den Versuchsreihen 1, 3 und 4 erreichen im Gegensatz dazu sogar Steifigkeiten über den theoretischen Werten. Bei diesen Versuchen wurden die steifen Setzbolzen als Querrandverbindungsmittel verwendet. Dies kann jedoch nicht der Grund für die hohen Steifigkeiten sein. Vielmehr sind die großen Profilüberstände an den Querrändern für die großen Werte verantwortlich. Den Überständen kommt demnach eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zu.

Dass die Schubsteifigkeiten in den Versuchen Werte über den theoretischen Steifigkeiten nach *Strehl* erreichen können, obwohl die Verbindungsmittel nachgiebig sind, zeigte sich auch in Versuchen von *Walter* [45]. Im Abschnitt 2.4.5 wurde in Tabelle 2.1 der Versuch 3 für einen Vergleich herangezogen. Die Steifigkeit erreichte in diesem Fall einen um 20% höheren Wert als die theoretische Steifigkeit nach *Strehl*.

Allgemein findet man aber die zuvor bereits beschriebenen Abhängigkeiten bestätigt. Die mittlere Abweichung von den Mittelwerten der einzelnen Versuchskonfigurationen liegt bei etwa 10%. Man erkennt, dass die Annahme der theoretischen Steifigkeit nach *Strehl* [43] für eine Berechnung der Konstruktion zum Teil deutlich auf der unsicheren Seite liegt.

Es stellt sich noch die Frage, ob ein biegesteifer Ersatzbalken die Versuche nicht besser abbildet als ein schubsteifer Balken, also die Angabe einer Biegesteifigkeit  $I^*$  statt einer Schubsteifigkeit  $S$ . Zu diesem Zweck sind im Bild 3.16 zwei ausgewählte Versuche dargestellt. Gezeigt sind die Trägerverformungen über die normierte Trägerlänge der Versuche 2.2 und 4.2. Die Markierungen auf den Grafen stehen für die drei Messpunkte im Versuchsaufbau. Man kann erkennen, dass der schubsteife Träger die im Versuch gemessenen Verschiebungen besser abbildet. Beim schubsteifen Träger stimmen neben der Verschie-

bung in Trägermitte auch die Zwischenwerte besser überein. Die Angabe einer Schubsteifigkeit beschreibt das Verhalten also genauer. Die übrigen Versuche zeigen das gleiche Verhalten.



**Bild 3.16** Vergleich zw. schub- und biegesteifem Ersatzbalken



---

## Kapitel 4

### Beschreibung und Verifizierung eines FE-Modells

#### 4.1 Allgemeines

Zur Aussteifung eingesetzte Trapezprofilkonstruktionen besitzen eine große Komponentenvielfalt. Eine umfassende Untersuchung auf der Basis von Versuchen wäre deshalb sehr aufwendig. Um dennoch allgemeingültige Aussagen zum Tragverhalten derartiger Konstruktionen treffen zu können, ist es nötig, alternative Möglichkeiten und Werkzeuge zu nutzen. Die Finite-Element-Methode bietet hierfür hervorragende Voraussetzungen. Innerhalb dieses Kapitels soll ein Finite-Element-Modell beschrieben werden, mit dessen Hilfe die Untersuchungen zum Steifigkeitsverhalten von Trapezprofilen auf numerischer Ebene fortgesetzt und umfangreicher gestaltet werden können. Andere Ansätze für die Modellierung sind unter anderem in *Kitipornchai et al.* [18], *Yang et al.* [46] und *Walter* [45] enthalten. Die vorgenommenen Berechnungen werden mit dem Programmsystem Ansys 10.0 [1] durchgeführt.

Für die Entwicklung eines Modells ist es zunächst erforderlich, sich mit den einzelnen Bestandteilen der Konstruktion und mit ihrer Erfassung im Modell zu befassen. Umfangreiche Tests, welche die Genauigkeit des Modells bestätigen, sind hierfür unumgänglich. Für die Verifizierung sollen die im Kapitel 3 beschriebenen und in der Literatur angegebene Versuche verwendet werden. Das Modell wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben und auf seine Funktionalität getestet.

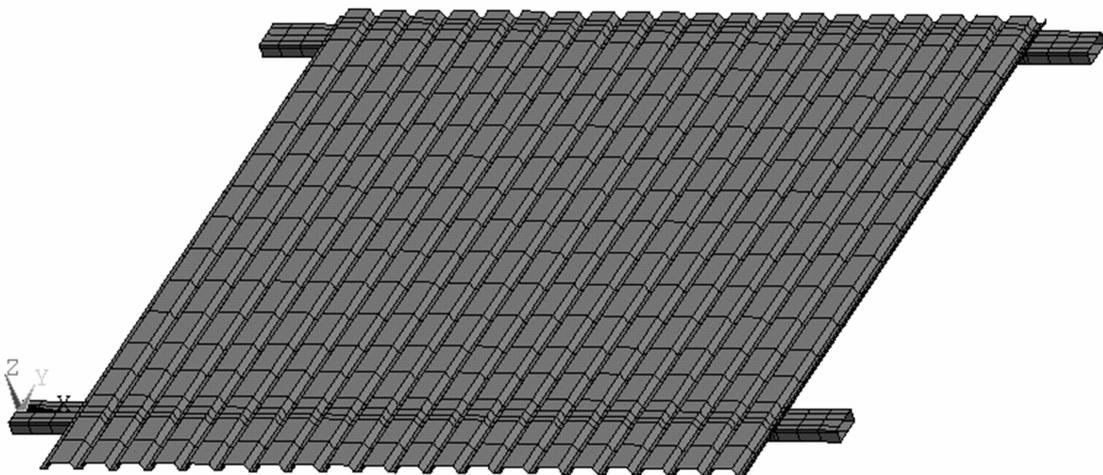
#### 4.2 Beschreibung des Finite-Element-Modells

Bei der Erstellung des Modells ist es erforderlich, alle Bestandteile möglichst genau zu erfassen, aber auch den numerischen Aufwand in Grenzen zu halten, da sonst unnötig lange Rechenzeiten ohne praktischen Nutzen entstehen. An dieser Stelle ist es notwendig, alle die Berechnung beeinflussenden Parameter zu ermitteln. Folgende Parameter haben einen Anteil an der Gesamtsteifigkeit des Systems und sind dementsprechend im Modell zu berücksichtigen:

- Abmessungen der Trapezprofilkonstruktion,
- Trapezprofilgeometrie (Höhe, Sicken, Dicke, etc.),
- Blechmaterial,
- Anzahl der Profiltafeln bzw. Anzahl der Profilstöße,

- Verbindungsmittel an den Profilstößen und ihre Abstände,
- Typ und Anzahl der Verbindungsmittel an den Profilrändern,
- Abmessungen der Unterkonstruktion,
- Material der Unterkonstruktion.

**Trapezprofil:** Als erstes und wichtigstes Element ist das Trapezprofil selbst zu beschreiben. Das Profil wird als Faltwerk abgebildet. Hierzu werden SHELL93 Elemente verwendet. Es handelt sich bei diesen Elementen um 8 Knoten Faltwerkselemente mit jeweils 6 Freiheitsgraden (3 translatorische und 3 rotatorische) pro Knoten. Sie sind in der Lage, nichtlineares Materialverhalten und ebenso nichtlineare Geometrie (also große Verformungen) zu erfassen. Um die Größe der Elemente festzulegen, wurden Elementierungstests in Form von Konvergenzversuchen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Tests war, dass bereits recht grobe Netze, wie im Bild 4.1 dargestellt, eine ausreichend genaue Abbildung der Profile leisten können. Die höheren Elementansätze der 8 Knoten Elemente wirken sich dabei positiv aus. Im Bild 4.1 ist beispielhaft die Elementierung für den Versuch 1.2 abgebildet.



**Bild 4.1** Verwendetes Elementnetz für die Nachrechnung von Versuch 1.2

**Verbindungsmittel:** Als zweites sind die Verbindungsmittel von besonderer Bedeutung. Die gewählten Elemente müssen in der Lage sein, ein nichtlineares Last-Verformungsverhalten abzubilden. Besondere Beachtung gilt hier der Tatsache, dass bei nichtlinearem Verhalten eine vektorielle Addition der Kraftanteile nicht mehr möglich ist. Die Anordnung zweier Federn, welche jeweils eine Koordinatenrichtung in der Scherebene beschrei-

ben, ist also ausgeschlossen. Bei der Verwendung von zwei richtungsbezogenen Elementen werden die Verbindungsmittel je nach Wirkungsrichtung der resultierenden Last viel zu steif abgebildet. Der Fehler tritt jeweils dann auf, wenn die resultierende Kraft den linearen Lastbereich verlässt und die Krafrichtung nicht in Richtung einer der beiden Federn verläuft. Die Elemente sind dementsprechend mit einer einzelnen nichtlinearen Feder zu beschreiben. Hierfür wurde das COMBIN39-Element aus der ANSYS-Elementbibliothek gewählt. Es handelt sich bei dem Element um ein 2-Knoten Federelement, welches nichtlineares Last-Verformungsverhalten abbilden kann. Das Element kann je nach Konfiguration Lasten in einer Koordinatenrichtung oder eine räumliche aber eindimensionale Last aufnehmen. Die Voraussetzung zum Einsatz des Elementes als zweidimensionale Feder ist die Durchführung einer geometrisch nichtlinearen Berechnung. Die Ausrichtung der Feder in Richtung der resultierenden Federkraft ist nur so möglich. Um die durchgeführten Versuche möglichst exakt nachrechnen zu können, empfiehlt sich die Durchführung einer solchen Berechnung ohnehin. Die Elemente werden sowohl für die Profilstoß- als auch für die Randverbinder eingesetzt.

Wie in *Walter* [43] beschrieben wird, haben Kontaktkräfte, welche beim Aufsetzen der Trapezprofilstege auf der Unterkonstruktion entstehen, eine zum Teil deutliche Erhöhung der Gesamtsteifigkeit zur Folge. Diese Einflüsse müssen im Modell ebenfalls erfasst werden. Zu diesem Zweck werden an den Kontaktstellen nichtlineare Federn angeordnet. Ihr Last-Verformungsverhalten wird so definiert, dass sie nur Druckkräfte übertragen können. Als Elemente werden ebenfalls COMBIN39-Federelemente gewählt. Die gleichen Elemente werden auch gewählt, um die Kontaktkräfte zwischen den Profilen an den Profilstößen abzubilden.

**Unterkonstruktion:** Den letzten Modellbestandteil bildet die Unterkonstruktion. Für die Nachrechnung der unter Kapitel 3 beschriebenen Versuche besteht sie aus den beiden gekoppelten Querträgern und dem steifen Fachwerkrahmen. Auf die Abbildung des Fachwerkrahmens wird im Modell verzichtet, da er als unverschieblich angesehen werden kann und somit keine verformungsrelevanten Steifigkeiten besitzt.

Die beiden Querträger werden mit ihren Abmessungen als Falzwerk abgebildet. Die Abbildung als Falzwerk hat den Vorteil, dass die zwischen dem Trapezprofil und dem Träger auftretende Kontaktkräfte über die mit den Falzwerkselementen erzeugten Knoten direkt übertragen werden können. Die Unterkonstruktion ist, je nachdem welche Untersu-

chungen durchgeführt werden sollen, unterschiedlich aufgebaut. Die Geometrie der Querschnitte und deren Lagerung kann der jeweiligen Konstruktion und den Erfordernissen angepasst werden. Als Elemente wurden SHELL43-Elemente gewählt. Es handelt sich um 4-Knoten-Faltwerkselemente. Jeder Knoten besitzt 6 Freiheitsgrade (3 translatorische und 3 rotatorische). Die Elemente sind auch für geometrisch nichtlineare Berechnungen geeignet.

### 4.3 Verifizierung des implementierten FE-Modelles

#### 4.3.1 Vergleich mit den theoretischen Schubsteifigkeiten nach Strehl aus [44]

Zur Verifizierung des in Abschnitt 4.2 beschriebenen und implementierten Finite-Element-Modelles werden nun verschiedene Tests durchgeführt. Hierbei ist es erforderlich, sich auf bereits bestätigte Werte zu beziehen. In dem ersten Test soll ein Vergleich zwischen den für die Zulassungen relevanten Werten nach *Strehl*, welche nach *Strehl* [44] berechnet werden können, und den mit dem FE-Modell ermittelten Werten durchgeführt werden.

Für den Test werden verschiedene Trapezprofile ausgewählt. Es werden die in den Großversuchen verwendeten Profile und drei weitere für einen Vergleich herangezogen. Die genutzten Profile sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Bei allen Profilen handelt es sich um Profile der Firma Arcelor. Die genauen Abmessungen können *Arcelor* [2] entnommen werden. Die Profillänge wird mindestens so groß wie die Mindestlänge  $\min L_s$  gewählt. Um den Einfluss aus Randstörungen zu minimieren, ist eine ausreichend große Anzahl an Profilperioden zu wählen. Für alle durchgeführten Rechnungen werden 20 Perioden verwendet. Ferner wird ein lineares Materialverhalten für die Profile angesetzt.

Zur Herleitung der Schubsteifigkeiten nach *Strehl* [43] wird ein ideales Schubfeld vorausgesetzt. Dies bedeutet, dass die Ränder nur Kräfte in ihrer Richtung aufnehmen können. Die Randverbindungsmittel sind deshalb nur in Randrichtung anzusetzen. Senkrecht zum Rand sind keine Verbinder angeordnet. Die Verbindungsmittel werden ferner durch starre Kopplungen ersetzt, um Nachgiebigkeiten und daraus entstehende Fehler auszuschließen. Für die Unterkonstruktion wird ein ebener Viereckrahmen mit einer sehr großen Steifigkeit modelliert. Das Aufsetzen der Trapezprofilstege wird über die beschriebenen Kontaktelemente ermöglicht.

In Tabelle 4.1 erfolgt die Gegenüberstellung der Werte. Für die berücksichtigten Profile wurden jeweils drei Blechdicken  $t_N$  untersucht. Die Berechnungen werden mit den Min-

destblechdicken  $t = t_N - 0,04$  mm durchgeführt, um die Ergebnisse mit den theoretischen Werten vergleichen zu können.

**Tabelle 4.1** Vergleich der theoretischen  $S_{\text{Strehl}}$  und errechneten Schubsteifigkeiten  $S_{\text{FE-Strehl}}$

Blechtyp	Blechlänge [mm]	Blechdicke $t_N$ [mm]	$S_{\text{Strehl}}$ [kN]	$S_{\text{FE-Strehl}}$ [kN]	$S_{\text{FE-Strehl}}/S_{\text{Strehl}}$ [-]
39/183	2000	0,75	4709	4447	0,94
		1	9718	9239	0,95
		1,25	16775	15943	0,95
85/280	3000	0,75	4787	4621	0,97
		1	9968	9875	0,99
		1,25	17376	17445	1,00
135/310	5000	0,75	4447	4340	0,98
		1	9324	9327	1,00
		1,25	16372	16591	1,01
160/250	6000	0,75	5175	5138	0,99
		1	10820	10924	1,01
		1,25	18940	19295	1,02
200/420	7000	0,75	2490	2418	0,97
		1	5262	5214	0,99
		1,25	9322	9390	1,01

Bei allen Profilen lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den FE-Rechnungen  $S_{\text{FE-Strehl}}$  und den theoretischen Schubsteifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  nach *Strehl* [44] feststellen. Die größte Abweichung entsteht bei dem Profil 39/183 mit einer Blechdicke von  $t_N = 0,75$  mm mit etwa 6%. Die Abweichung bewegt sich damit aber in einem akzeptablen Rahmen. Alle übrigen Profile stimmen nahezu exakt überein. Neben den hier dargestellten Werten wurden weitere Profile nachgerechnet. Insgesamt sind 12 Profile auf diese Weise überprüft worden. Es ergaben sich ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen. Das Modell ist also in der Lage, die theoretischen Werte, bei welchen es sich auch um Näherungen handelt, ausreichend genau abzubilden. Der Test wird als bestanden angesehen.

### 4.3.2 Verifizierung anhand der durchgeführten Großversuche

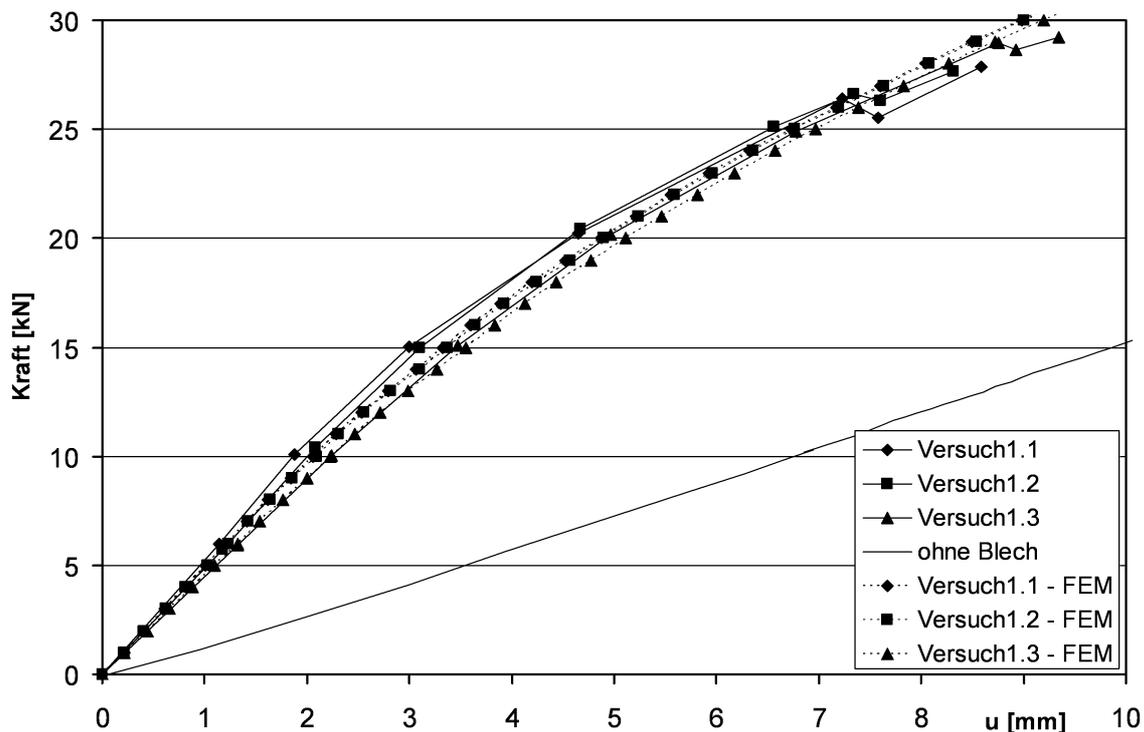
Zur zweiten Verifizierung sollen die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Großversuche herangezogen werden. Hierzu sind wieder einige Modellspezifizierungen nötig. In Bild 4.1 ist bereits das verwendete FE-Modell abgebildet. Die Unterkonstruktion wird als faltwerk mit den Abmessungen der Querträger abgebildet und entsprechend gelenkig gelagert.

Für die Trapezprofile wird ein multilineares Materialverhalten angesetzt. Die Spannungs-Dehnungslinie folgt dem unter Abschnitt 3.2.1 ermittelten Verlauf. Sicken, welche bei den

Versuchen 4 und 5 im Profil 85/280 vorhanden waren, werden für die Berechnungen vernachlässigt. Die Vernachlässigung der Sicken hat einen versteifenden Einfluss auf die Gesamtkonstruktion. Die Begründung hierfür liegt in der größeren abgewickelten Länge der Profile. Die Sicken verbessern zwar den Beulwiderstand und damit die Biegetragfähigkeit des Profils, aber nicht seine Schubsteifigkeit.

Die Verbindungsmittel werden mit den unter Abschnitt 3.2.2 experimentell ermittelten mittleren nichtlinearen Kraft-Verformungsverläufen in Ansatz gebracht. Der Kraft-Verformungsverlauf der räumlichen Federn ist durch eine multilineare Linie beschrieben. Die Kontaktkräfte zwischen Profil und Unterkonstruktion werden durch drucksteife Federn beschrieben.

In den nachfolgenden Abbildungen Bild 4.2 bis Bild 4.6 kann ein grafischer Vergleich zwischen den Großversuchen und den Berechnungen mit dem FE-Modell vorgenommen werden. Die zusammengehörigen Verläufe sind in den Abbildungen durch gleiche Symbole gekennzeichnet.



**Bild 4.2** Vergleich zw. FE-Rechnung und den Großversuchen 1.1, 1.2 und 1.3

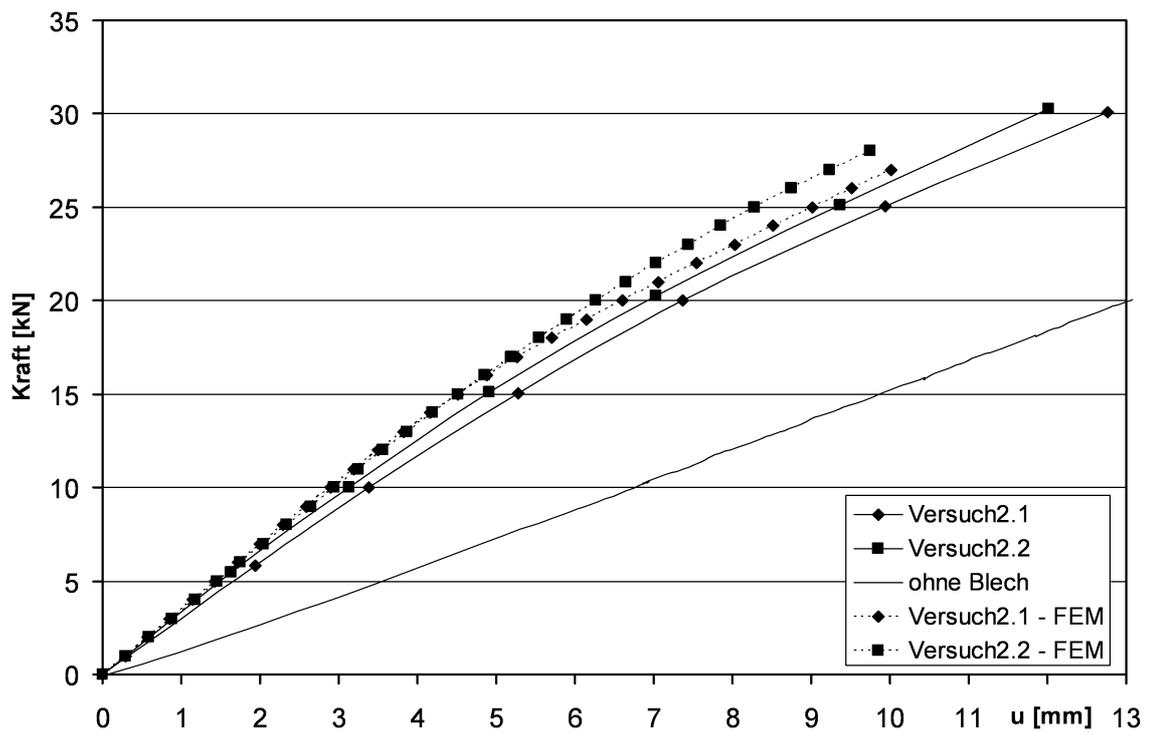


Bild 4.3 Vergleich zw. FE-Rechnung und den Großversuchen 2.1 und 2.2

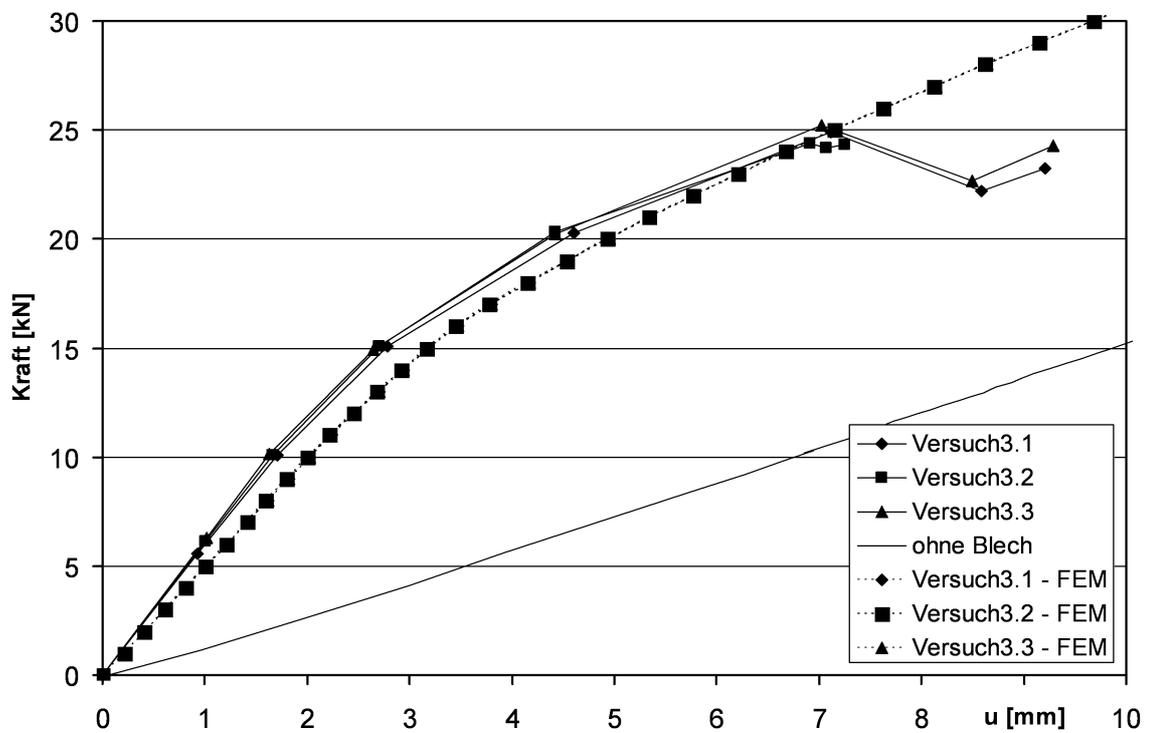
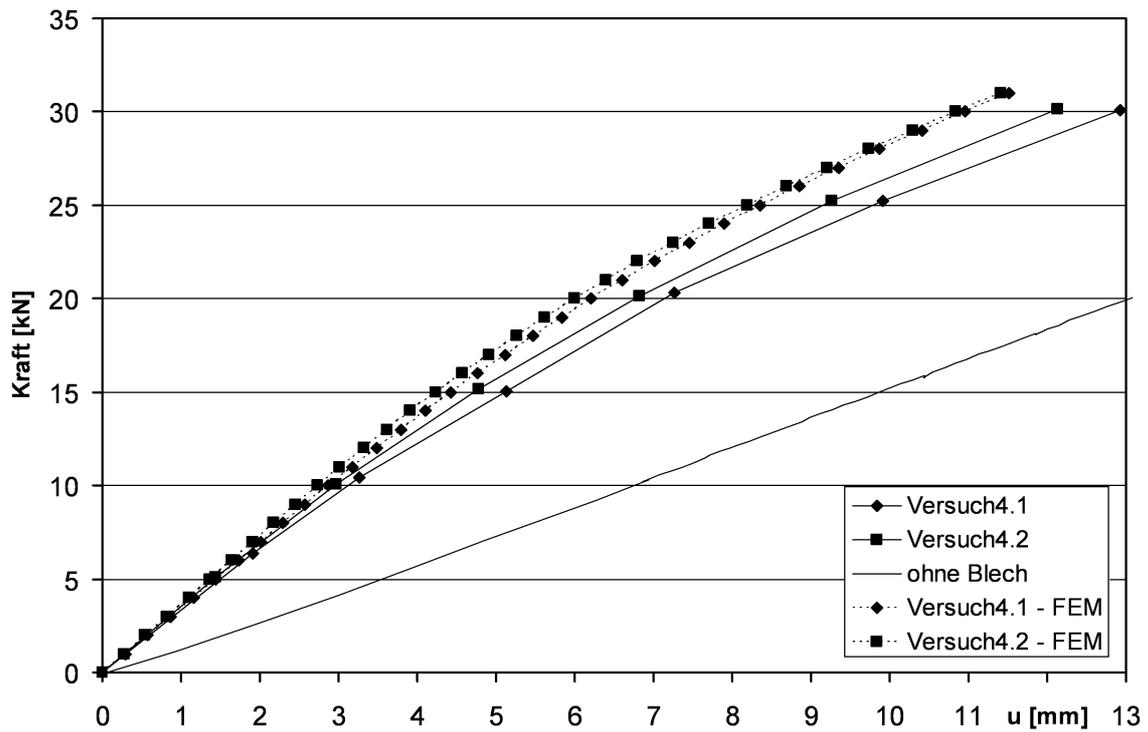
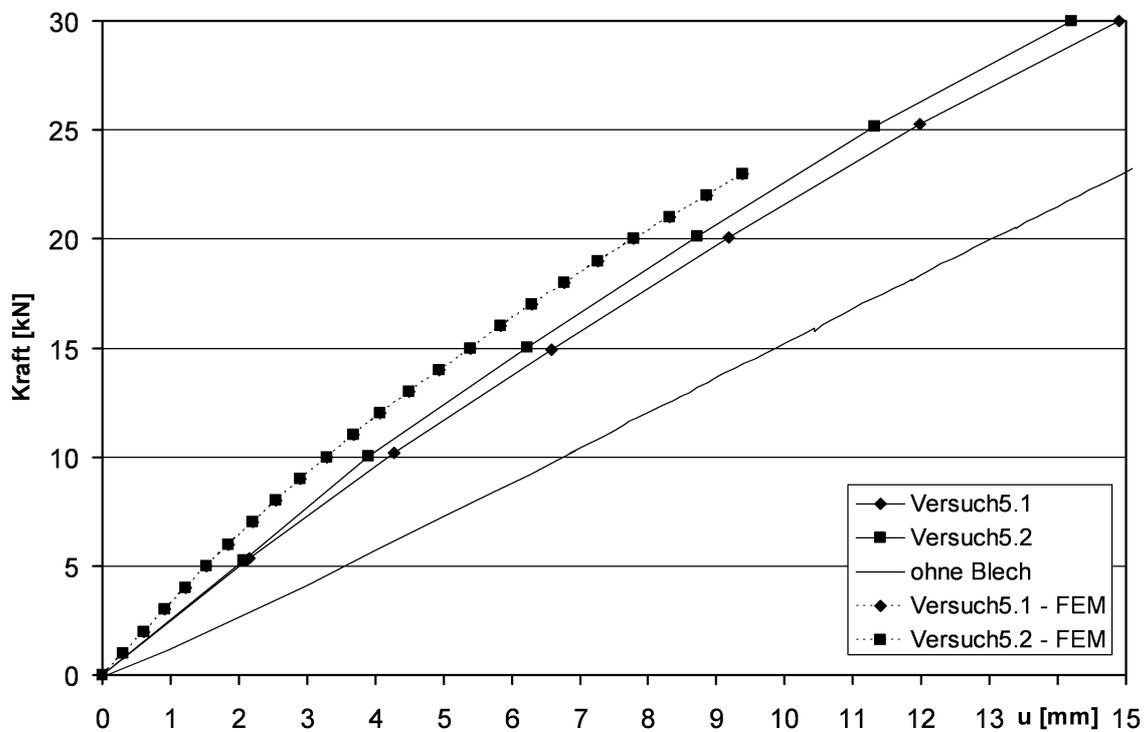


Bild 4.4 Vergleich zw. FE-Rechnung und den Großversuchen 3.1, 3.2 und 3.3



**Bild 4.5** Vergleich zw. FE-Rechnung und den Großversuchen 4.1 und 4.2



**Bild 4.6** Vergleich zw. FE-Rechnung und den Großversuchen 5.1 und 5.2

Die experimentell und mit der FEM ermittelten Ergebnisse zeigen sehr gute Übereinstimmungen. Bei den Versuchen 1 (Bild 4.2) und 3 (Bild 4.4) sind die Verläufe nahezu identisch. Im Versuch 2 (Bild 4.3) treten maximale Abweichungen von etwa 8% auf. Die Unterschiede im Versuch 2 zwischen den beiden Versuchen 2.1 und 2.2 im Verformungsverlauf resultieren aus dem geringeren Verbindungsmittelabstand in den Profilstößen beim Versuch 2.2.

Die mit dem Profil 85/280 durchgeführten Versuche 4 (Bild 4.5) und 5 (Bild 4.6) zeigen etwas größere Abweichungen im Verformungsverlauf. Sie betragen etwa 10% im Versuch 4 und maximal 15% im Versuch 5. Diese Abweichungen resultieren aus der vereinfachten Abbildung der Trapezprofile im FE-Modell, da die Sicken vernachlässigt wurden. Die Profile verhalten sich im Versuch dadurch etwas weicher.

Für alle Versuche lässt sich erkennen, dass die FE-Rechnungen generell steifer als die Versuche ausfallen. Dies stellt aber keinen Modellierungsfehler dar. Vielmehr lassen sich in FE-Modellen nicht alle Nachgiebigkeiten eines realen Versuches abbilden. Dies betrifft z.B. Nachgiebigkeiten aus Beuleffekten oder Einflüsse aus fehlerhaft gesetzten Verbindungsmitteln. Die im Bild A.5 dargestellte Beule vor dem Verbindungsmittel am nicht abgekanteten äußeren Profilrand hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Durchgeführte Vergleichsrechnungen mit einer verminderten Steifigkeit für die Verbindungsmittel an diesem Rand brachten eine Bestätigung dafür. Die Modelle reagieren in diesem Fall nachgiebiger. Mit diesem Effekt lässt sich auch die größere Abweichung bei den Versuchen 4 und 5 mit dem Profil 85/280 zum Teil erklären. Für diese Versuche wurden lediglich 3 Profiltafeln nebeneinander gelegt. Es waren also 12 Profilperioden vorhanden. Sollte die Lagerung auch nur an einem der Verbindungsmittel weicher als angenommen sein, ergibt sich daraus eine größere Änderung im Bezug auf die Gesamtsteifigkeit. Bei den Versuchen 1 bis 3 mit jeweils 4 Profiltafeln und insgesamt 20 Profilperioden ist eine deutlich größere Anzahl von Befestigungsmitteln vorhanden. Aus diesem Grund tritt der Effekt dort nicht so stark hervor.

An den FE-Berechnungen und den Versuchen lässt sich noch ein weiterer Effekt beobachten. Vergleicht man die Versuche 1.1 bis 1.3 im Bild 4.2, lässt sich sowohl bei den Versuchen als auch bei den FE-Berechnungen erkennen, dass Versuch 1.3 nachgiebiger als die beiden anderen reagiert. Das Gleiche zeigt auch ein Vergleich der Versuche 4 im Bild 4.5, wenn er auch nicht ganz so klar hervortritt. Analysiert man nun die Versuchsaufbauten, kann man sehen, dass die beiden „weichen“ Versuche 1.3 und 4.1 eine Gemeinsamkeit

haben. Die Profilenden eines der beiden Ränder haben jeweils nur einen Abstand von 5cm von den Verbindungsmitteln am Querrand. Es liegt also nahe, dass der Überstand der Profiltafeln einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Steifigkeit hat. Dieser Effekt soll in den weiteren Betrachtungen in Abschnitt 5.2 noch näher untersucht werden. Bei den anderen Versuchen sind die FE-Berechnungen nahezu deckungsgleich und zeigen diesen Effekt nicht. Eine Verschiebung der Profile um 10 cm hat dort keine Auswirkungen auf die Gesamtsteifigkeit.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das FE-Modell in der Lage ist die Versuche sehr gut abzubilden. Es kann für weitere Betrachtungen herangezogen werden.

### 4.3.3 Vergleich mit den von Dürr in [33] beschriebenen Versuchen

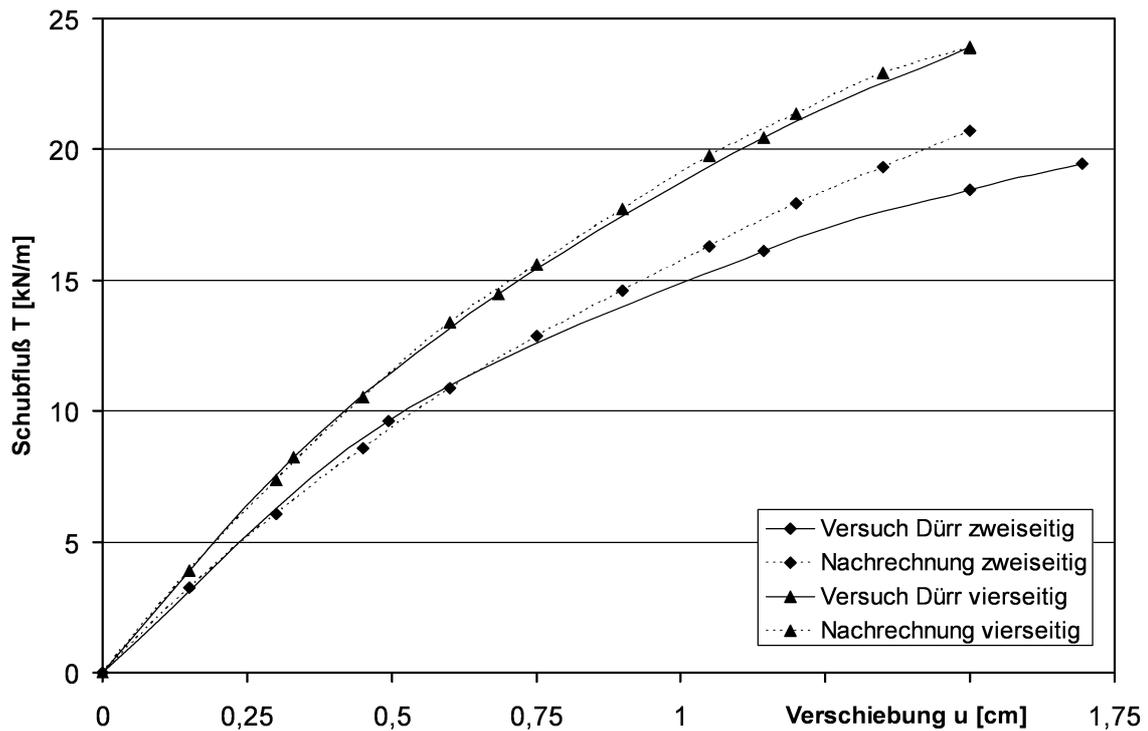
Als weiterer Test des FE-Modells sollen in der Literatur beschriebene Versuche zur Verifizierung herangezogen werden. In *Saal et al.* [33] werden unter anderem zwei in Karlsruhe durchgeführte Schubversuche beschrieben. Wobei es sich einmal um eine zweiseitige und das andere mal um eine vierseitige Befestigung der Profiltafeln handelt. Es werden dabei Profiltafeln vom Typ LS 5/35/1035 mit einer Blechdicke von  $t_N = 1$  mm auf einem Schubrahmen von 6,75 m x 3 m befestigt. Die Trapezprofile besitzen eine Spannweite von 3 m. Die Profile werden senkrecht zu ihrer Tragrichtung beansprucht. Als Randverbinder wurden Bohrschrauben EJOT JT2-12-5,5x35 V16 eingesetzt. Die Profile wurden in jeder Sicke und zusätzlich für das Schubfeld alle 15 cm an den Längsrändern befestigt. Für die Profilstöße sind Bohrschrauben EJOT JT2-4,8x19 mit einem Abstand von 15 cm verwendet worden.

Mit den Randverbindern wurden Abscherversuche durchgeführt. Aus den dabei gemessenen Verläufen wurde ein mittlerer Last-Verformungsverlauf für die Schrauben bestimmt. Der angegebene Verlauf wird für die Berechnungen verwandt. Für die Bohrschrauben in den Profilstößen wurden keine Verläufe angegeben. In *Walter* [45] werden aber Abscherversuche mit identischen Verbindungsmitteln beschrieben. Die dort ermittelten Kurven wurden als Näherung für die Berechnungen verwendet.

Im Bild 4.7 sind die Last-Verformungsverläufe der beiden beschriebenen Versuche abgebildet. In dem Diagramm ist in Anlehnung an die Grafiken in *Saal et al.* [33] der Schubfluß über der Verformung aufgetragen.

Die Verläufe zeigen beide eine gute Übereinstimmung. Der vierseitige Versuch ist hierbei nahezu deckungsgleich. Der zweiseitige Versuch weist im nichtlinearen Bereich Abwei-

chungen im Verlauf von etwa 12% auf. Die Versuche können zufriedenstellend nachgerechnet werden und liegen mit ihren Abweichungen in akzeptablen Bereichen. Bei den beiden Berechnungen handelt es sich aber jeweils um Näherungen, da nicht alle Angaben wie die genaue Profillänge oder die Last-Verformungsverläufe der Profilstoßverbinder in *Saal et al.* [33] enthalten waren.



**Bild 4.7** Vergleich der Versuche nach *Saal et al.* [33] und des eigenen FE-Modells

#### 4.3.4 Vergleich mit von Walter in [45] beschriebenen Versuchen

In diesem Abschnitt werden weitere in der Literatur beschriebene Versuche zur Verifizierung des FE-Modells betrachtet. Aus den in *Walter* [45] beschriebenen neun Großversuchen werden sechs repräsentative Versuche ausgewählt und mit Berechnungen des eigenen FE-Modells verglichen. Bei den beschriebenen Versuchen handelt es sich um Schubfeldversuche mit zwei verschiedenen Trapezprofilen und Befestigungskonfigurationen.

Die Abmessungen des verwendeten Schubrahmens betragen 2,75 m x 3,44 m. Die Spannweite der Profile beträgt 3,44 m. Es werden die beschriebenen Versuche 3 bis 5 und 7 bis 9 exemplarisch ausgewählt. Bei der Versuchsanordnung waren ebenfalls Überstände an den Querrandverbindungsmitteln vorhanden. Sie wurden in ihrer Größenordnung

jedoch nicht genau beziffert. Aus abgedruckten Fotos konnten jedoch Überstände von ca. 3 cm abgelesen und implementiert werden.

In den Versuchsanordnungen 3 bis 7 wurden Trapezprofile von Arcelor E40 mit einer Blechdicke von  $t_N = 1$  mm verwandt. Es wurden drei Profiltafeln nebeneinandergelegt.

Für die Versuchsanordnungen 8 und 9 fanden Trapezprofile E135 von Arcelor mit einer Blechdicke von  $t_N = 1$  mm Verwendung. Es wurden ebenfalls drei Profiltafeln nebeneinandergelegt.

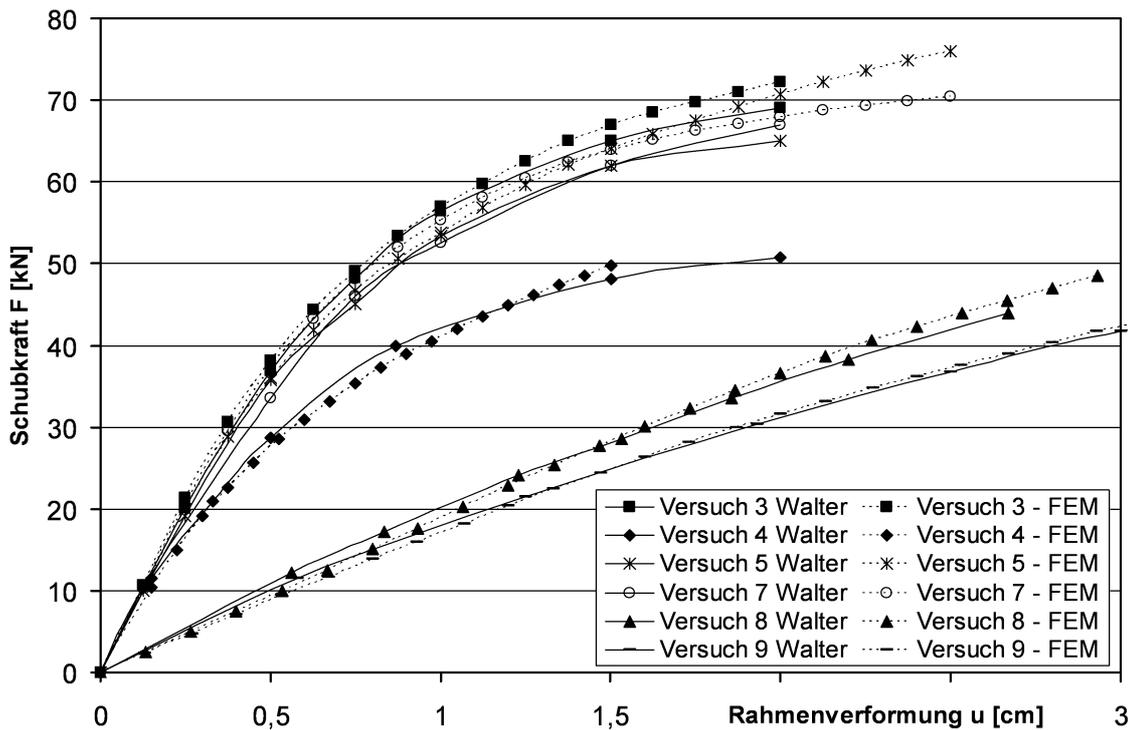
Für die Befestigung der Profile kamen verschiedene Verbindungsmittelkonfigurationen zur Anwendung. Sie werden nachfolgend angegeben.

Versuch	Befestigung	Befestigung
	Quer-/Längsrand	Blech/Blech
Versuch 3	Setzbolzen ENP2-21 L15	Bohrschrauben Typ DRIL-KWICK
Versuch 4	Schrauben TF1/Z-S1 $\varnothing$ 6,3	POP-Blindnieten $\varnothing$ 4,8-81
Versuch 5	Setzbolzen ENP2-21 L15	POP-Blindnieten $\varnothing$ 4,8-81
Versuch 7	High Shear Nail EDNK-TS12	Bohrschrauben Typ DRIL-KWICK
Versuch 8	Setzbolzen ENP2-21 L15	Bohrschrauben Typ DRIL-KWICK
Versuch 9	Schrauben TF1/Z-S1 $\varnothing$ 6,3	Bohrschrauben Typ DRIL-KWICK

Die Verbindung der Trapezprofile mit der Unterkonstruktion erfolgte in jeder Sicke. An den Längsrändern wurden die Verbindungsmittel in einem Abstand von 57,3 cm und an den Profilstößen von 28,67 cm angeordnet.

Die Last-Verformungsverläufe der drei Versuche können dem nachfolgenden Diagramm in Bild 4.8 entnommen werden.

Auch hier lässt sich zwischen der FE-Rechnung und den Versuchen eine sehr gute Übereinstimmung feststellen. Die Verläufe sind über den gesamten Bereich nahezu identisch. Das FE-Modell bestätigt sich auch an diesen Versuchen. Es treten lediglich in den plastischen Verformungsbereichen kleine aber akzeptable Abweichungen zwischen den Verläufen auf.

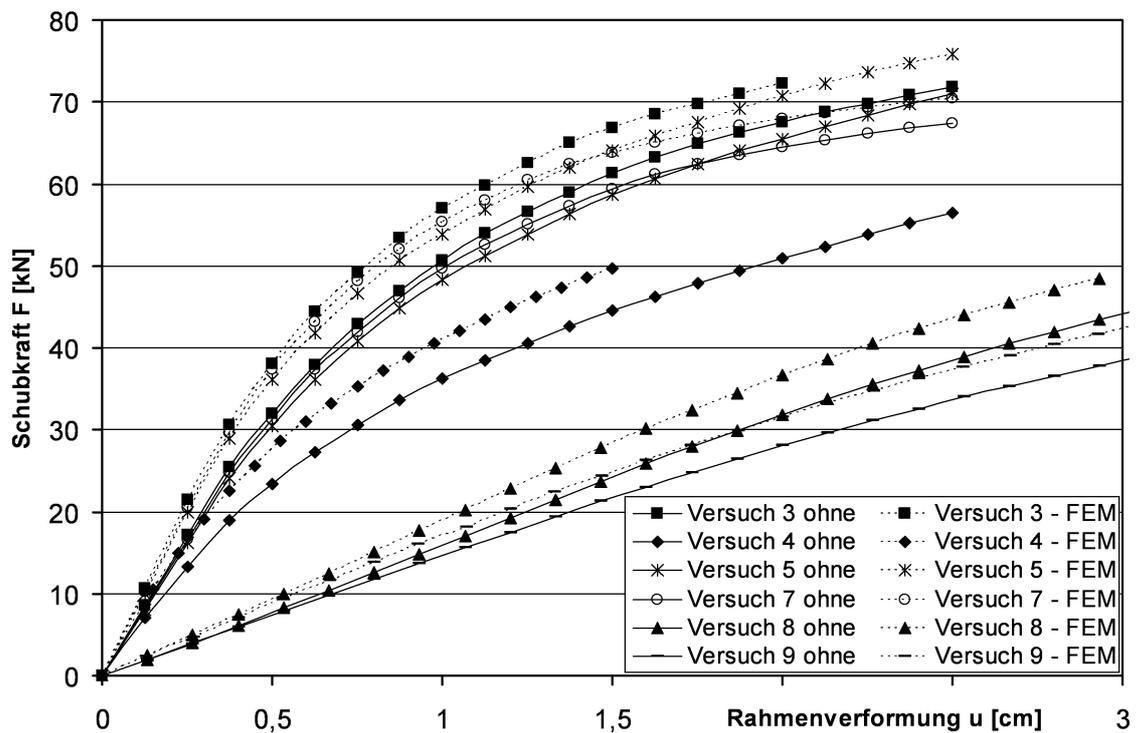


**Bild 4.8** Last-Verformungsverläufe der Versuche 3 bis 5 und 7 bis 9 nach *Walter* [45] und den zugehörigen FE-Rechnungen mit dem vorgestellten Modell

Um den Einfluss der vorhandenen Profilüberstände an den Querrändern zu untersuchen, wurden die Versuche erneut mit dem vorgestellten FE-Modell berechnet. Bei dieser Berechnung wurden die Profilüberstände nicht modelliert.

Im nachfolgenden Bild 4.9 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Um die Übersichtlichkeit in der Darstellung zu bewahren, werden lediglich die Last-Verformungsverläufe der FE-Rechnungen miteinander verglichen.

Aus dem Diagramm lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den Verläufen ablesen. Die FE-Modelle ohne Profilüberstände reagieren gegenüber den Modellen mit Überständen wesentlich weicher. Der Berücksichtigung der Profilüberstände kommt also, wie bereits erwähnt, eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zu.



**Bild 4.9** Last-Verformungsverläufe der FE-Rechnungen zu den Versuchen 3 bis 5 und 7 bis 9 bei Modellierung der Systeme mit und ohne Profilüberstände an den Querrändern

Das entwickelte FE-Modell wurde im Rahmen verschiedener Tests auf seine Richtigkeit geprüft. Es wurden dafür verschiedene auch unabhängig voneinander durchgeführte Versuche nachgerechnet. Das Modell lieferte für alle Versuche zufriedenstellende Übereinstimmungen. Es kann damit für weitere systematische Betrachtungen eingesetzt werden.

---

# Kapitel 5

## Numerische Voruntersuchungen

### 5.1 Allgemeines

In Kapitel 3 wurden Versuche zur aussteifenden Wirkung von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen durchgeführt und beschrieben. In Kapitel 4 ist ein FE-Modell zur Nachrechnung der durchgeführten Versuche entwickelt und getestet worden. Den am Fachgebiet durchgeführten und den in der Literatur beschriebenen Versuchen liegen in bestimmten Punkten abweichende Ansätze zugrunde. Bei den in *Walter* [45] durchgeführten Untersuchungen wird das Steifigkeitsverhalten von Schubfeldern unter Berücksichtigung der nachgiebigen Verbindungsmittel untersucht. Die Profile werden hierzu einer Schubverformung unterzogen.

Im Rahmen der in *Saal et al.* [33] beschriebenen Versuche wird die aussteifende Wirkung von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen für eine biegedrillknickgefährdete Unterkonstruktion betrachtet. Die Belastung wird aber ebenfalls als Schubverformung aufgebracht. Es wird das Ziel verfolgt, eine allgemeine Abhängigkeit der Schubsteifigkeit von zweiseitig nachgiebig gelagerten Trapezprofilen und einem echten nachgiebig gelagerten Schubfeld zu bestimmen.

Es stellt sich natürlich die Frage, ob die Steifigkeit von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen zufriedenstellend als Schubsteifigkeit wiedergegeben werden kann. Welchen Einfluss haben Profilüberstände an den Verbindungsmitteln? Wie wirkt sich eine nachgiebige Verbindung im Vergleich zu einer unendlich starren in der Theorie aus? Wie verändert sich die Steifigkeit, wenn die Verbindungsmittel am Schubfeld nicht nur Kräfte in Profilrandrichtung, sondern auch senkrecht dazu aufnehmen können? Diese Fragen sollen in den nachfolgenden Abschnitten näher untersucht und betrachtet werden. Für die Berechnungen wird das in Kapitel 4 beschriebene FE-Modell verwendet.

### 5.2 Trapezprofilkonstruktionen unter Schubbelastung

#### 5.2.1 Einfluss von zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln

In diesem Abschnitt soll der Einfluss von zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln auf ein Schubfeld untersucht werden. Im Abschnitt 4.3.1 wurde bereits erläutert, dass für die Herleitung der theoretischen Schubfeldsteifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  nach *Strehl* [43] das Schubfeld nur in Richtung seiner Ränder gelagert ist. Senkrecht zu den Rändern sind keine

Lager angeordnet. In der Realität wirken die Randverbinder natürlich zweidimensional, also auch senkrecht zu den Rändern. Es wird deshalb an dieser Stelle der Einfluss der zweidimensionalen Lagerung an einigen Beispielen untersucht. Für die Berechnungen wird ein lineares Materialverhalten angesetzt. Die Trapezprofile sind in ihren Abmessungen durch den steifen Schubrahmen begrenzt. Profilüberstände sind nicht vorhanden. Die Verbindungsmittel werden durch starre Kopplungen ersetzt. Für die Berechnungen werden wie bei den Nachrechnungen der theoretischen Schubsteifigkeiten  $S_{\text{FE-Strehl}}$  20 Profilperioden implementiert. Profilstöße sind nicht vorhanden. In Tabelle 5.1 sind die errechneten Steifigkeiten  $S_{2\text{-dim}}$  Werte von fünf ausgewählten Trapezprofiltypen dargestellt.

**Tabelle 5.1** Berechnete Schubsteifigkeiten bei ein- und zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln an einem Schubfeld

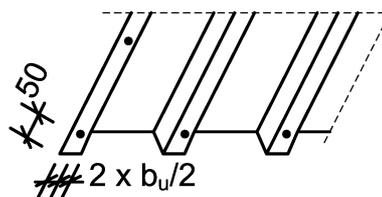
Blechtyp	Blechlänge $L_s$ [mm]	Blechdicke $t_N$ [mm]	$S_{\text{FE-Strehl}}$ [kN]	$S_{2\text{-dim}}$ [kN]	$S_{2\text{-dim}}/S_{\text{FE-Strehl}}$ [-]
39/183	2000	0,75	4447	4630	1,04
		1	9239	9646	1,04
		1,25	15943	16638	1,04
85/280	3000	0,75	4621	4833	1,05
		1	9875	10369	1,05
		1,25	17445	18345	1,05
135/310	5000	0,75	4340	4529	1,04
		1	9327	9773	1,05
		1,25	16591	17416	1,05
160/250	6000	0,75	5138	5374	1,05
		1	10924	11454	1,05
		1,25	19295	20244	1,05
200/420	7000	0,75	2418	2483	1,03
		1	5214	5384	1,03
		1,25	9390	9731	1,04

In der Tabelle werden für beide Lagerungen jeweils die mit der FE-Methode ermittelten Werte verwendet. Es ergeben sich im Mittel Steifigkeitszuwächse von etwa 4,5%. Die Analyse weiterer Profiltypen lieferte Verhältniswerte, welche in der gleichen Größenordnung liegen. Die höhere Steifigkeit ist im Wesentlichen mit dem Einfluss der Randstörungen zu erklären. An den Ecken der Schubfelder liegt in der Realität kein reiner Schubspannungszustand vor. Die Verbindungsmittel tragen zweidimensional. Die zweidimensionale Lagerung am starr gelagerten Schubfeld hat also einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass

die ermittelten Prozentwerte nur für die hier verwendeten starr gelagerten Schubfelder gelten. Die Aussage kann nicht ohne weitere Betrachtungen beliebig auf andere Modellvarianten übertragen werden.

### 5.2.2 Einfluss von Profilüberständen auf Schubfelder unter einer Schubbelastung

Bei den in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Berechnungen zu den am Fachgebiet durchgeführten Versuchen wurde bereits darauf verwiesen, dass an den Profilrändern vorhandene Überstände in ihrer Wirkung auf die Gesamtsteifigkeit voraussichtlich nicht zu vernachlässigen sind. Neben den eigenen Versuchen zeigt sich dieser Effekt auch bei den in *Walter* [45] beschriebenen Versuchen. In Abschnitt 2.4.5 wird in Tabelle 2.1 der Versuch 3 beispielhaft mit den verschiedenen Berechnungsverfahren betrachtet. Die von *Walter* im Versuch ermittelte Schubsteifigkeit liegt für diesen Versuch deutlich über dem theoretischen Wert nach *Strehl*. Um dies zu überprüfen, sollen in diesem Abschnitt entsprechende Betrachtungen vorgenommen werden. Es werden starr gelagerte Schubfelder mit zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln für den Vergleich herangezogen. Zunächst ist es dafür erforderlich einen möglichst realistischen Überstand zu wählen. An den Längsrändern wird jeweils eine halbe Untergurtbreite als Überstand gewählt. Dieser Wert ist nahe liegend, da die Profile diese Breite herstellungsbedingt ohnehin besitzen. An den Querrändern werden 50 mm als realistisch erachtet. Im Bild 5.1 ist eine Prinzipskizze zu den gewählten Profilüberständen dargestellt.



**Bild 5.1** Prinzipskizze zu den Profilüberständen

Die Unterkonstruktion wird wie bei den vorangegangenen Versuchen durch einen steifen Viergelenkrahmen gebildet. Die Trapezprofile werden mit 20 Profilperioden und einem linearen Materialmodell implementiert. Die Profillängen entsprechen den unter Abschnitt 5.2.1 verwendeten Werten. Auf diese Weise ist eine direkte Vergleichbarkeit mit den Steifigkeiten  $S_{2\text{-dim}}$  aus Abschnitt 5.2.1 möglich.

In Tabelle 5.2 werden die so errechneten Steifigkeiten  $S_{S4s}$  für Profile mit 50 mm Überstand den in Abschnitt 5.2.1 ermittelten Werten  $S_{2\text{-dim}}$  für zweidimensional wirkende Ver-

bindungsmittel ohne Überstand an den Profilrändern gegenübergestellt. Es wird auch hier nur eine Auswahl an Profilen dargestellt.

**Tabelle 5.2** Berechnete Schubsteifigkeiten von Schubfeldern unter Schubbelastung mit zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln mit  $S_{S4s}$  und ohne Profilüberstand  $S_{2-dim}$

Blechtyp	Blechlänge $L_s$ [mm]	Blechdicke $t_N$ [mm]	$S_{2-dim}$ [kN]	$S_{S4s}$ [kN]	$S_{S4s}/S_{2-dim}$ [-]
39/183	2000	0,75	4630	6818	1,47
		1	9646	14665	1,52
		1,25	16638	25809	1,55
85/280	3000	0,75	4833	6727	1,39
		1	10369	14732	1,42
		1,25	18345	26355	1,44
135/310	5000	0,75	4529	5688	1,26
		1	9773	12505	1,28
		1,25	17416	22546	1,29
160/250	6000	0,75	5374	6792	1,26
		1	11454	14687	1,28
		1,25	20244	26178	1,29
200/420	7000	0,75	2483	2843	1,14
		1	5384	6296	1,17
		1,25	9731	11549	1,19

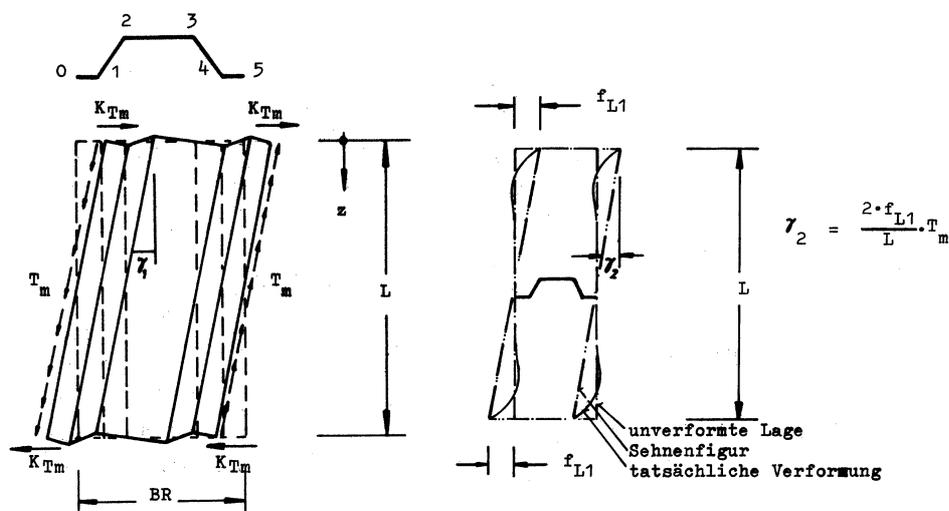
In der Tabelle sind deutliche Steifigkeitszuwächse erkennbar. So ergibt sich für das Profil 39/183 bei einer Blechdicke  $t_N = 1,25$  mm ein maximaler Zuwachs von 55%. Für die anderen Profile zeigt sich, dass mit abnehmender Schubsteifigkeit die Erhöhung geringer ausfällt. Diese Aussage lässt sich aber nicht für alle Profile verallgemeinern. Der Einfluss der genauen Profilgeometrie (Profilperiodenbreite, Profilhöhe und Gurtbreiten) hat zusätzliche Auswirkungen, welche sich nicht bloß über die Schubsteifigkeit beschreiben lassen.

Bei der weiteren Betrachtung der Tabellenwerte erkennt man ferner, dass die Steifigkeits-erhöhung mit zunehmender Profillänge abnimmt. Aber auch diese Aussage lässt sich nicht verallgemeinern. Bei durchgeführten Berechnungen, zu weiteren als den hier dargestellten Profilen, bestätigte sich diese Aussage nur in der Tendenz. Es gibt aber auch Fälle, bei denen ein schubweicherer Profil größere Zunahmen als ein schubsteiferes Profil zeigt.

Des Weiteren stellt sich die Frage, ob die Steifigkeitszunahme für ein Profil von der Profillänge anhängig ist? Zu dieser Frage durchgeführte Berechnungen haben gezeigt, dass diese Abhängigkeit erwartungsgemäß vorhanden ist. Eine Vergrößerung der Stützweite

der Profile bringt eine deutliche Abnahme der Erhöhungsfaktoren mit sich. Dies bedeutet aber nicht, dass die Erhöhung bei sehr großen Werten gegen null geht. Es ergibt sich immer noch eine deutliche Zunahme der Steifigkeit. Der Einfluss ist demnach auf gar keinen Fall vernachlässigbar und in seiner Wirkung nach Möglichkeit zu erfassen.

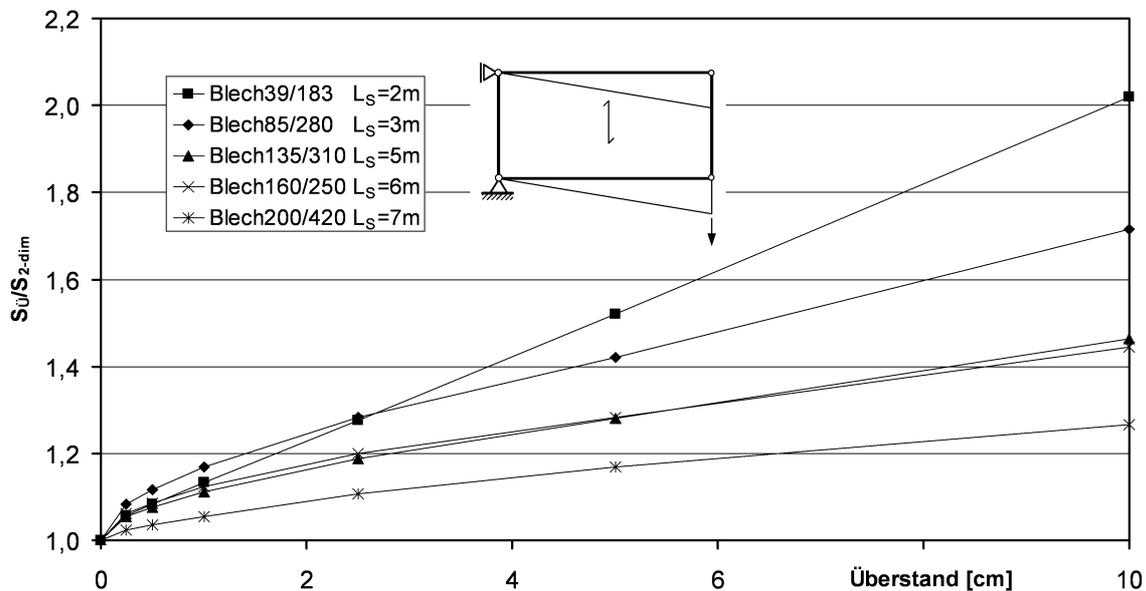
Die wichtigste sich stellende Frage ist allerdings, ob Steifigkeitszuwächse in dieser Größenordnung von „nur“ 50 mm Überstand bewirkt werden können? In *Strehl* [43] wird eine Berechnungsmethode zur Herleitung der theoretischen Schubsteifigkeiten von Trapezprofilen dargestellt. Die Schubsteifigkeit setzt sich darin aus zwei Anteilen zusammen. Den ersten Anteil bildet die reine Schubverformung der einzelnen Querschnittsteile, siehe linke Abbildung für  $\gamma_1$  im Bild 5.2. Der Querschnitt bleibt für diesen Anteil eben. Der zweite und für die gestellte Frage wichtigere Anteil wird durch die Profilquerbiegung am Profilende beschrieben, siehe rechte Abbildung für  $\gamma_2$  im Bild 5.2. In der Herleitung wird dieser Verformungsanteil anhand eines elastisch gebetteten Balkens beschrieben, welcher am Ende durch eine Einzellast, hier die Kräfte aus den Verbindungsmitteln am Querrand, belastet wird. Die Verformung an dem gebetteten Balken klingt je nach vorhandener Profilgeometrie unterschiedlich schnell ab. In den in *Strehl* [43] beschriebenen Beispielen ist zu erkennen, dass die Abklinglängen relativ kurz sind. Es kann also auch die Verlängerung des Balkens um einen kleinen Betrag zu großen Auswirkungen führen. Außerdem befindet sich der Angriffspunkt der Einzellast bei einer Verlängerung des Balkens nicht mehr am äußeren Rand des Profils, was durch eine bessere Lastverteilung zu einem deutlichen Steifigkeitszuwachs führt.



**Bild 5.2** Zur Schubsteifigkeit beitragende Anteile  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  nach *Strehl* [43]

Sind die Profile so lang, dass die Verformungen aus Querbiegung bereits abgeklungen sind, haben diese Verformungsanteile feste Werte. Der daraus resultierende Schubwinkel  $\gamma_2$  wird also mit zunehmender Profillänge kleiner, was die Berechnungen auch bestätigt haben.

Um den Einfluss verschiedener Profilüberstände zu untersuchen, werden weitere Berechnungen an den fünf in Tabelle 5.2 verwendeten Profilen durchgeführt. Es werden die Profile mit  $t_N = 1 \text{ mm}$  und den selben Abmessungen  $L$  und  $L_S$  berechnet. Die Profilüberstände variieren von 0 cm bis 10 cm an den Querrändern. In Bild 5.3 sind die Berechnungsergebnisse als Verhältnisse zwischen den Schubsteifigkeiten mit Überstand  $S_{\text{Ü}}$  und ohne Überstand  $S_{2\text{-dim}}$  bei zweidimensional wirkenden Verbindungsmitteln über die Überstände dargestellt.



**Bild 5.3** Einfluss von Profilüberständen auf Schubfelder unter Schubbelastung einiger Profile

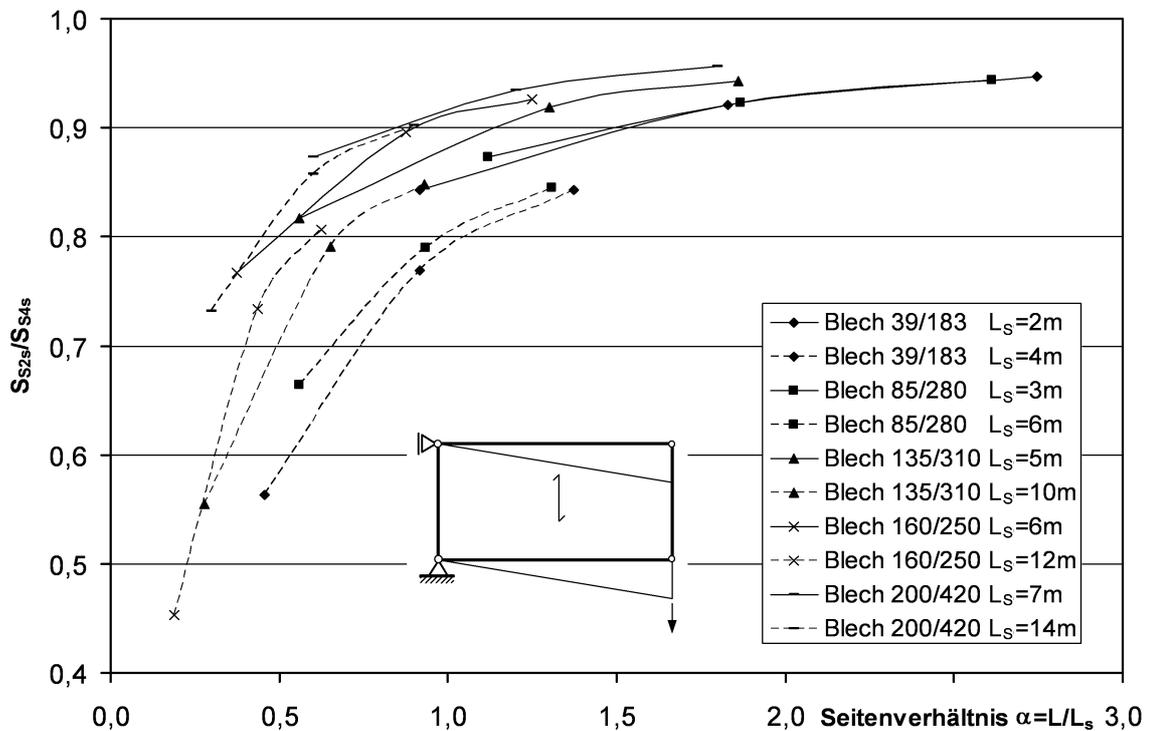
Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Steifigkeiten mit zunehmendem Überstand deutlich ansteigen. Die Anstiege der einzelnen Grafen unterscheiden sich für jedes Profil, wobei die schubsteiferen Profile größere Anstiege aufweisen. Verringert man die Überstände immer weiter, laufen die Steifigkeiten gegen die Werte ohne Überstand. Die Ergebnisse weisen damit einen stetigen Verlauf auf und bestätigen die Berechnungen.

Profilüberstände wirken sich also positiv auf die Gesamtsteifigkeit aus und sind bei den weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen. Als feste Größen für die Überstände sollen die in diesem Abschnitt genannten Werte von 50 mm am Querrand und der halben Untergurtbreite am Längsrand nach Bild 5.1 verwendet werden.

### 5.2.3 Vergleich zwei- und vierseitig starr gelagerter Profile bei Schubbelastung

Als nächstes sollen die Steifigkeiten von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen untersucht werden. Sie werden äquivalent zu den unter Abschnitt 5.2.2 berechneten Werten ermittelt. Es wird also mit 50 mm Überstand an den Querrändern gerechnet. Um die Werte mit den vierseitig gelagerten Profilen vergleichen zu können, werden sie zweckmäßigerweise für starre zweidimensional wirkende Verbindungsmittel berechnet. Als Belastung wird wieder eine Schubverformung aufgebracht. Die Berechnungen werden in allen Fällen für eine Nennblechdicke  $t_N = 1$  mm durchgeführt.

In Bild 5.4 sind die berechneten Werte dargestellt. Sie werden als Verhältniswerte der zwei- zur vierseitigen Lagerung  $S_{S2s}/S_{S4s}$  über dem Seitenverhältnis der Schubfeldabmessungen aufgetragen. Es ist wieder eine Auswahl von fünf verschiedenen Trapezprofilen in dem Diagramm abgebildet. Die weiteren Profile zeigen in den Untersuchungen ein qualitativ gleiches Verhalten. Für jedes Profil werden jeweils zwei unterschiedliche Spannweiten  $L_s$  mit je drei verschiedenen Periodenanzahlen betrachtet. Die Anzahl der gewählten Perioden bewegt sich zwischen etwa 10 bis 30 Perioden. Als Stützweite der Profile werden die in Abschnitt 5.2.2 bereits verwendeten Profillängen  $L_s$  und der jeweils doppelte Wert in Ansatz gebracht. Jedem Profiltyp ist im Diagramm ein Liniensymbol zugeordnet.



**Bild 5.4** Verhältnis von zwei-/vierseitig starr gelagerten Profilen unter Schubverformung

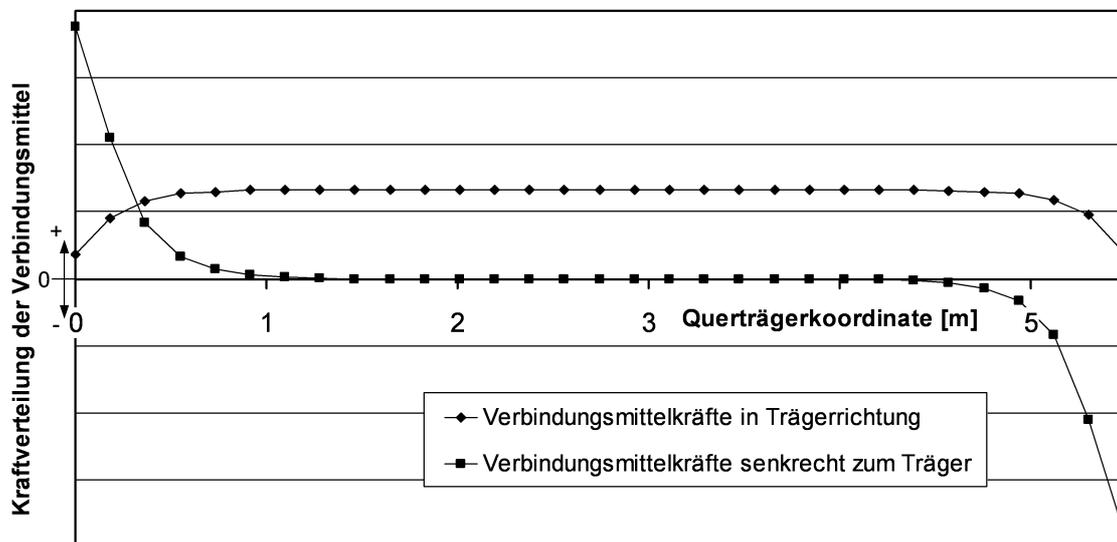
Wie sich aus der Darstellung gut erkennen lässt, nimmt das Verhältnis der Steifigkeiten  $S_{S2s}/S_{S4s}$  mit zunehmendem Seitenverhältnis stetig zu und ist dabei stets kleiner als 1. Die zweiseitige Lagerung besitzt also erwartungsgemäß stets eine geringere Steifigkeit als eine vierseitige Lagerung. Das Streben der Verhältniswerte gegen 1,0 liegt in den bei der zweiseitigen Lagerung ausgeprägten Randstörungen begründet. Je größer die Anzahl der Perioden ist, umso geringer wird der Einfluss der Randstörungen. Bei einer unendlichen Periodenanzahl, also einer unendlichen Querträgerlänge  $L$ , geht das Steifigkeitsverhältnis gegen 1,0.

Im Bild 5.5 ist der qualitative Verlauf der Verbindungsmittelkräfte der Berechnung Profil 39/183, einer Profillänge  $L_s = 2$  m und einer Feldbreite  $L = 5,49$  m bei zweiseitiger Lagerung mit starren Verbindungsmitteln dargestellt. Die qualitativen Verbindungsmittelkräfte in den beiden Richtungen (senkrecht und parallel zum Querträger) sind in den beiden Grafen über die Trägerlänge  $L$  aufgetragen. Es ist deutlich abzulesen, dass kein reiner Schubspannungszustand vorhanden ist. Die am Schubfeld von den Längsrändern über die Länge  $L_s$  abzutragenden Kräfte müssen bei nur zweiseitiger Lagerung der Trapezprofile von den Verbindungsmitteln am Querrand zusätzlich aufgenommen werden. Dies wird aus dem Verlauf der Verbindungsmittelkräfte senkrecht zum Querträger deutlich. An den beiden äußeren Rändern treten große Kräfte in Richtung der Trapezprofile auf, welche aber nach vier bis fünf Perioden nahezu abgeklungen sind. Für die zum Querträger parallelen Kräfte gilt genau das Entgegengesetzte. Sie sind an den Rändern minimal und erreichen nach vier bis fünf Perioden einen konstanten Verlauf. Die Verläufe sehen für alle Profiltypen prinzipiell gleich aus. Sie unterscheiden sich je nach Profilgeometrie aber in der Abklinggeschwindigkeit der Kräfte senkrecht zum Querträger.

Als zweiten Punkt erkennt man aus Bild 5.4, dass bei kleiner werdenden Seitenverhältnissen  $L/L_s$  die Schubsteifigkeiten  $S_{S2s}$  bei zweiseitigen gegenüber den vierseitigen Steifigkeiten  $S_{S4s}$  sehr stark abnehmen. Der Steifigkeitsabfall fällt um so stärker aus, je länger die Trapezprofillänge  $L_s$  ist. Bedenkt man, dass bei einem geringen Seitenverhältnis  $L/L_s$  nur eine geringe Anzahl von Profilperioden vorhanden ist, wird dies auch nachvollziehbar. Die Randstörungen gewinnen in diesem Fall einen immer größeren Einfluss.

Der stärkere Abfall der Steifigkeitsverhältnisse  $S_{S2s}/S_{S4s}$  bei größeren Profillängen  $L_s$  folgt aus der höheren Schubsteifigkeit bei großen Profillängen  $L_s$ . Die Verbindungsmittel werden infolge der höheren Steifigkeit stärker belastet, was größere Verformungen zur

Folge hat und damit die Gesamtsteifigkeit im Verhältnis stärker verringert. Die Grafen besitzen also nachvollziehbare Verläufe.



**Bild 5.5** Qualitativer Verlauf der Verbindungsmittelkräfte am Querträger bei zweiseitiger Lagerung

Für die weiteren Untersuchungen lässt sich aus Bild 5.4 ferner ablesen, dass die Beurteilung der Steifigkeitsverhältnisse  $S_{S2s}/S_{S4s}$  nicht über das Seitenverhältnis  $L/L_s$  allein abzubilden ist. Es ergibt sich für jede Profillänge  $L_s$  ein anderer Verlauf der Steifigkeitsverhältnisse. Querträgerlänge  $L$  und Trapezprofillänge  $L_s$  lassen sich damit nicht zu einem einzigen zu variierenden Parameter zusammenfassen und sind getrennt zu betrachten.

Es ist allgemein festzustellen, dass die Schubfeldabmessungen  $L$  und  $L_s$  einen großen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit zweiseitig starr gelagerter Trapezprofile besitzen.

### 5.2.4 Vergleich von nachgiebiger/ starrer vierseitiger Lagerung bei Schubbelastung

Für die bisherigen Berechnungen wurden ausschließlich starre Verbindungsmittel in Ansatz gebracht. Es stellt sich nun natürlich die Frage, wie groß die Auswirkungen nachgiebiger Verbindungsmittel sind. Zu diesem Zweck sollen in diesem Abschnitt starr und nachgiebig gelagerte vierseitig gelagerte Trapezprofile unter Schubbelastung verglichen werden.

Dazu ist es zunächst notwendig, Federsteifigkeiten für die nachgiebigen Verbindungsmittel festzulegen. Im Abschnitt 3.2.2 wurden verschiedene Verbindungsmittel hinsichtlich ihres Last-Verformungsverhaltens untersucht. Alle Verbindungsmittel zeigten ein ausgeprägtes nichtlineares Verhalten. Allerdings gelten die ermittelten Kurven nur für die unter-

suchten Verbindungskonfigurationen. Ändern sich die Blechdicken oder wird ein Stahlblech anderer Güte verwendet, sind die ermittelten Kurven nicht mehr gültig und damit nicht mehr anwendbar. Dies gilt im Besonderen für die nichtlinearen Bereiche.

Für eine breite und allgemeingültige Untersuchung ist es dadurch nötig, eine möglichst einfache allgemeine Formulierung für die Verbindungsmittelsteifigkeiten zu finden. In *Walter* [45] werden aus Versuchen ermittelte Werte für die FE-Rechnungen verwendet. Es wird aber keine breit angelegte Parameteruntersuchung durchgeführt. Eine breiter angelegte Betrachtung wird in *Saal et al.* [33] vorgenommen. Hier werden ebenfalls aus Versuchen ermittelte Verläufe für die Verbindungsmittel in Ansatz gebracht. Die ermittelten Verläufe werden für alle durchgeführten Parameterrechnungen verwendet. Der Einfluss unterschiedlicher Stahlgüten wird vernachlässigt und es wird auch nur eine Blechdicke  $t_N$  untersucht. Als Versagensgröße für die berechneten Konstruktionen wurden die zulässigen Schubflüsse aus den Zulassungen der Trapezprofile benutzt. Daraus ergibt sich, dass man sich bei Erreichen der Versagenslast je nach Versuchsanordnung an einer anderen Stelle der Last-Verformungsverläufe der Verbindungsmittel befindet. Eine allgemeine Aussage über die Steifigkeiten ist durch die große Anzahl von Einflussparametern auf die Verbindungsmittelsteifigkeit nur schwer möglich. Die Ergebnisse sind deshalb mit großen Unwägbarkeiten behaftet.

In den nachfolgend beschriebenen eigenen Untersuchungen soll ein anderer Weg beschritten werden. In Abschnitt 3.2.2 werden die experimentell ermittelten Versuchskurven konstanten Federsteifigkeiten gegenübergestellt. Bei den konstanten Werten handelt es sich um vom *ECCS* in [11] angegebene Werte. In der Veröffentlichung werden für die wichtigsten Verbindungsmitteltypen verschiedene Federsteifigkeiten festgelegt. Bei den Werten handelt es sich um Mindeststeifigkeiten, welche für alle Blechdicken und die Mindeststahlgüten gelten. Die Werte liegen auch für alle in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Versuche auf der sicheren Seite. Mit ihnen sollen alle nachfolgenden Berechnungen durchgeführt werden. Es ist so eine umfassendere Untersuchung möglich. Die Werte können Tabelle 5.3 entnommen werden.

Anhand der Tabellenwerte wird deutlich, dass die Federwerte sehr stark streuen. So reagieren beispielsweise Setzbolzen mehr als dreimal so steif wie Schrauben mit einer Neoprenscheibe. Für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen werden die Trapezprofile grundsätzlich in jeder Sicke mit der Unterkonstruktion verbunden.

**Tabelle 5.3** Ansetzbare Verbindungsmittelsteifigkeiten nach ECCS [11]

Table 5.1 Design strengths and slip values of fasteners				
(1) Sheet/purlin and sheet/shear connector fasteners				
	Washer type	Overall dia. (mm)	Design shear strength $F_p$ and $F_{sc}$ (kN)	Slip $s_p$ and $s_{sc}$ (mm/kN)
Screws	Collar head	5.5	$1.9 f_u d_n t$ max. 6.5	0.15
		6.3	$1.9 f_u d_n t$ max. 8.0	
	Collar head + neoprene washer	5.5	$1.9 f_u d_n t$ max. 6.5	0.35
		6.3	$1.9 f_u d_n t$ max. 8.0	
Fired pins	$\phi$ 23 mm steel washer	3.7 to 4.8	$2.9 f_u d_n t$ max. 8.0	0.10
(2) Seam fasteners (no washers)				
		Overall dia. (mm)	Design shear strength $F_s$ (kN)	Slip $s_s$ (mm/kN)
Screws		4.1 to 4.8	$2.9(t/d_n)^{1/2} * f_u d_n t$ max 3.8	0.25
Steel or monel blind rivets		4.8	$3.2(t/d_n)^{1/2} * f_u d_n t$ max 3.0	0.30
Notes: (1) In the above table, $f_u$ is the specified ultimate tensile strength of the steel sheet (kN/mm <sup>2</sup> ), $d_n$ is the nominal diameter of the fastener (mm) and $t$ is the net sheet thickness (mm).				
(2) <u>Important</u> The comments and recommendations given in 5.3.2 should be taken into account before using the above design strengths and slip values.				
(3) See comment to 5.3.2 regarding the material factor included in this table 5.1.				

Für die Blech/Blech-Verbindungen ergibt sich ein weiteres Problem. Die Verbindungsmittelabstände können sehr stark variieren. Nach [48] sind für die Längsstoßverbindungsmitel folgende Abstände einzuhalten:

$$50\text{mm} \leq e_L \leq 666\text{mm},$$

wobei mindestens 4 Verbindungsmittel pro Stoß anzuordnen sind. Daraus ergibt sich eine große Anzahl möglicher Stoßsteifigkeiten.

In den weiteren Berechnungen sollen die in Tabelle 5.4 angegebenen Federsteifigkeiten für die verschiedenen Verbindungsmittel Verwendung finden.

**Tabelle 5.4** Für die Berechnungen verwendete Verbindungsmittelsteifigkeiten

Verbinder	Typ	Abstand	äquivalente Feder
Blech/Blech	Schrauben mit 0,25 mm/kN	7 cm	5,70 kN/cm <sup>2</sup>
		20 cm	2,00 kN/cm <sup>2</sup>
	Nieten mit 0,3 mm/kN	60 cm	0,56 kN/cm <sup>2</sup>
Querrand- verbinder	Schrauben mit Neoprenscheibe 0,35 mm/kN	jede Sicke	28,57 kN/cm
	Schrauben 0,15 mm/kN	jede Sicke	66,70 kN/cm
	Setzbolzen 0,1 mm/kN	jede Sicke	100,00 kN/cm

Die Steifigkeit der Blech/Blech-Verbinder wird hier als Streckenfeder angegeben. Es bietet sich dadurch die Möglichkeit, die Stoßverbindungen ohne den jeweils genauen Verbindungsmittelabstand in den Berechnungen zu erfassen. Der dadurch begangene Fehler wird als vernachlässigbar erachtet. An den Querrändern werden die Verbindungsmittel jeweils als Einzelfedern erfasst.

Um einen Überblick über die Auswirkungen der nachgiebigen Lagerung zu erhalten, wird im Bild 5.6 eine Auswahl verschiedener Berechnungen abgebildet. Für den Vergleich werden drei verschiedene Trapezprofiltypen verwendet. Jedes Profil wird in zwei Längen  $L_s$  und drei Querträgerlängen  $L$  untersucht. Die Profillängen  $L_s$  entsprechen den bereits zuvor verwendeten und der jeweils doppelten Länge. Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S_{S4n}$  werden zu den Steifigkeiten einer starren vierseitigen Lagerung  $S_{S4s}$  ins Verhältnis gesetzt, wobei sie über die Seitenverhältnisse  $L/L_s$  aufgetragen werden. Um eine Aussage über das gesamte Steifigkeitsspektrum der Verbindungsmittel treffen zu können, werden zweckmäßigerweise die extremalen Steifigkeiten betrachtet. Zu diesem Zweck finden folgende zwei Verbindungsmittelkombinationen Verwendung:

Kombination 1 (durchgezogene Grafenlinien) - nachgiebigste Lagerung:

Ränder: Schrauben mit Neoprenscheibe  $C_Q = 28,57 \text{ kN/cm}$

Profilstoß: Nieten  $e_L = 600 \text{ mm}$   $c_S = 0,56 \text{ kN/cm}^2$

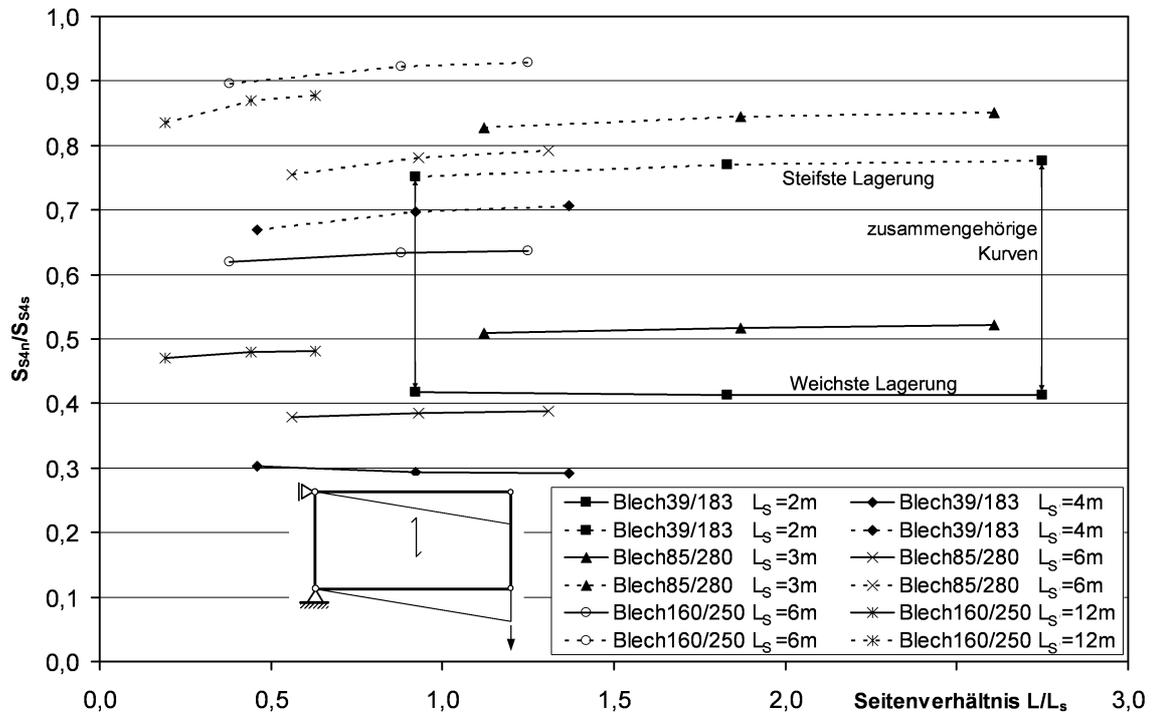
Kombination 2 (gestrichelte Grafenlinien) - steifste Lagerung:

Ränder: Setzbolzen  $C_Q = 100 \text{ kN/cm}$

Profilstoß: Schrauben  $e_L = 70 \text{ mm}$   $c_S = 5,7 \text{ kN/cm}^2$

Mit diesen beiden Kombinationen sind die weichste und die steifste nachgiebige Lagerung erfasst. An den Längsrändern werden die Verbindungsmittel so angeordnet, dass sich die gleiche Steifigkeit wie an den Querrändern in  $\text{kN/cm}^2$  ergibt. Für einen direkten Vergleich

zwischen der nachgiebigsten und der steifsten Lagerung eines Profiltyps mit einer bestimmten Länge  $L_s$  sind die gestrichelten und durchgehenden Grafen mit den jeweils gleichen Symbolen zu verwenden.



**Bild 5.6** Vergleich von nachgiebiger/starrer vierseitiger Lagerung bei Schubbelastung

Als erstes Ergebnis lässt sich aus dem Diagramm eine deutliche Abnahme der Steifigkeiten  $S_{S4n}$  bei nachgiebigen Verbindungsmitteln gegenüber  $S_{S4s}$  entnehmen. So ergibt sich der größte Steifigkeitsverlust bei dem schubsteifen Profil 39/183 mit einer Länge  $L_s = 4 m$  und der weichen Verbindungsmittelkombination. Die Steifigkeit  $S_{S4n}$  reduziert sich für diesen Fall auf lediglich 29% der starren Lagerung  $S_{S4s}$ .

Das größte Steifigkeitsverhältnis  $S_{S4n}/S_{S4s}$  stellt sich für das schubweichste der drei Profile Profil 160/250 mit  $L_s = 6 m$  und der steifen Verbindungsmittelkombination ein. Es bleibt eine Reststeifigkeit von 93% gegenüber der starren Lagerung erhalten.

Vergleicht man die zusammengehörigen Grafen zu einem Profiltyp mit unterschiedlicher Verbindungsmittelsteifigkeit erkennt man, dass sich große Unterschiede zeigen. Für das Profil 39/183 mit  $L_s = 4 m$  ergeben sich Steifigkeitsverhältnisse  $S_{S4n}/S_{S4s}$  von 71% für die steifen und 29% für die weichen Verbindungsmittel. Die Gesamtsteifigkeit lässt sich über die Wahl der Verbindungsmittel demnach mehr als verdoppeln. Auch wenn es sich bei den gewählten Verbindungsmittelkombinationen um die absoluten Extreme handelt,

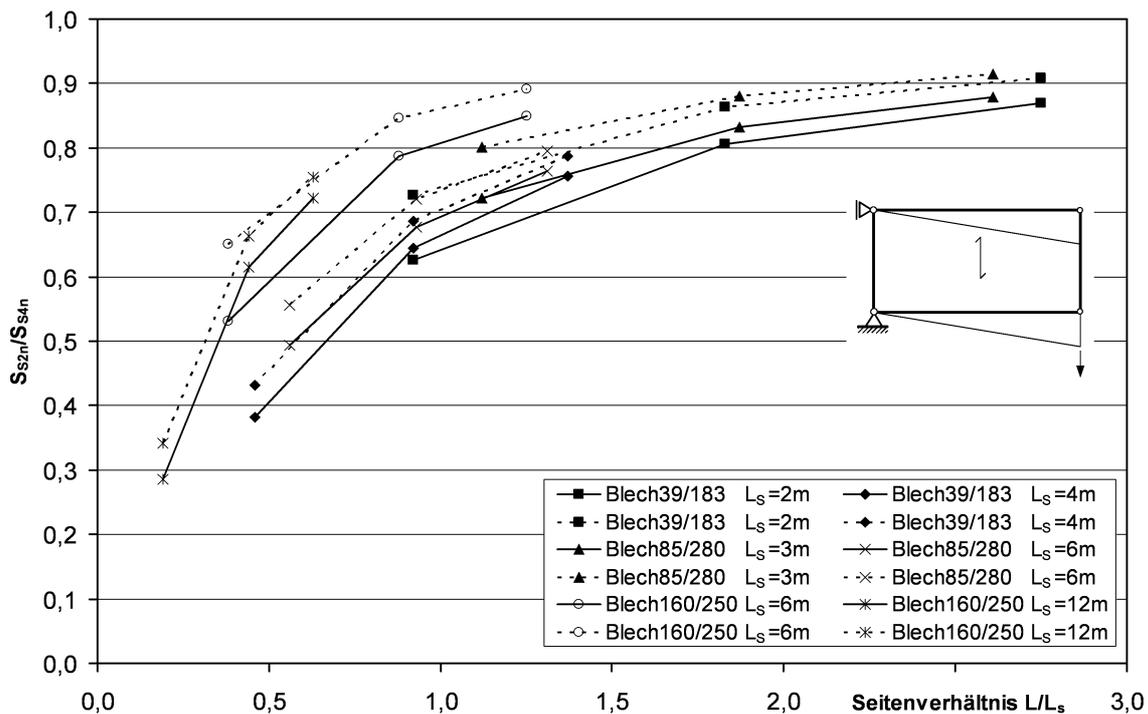
kann man doch sicher sagen, dass den Verbindungsmitteln eine entscheidende Rolle für die Gesamtsteifigkeit von Schubfeldern zukommt. Je nach Anordnung können die Steifigkeiten sehr stark variieren.

Man erkennt aber auch, dass alle Grafen mit zunehmendem Seitenverhältnis  $L/L_s$  gegen konstante Werte streben oder bereits relativ konstant sind. Diese Tatsache ist wiederum mit den bereits beschriebenen Randstörungen zu erklären. Je mehr Profilperioden vorhanden sind, umso geringer ist der daraus entstehende Einfluss.

Gleichzeitig ist offenbar aber auch der Einfluss der Profillänge nicht vernachlässigbar. So zeigen die Grafen bei gleichen Seitenverhältnissen  $L/L_s$  und gleichen Befestigungen trotzdem deutliche Unterschiede in den Steifigkeitsverhältnissen  $S_{S2n}/S_{S4n}$ . Die Berücksichtigung der genauen Abmessungen ist neben der Erfassung der Verbindungsmittel dementsprechend zu beachten.

### 5.2.5 Zweiseitig nachgiebig gelagerte Trapezprofile bei Schubbelastung

Als nächstes werden Berechnungen mit zweiseitig nachgiebig gelagerten Trapezprofilen unter einer Schubbelastung durchgeführt. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den bisher dargestellten Berechnungen werden zweckmäßigerweise die selben Trapezprofile mit identischen Abmessungen betrachtet.



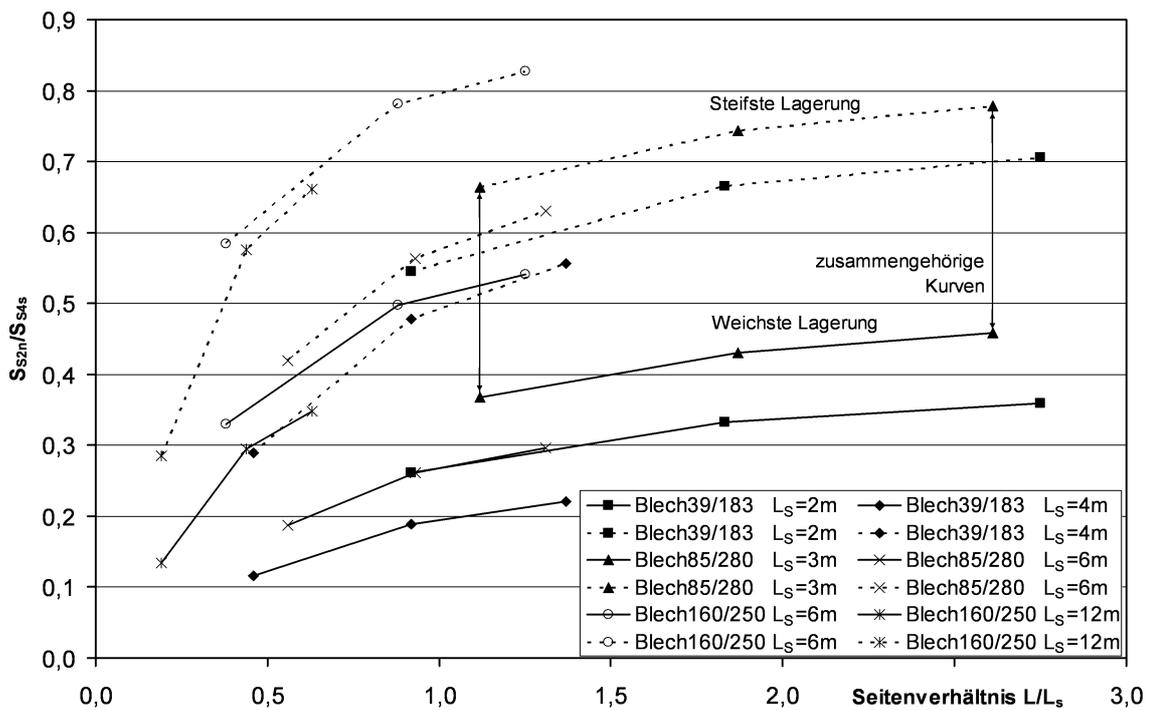
**Bild 5.7** Vergleich von zwei-/vierseitiger nachgiebiger Lagerung bei Schubbelastung

Als erstes soll ein Vergleich mit den unter Abschnitt 5.2.4 ermittelten vierseitigen nachgiebigen Lagerungen vorgenommen werden. Die ermittelten Werte können Bild 5.7 entnommen werden.

Bei den durchgehenden Linien der Grafen handelt es sich wieder um die weichsten Verbindungsmittelkombinationen und bei den gestrichelten Verläufen um die steifste Lagerung, siehe hierzu auch Abschnitt 5.2.4.

Aus der Grafik geht deutlich hervor, dass auch bei der nachgiebigen Lagerung ein wesentlicher Steifigkeitsunterschied zwischen der zweiseitigen Lagerung  $S_{S2n}$  und der vierseitigen Lagerung  $S_{S4n}$  besteht. Die Verläufe zeigen ähnliche Tendenzen zu den unter Abschnitt 5.2.3 bereits beschriebenen. Grundsätzlich sind die zweiseitigen Lagerungen weicher als die zugehörigen vierseitigen. Die zweiseitigen Lagerungen streben auch hier mit zunehmender Periodenanzahl gegen die Steifigkeit der vierseitigen Lagerung. Die Randstörungen klingen auch hier mit zunehmender Länge ab.

Werden die Seitenverhältnisse  $L/L_s$  kleiner, ist auch für diesen Fall ein starker Abfall der Steifigkeit gegenüber der vierseitigen Lagerung zu erkennen. Die Erklärung liegt auch hier in dem unter Abschnitt 5.2.3 beschriebenen starken Einfluss der Randstörungen. Die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{S2n}/S_{S4n}$  schwanken mit Werten zwischen 29% und 91% für die dargestellten Konstruktionsanordnungen sehr stark.

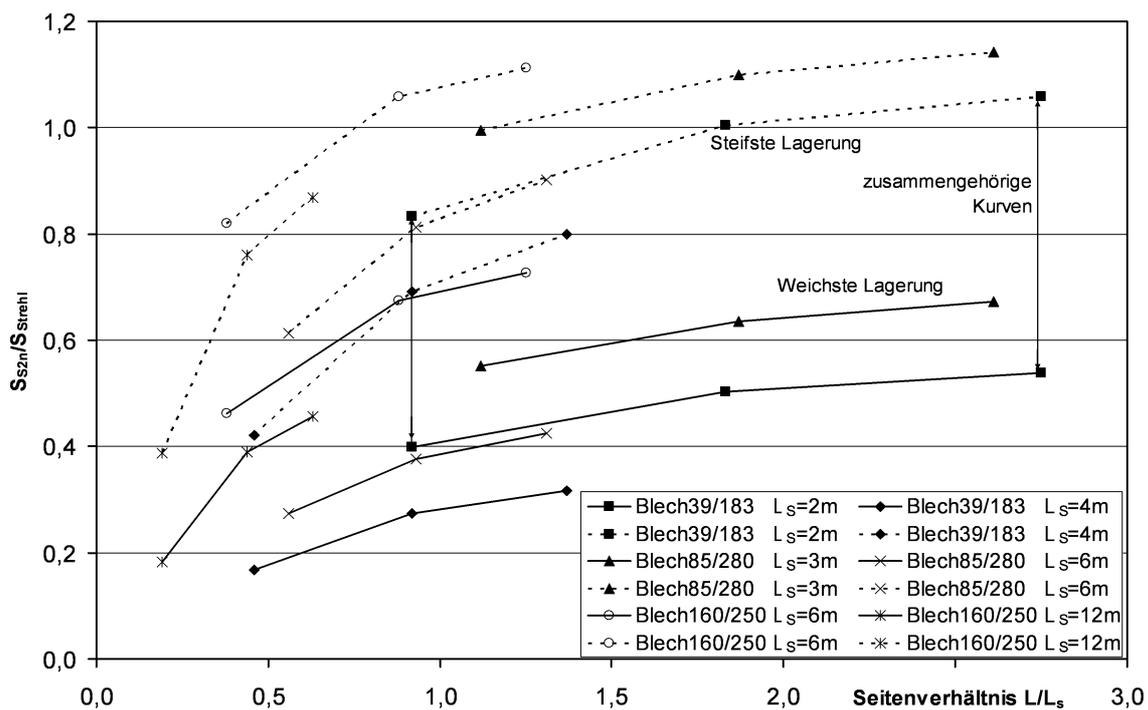


**Bild 5.8** Vergleich zw. nachgiebiger zwei-/starrer vierseitiger Lagerung  $S_{S2n}/S_{S4s}$

Für eine bessere Bewertung der verminderten Steifigkeiten erscheint es sinnvoll, die errechneten Werte auch den vierseitigen starren Befestigungen gegenüberzustellen. Dieser Vergleich kann Bild 5.8 entnommen werden.

In dieser Darstellung wird der Steifigkeitsabfall der zweiseitigen nachgiebigen Lagerung besonders deutlich. Die Werte schwanken zwischen 12% und 83%. Des Weiteren gilt, dass die schubweichen Profile größere Verhältnisse  $S_{S_{2n}}/S_{S_{4s}}$  als die schubsteifen Profile liefern. An dieser Stelle sei aber nochmals darauf hingewiesen, dass die Werte für die vierseitige starre Lagerung mit einem Überstand von 50 mm ermittelt wurden. Die dafür errechneten Schubsteifigkeiten  $S_{S_{4s}}$  liegen zum Teil deutlich über den theoretischen Werten  $S_{S_{Strehl}}$  nach *Strehl* [43]. Es sei hier deshalb nochmals auf Abschnitt 5.2.2 verwiesen.

Um noch einmal einen direkten Vergleich zu den theoretischen Schubsteifigkeiten  $S_{S_{Strehl}}$  herzustellen, werden im folgenden Diagramm in Bild 5.9 die ermittelten Schubsteifigkeiten  $S_{S_{2n}}$  den theoretischen Schubsteifigkeiten  $S_{S_{Strehl}}$  gegenübergestellt.



**Bild 5.9** Vergleich zw. nachgiebiger zweiseitiger Lagerung unter Schubbelastung/ theoretischen Steifigkeiten nach *Strehl* [43]  $S_{S_{2n}}/S_{S_{Strehl}}$

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{S_{2n}}/S_{S_{Strehl}}$  im Regelfall deutlich unter 1,0 liegen. Lediglich bei den kurzen Trapezprofilängen  $L_s$  mit der steifsten Lagerung erreichen die Verhältnisse Werte von über 1,0. Die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{S_{2n}}/S_{S_{Strehl}}$  steigen mit zunehmendem Seitenverhältnis  $L/L_s$  deutlich an. Bei einer ausreichen-

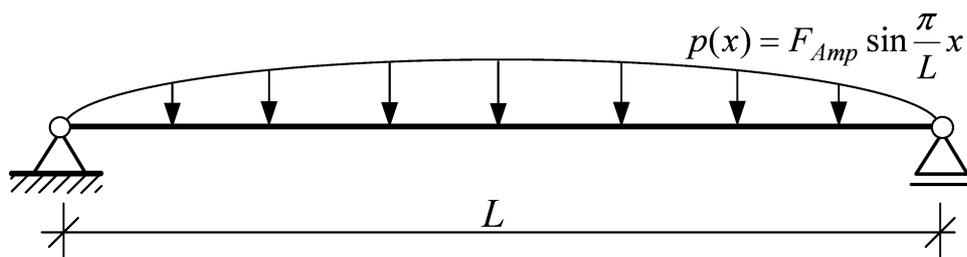
den Anzahl von nebeneinanderliegenden Trapezprofilen werden sie voraussichtlich gegen einen festen Wert streben.

### 5.3 Trapezprofilkonstruktionen unter Einfeldträgerbelastung

#### 5.3.1 Vierseitige starre Lagerung - Einfeldträger- /Schubbelastung $S_{E4s}/S_{S4s}$

Der eigentliche Gegenstand dieser Arbeit ist die aussteifende Wirkung von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen als seitliche Halterung für stabilitätsgefährdete Biegeträger. Die im Abschnitt 5.2 durchgeführten Untersuchungen umfassten Betrachtungen zum Steifigkeitsverhalten von Trapezprofilen unter Schubbelastung. Beim Stabilitätsversagen in Form des Biegedrillknickens verformen sich die Träger bzw. Stützen beim Versagen aber nicht wie ein Schubfeld. Vielmehr weichen die druckbeanspruchten Querschnittsteile seitlich aus. Infolge des seitlichen Ausweichens wirken auf den Querschnitt zusätzlich zu den äußeren Lasten Abtriebskräfte. Die seitliche Biegelinie folgt näherungsweise der Verformung eines Einfeldträgers unter einer Streckenlast. Die entstehenden Abtriebslasten bilden die resultierende Belastung für das zu untersuchende ebene System bestehend aus Randträgern, Verbindungsmitteln und Trapezprofilen.

Für die durchzuführenden Berechnungen ist es nötig, eine realistische Abbildung der Abtriebskräfte zu verwenden. Als Näherung wird für alle nachfolgenden Berechnungen ein Sinusverlauf angesetzt, siehe Bild 5.10.



**Bild 5.10** Gewählter Ansatz für die Abtriebskräfte am Einfeldträger

Die Berechnungen für die vierseitige starre Lagerung werden wieder an einem Viergelenkrahmen durchgeführt. Die Verbindungsmittel sind durch starre Kopplungen ersetzt. Der Profilüberstand an den Querrändern beträgt 50 mm. Profilstöße sind nicht vorhanden. Die beschriebene Sinuslast wird auf beide Querträger aufgebracht. Auf diese Art und Weise lässt sich das gleichzeitige Versagen beider Randträger als ungünstigster Fall für die Gesamtkonstruktion simulieren.

An dieser Stelle tritt noch ein weiteres Problem der Einfeldträgerbelastung hervor. Könnte man bei der Schubverformung noch mit einem starren Viereckrahmen operieren, ist dies hier nicht mehr möglich. Es wäre sonst eine unendliche Last zur Verformung nötig. Die Berechnungen müssen also mit einer endlichen Steifigkeit für die Querträger durchgeführt werden. Daraus ergibt sich eine zusätzliche Einflussgröße bei der Beurteilung der Steifigkeit unter Einfeldträgerbelastung. Es ist zusätzlich zu klären, ob und wenn ja, welchen Einfluss die Querträgersteifigkeit auf die Gesamtsteifigkeit besitzt.

Für die Untersuchungen werden verschiedene Profiltypen verwendet. Die Abmessungen werden analog zu den unter Abschnitt 5.2.3 berechneten Beispielen gewählt. Dadurch ist ein direkter Vergleich mit den dort errechneten Werten möglich.

Die Schubsteifigkeiten werden anhand eines schubsteifen parallel zum Querträger angeordneten Trägers unter einer Sinuslast ermittelt. Es wird für die Ableitung eine Verformungsgleichheit in Trägermitte vorausgesetzt. Um den Einfluss der Schubsteifigkeit der Querträger mitzuerfassen, wird auch deren Schubsteifigkeit berücksichtigt.

Die Schubsteifigkeit errechnet sich nach Gleichung (5.1).

$$S = \frac{2F_{\text{Amp}} \left(\frac{L}{\pi}\right)^2}{u\left(\frac{L}{2}\right)} - \frac{2}{\frac{1}{EI_z \left(\frac{\pi}{L}\right)^2} + \frac{1}{GA_q}} \quad (5.1)$$

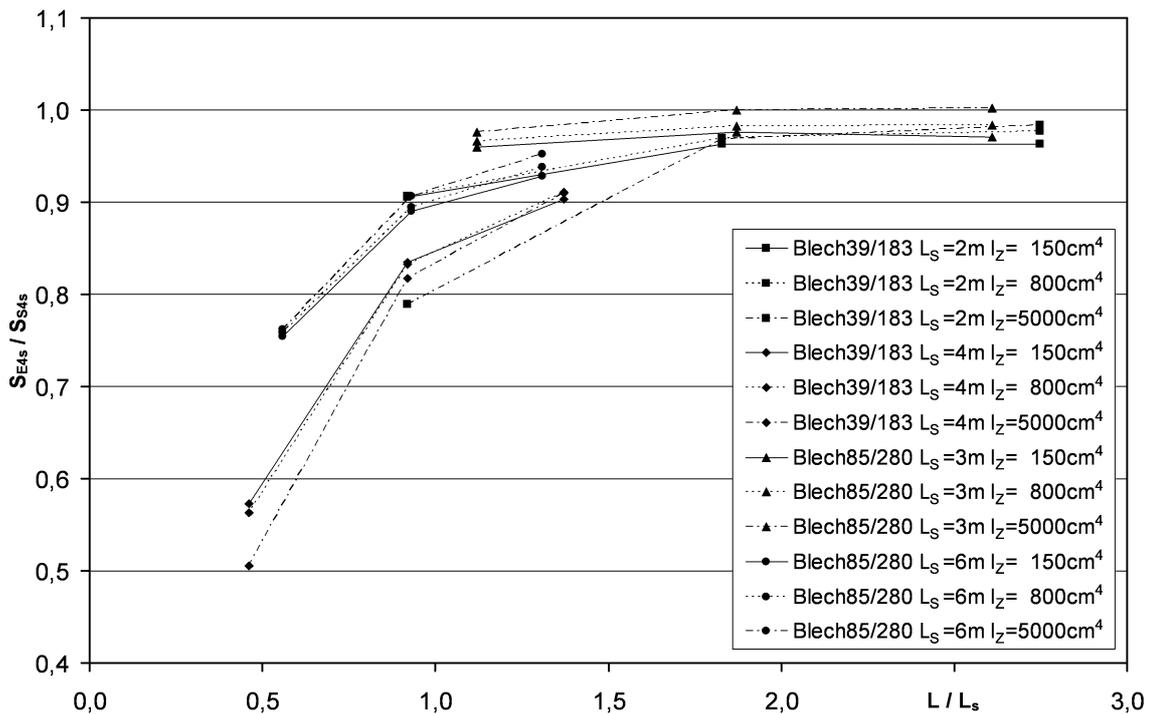
mit	$F_{\text{Amp}}$	→	Amplitude der aufgebrachten Sinuslast
	$u(L/2)$	→	Verformung in Trägermitte
	$L$	→	Trägerlänge am Querrand
	$I_z$	→	Flächenträgheitsmoment der Querträger
	$GA_q$	→	Schubsteifigkeit der Querträger

Für die Berechnungen werden drei verschiedenen Flächenträgheitsmomente für die Randträger gewählt. Die verwendeten Flächenträgheitsmomente sollen realistischen Werten entsprechen.

Es werden folgende Werte ausgewählt:

$I_{z1} = 150 \text{ cm}^4$	entspricht	IPE 200
$I_{z2} = 800 \text{ cm}^4$	entspricht	IPE 330
$I_{z3} = 5000 \text{ cm}^4$	entspricht	HEA 280

Im Bild 5.11 sind die Ergebnisse einer Auswahl von zwei Trapezprofiltypen mit jeweils zwei Längen  $L_s$  und den drei genannten Flächenträgheitsmomenten dargestellt. Alle Berechnungen werden wiederum mit einer Blechdicke  $t_N = 1$  mm durchgeführt. Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S_{E4s}$  werden den unter Abschnitt 5.2.3 ermittelten Schubsteifigkeitswerten für eine Schubverformung  $S_{S4s}$  gegenübergestellt. Die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E4s}/S_{S4s}$  sind über das Seitenverhältnis  $L/L_s$  aufgetragen. Zu den Grafen mit gleichen Profillängen  $L_s$  gehören jeweils die gleichen Liniensymbole.



**Bild 5.11** Vergleich der starren vierseitigen Lagerungen Einfeldträger-/Schubbelastung  $S_{E4s}/S_{S4s}$

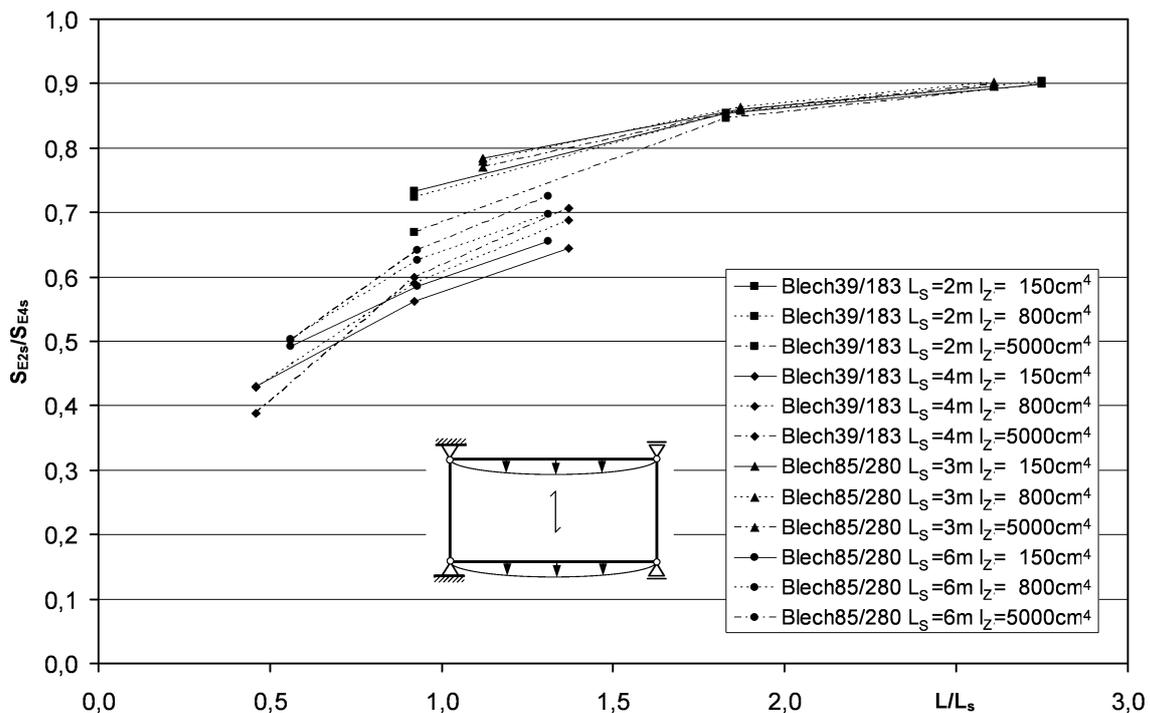
Aus dem Diagramm lässt sich sehr deutlich ablesen, dass zwischen der Einfeldträgerbelastung  $S_{E4s}$  und der Schubbelastung  $S_{S4s}$  je nach den Schubfeldabmessungen starke Unterschiede auftreten. Je kleiner das Seitenverhältnis  $L/L_s$  wird, um so größer ist der Steifigkeitsabfall bei der Einfeldträgerbelastung. Der größte Unterschied stellt sich bei den gezeigten Beispielen für das Profil 39/183 mit einer Länge von  $L_s = 4$  m und einer Querträgersteifigkeit von  $I_z = 5000$   $cm^4$  ein. Die Einfeldträgersteifigkeit  $S_{E4s}$  beträgt in diesem Fall nur 51% der Schubsteifigkeit  $S_{S4s}$  unter Schubbelastung. Für Seitenverhältnisse  $L/L_s$  größer 2,0 ist dieser Steifigkeitsabfall aber bereits nahezu vollständig abgeklungen. Die Verhältnisse streben für die gezeigten Beispiele gegen einen Wert um 1,0. Des Weiteren sieht man, dass die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E4s}/S_{S4s}$  bei gleichem Seitenverhältnis  $L/L_s$  aber größerer Profillänge deutlich abnehmen.

Als Zweites ist zu erkennen, dass die Steifigkeit der Querträger ebenfalls einen Einfluss auf die Schubsteifigkeit am Einfeldträger besitzt. Der Einfluss ist vor allem bei den kleineren Seitenverhältnissen sehr deutlich. Aber auch bei den größeren Werten streben die Grafen wieder stärker auseinander. Es lässt sich erkennen, dass sich eine große Querträgersteifigkeit bei Seitenverhältnissen  $L/L_s$  größer 1,5 für die gezeigten Beispiele positiv auf die Gesamtsteifigkeit auswirkt.

Allgemein lässt sich für weitere Untersuchungen die Aussage formulieren, dass ein Einfluss der Querträgersteifigkeit auf die Ersatzschubsteifigkeit der Trapezprofile vorhanden ist. Die Steifigkeit ist also zu berücksichtigen.

### 5.3.2 Starre zwei-/ vierseitiger Lagerung $S_{E2s}/S_{E4s}$ bei Einfeldträgerbelastung

Für einen weiteren Vergleich soll auch für die Einfeldträgerverformung das Verhalten bei zweiseitiger starrer Lagerung untersucht werden. Es werden für die Berechnungen die gleichen Parameter wie für die vierseitige Lagerung unter Abschnitt 5.3.1 verwendet. Die errechneten Steifigkeiten  $S_{E2s}$  werden anschließend den Schubsteifigkeiten  $S_{E4s}$  für die starre vierseitige Lagerung unter Einfeldträgerbelastung gegenübergestellt, siehe hierzu Bild 5.12.

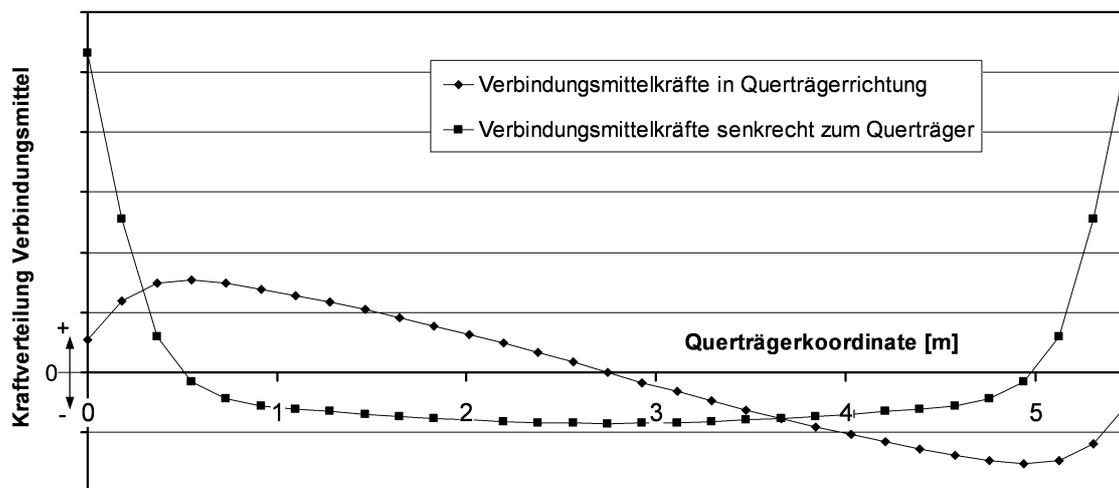


**Bild 5.12** Vergleich von starrer zwei-/vierseitiger Lagerung  $S_{E2s}/S_{E4s}$  bei Einfeldträgerbelastung

Auch in dieser Grafik zeigt sich, dass die zweiseitige Lagerung erwartungsgemäß weicher als die vierseitige Lagerung reagiert. Mit zunehmendem Seitenverhältnis  $L/L_s$  steigen die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2s}/S_{E4s}$  allerdings an und streben gegen den Wert 1,0. Hierbei konvergieren die geringeren Profillängen  $L_s$  schneller als die größeren Längen.

Die Steifigkeitsunterschiede sind wie schon im Abschnitt 5.2.3 für die Schubverformung auf Randstörungen zurückzuführen. Bei der zweiseitigen Lagerung fehlen die Verbindungsmittel an den Längsrändern, welche die in Profiltragrichtung aufgebrauchten Kräfte in den Rahmen abgeben würden. Stattdessen werden diese Kräfte über die äußeren Querwandverbinder übertragen. Dies führt zu größeren Verformungen an diesen Stellen, was sich steifigkeitsvermindernd auf die Gesamtkonstruktion auswirkt.

In Bild 5.13 ist der Kraftverlauf an den Verbindungsmitteln eines Längsträgers qualitativ für das Profil 39/183 bei  $L_s = 2$  m, 30 Profilperioden und einem  $I_z = 800$  cm<sup>4</sup> dargestellt.



**Bild 5.13** Qualitativer Verlauf der Verbindungsmittelkräfte bei starrer zweiseitiger Lagerung

In der Abbildung sind die genannten Randstörungen klar zu erkennen. An dem Verlauf der Kräfte in Tragrichtung der Trapezprofile ist ebenfalls gut zu erkennen, dass die Trapezprofile im mittleren Trägerbereich Kräfte von den Querträgern aufnehmen, welche sie an den Rändern wieder an den Querträger abgeben. An den Randbereichen erhalten die Träger also eine Belastung aus den Trapezprofilen, was auch den Einfluss der Randträgersteifigkeit auf die Gesamtsteifigkeit zum Teil erklärt. Die Kräfte werden in diesem Beispiel lediglich über die drei äußersten Verbindungsmittel übertragen.

Aus dem Verlauf der Kurve für die Verbindungsmittelkräfte in Querträgerrichtung erkennt man, dass sich eine Kraftverteilung ähnlich der Schubverteilung eines Biegeträgers ausbildet. Der Träger besteht aus dem Trapezprofil als Steg und den beiden Querträgern als Gurte. Die starke Abnahme der Schubkräfte an den drei äußeren Verbindungsmitteln resultiert aus den Kräften senkrecht zum Querträger. Die Lasten konzentrieren sich an diesen Verbindern und machen die Konstruktion dadurch weicher für Kräfte in Querträgerrichtung.

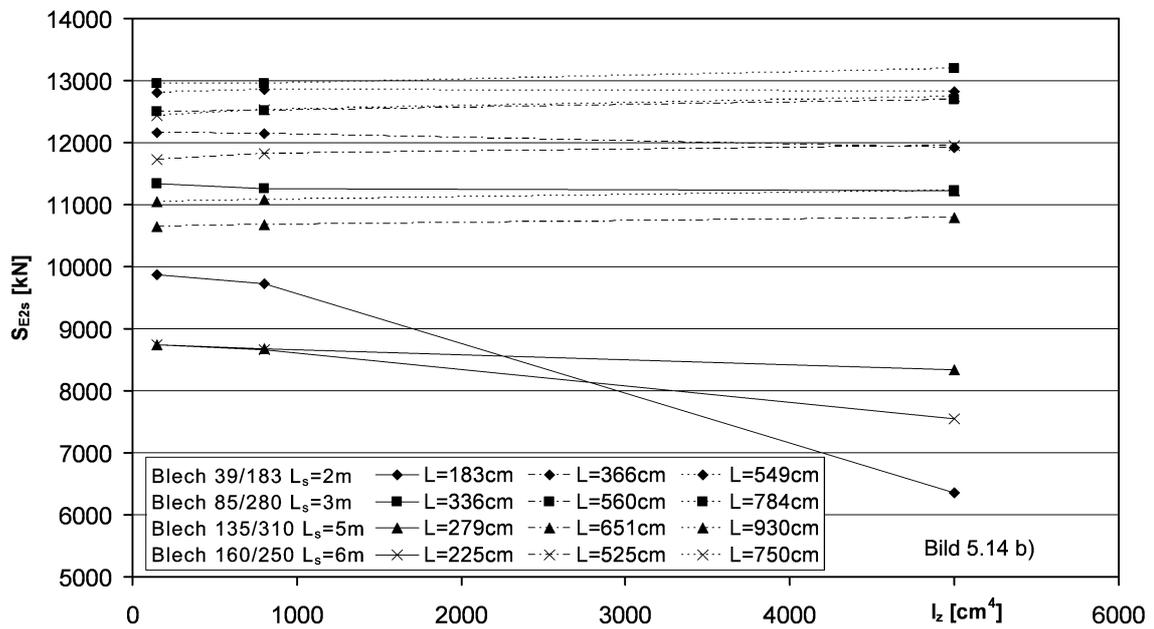
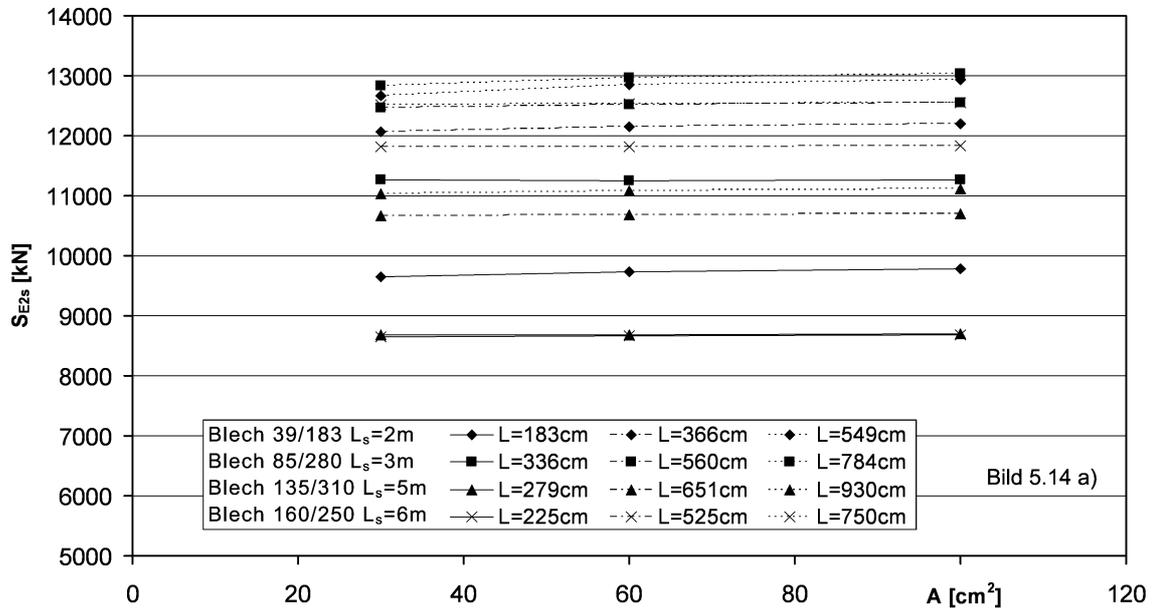
Aus den Kraftverläufen für die Verbindungsmittel und deren Verteilung könnte man schlussfolgern, dass für die Gesamtsteifigkeit nicht das Flächenträgheitsmoment der Querträger sondern deren Fläche von Einfluss ist. Zu diesem Zweck durchgeführte Berechnungen haben aber gezeigt, dass dies nicht der Fall ist. Die Steifigkeit der Trapezprofile reicht nicht aus, um das statische Moment der Querträger in ausreichendem Umfang zu aktivieren. Der Einfluss ist vernachlässigbar. Vielmehr ist doch das Flächenträgheitsmoment von Bedeutung, welches für die Verteilung der von den Profilen aufgenommenen Kräfte verantwortlich ist. Dies wird aus Bild 5.14 deutlich.

Für die beiden Diagramme wurden vier verschiedene Trapezprofile mit jeweils einer Länge  $L_s$  und drei Querträgerlängen  $L$  betrachtet. Die Querrandverbindungsmittel sind starr gesetzt. Die Querträger werden mit jeweils drei Steifigkeiten untersucht. Die Flächenträgheitsmomente werden mit den Werten  $I_{z1} = 150 \text{ cm}^4$ ,  $I_{z2} = 800 \text{ cm}^4$ ,  $I_{z3} = 5000 \text{ cm}^4$  und die Querträgerflächen mit  $A_1 = 30 \text{ cm}^2$ ,  $A_2 = 60 \text{ cm}^2$  bzw.  $A_3 = 100 \text{ cm}^2$  betrachtet. Das zur jeweiligen Berechnung zugehörige  $A$  bzw.  $I$  wurde konstant gehalten.

Aus dem Diagramm in Bild 5.14a) für die Querträgerfläche lassen sich für die einzelnen Flächen keine signifikanten Abweichungen erkennen. Die Grafen verlaufen nahezu horizontal. Es gibt demnach keinen bzw. nur einen geringen Einfluss der Fläche  $A$ . Die Betrachtung von nachgiebigen Verbindungsmitteln kann auch für die Fläche keine größeren Abhängigkeiten liefern. Der Einfluss ist eher noch geringer, da die starren Verbindungsmittel die größte Schubsteifigkeit  $S_{E2s}$  und damit die stärkste Aktivierung der Steineranteile der Querträger bewirken.

Für das Flächenträgheitsmoment  $I_z$  im unteren Diagramm in Bild 5.14b) lassen sich dagegen zum Teil deutliche Steifigkeitsunterschiede ablesen. Besonders stark fallen diese für die kürzeren Trägerlängen  $L$  aus. Der Einfluss des Flächenträgheitsmomentes ist gegenüber der Fläche sehr viel ausgeprägter und damit von entscheidender Bedeutung. Wie

auch aus Bild 5.12 hervorgeht, stellen sich für unterschiedliche Querträgersteifigkeiten Differenzen bei den Steifigkeitsverhältnissen  $S_{E2s}/S_{E4s}$  ein.



**Bild 5.14** Einfluss der Fläche  $A$  (Teilbild a) bzw. des Flächenträgheitsmomentes  $I_z$  (Teilbild b) der Querträger auf die Schubsteifigkeit  $S_{E2s}$  unter Einfeldträgerbelastung

Wie schon bei der im Abschnitt 5.3.1 untersuchten vierseitigen Lagerung verhalten sich größere Profillängen  $L_s$  in Bezug auf die Steifigkeitsverhältnisse weicher als geringere Längen. Die Ursache hierfür liegt in den bei längeren Profilen ausgeprägteren Randstö-

rungen. Die längeren Profile sind prinzipiell steifer. Die Folge der höheren Steifigkeit ist eine stärkere Mitwirkung der Verbindungsmittel, was die Gesamtkonstruktion im Verhältnis aber nachgiebiger macht.

Bei einer unendlichen Anzahl von Perioden verschwindet der Einfluss der Randstörung aber wieder. Der Einfluss der äußeren hoch belasteten Verbindungsmittel an den Rändern auf die Gesamtsteifigkeit nimmt dann ab.

### 5.3.3 Vierseitige nachgiebige/ starrer Lagerung $S_{E4n}/S_{E4s}$ bei Einfeldträgerbelastung

An dieser Stelle soll ermittelt werden, wie sich vierseitig befestigte Profile mit nachgiebigen Verbindungsmitteln im Vergleich zu starren Verbindungsmitteln verhalten. Zu diesem Zweck werden zwei Profiltypen genauer betrachtet und hier dargestellt. Die Profiltypen 39/183 und 85/280 mit einer Blechdicke  $t_N = 1$  mm sollen hierfür Verwendung finden. Die beiden Profile werden wie schon in den vorangegangenen Abschnitten jeweils mit zwei Längen  $L_s$  untersucht. Daneben werden wie in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 drei Querträgersteifigkeiten mit  $I_{z1} = 150 \text{ cm}^4$ ,  $I_{z2} = 800 \text{ cm}^4$  und  $I_{z3} = 5000 \text{ cm}^4$  berechnet, um den Einfluss aus der Querträgerbiegesteifigkeit zu erfassen. Für die nachgiebigen Verbindungsmittel sollen wie im Abschnitt 5.2.4 nur die extremalen Steifigkeitskombinationen verwendet werden. Der Streubereich der Steifigkeiten wird so ausreichend genau erfasst. Für die Verbindungsmittel ergeben sich folgende Kombinationen:

Kombination 1 - nachgiebigste Lagerung - Bezeichnung weich:

Ränder: Schrauben mit Neoprenscheibe  $C_Q = 28,57 \text{ kN/cm}$

Profilstoß: Nieten  $e_L = 600 \text{ mm}$   $c_S = 0,56 \text{ kN/cm}^2$

Kombination 2 - steifste Lagerung - Bezeichnung steif:

Ränder: Setzbolzen  $C_Q = 100 \text{ kN/cm}$

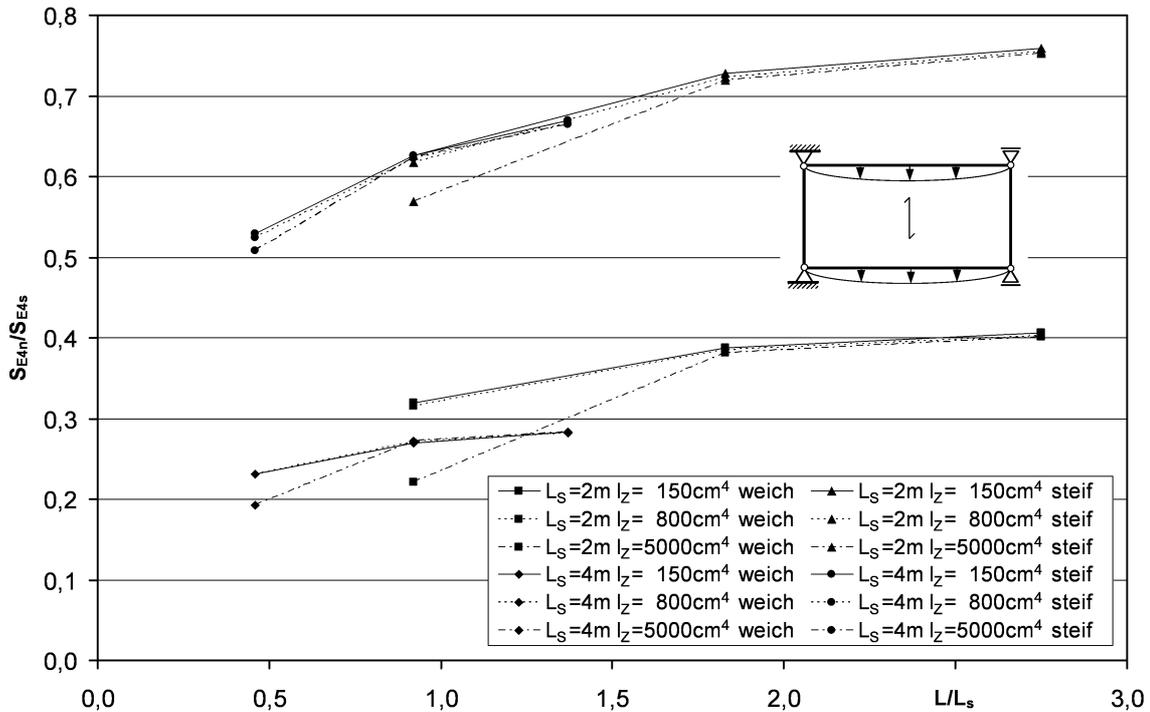
Profilstoß: Schrauben  $e_L = 70 \text{ mm}$   $c_S = 5,7 \text{ kN/cm}^2$

Für alle Berechnungen sind wieder 50 mm Profilüberstand an den Querrändern und eine halbe Untergurtbreite an den Längsrändern der Profile vorhanden.

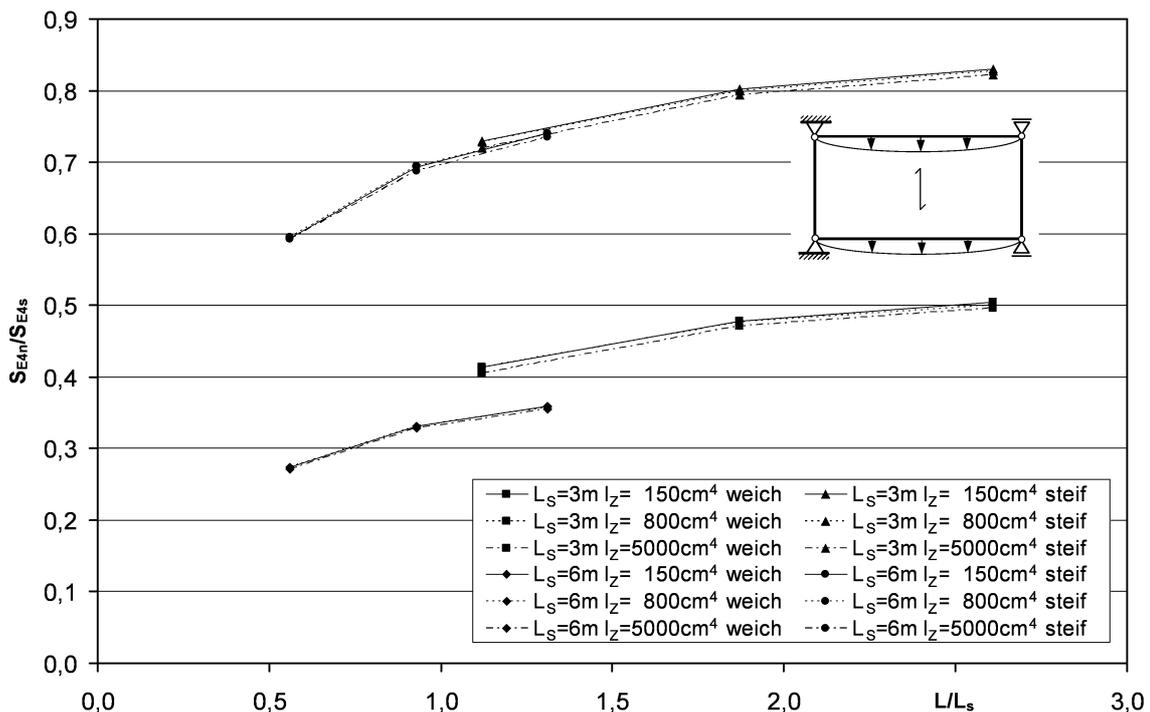
Die beiden Profile werden in unterschiedlichen Diagrammen dargestellt, da sonst die Übersichtlichkeit verloren gehen würde. Es zeigt sich an dieser Stelle bereits, dass es eine große Anzahl von Einflussparametern mit maßgeblicher Bedeutung für die Schubsteifig-

keit gibt. Eine umfassende und detaillierte Betrachtung aller Parameter ist deshalb sehr aufwendig und gestaltet sich schwierig bezüglich der Auswertung.

Die berechneten Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E4n}/S_{E4s}$  können den Diagrammen in Bild 5.15 für Profil 39/183 und Bild 5.16 für das Profil 85/280 entnommen werden. Die Werte sind über die Seitenverhältnisse  $L/L_s$  der Konstruktionen aufgetragen.



**Bild 5.15** Profil 39/183: Vierseitige nachgiebige/ starrer Lagerung  $S_{E4n}/S_{E4s}$  bei Einzellastbelastung



**Bild 5.16** Profil 85/280: Vierseitige nachgiebige/ starrer Lagerung  $S_{E4n}/S_{E4s}$  bei Einzellastbelastung

Aus den beiden Diagrammen lässt sich klar entnehmen, dass auch für die Einfeldträgerbelastung die Steifigkeit der Verbindungsmittel von entscheidender Bedeutung ist. Bei beiden Profilen zeigen sich Differenzen in den Steifigkeitsverhältnissen  $S_{E4n}/S_{E4s}$  von bis zu 40%. Die weiche Verbindungsmittelkombination liegt deutlich unter den Konstruktionen mit steifen Verbindungsmitteln. Wobei sich deutlich abzeichnet, dass mit zunehmendem Seitenverhältnis  $L/L_s$  das Steifigkeitsverhältnis zunimmt, aber nicht gegen den Wert 1,0 läuft. Die Grafen werden diesen Wert nicht erreichen.

Aus einem Vergleich zwischen dem steifen Profil 39/183 im Bild 5.15 und dem weicheren Profil 85/280 kann man auch erkennen, dass die Verhältnisse  $S_{E4n}/S_{E4s}$  bei steifen Profilen kleiner sind. Diese Tatsache ist mit der stärkeren Belastung der Verbindungsmittel zu erklären. Da die Profile steifer sind, beteiligen sie sich stärker am Lastabtrag. Daraus ergibt sich, dass auch die Verbindungsmittel stärker belastet werden, was die aus den Kräften resultierenden Verformungen dementsprechend vergrößert und das System weicher macht.

Des Weiteren kann man erkennen, dass auch die Querträgersteifigkeiten von Bedeutung sind. Besonders deutlich wird der Einfluss für das Profil 39/183 im Bild 5.15. Für eine Querträgersteifigkeit von  $I_z = 5000 \text{ cm}^4$  fallen die Verhältnisse  $S_{E4n}/S_{E4s}$  sehr stark ab. Für die beiden weicheren Querträger sind kaum Unterschiede zu sehen. Für das Profil 85/280 im Bild 5.16 sind die Differenzen weniger ausgeprägt. Sie sind aber vorhanden.

Zur Auswirkung der Stützweite  $L_s$  der Trapezprofile kann man sagen, dass der Steifigkeitsabfall bei größeren Stützweiten stärker ausfällt. Dies liegt wiederum an der höheren Steifigkeit der Profile und der daraus resultierenden höheren Belastung der Verbindungsmittel.

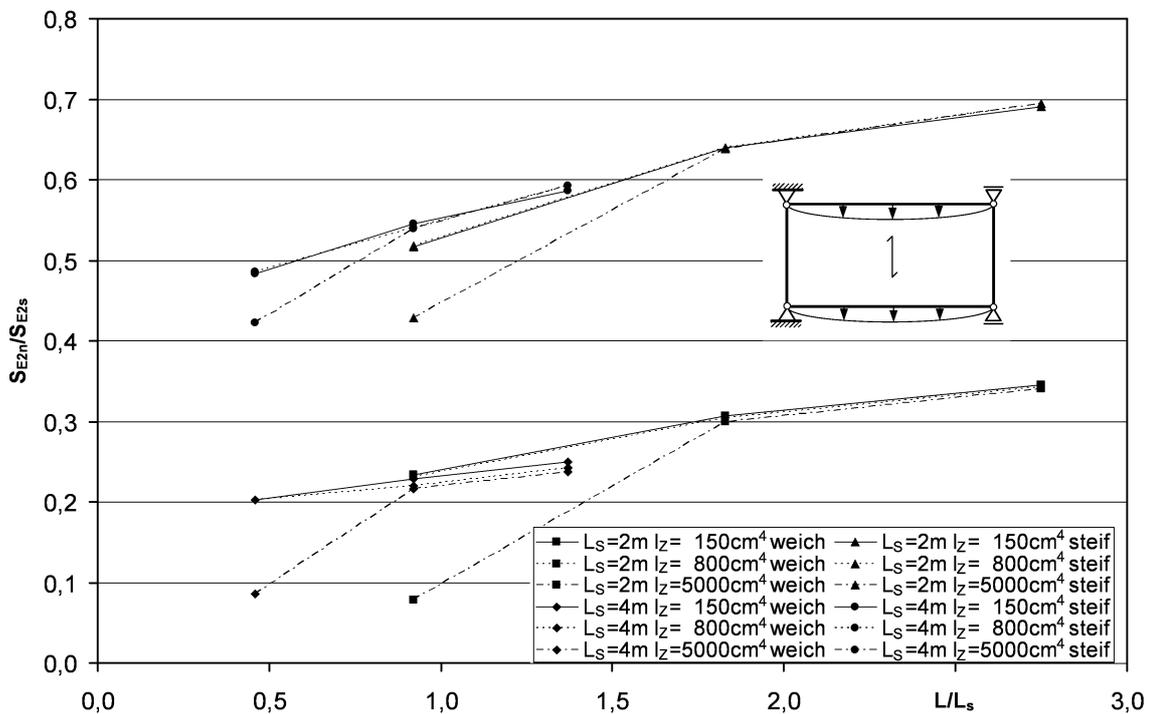
Insgesamt ist die Befestigung mit nachgiebigen Verbindungsmitteln erwartungsgemäß weicher als die starre Befestigung. Der Steifigkeitsverlust fällt dabei je nach Konfiguration unterschiedlich stark aus. Es wirken sich alle betrachteten Parameter auf die Steifigkeit aus und sind zu berücksichtigen.

**5.3.4 Zweiseitige nachgiebige/ starre Lagerung  $S_{E2n}/S_{E2s}$  bei Einfeldträgerbelastung**

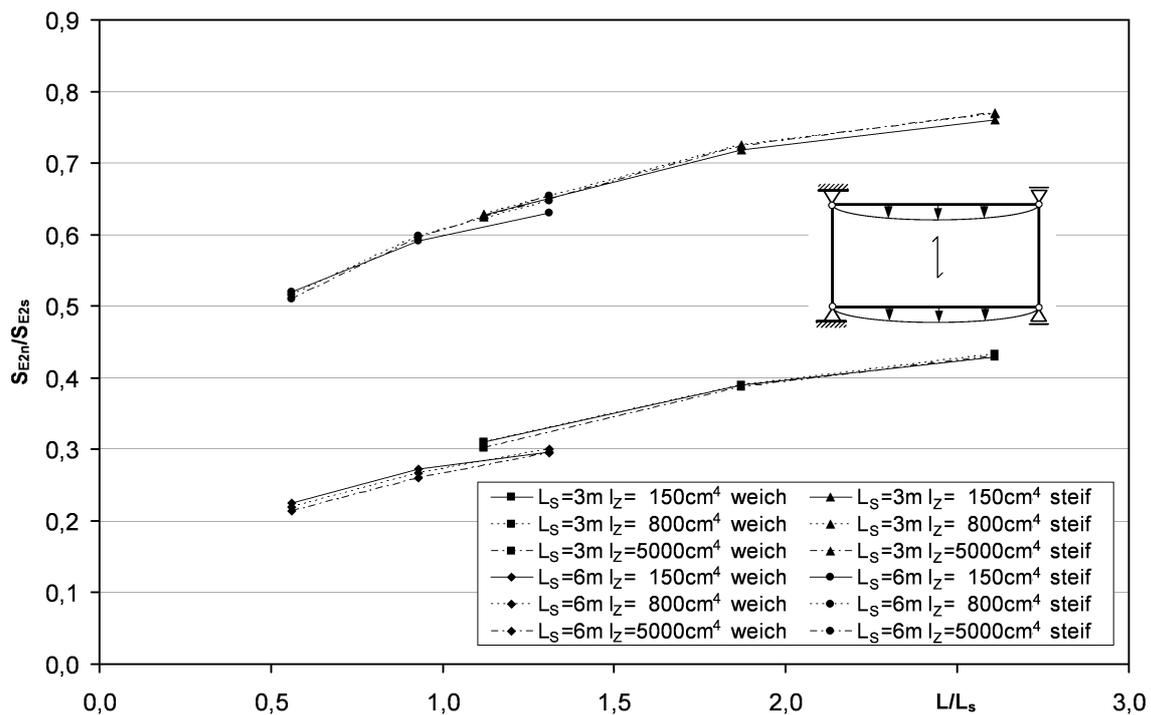
In diesem Abschnitt werden zweiseitig gelagerte Trapezprofilkonstruktionen unter Einfeldträgerbelastung verglichen. Der Vergleich wird zwischen einer nachgiebigen und einer starren Verbindungsmittelanordnung vorgenommen. Auf Grund der großen Kombinationsvielfalt der Parameter ist auch an dieser Stelle nur die Darstellung eines kleinen Spektrums möglich.

Es werden die gleichen Profile wie in dem vorangegangenen Abschnitt 5.3.3 betrachtet, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Die Blechdicke beträgt für alle Berechnungen  $t_N = 1 \text{ mm}$ . Neben zwei Profillängen  $L_s$  und drei Querträgerlängen  $L$  werden wieder die schon zuvor genannten drei Flächenträgheitsmomente  $I_z$  der Querträger betrachtet. Die Verbindungsmittel werden erneut in der weichsten und steifsten Kombination betrachtet. Für die genauen Verbindungsmittelsteifigkeiten sei hier auf Abschnitt 5.3.3 verwiesen.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen in Bild 5.17 für das Profil 39/183 und in Bild 5.18 für das Profil 85/280 dargestellt.



**Bild 5.17** Profil 39/183: Zweiseitige nachgiebige/ starrer Lagerung  $S_{E2n}/S_{E2s}$  bei Einfeldträgerbelastung



**Bild 5.18** Profil 85/280: Zweiseitige nachgiebige/ starrer Lagerung  $S_{E2n}/S_{E2s}$  bei Einfeldträgerbelastung

Auch in diesen beiden Diagrammen ist der Steifigkeitsabfall von der nachgiebigen zur starren Lagerung an den Steifigkeitsverhältnissen  $S_{E2n}/S_{E2s}$  sehr deutlich ausgeprägt. Der Abfall ist sogar um einiges stärker als bei der unter Abschnitt 5.3.3 untersuchten vierseitigen Lagerung. Diese Tatsache leuchtet aber ein, wenn man bedenkt, dass sich die Lasten bei der zweiseitigen Lagerung, wie bereits beschrieben, nur auf wenigen der äußeren Verbindungsmitteln konzentrieren.

Für die weicheren Verbindungsmittel ist der Steifigkeitsverlust erwartungsgemäß größer. Für das Profil 39/183 ergibt sich als Extremwert eine Reststeifigkeit für  $S_{E2n}$  von gerade einmal 8% der starren Lagerung  $S_{E2s}$ .

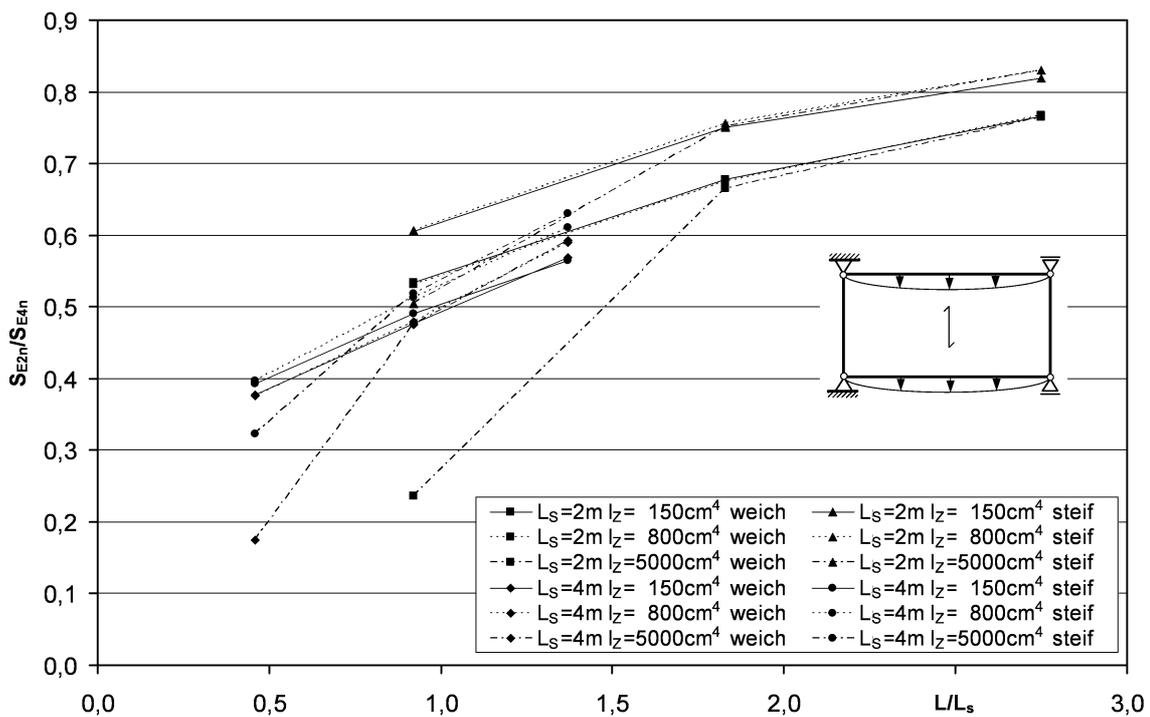
Ein Einfluss der Querträgersteifigkeit ist ebenso vorhanden. Die Auswirkungen sind bei der zweiseitigen Lagerung größer als bei der unter Abschnitt 5.3.3 untersuchten vierseitigen Lagerung. Auch dieser Fakt ist nachvollziehbar, da der Lastabtrag in die Auflager bei der zweiseitigen Lagerung ausschließlich über die Querträger erfolgt.

Zudem streuen die Verhältnisswerte  $S_{E2n}/S_{E2s}$  bei der zweiseitigen Lagerung auch im Bereich größerer Seitenverhältnisse  $L/L_s$  wieder stärker. Insgesamt gilt aber auch hier, dass die Steifigkeitsverhältnisse mit größer werdenden Seitenverhältnissen, also einer steigenden Periodenanzahl, zunehmen.

Es sind bei der zweiseitigen Lagerung ebenfalls alle Einflussparameter von Bedeutung und können nicht außer acht gelassen werden.

### 5.3.5 Nachgiebige zwei-/ vierseitigen Lagerung $S_{E2n}/S_{E4n}$ bei Einfeldträgerbelastung

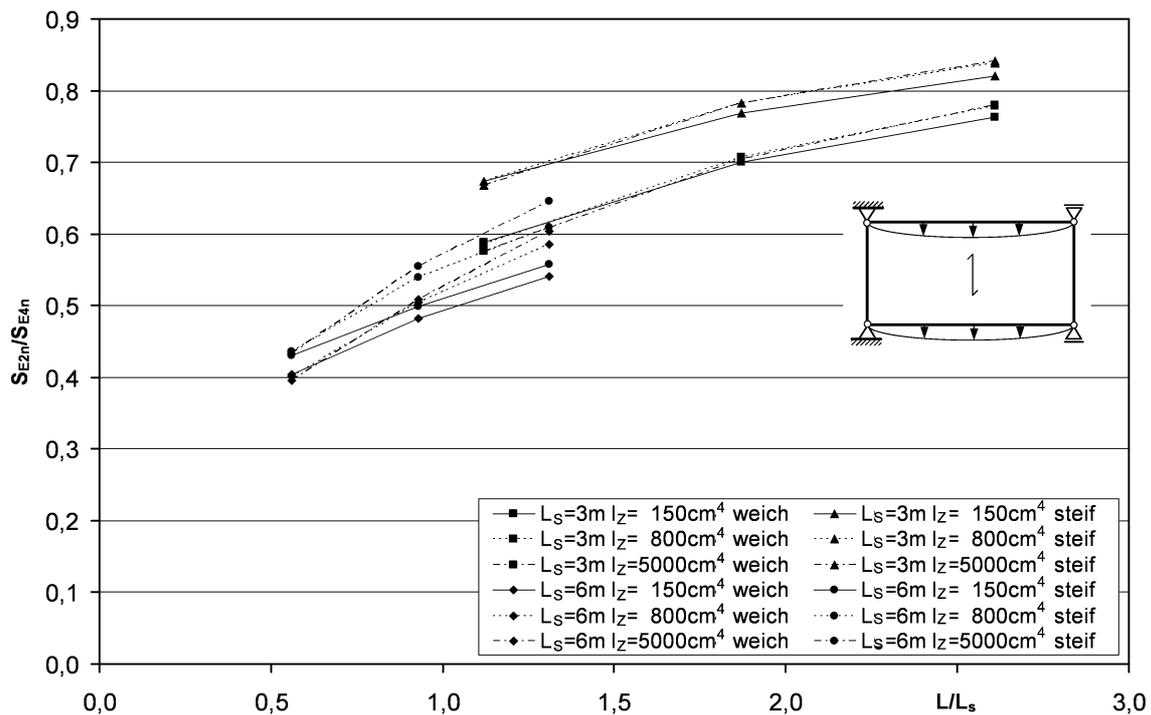
In diesem Abschnitt soll ein Vergleich zwischen der nachgiebigen zwei- und vierseitigen Lagerung unter Einfeldträgerbelastung vorgenommen werden. Zweckmäßigerweise werden die gleichen Parameterkombinationen wie unter den vorangegangenen Abschnitten gewählt. Die betrachteten Profile 39/183 und 85/280 sind getrennt in den beiden nachfolgenden Diagrammen in Bild 5.19 und Bild 5.20 dargestellt. Die Grafenbezeichnung weich steht auch hier für die nachgiebigste und steif für die steifste Verbindungsmittelkombination, siehe Abschnitt 5.3.3. Die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{E4n}$  werden wieder über das Seitenverhältnis  $L/L_s$  der Konstruktion aufgetragen.



**Bild 5.19** Profil 39/183: Nachgiebige zwei-/ vierseitiger Lagerung  $S_{E2n}/S_{E4n}$  bei Einfeldbelastung

Die beiden Diagramme zeigen auch für diesen Vergleich einen deutlichen Abfall der Steifigkeit der zweiseitigen gegenüber der vierseitigen Lagerung. Wobei das Steifigkeitsverhältnis  $S_{E2n}/S_{E4n}$  mit abnehmendem Seitenverhältnis  $L/L_s$  kleiner wird.

Bei dem Profil 39/183 ergeben sich kleinere Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{E4n}$  als bei dem weicheren Profil 85/280. Der Anstieg der Werte mit dem Seitenverhältnis  $L/L_s$  liegt auch hier in der Abnahme des Einflusses der Randstörungen begründet.



**Bild 5.20** Profil 85/280: Nachgiebige zwei-/ vierseitiger Lagerung  $S_{E2n}/S_{E4n}$  bei Einfeldbelastung

Des Weiteren ist ebenfalls ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Verbindungsmittelkonfigurationen erkennbar. Die nachgiebige Konfiguration ist erwartungsgemäß viel weicher als die steife Lagerung. Die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{E4n}$  weichen je nach Seitenverhältnis  $L/L_s$  um 5% und 45% voneinander ab. Die Werte streuen sehr stark. Die Verbindungsmittel sind auch hier von entscheidender Bedeutung.

Zwischen den drei Querträgersteifigkeiten  $I_z$  sind ebenfalls Unterschiede vorhanden. Es kann allerdings keine allgemeine Aussage bezüglich der Tendenz gemacht werden. Die einzelnen Grafen schneiden einander während des Verlaufs. Bei kleineren Seitenverhältnissen  $L/L_s$  wirkt sich eine große Querträgersteifigkeit negativ und bei größeren Seitenverhältnissen positiv auf das Steifigkeitsverhältnis  $S_{E2n}/S_{E4n}$  aus.

Es haben bei diesem Vergleich alle Parameter einen Einfluss und sind zu berücksichtigen.

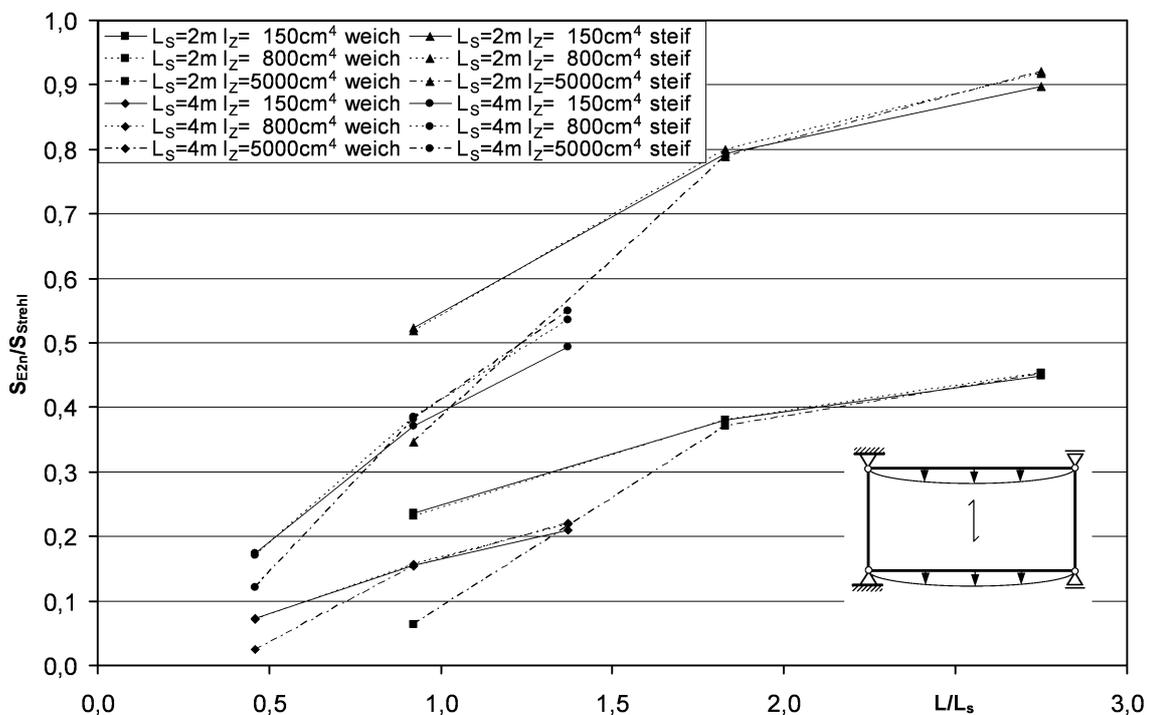
### 5.3.6 Nachgiebige zweiseitige Lagerung unter Einfeldträgerbelastung/ Steifigkeiten nach Strehl $S_{E2n}/S_{Strehl}$

Um einen Bezug zu den bekannten Schubsteifigkeiten nach *Strehl*  $S_{Strehl}$  herstellen zu können, wird in diesem Abschnitt ein Vergleich zwischen den Schubsteifigkeiten zweiseitig nachgiebig gelagerter Trapezprofile unter Einfeldträgerbelastung  $S_{E2n}$  und den theoretischen Schubsteifigkeiten nach *Strehl*  $S_{Strehl}$  angestellt.

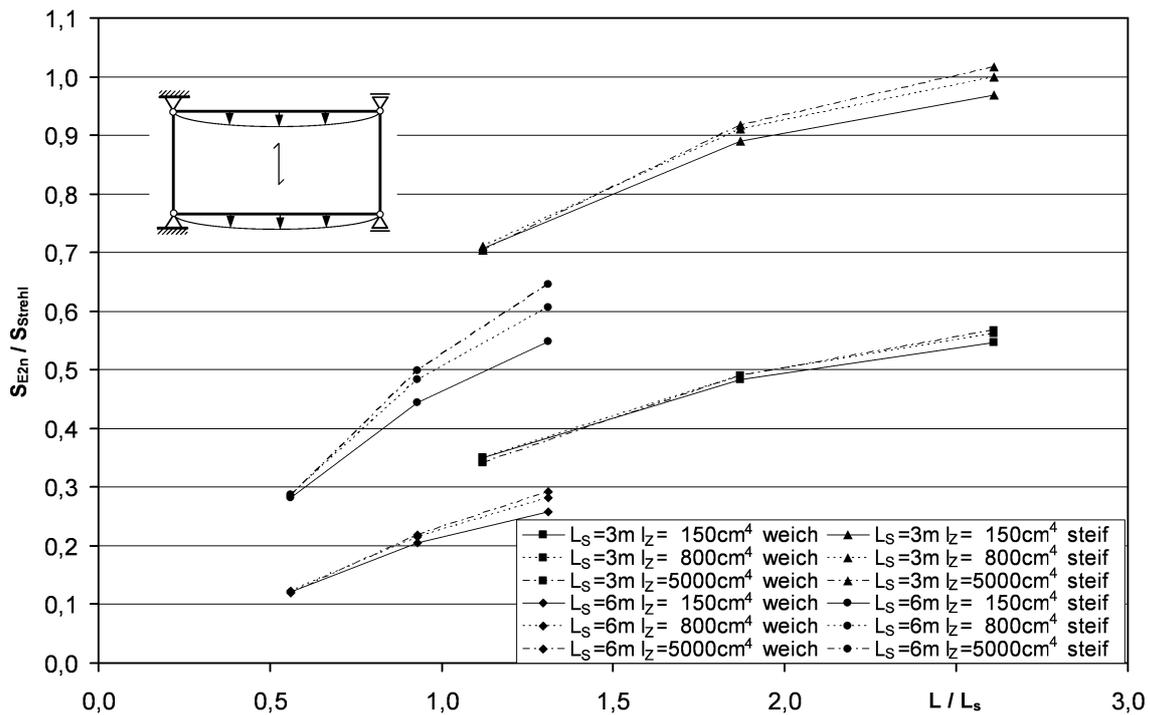
Es werden für diesen Vergleich ebenfalls die gleichen Parameterkombinationen wie in den vorangegangenen Abschnitten verwendet. Die Ergebnisse für die beiden Trapezprofiltypen 39/183 und 85/280 sind in den beiden nachfolgenden Diagrammen in Bild 5.21 für das Profil 39/183 und in Bild 5.22 für das Profil 85/280 dargestellt. Die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Strehl}$  sind auch hier über das Seitenverhältnis  $L/L_s$  aufgetragen.

Die Graphenbezeichnungen weich und steif stehen auch hier für die steifste und die nachgiebigste Verbindungsmittelkonfiguration.

Die beiden Diagramme bestätigen ebenfalls die Notwendigkeit der angestellten Untersuchungen. Es sind große Steifigkeitsunterschiede zwischen den theoretischen Schubsteifigkeiten nach *Strehl*  $S_{Strehl}$  und der Schubsteifigkeit  $S_{E2n}$  zweiseitig nachgiebig gelagerter Trapezprofile erkennbar.



**Bild 5.21** Profil 39/183: Nachgiebige zweiseitige Lagerung/ Steifigkeiten nach Strehl  $S_{E2n}/S_{Strehl}$



**Bild 5.22** Profil 85/280: Nachgiebige zweiseitige Lagerung/ Steifigkeiten nach Strehl  $S_{E2n}/S_{Strehl}$

Das Steifigkeitsverhältnis fällt auch hier mit kleiner werdendem Seitenverhältnis ab. Beide Profiltypen zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Steifigkeitsverhältnissen  $S_{E2n}/S_{Strehl}$  bei den beiden Verbindungsmittelkonfigurationen. Die steifen Verbindungsmittel liefern erwartungsgemäß weitaus größere Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Strehl}$  als die weichen Verbindungsmittel. Für das Profil 39/183 liegen die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Strehl}$  zwischen 3% bei den weichen Lagerungen und 92% bei der steifen Verbindungsmittelkonfiguration. Diese Aussage gilt allerdings nur für den untersuchten Bereich der Seitenverhältnisse  $L/L_s$ . Bei abweichenden Seitenverhältnissen können auch andere Steifigkeitsverhältnisse erreicht werden. Für das Profil 85/280 schwanken die Steifigkeitsverhältnisse von 12% bei der weichen Lagerung und 102% bei der steifen Lagerung. Es werden bei ausreichend steifer Lagerung und einer großen Anzahl von Profilperioden also auch Steifigkeitsverhältnisse oberhalb von 1,0 erreicht.

Im direkten Vergleich zwischen den beiden Profilen läßt sich damit erkennen, dass der Steifigkeitsabfall bei dem schubsteifen Profil 39/183 wesentlich stärker ausfällt als bei dem weichen Profil 85/280. Diese Tatsache kann man mit dem größeren Verformungsanteil der Verbindungsmittel bei steiferen Profilen leicht erklären. Die Gesamtverformung wird in diesem Fall viel stärker von der Verbindungsmittelsteifigkeit beeinflusst als bei dem schubweichen Profil 85/280.

Die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Strehl}$  streben auch bei diesem Vergleich mit zunehmender Periodenanzahl der Profile scheinbar gegen feste Werte. Die konstanten Werte werden allerdings erst bei deutlich größeren Seitenverhältnissen  $L/L_s$  erreicht.

Der Einfluß der Querrandträgersteifigkeit  $I_z$  ist auch bei diesem Vergleich deutlich zu erkennen. Während sich eine große Querrandträgersteifigkeit  $I_z$  bei kleineren Seitenverhältnissen  $L/L_s$  negativ auf die Schubsteifigkeit  $S_{E2n}$  auswirkt, dreht sich diese Tendenz mit zunehmendem Seitenverhältnis  $L/L_s$  um. Die Schubsteifigkeit  $S_{E2n}$  steigt dann mit zunehmendem  $I_z$  an.

Der Vergleich zwischen den Schubsteifigkeiten  $S_{E2n}$  und  $S_{Strehl}$  bestätigt wiederum die Relevanz aller betrachteten Einflußparameter und die Notwendigkeit der angestellten Untersuchungen.



---

## Kapitel 6

### Parametrische Untersuchungen

#### 6.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Vorbetrachtungen durchgeführt. Sie ergeben, dass alle genannten Einflussgrößen (Trapezprofil­länge  $L_s$ , Querrand­träger­länge  $L$ , Steifigkeit der Verbindungsmittel an den Rändern  $C_Q$  und den Profilstößen  $c_s$ , Art der Befestigung, Profil­geometrie und Profil­überstände) nicht vernachlässigbare Auswirkungen auf die Steifigkeit der Gesamtkonstruktion besitzen. Die Ermittlung der resultierenden Schubsteifigkeit einer Trapez­profil­scheibe muss, um ihre Wirkung exakt zu erfassen, demnach unter Berücksichtigung aller genannten Einflüsse erfolgen.

In der vorliegenden Arbeit wird die aussteifende Wirkung von Trapez­profilen auf biegedrillknickgefährdete Biegeträger bei einer nur zweiseitigen Befestigung der Profile untersucht. Für diese Untersuchung ist es notwendig die vorhandene Belastung und das statische System im Falle des Biegedrillknickens genauer zu erfassen. Zu diesem Zweck werden Berechnungen an einem Einfeld­trägersystem unter einer Sinuslast durchgeführt, siehe Abschnitt 5.3. Die Sinuslast entspricht der im Falle des Biegedrillknickens auftretenden Verteilung der horizontalen Abtriebskräfte. Neben den bereits für die Schubfelduntersuchungen genannten Einflussparametern ist für die Einfeld­träger­verformung zusätzlich die Rand­träger­steifigkeit  $I_z$  zu berücksichtigen.

Wie sich bereits bei der Schubverformung zeigte, besitzen auch im Falle der Einfeld­träger­belastung alle Parameter einen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit. Ein Vergleich mit den errechneten Werten für die Schubverformung ergab, dass zwischen beiden Belastungsformen (Schub- und Einfeld­träger­belastung) deutliche Unterschiede in Bezug auf die Gesamtsteifigkeit vorhanden sind. Für die Ermittlung der zur Aussteifung der Biegeträger ansetzbaren Schubsteifigkeit ist die Belastungsform also von entscheidender Bedeutung.

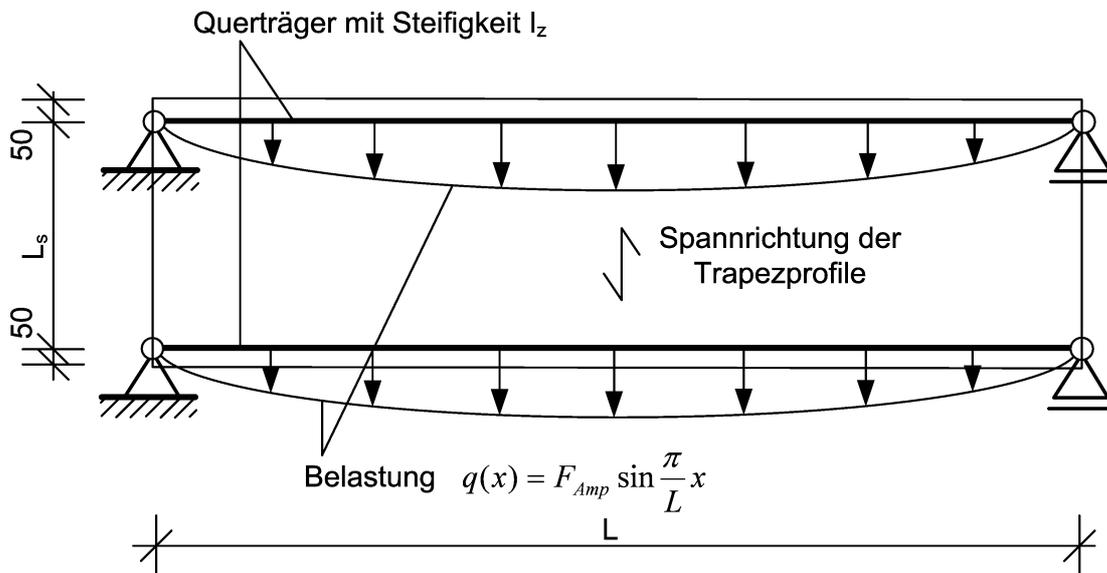
In diesem Kapitel werden zur detaillierten Betrachtung Parameterstudien an Trapez­profil­konstruktionen unter der bereits beschriebenen Einfeld­träger­belastung durchgeführt. Es werden alle relevanten Einflussgrößen (Trapez­profil­typ, Blech­dicke  $t_N$ , Profil­länge  $L_s$ , Quer­träger­länge  $L$ , Steifigkeit der Quer­träger  $I_z$ , Steifigkeit der Profil­stoß­verbinder  $c_s$  und der Querrand­verbindungs­mittel  $C_Q$ ) berücksichtigt.

## 6.2 Parameterstudien

### 6.2.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Abschnitten werden parametrische Untersuchungen an verschiedenen Trapezprofilen durchgeführt. Es werden sieben verschiedene Profile mit jeweils vier Blechdicken  $t_N$  betrachtet.

Die Berechnungen werden mit dem bereits in Abschnitt 5.3 verwendeten Finite-Element-Modell durchgeführt. An den Querrändern der Trapezprofile werden Überstände von jeweils 50 mm angesetzt. Als Belastung wird auf beiden Querträgern eine Sinuslast gemäß der beim Biegedrillknicken entstehenden Abtriebskräfte aufgebracht. Eine prinzipielle Systemdarstellung kann Bild 6.1 entnommen werden. Die Trapezprofile sind stets nur mit den beiden Querträgern sowie untereinander verbunden.



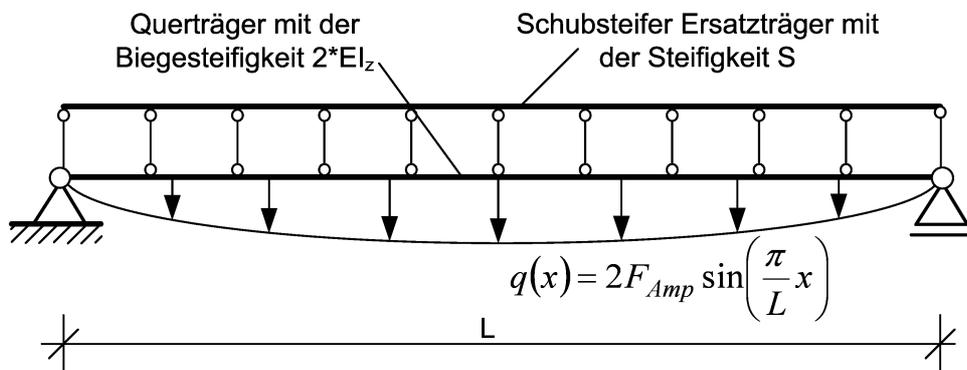
**Bild 6.1** Darstellung des für die Parameterstudien verwendeten statischen Systems

Die fünf Parameter - Profillänge  $L_s$ , Querträgerlänge  $L$ , Steifigkeit der Querträger  $I_z$ , Steifigkeit der Profilstoßverbinder  $c_S$  und der Querrandverbindungsmitel  $C_Q$  - werden jeweils mit drei verschiedenen Werten betrachtet.

Nachfolgend sind die untersuchten Parameter zusammengestellt und die berechneten Größen angegeben. Bei den verwendeten Trapezprofilen handelt es sich um Profile der Firma Arcelor, siehe Arcelor [2].

Blechtypen	35/207, HSA 39/183, UB 85/280, 106/250, 135/310, 150/280, EKO160/250
$L_s$	Profilstützweite - 2 m, max $L_s$ nach Zulassung und ein Zwischenwert
L	Länge der beiden Querträger - 5 m, 7,5 m und 10 m (Werte variieren je nach Profiltyp in Abhängigkeit der Profiltafelbreite)
$I_z$	Flächenträgheitsmoment der Querträger - $150 \text{ cm}^4$ , $800 \text{ cm}^4$ und $5000 \text{ cm}^4$
$C_Q$	Federsteifigkeit der Querrandverbindungsmittel (siehe Tabelle 5.3), 28,57 kN/cm - entspricht Schrauben mit Neoprenscheibe 66,7 kN/cm - entspricht Schrauben ohne Neoprenscheibe 100 kN/cm - entspricht Setzbolzenverbindungen
$c_s$	Federsteifigkeit der Blechlängsstoßverbindungsmittel (siehe Tabelle 5.3), 0,56 kN/cm <sup>2</sup> - entspricht Nieten mit 60 cm Abstand 2,0 kN/cm <sup>2</sup> - entspricht Schrauben mit 20 cm Abstand 5,7 kN/cm <sup>2</sup> - entspricht Schrauben mit 7 cm Abstand
$t_N$	Nennblechdicke $t_{N1} = 0,75 \text{ mm}$ , $t_{N2} = 0,88 \text{ mm}$ , $t_{N3} = 1 \text{ mm}$ und $t_{N4} = 1,25 \text{ mm}$ , die Berechnungen werden mit $t = t_N - 0,04 \text{ mm}$ nach [48] durchgeführt.

Die Berechnung der Ersatzschubsteifigkeit S erfolgt analog zu Gleichung (5.1). Allerdings wird die Ersatzschubsteifigkeit an zwei starr gekoppelten Trägern unter Vernachlässigung der Schubsteifigkeit  $GA_q$  der Querträger ermittelt. Der Einfluss dieses Steifigkeitsanteils geht bei den untersuchten Trägerlängen L gegen null. Das für die Berechnungen verwendete statische System ist Bild 6.2 zu entnehmen.



**Bild 6.2** Statisches System zur Ermittlung der Ersatzschubsteifigkeit

Die Ersatzschubsteifigkeit des aussteifenden Balkens ergibt sich nach Gleichung (6.1). Die Grundlage für Gleichung (6.1) bildet die Differentialgleichung der beiden starr gekoppelten Träger.

$$S = 2 \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left( \frac{F_{Amp}}{u\left(\frac{L}{2}\right)} - EI_z \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \right) \quad (6.1)$$

mit  $u(L/2)$  Verformung in Trägermitte

### 6.2.2 Profil HSA 39/183

Für das Profil HSA 39/183 werden im Rahmen der Parameterstudien folgende genauen Profil-  $L_s$  und Querträgerlängen  $L$  untersucht:

Profilstützweite:  $L_{s1} = 2 \text{ m}$

$L_{s2} = 4 \text{ m}$

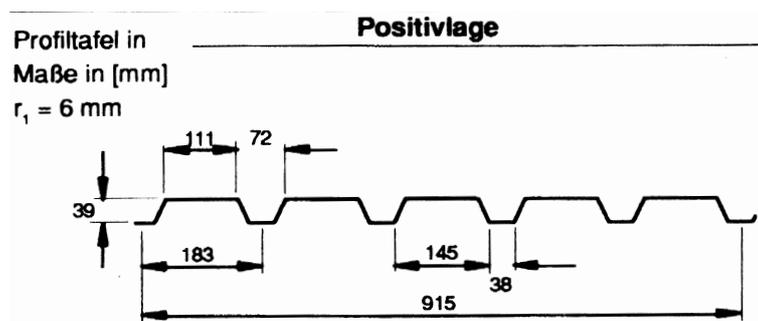
$L_{s3} = 6 \text{ m}$  entspricht der maximal zulässigen Stützweite  $l_{gr}$

Querträgerlänge:  $L_1 = 5,49 \text{ m}$  entspricht 6 Profiltafeln nebeneinander

$L_2 = 7,32 \text{ m}$  entspricht 8 Profiltafeln nebeneinander

$L_3 = 10,07 \text{ m}$  entspricht 11 Profiltafeln nebeneinander

In Bild 6.3 sind die Abmessungen des Profils nochmals genau dargestellt.

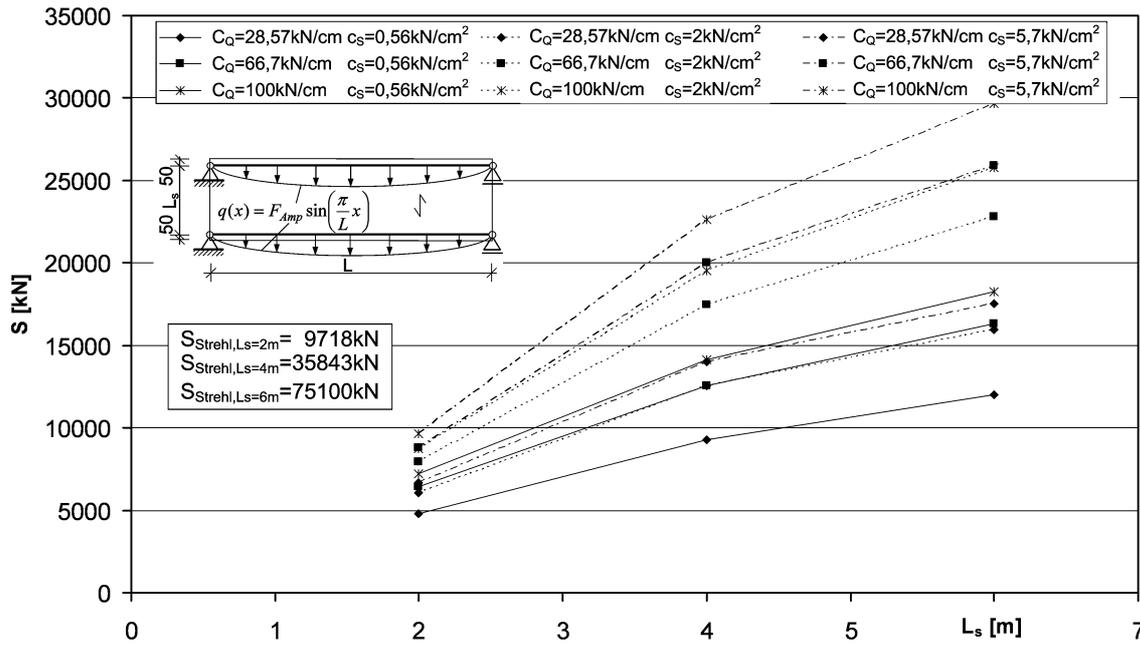


**Bild 6.3** Profilabmessungen HSA 39/183, Arcelor [2]

Für die weiteren Betrachtungen werden die vier Blechdicken  $t_N$  jeweils extra betrachtet. Damit ergeben sich noch fünf Einflussparameter ( $L_s$ ,  $L$ ,  $I_z$ ,  $c_S$  und  $C_Q$ ), welche variiert werden müssen. Pro Blechdicke  $t_N$  und bei jeweils drei Variationswerten der fünf Parameter sind damit  $3^5 = 243$  Berechnungen durchzuführen.

Mit den fünf Parametern und der errechneten Schubsteifigkeit für den Ersatzträger bewegt man sich für die Ergebnisdarstellung im sechsdimensionalen Raum. Eine allgemeine Übersicht in grafischer Form zum Einfluss der einzelnen Parameter ist damit nur schwer möglich. Es soll aber dennoch versucht werden, eine einfache Übersicht zum Einfluss der einzelnen Parameter zu geben. Dazu werden die zur Blechdicke  $t_N = 1 \text{ mm}$  durchgeführten Berechnungen exemplarisch ausgewählt.

Im Bild 6.4 sind die errechneten Schubsteifigkeiten für das Profil 39/183 mit einer Blechdicke  $t_N = 1 \text{ mm}$  bei einer Querträgerlänge  $L = 732 \text{ cm}$  und einem Flächenträgheitsmoment der Querträger  $I_z = 800 \text{ cm}^4$  dargestellt.

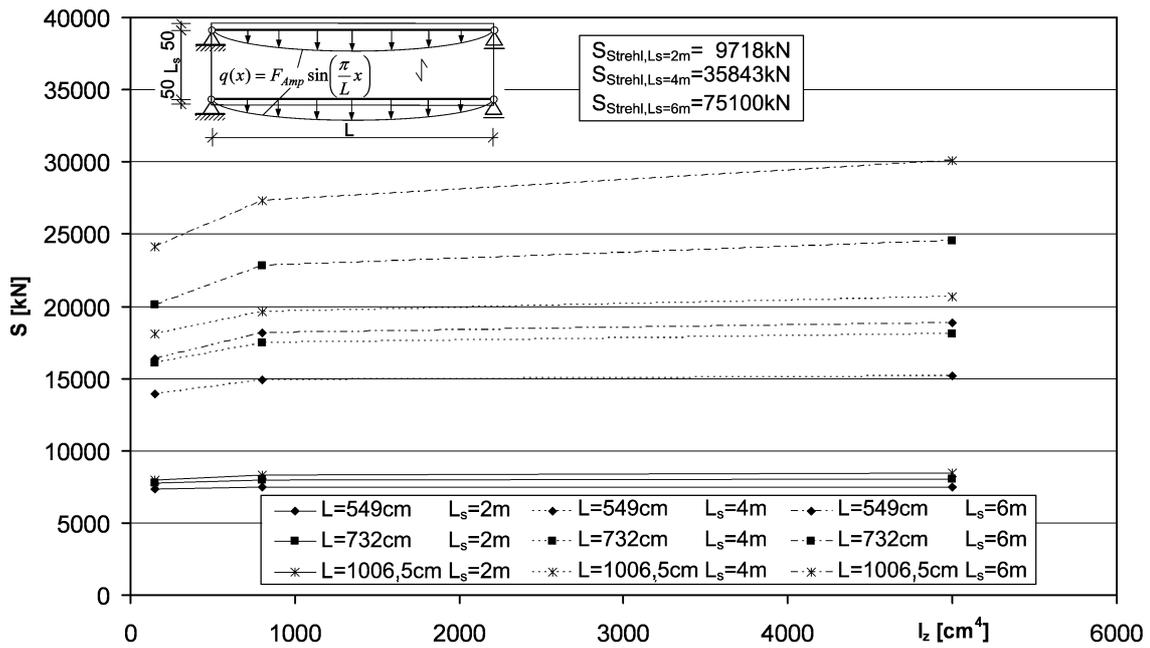


**Bild 6.4** Ermittelte Schubsteifigkeiten  $S$  von Profil 39/183,  $t_N=1$  mm,  $L=732$  cm,  $I_z=800$  cm<sup>4</sup>

Aus dem Diagramm lässt sich deutlich die Zunahme der Steifigkeiten mit zunehmender Profillänge  $L_s$  ablesen. Allerdings sind die erreichten Steifigkeiten bei Weitem nicht so groß, wie die im Diagramm angegebenen theoretischen Steifigkeiten  $S_{Strehl}$  nach *Strehl* [44] für die drei Profillängen  $L_s = 2$  m, 4 m und 6 m. Bei einer Profillänge  $L_s = 2$  m werden die theoretischen Werte bei steifen Verbindungsmitteln fast noch erreicht. Die errechneten Steifigkeiten bei  $L_s = 6$  m sind im Vergleich zur theoretischen Steifigkeit  $S_{Strehl}$  aber viel geringer. Mit der steifsten Verbindungsmittelkombination werden nur etwa 40% der theoretischen Schubsteifigkeit erreicht. Insgesamt ist erwartungsgemäß eine deutliche Zunahme der Steifigkeit mit steifer werdenden Verbindungsmitteln zu beobachten. Die Schubsteifigkeit  $S$  besitzt, wie die Verläufe der einzelnen Grafen deutlich zeigen, eine nichtlineare Abhängigkeit von der Profillänge  $L_s$ .

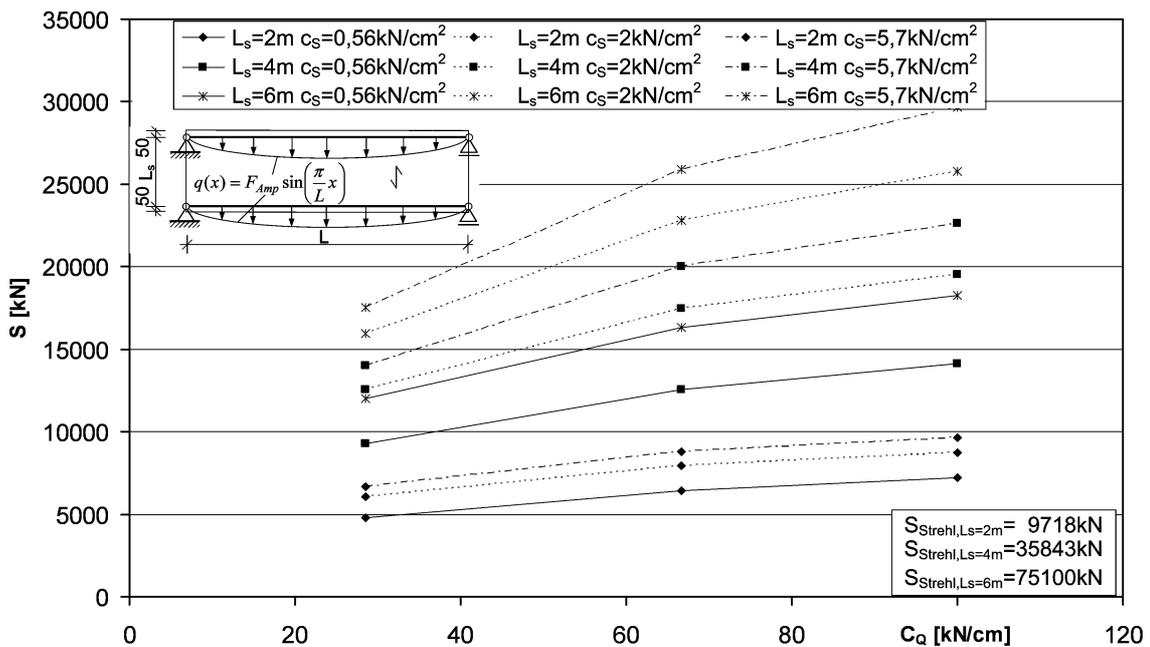
Der Einfluss der Biegesteifigkeit  $I_z$  der Querträger ist für konstante Verbindungsmittelsteifigkeiten mit  $C_Q = 66,7$  kN/cm und  $c_S = 2$  kN/cm<sup>2</sup> im Bild 6.5 aufgetragen.

Die Grafen zeigen ebenfalls einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Randträgersteifigkeit  $I_z$  und der Schubsteifigkeit  $S$ . Dies wird insbesondere bei den größeren Profillängen  $L_s$  deutlich. Für keine der dargestellten Systemkonfigurationen wird die theoretische Steifigkeit  $S_{Strehl}$  erreicht. Mit zunehmender Steifigkeit  $I_z$  steigen die Werte aber an.



**Bild 6.5** Schubsteifigkeiten  $S$  von Profil 39/183,  $t_N=1\text{mm}$ ,  $C_Q=66,7 \text{ kN/cm}$ ,  $c_S=2 \text{ kN/cm}^2$

Die Querträgerlänge  $L$  besitzt ebenso einen Einfluss auf die Schubsteifigkeit  $S$ . Bei längeren Trägern nimmt die Schubsteifigkeit  $S$  zu. Dies ist auf den geringeren Einfluss der Randstörungen bei einer größeren Anzahl von Profilperioden zurückzuführen.

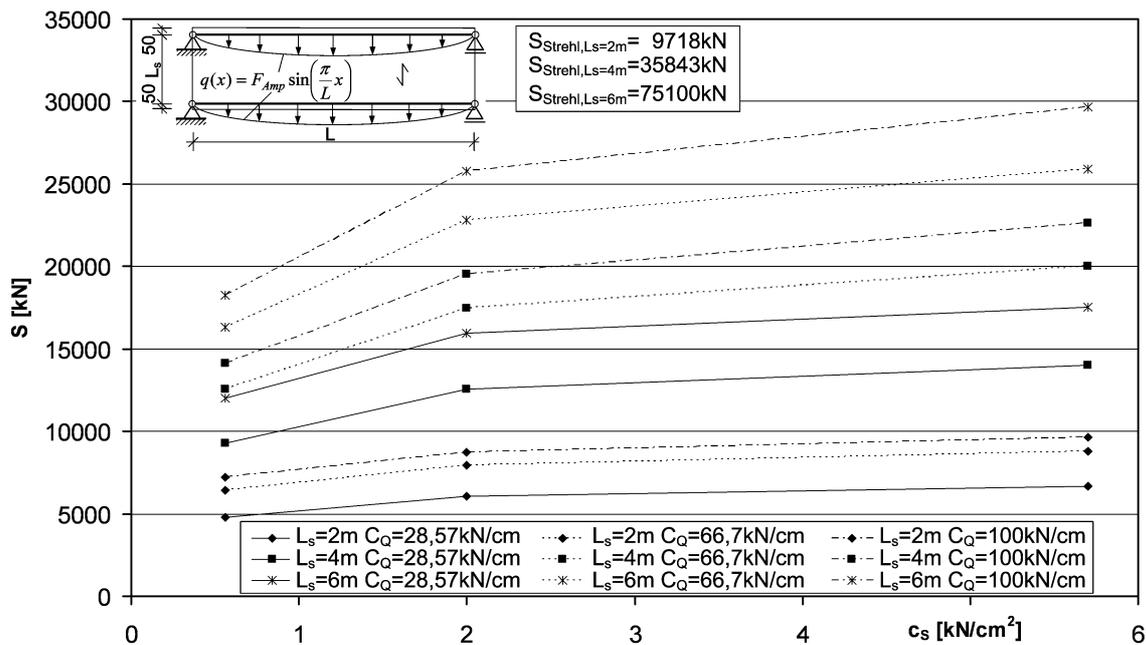


**Bild 6.6** Ermittelte Schubsteifigkeiten  $S$  von Profil 39/183 mit  $t_N=1\text{mm}$ ,  $I_z=800\text{cm}^4$ ,  $L=732\text{cm}$

Die Querrandverbindungsmittel zeigen die gleiche Tendenz. Im Bild 6.6 sind für das Profil 39/183 mit  $t_N = 1$  mm bei  $I_z = 800$  cm<sup>4</sup> und einer Querträgerlänge  $L = 732$  cm die errechneten Schubsteifigkeiten über die Querrandverbindungsmittelsteifigkeit  $C_Q$  aufgetragen.

Die Schubsteifigkeiten  $S$  nehmen mit zunehmendem  $C_Q$  nichtlinear zu. Eine höhere Profilstoßsteifigkeit  $c_S$  wirkt sich dabei positiv aus. Der Grund dafür ist die bessere Verteilung der Kräfte in der Trapezprofilscheibe. Größere Stoßsteifigkeiten ermöglichen das bessere Zusammenwirken der einzelnen Profile. Die Profile wirken eher wie eine große und damit insgesamt steifere Scheibe.

Die theoretischen Steifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  werden bei der gezeigten Auswahl wieder von keiner der Parameterkombinationen erreicht. Eine größere Länge  $L_s$  der Trapezprofile erhöht die resultierende Steifigkeit  $S$  nicht in dem Maße wie dies nach der Zunahme der theoretischen Schubsteifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  sein müsste. Erklären lässt sich das mit den Querrandverbindungsmitteln. Die reine Profilsteifigkeit  $S_{\text{Strehl}}$  nimmt mit  $L_s$  zwar zu, aber die Querrandverbindungsmittel ändern ihre Steifigkeit  $C_Q$  nicht. Die einzelnen Bauteile verhalten sich wie eine Reihenschaltung verschiedener Federn. Die Erhöhung einer Federsteifigkeit steigert die Steifigkeit der resultierenden Gesamtfeder nicht im gleichen Maße, sondern wesentlich weniger.

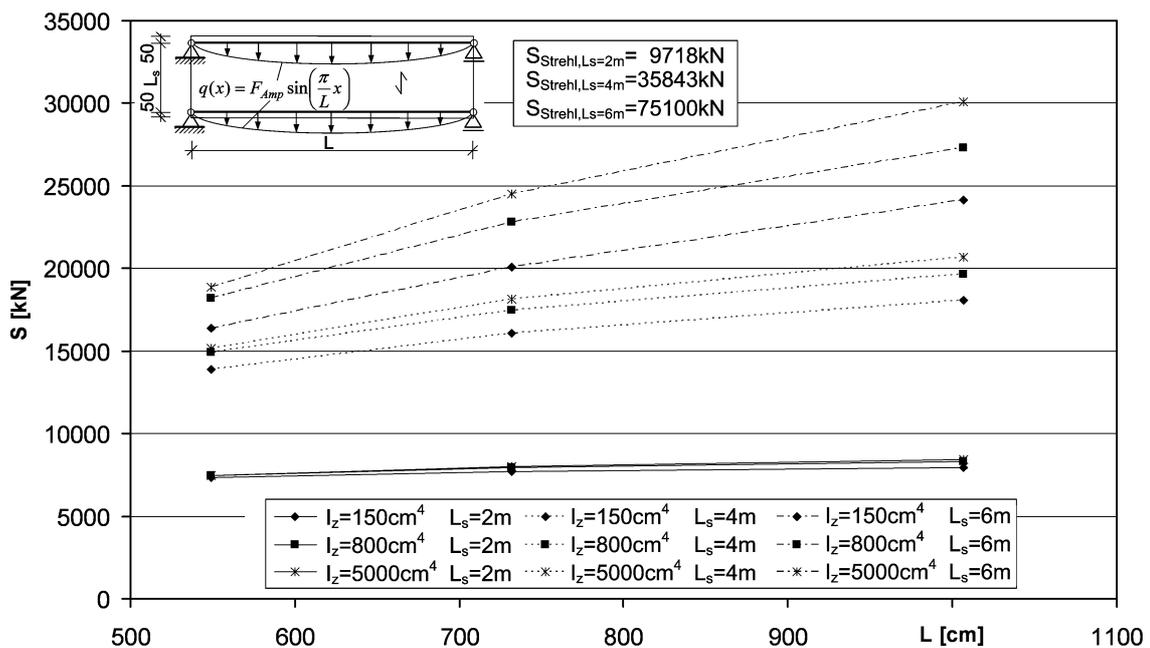


**Bild 6.7** Ermittelte Schubsteifigkeiten  $S$  von Profil 39/183 mit  $t_N=1$  mm,  $I_z=800$  cm<sup>4</sup>,  $L=732$  cm

Der nichtlineare Zusammenhang zwischen der Profilstoßsteifigkeit  $c_S$  und der resultierenden Schubsteifigkeit  $S$  für konstante Querträgersteifigkeiten  $I_z = 800 \text{ cm}^4$  und Trägerlängen  $L = 732 \text{ cm}$  ist im Bild 6.7 dargestellt. Die Steifigkeiten nehmen wieder mit zunehmendem  $c_S$  erwartungsgemäß zu. Die theoretischen Steifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  werden bei den dargestellten Beispielen lediglich bei den kurzen Profilen  $L_s = 2 \text{ m}$  und der steifsten Verbindungsmittelkombination erreicht. Alle anderen liegen deutlich unter den theoretischen Werten.

Mit steigender Querrandverbindungsmittelsteifigkeit nehmen auch die Anstiege der einzelnen Grafen zu. Die Ursache ist die gleiche wie im vorangegangenen Diagramm in Bild 6.6 Erst wenn die anderen Federn in der symbolischen Reihenschaltung eine ausreichende Größe besitzen, kann sich die Stoßsteifigkeit  $c_S$  entsprechend auswirken.

In Bild 6.8 ist eine äquivalente Darstellung für die Schubsteifigkeit  $S$  über die Querträgerlänge  $L$  vorhanden. Die errechneten Werte gelten für konstante Verbindungsmittelsteifigkeiten  $C_Q = 66,7 \text{ kN/cm}$  und  $c_S = 2 \text{ kN/cm}^2$ . Ein nichtlineares Abhängigkeitsverhältnis ist auch in diesem Fall vorhanden. Es ist jedoch nicht so stark ausgeprägt. Die Steifigkeiten  $S$  streuen mit zunehmender Profillänge  $L_s$  immer stärker. Der positive Einfluss der Querträgersteifigkeit  $I_z$  ist ebenfalls gut erkennbar. Die theoretischen Steifigkeiten für vierseitig gelagerte Trapezprofile  $S_{\text{Strehl}}$  werden von allen Parameterkonfigurationen unterschritten.



**Bild 6.8** Schubsteifigkeiten  $S$  von Profil 39/183,  $t_N=1\text{mm}$ ,  $C_Q=66,7 \text{ kN/cm}$ ,  $c_S=2 \text{ kN/cm}^2$

Die in den vorangegangenen Abbildungen dargestellten Beispiele decken nur einen kleinen Teil der berechneten Parameterkombinationen ab. Mit den Diagrammen werden jeweils nur 1/9 aller Kombinationsmöglichkeiten zu einer Blechdicke  $t_N$  dargestellt. Auf die Darstellung weiterer Beispiele soll an dieser Stelle verzichtet werden. Die Tendenz der Werte für die Schubsteifigkeiten ist bei den anderen Parameterkombinationen ähnlich. Es hat sich in den Berechnungen bestätigt, dass alle untersuchten Einflussgrößen nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf die Gesamtsteifigkeit besitzen.

Die Angabe einer geschlossenen Lösung für alle untersuchten Fälle wäre nur mit hochparametrischen Polynomen möglich. Die praktische Anwendung würde damit aber sehr erschwert.

Alle verwendeten Parameterkombinationen sind in tabellarischer Form im Anhang B.1 zusammengestellt.

### 6.2.3 Profil 35/207

Für das Profil 35/207 werden im Rahmen der Parameterstudien folgende genauen Profil- $L_s$  und Querträgerlängen  $L$  untersucht:

Profilstützweite:  $L_{s1} = 2 \text{ m}$

$L_{s2} = 4 \text{ m}$

$L_{s3} = 6 \text{ m}$

der Wert liegt deutlich oberhalb der maximal zulässigen Stützweite

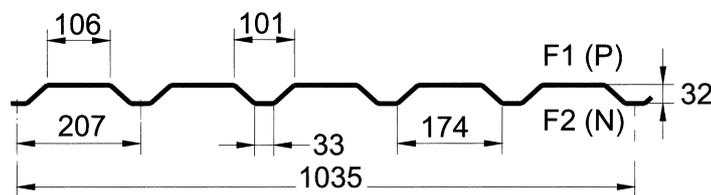
Querträgerlänge:  $L_1 = 5,18 \text{ m}$  entspricht 5 Profiltafeln nebeneinander

$L_2 = 7,25 \text{ m}$  entspricht 7 Profiltafeln nebeneinander

$L_3 = 10,35 \text{ m}$  entspricht 10 Profiltafeln nebeneinander

Die übrigen Parameter  $c_s$ ,  $C_Q$  und  $I_z$  sind Abschnitt 6.2.1 zu entnehmen.

In Bild 6.10 sind die Abmessungen des Profils dargestellt.



**Bild 6.9** Profilabmessungen 35/207, Arcelor [2]

Für die weiteren Betrachtungen werden die Blechdicken  $t_N$  wiederum jeweils extra betrachtet. Damit ergeben sich erneut fünf Einflussparameter ( $L_s$ ,  $L$ ,  $I_z$ ,  $c_s$  und  $C_Q$ ), welche variiert werden müssen. Auch für dieses Profil werden Schubsteifigkeiten  $S$  für  $t_N = 0,75 \text{ mm}$ ,  $t_N = 0,88 \text{ mm}$ ,  $t_N = 1 \text{ mm}$  und  $t_N = 1,25 \text{ mm}$  berechnet.

Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S$  zeigen die gleichen Tendenzen und Abhängigkeiten wie für das Profil HSA 39/183 im Abschnitt 6.2.2. Aus diesem Grund soll auf eine detaillierte Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden. Im Anhang B.4 sind für alle vier Blechdicken  $t_N$  die errechneten Werte in tabellarischer Form beigelegt.

### 6.2.4 Profil UB 85/280

Für das Profil UB 85/280 werden im Rahmen der Parameterstudien folgende genauen Profil-  $L_s$  und Querträgerlängen  $L$  untersucht:

Profilstützweite:  $L_{s1} = 2 \text{ m}$

$L_{s2} = 5 \text{ m}$

$L_{s3} = 8 \text{ m}$  entspricht etwa der maximal zulässigen Stützweite  $l_{gr}$  bei  $t_N = 1,25 \text{ mm}$

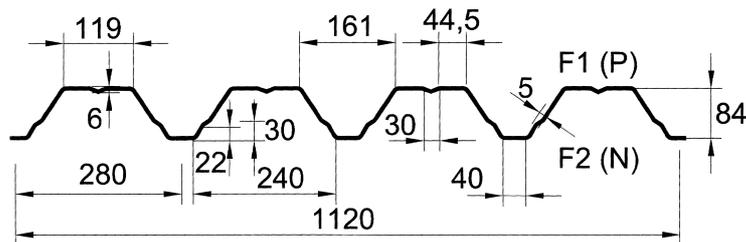
Querträgerlänge:  $L_1 = 4,48 \text{ m}$  entspricht 4 Profiltafeln nebeneinander

$L_2 = 7,84 \text{ m}$  entspricht 7 Profiltafeln nebeneinander

$L_3 = 10,08 \text{ m}$  entspricht 9 Profiltafeln nebeneinander

Die übrigen Parameter  $c_S$ ,  $C_Q$  und  $I_z$  sind Abschnitt 6.2.1 zu entnehmen.

In Bild 6.10 sind die Abmessungen des Profils dargestellt.



**Bild 6.10** Profilabmessungen UB 85/280, Arcelor [2]

Für die weiteren Betrachtungen werden die Blechdicken  $t_N$  wiederum jeweils extra betrachtet. Damit ergeben sich erneut fünf Einflussparameter ( $L_s$ ,  $L$ ,  $I_z$ ,  $c_S$  und  $C_Q$ ), welche variiert werden müssen. Auch für dieses Profil werden Schubsteifigkeiten  $S$  für  $t_N = 0,75 \text{ mm}$ ,  $t_N = 0,88 \text{ mm}$ ,  $t_N = 1 \text{ mm}$  und  $t_N = 1,25 \text{ mm}$  berechnet.

Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S$  zeigen die gleichen Tendenzen und Abhängigkeiten wie für das Profil HSA 39/183 im Abschnitt 6.2.2. Aus diesem Grund soll auf eine detaillierte Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden. Im Anhang B.2 sind für alle vier Blechdicken  $t_N$  die errechneten Werte in tabellarischer Form beigefügt.

### 6.2.5 Profil 106/250

Für das Profil UB 85/280 werden im Rahmen der Parameterstudien folgende genauen Profil-  $L_s$  und Querträgerlängen  $L$  untersucht:

Profilstützweite:  $L_{s1} = 2 \text{ m}$

$L_{s2} = 6 \text{ m}$

$L_{s3} = 10 \text{ m}$  entspricht etwa der maximal zulässigen Stützweite  $l_{gr}$  bei  $t_N = 1 \text{ mm}$

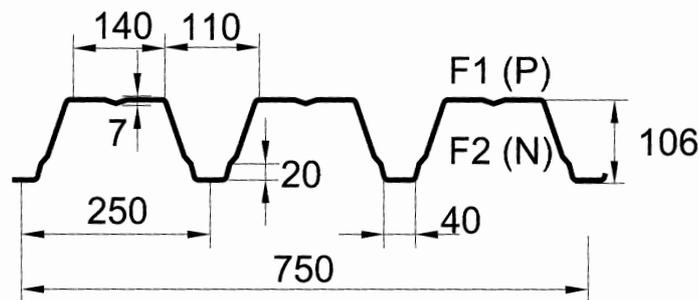
Querträgerlänge:  $L_1 = 5,25 \text{ m}$  entspricht 7 Profiltafeln nebeneinander

$L_2 = 7,50 \text{ m}$  entspricht 10 Profiltafeln nebeneinander

$L_3 = 10,50 \text{ m}$  entspricht 14 Profiltafeln nebeneinander

Die übrigen Parameter  $c_s$ ,  $C_Q$  und  $I_z$  sind Abschnitt 6.2.1 zu entnehmen.

In Bild 6.11 sind die Abmessungen des Profils dargestellt.



**Bild 6.11** Profilabmessungen 106/250, Arcelor [2]

Für die weiteren Betrachtungen werden die Blechdicken  $t_N$  wiederum jeweils extra betrachtet. Damit ergeben sich erneut fünf Einflussparameter ( $L_s$ ,  $L$ ,  $I_z$ ,  $c_s$  und  $C_Q$ ), welche variiert werden müssen. Auch für dieses Profil werden Schubsteifigkeiten  $S$  für  $t_N = 0,75 \text{ mm}$ ,  $t_N = 0,88 \text{ mm}$ ,  $t_N = 1 \text{ mm}$  und  $t_N = 1,25 \text{ mm}$  berechnet.

Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S$  zeigen die gleichen Tendenzen und Abhängigkeiten wie für das Profil HSA 39/183 im Abschnitt 6.2.2. Aus diesem Grund soll auf eine detaillierte Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden. Im Anhang B.5 sind für alle vier Blechdicken  $t_N$  die errechneten Werte in tabellarischer Form beigelegt.

### 6.2.6 Profil 135/310

Für das Profil 135/310 werden im Rahmen der Parameterstudien folgende genauen Profil- $L_s$  und Querträgerlängen  $L$  untersucht:

Profilstützweite:  $L_{s1} = 2 \text{ m}$

$L_{s2} = 6 \text{ m}$

$L_{s3} = 10 \text{ m}$  entspricht etwa der maximal zulässigen Stützweite  $l_{gr}$  bei  $t_N = 0,88 \text{ mm}$

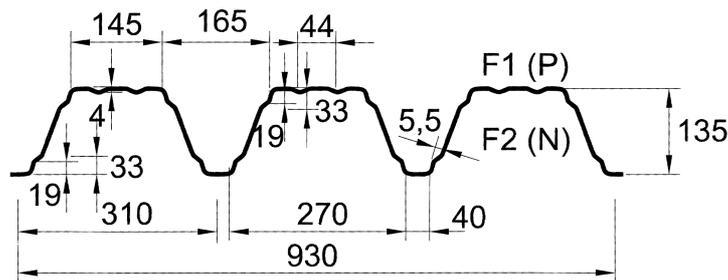
Querträgerlänge:  $L_1 = 4,65 \text{ m}$  entspricht 5 Profiltafeln nebeneinander

$L_2 = 7,44 \text{ m}$  entspricht 8 Profiltafeln nebeneinander

$L_3 = 10,23 \text{ m}$  entspricht 11 Profiltafeln nebeneinander

Die übrigen Parameter  $c_s$ ,  $C_Q$  und  $I_z$  sind Abschnitt 6.2.1 zu entnehmen.

In Bild 6.11 sind die Abmessungen des Profils dargestellt.



**Bild 6.12** Profilabmessungen 135/310, Arcelor [2]

Für die weiteren Betrachtungen werden die Blechdicken  $t_N$  wiederum jeweils extra betrachtet. Damit ergeben sich erneut fünf Einflussparameter ( $L_s$ ,  $L$ ,  $I_z$ ,  $c_s$  und  $C_Q$ ), welche variiert werden müssen. Auch für dieses Profil werden Schubsteifigkeiten  $S$  für  $t_N = 0,75 \text{ mm}$ ,  $t_N = 0,88 \text{ mm}$ ,  $t_N = 1 \text{ mm}$  und  $t_N = 1,25 \text{ mm}$  berechnet.

Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S$  zeigen die gleichen Tendenzen und Abhängigkeiten wie für das Profil HSA 39/183 im Abschnitt 6.2.2. Aus diesem Grund soll auf eine detaillierte Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden. Im Anhang B.6 sind für alle vier Blechdicken  $t_N$  die errechneten Werte in tabellarischer Form beigefügt.

### 6.2.7 Profil 150/280

Für das Profil 150/280 werden im Rahmen der Parameterstudien folgende genauen Profil- $L_s$  und Querträgerlängen  $L$  untersucht:

Profilstützweite:  $L_{s1} = 2 \text{ m}$

$L_{s2} = 6 \text{ m}$

$L_{s3} = 10 \text{ m}$  entspricht etwa der maximal zulässigen Stützweite  $l_{gr}$  bei  $t_N = 0,88 \text{ mm}$

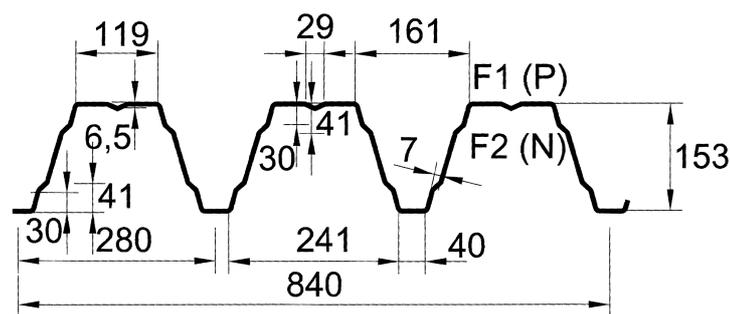
Querträgerlänge:  $L_1 = 5,04 \text{ m}$  entspricht 6 Profiltafeln nebeneinander

$L_2 = 7,56 \text{ m}$  entspricht 9 Profiltafeln nebeneinander

$L_3 = 10,08 \text{ m}$  entspricht 12 Profiltafeln nebeneinander

Die übrigen Parameter  $c_s$ ,  $C_Q$  und  $I_z$  sind Abschnitt 6.2.1 zu entnehmen.

In Bild 6.11 sind die Abmessungen des Profils dargestellt.



**Bild 6.13** Profilabmessungen 150/280, Arcelor [2]

Für die weiteren Betrachtungen werden die Blechdicken  $t_N$  wiederum jeweils extra betrachtet. Damit ergeben sich erneut fünf Einflussparameter ( $L_s$ ,  $L$ ,  $I_z$ ,  $c_s$  und  $C_Q$ ), welche variiert werden müssen. Auch für dieses Profil werden Schubsteifigkeiten  $S$  für  $t_N = 0,75 \text{ mm}$ ,  $t_N = 0,88 \text{ mm}$ ,  $t_N = 1 \text{ mm}$  und  $t_N = 1,25 \text{ mm}$  berechnet.

Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S$  zeigen die gleichen Tendenzen und Abhängigkeiten wie für das Profil HSA 39/183 im Abschnitt 6.2.2. Aus diesem Grund soll auf eine detaillierte Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden. Im Anhang B.7 sind für alle vier Blechdicken  $t_N$  die errechneten Werte in tabellarischer Form beigefügt.

### 6.2.8 Profil EKO 160/250

Für das Profil EKO 160/250 werden im Rahmen der Parameterstudien folgende genauen Profil-  $L_s$  und Querträgerlängen  $L$  untersucht:

Profilstützweite:  $L_{s1} = 2 \text{ m}$

$L_{s2} = 7 \text{ m}$

$L_{s3} = 12 \text{ m}$  entspricht etwa der maximal zulässigen Stützweite  $l_{gr}$  bei  $t_N = 1 \text{ mm}$

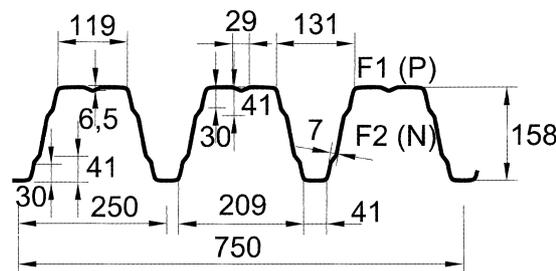
Querträgerlänge:  $L_1 = 5,25 \text{ m}$  entspricht 7 Profiltafeln nebeneinander

$L_2 = 7,5 \text{ m}$  entspricht 10 Profiltafeln nebeneinander

$L_3 = 9,75 \text{ m}$  entspricht 13 Profiltafeln nebeneinander

Die übrigen Parameter  $c_s$ ,  $C_Q$  und  $I_z$  sind Abschnitt 6.2.1 zu entnehmen.

In Bild 6.14 sind die Abmessungen des Profils dargestellt.



**Bild 6.14** Profilabmessungen EKO 160/250, Arcelor [2]

Für die weiteren Betrachtungen werden die Blechdicken  $t_N = 0,75 \text{ mm}$ ,  $t_N = 0,88 \text{ mm}$ ,  $t_N = 1 \text{ mm}$  und  $t_N = 1,25 \text{ mm}$  wiederum jeweils extra betrachtet. Die fünf Einflussparameter ( $L_s$ ,  $L$ ,  $I_z$ ,  $c_s$  und  $C_Q$ ) werden für jede Blechdicke  $t_N$  variiert. Die ermittelten Schubsteifigkeiten  $S$  sind für die drei Blechdicken  $t_N$  im Anhang B.3 in tabellarischer Form enthalten.

Die errechneten Schubsteifigkeiten  $S$  zeigen die gleichen Tendenzen und Abhängigkeiten wie für das Profil HSA 39/183 im Abschnitt 6.2.2. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Darstellung verzichtet.

Die gewonnenen Ergebnisse führen zu dem Schluss, dass die Angabe einer geschlossenen Lösung mit einem praktikablen Aufwand nicht möglich ist und nicht weiter verfolgt wird.

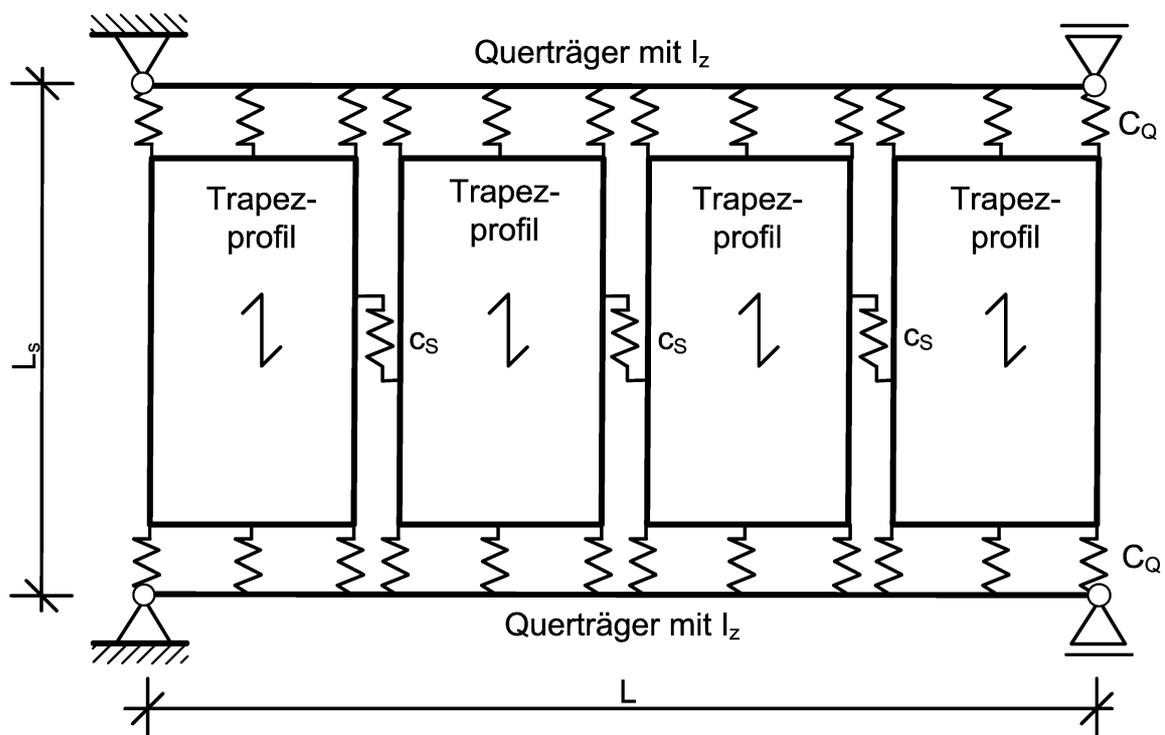
## Kapitel 7

### Mechanisches Modell und vereinfachte Berechnung

#### 7.1 Mechanisches Modell

Die in Kapitel 6 durchgeführten Parameterstudien haben gezeigt, dass eine geschlossene mathematische Lösung für das Gesamtproblem nur schwer zu realisieren ist. Die große Anzahl von fünf unabhängigen Variablen zuzüglich des Profiltyps und der Blechdicke  $t_N$  schließt auch eine grafische Auswertung praktisch aus. Deshalb soll ein vereinfachtes Berechnungsmodell vorgestellt werden, welches anhand der Lösungen des Faltnetzmodells kalibriert wird.

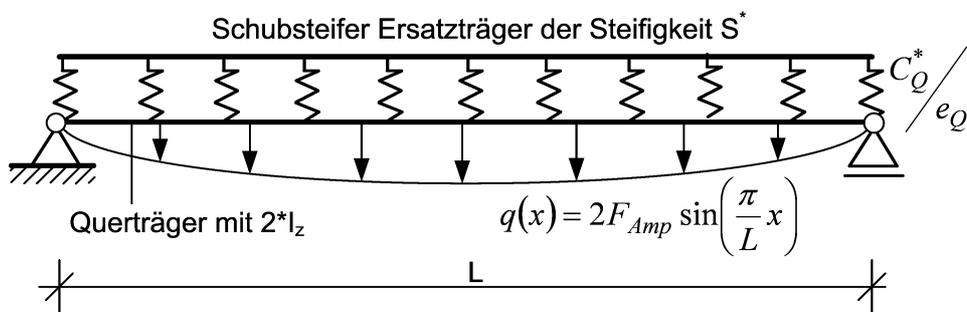
In Bild 7.1 ist ein vereinfachtes mechanisches Modell des Gesamtsystems angegeben. In ihm sind die Trapezprofile, die Verbindungsmittel und die Randträger enthalten. Die Trapezprofiltafeln sind untereinander und mit den Querträgern federelastisch verbunden. Die Längsränder sind nicht befestigt.



**Bild 7.1** Vereinfachtes mechanisches Modell der untersuchten Systeme

Um für das System eine Näherungslösung ermitteln zu können, sollen weitere Vereinfachungen getroffen werden. Die beiden Querträger lassen sich mit ihrer Steifigkeit  $I_z$  zu einem einzigen Träger mit der Biegesteifigkeit  $2 \cdot I_z$  zusammenfassen.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass eine ausreichend große Anzahl von Trapezprofiltafeln mit einer entsprechenden Periodenanzahl verwendet wird. Ist dies der Fall, lassen sich die Profiltafeln, die verwendeten Stoßverbindungsmitel und die im Stoß befindlichen Querrandverbinder näherungsweise zu einem Balken mit einer resultierenden Schubsteifigkeit  $S^*$  zusammenfassen. Da die Querrandverbindungsmitel auch Lasten in Trägerrichtung aufnehmen, ist hierbei auch ein Steifigkeitsanteil, welcher sich aus  $C_Q$  ergibt, zu berücksichtigen. Die sich ergebende Ersatzschubsteifigkeit des Balkens wird mit  $S^*$  bezeichnet. Zusätzlich wird die Federsteifigkeit  $C_Q$  zu  $C_Q^*$  modifiziert, um die Übereinstimmung der Ergebnisse zu verbessern. Mit den zuvor genannten Vereinfachungen ergibt sich das in Bild 7.2 abgebildete statische System.



**Bild 7.2** Vereinfachtes Stabwerk zur Abbildung des Systems

Es gelten die folgenden Bezeichnungen:

- $2 \cdot I_z$       Flächenträgheitsmoment der beiden Querträger
- $S^*$          Schubsteifigkeit eines Ersatzbalkens aus Trapezblech, Stoßverbindern und Querrandverbindern
- $C_Q^*$         modifizierte Federsteifigkeit der Querrandverbindungsmitel [kN/cm]
- $e_Q$          Abstand Querrandverbindungsmitel, entspricht i.d.R. der Periodenlänge [cm]
- $L$            Länge der Querträger
- $F_{Amp}$       Amplitude der anzusetzenden Abtriebslasten pro Querträger

Die Schubsteifigkeit  $S^*$  des Ersatzbalkens setzt sich aus den Anteilen der Federsteifigkeiten der Trapezprofile, der Verbindungsmittel im Blechstoß und der Verbindungsmittel am Querrand nach Gleichung (7.1) zusammen.

$$S^* = LC_{ges} \quad (7.1)$$

mit

L Länge der Querträger

$C_{ges}$  Resultierende Federsteifigkeit der drei Teilfedersteifigkeiten [kN/cm] mit

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_{Trapez}} + \frac{1}{C_{Sto\beta}} + \frac{1}{C_{Quer}} \quad (7.2)$$

$C_{Trapez}$  Federsteifigkeit der Trapezprofile [kN/cm] mit

$$C_{Trapez} = \frac{S_{S4s}}{L} \quad (7.3)$$

$S_{S4s}$  Schubsteifigkeit eines starr gelagerten Schubfeldes mit einer ausreichenden Anzahl von Profilperioden unter Schubbelastung und Berücksichtigung von 50mm Profilüberstand [kN]

$C_{Sto\beta}$  Federsteifigkeit der Verbindungsmittel in den Profilstößen [kN/cm] mit

$$C_{Sto\beta} = \frac{c_S L_s + 2C_Q^*}{n_T - 1} \quad (7.4)$$

$c_S$  Steifigkeit der Profilstoßverbinder in [kN/cm<sup>2</sup>]

$L_s$  Stützweite der Trapezprofile [cm]

$C_Q^*$  modifizierte Steifigkeit der Verbindungsmittel am Querrand [kN/cm], gemäß Gleichung (7.6)

$n_T$  Anzahl der nebeneinanderliegenden Trapezprofiltafeln

$C_{Quer}$  Resultierende Federsteifigkeit der Verbindungsmittel am Querrand nach *Baehre* [3] [kN/cm] (basiert auf dem Verfahren von *Bryan/Davies* und entspricht Gleichung (2.22) im Abschnitt 2.4.4) mit

$$C_{Quer} = \frac{L_s^2}{2L(e_Q/C_Q^*)} \quad (7.5)$$

Die Steifigkeit der Querrandverbindungsmittel wird mit einer quadratischen Gleichung modifiziert:

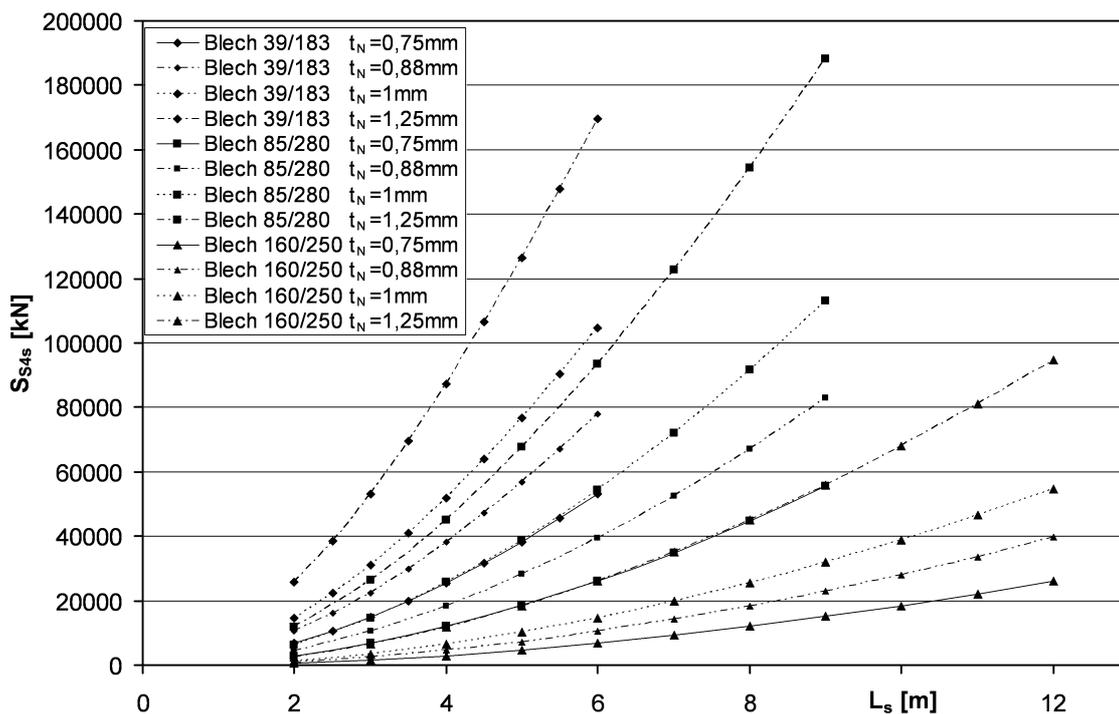
$$C_Q^* = (mC_Q + n)C_Q \quad (7.6)$$

**Tabelle 7.1** Koeffizienten m und n zur Modifizierung der Querrandverbindungsmittel

Trapezprofiltyp	Blechdicke $t_N$ [mm]	Koeffizienten	
		$C_Q^* = (mC_Q + n)C_Q$	
		m [cm/kN]	n [-]
35/207	0,75	-0,0052	1,08
	0,88	-0,0044	1,07
	1,00	-0,0042	1,09
	1,25	-0,0042	1,15
HSA 39/183	0,75	-0,0045	1,05
	0,88	-0,0043	1,07
	1,00	-0,0045	1,10
	1,25	-0,0040	1,12
UB 85/280	0,75	-0,0050	1,24
	0,88	-0,0049	1,27
	1,00	-0,0048	1,27
	1,25	-0,0045	1,30
106/250	0,75	-0,0049	1,19
	0,88	-0,0052	1,22
	1,00	-0,0053	1,25
	1,25	-0,0048	1,27
135/310	0,75	-0,0055	1,20
	0,88	-0,0052	1,37
	1,00	-0,0052	1,40
	1,25	-0,0052	1,43
150/280	0,75	-0,0055	1,36
	0,88	-0,0053	1,35
	1,00	-0,0051	1,37
	1,25	-0,0049	1,39
EKO 160/250	0,75	-0,0055	1,07
	0,88	-0,0054	1,26
	1,00	-0,0054	1,30
	1,25	-0,0048	1,32

Die Koeffizienten  $m$  und  $n$  der quadratischen Gleichung sind für jedes Trapezprofil und jede Blechdicke  $t_N$  gesondert zu bestimmen. Über die beiden Koeffizienten wird die Lösung des vereinfachten Balkensystems an die Lösung des Falzwerkmodells angepasst. Für die untersuchten Profile mit den vier Blechdicken sind die Koeffizienten in Tabelle 7.1 angegeben.

Neben den Koeffizienten  $m$  und  $n$  für die Anpassung der Querrandverbindungsmittelsteifigkeit  $C_Q$  ist für die Berechnung der Ersatzsteifigkeiten  $S_{Stab}$  noch die Angabe der Schubsteifigkeiten  $S_{S4s}$  der Trapezprofile erforderlich. Dazu werden für die sieben Profile und die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  Berechnungen mit verschiedenen Profillängen  $L_s$  durchgeführt. Es werden jeweils 20 Profilperioden verwendet. An den Querrändern sind Profilüberstände von 50mm vorhanden und die Verbindungsmittel sind starr gesetzt. Für drei der insgesamt sieben berechneten Profiltypen sind die errechneten Werte  $S_{S4s}$  beispielhaft in Bild 7.3 über die Profillänge  $L_s$  aufgetragen.



**Bild 7.3** Schubsteifigkeiten  $S_{S4s}$  von drei Profiltypen zur Berechnung der Ersatzsteifigkeit  $S_{Stab}$

In dem Diagramm in Bild 7.3 ist gut zu erkennen, dass die Verläufe näherungsweise quadratischen Parabeln folgen. Um eine Berechnung der Steifigkeit zu ermöglichen, werden die Graphen durch quadratischen Gleichungen der Form  $S_{S4s}(L_s) = aL_s^2 + bL_s + c$  approximiert. Die Koeffizienten für die Approximation der verschiedenen Kurven sind in

Tabelle 7.2 angegeben. Es ist zu beachten, dass die Profillänge  $L_s$  für die Approximation in m einzusetzen ist.

**Tabelle 7.2** Koeffizienten für die Approximation der Steifigkeiten  $S_{S4s}$  der drei Profile mit  $L_s$  [m]

Blechtyp	Blehdicke $t_N$ [mm]	Koeffizienten für Approximation		
		$S_{S4s}(L_s) = aL_s^2 + bL_s + c$		
		a [kN/m <sup>2</sup> ]	b [kN/m]	c [kN]
35/207	0,75	1681	7062	-7298
	0,88	2072	12136	-12203
	1	2344	18153	-17802
	1,25	2599	34161	-31751
HSA 39/183	0,75	1137	2541	-2880
	0,88	1548	4587	-5032
	1	1917	7301	-7857
	1,25	2562	15674	-16313
UB 85/280	0,75	578	1233	-2069
	0,88	825	2204	-3450
	1	1074	3497	-5232
	1,25	1611	7692	-10805
106/250	0,75	232	329	-803
	0,88	342	588	-1273
	1	464	911	-1823
	1,25	768	1982	-3531
135/310	0,75	214	276	-816
	0,88	314	527	-1341
	1	426	840	-1947
	1,25	710	1819	-3665
150/280	0,75	219	296	-759
	0,88	323	553	-1253
	1	437	886	-1850
	1,25	723	1971	-3645
EKO 160/250	0,75	166	253	-681
	0,88	245	456	-1098
	1	332	726	-1616
	1,25	548	1630	-3247

Die Lösung des Balkenmodells der elastisch gekoppelten Träger lässt sich mit den genannten Werten leicht mit einem Stabwerksprogramm ermitteln. Eine geschlossene Lösung ist allerdings auch für dieses System nicht möglich.

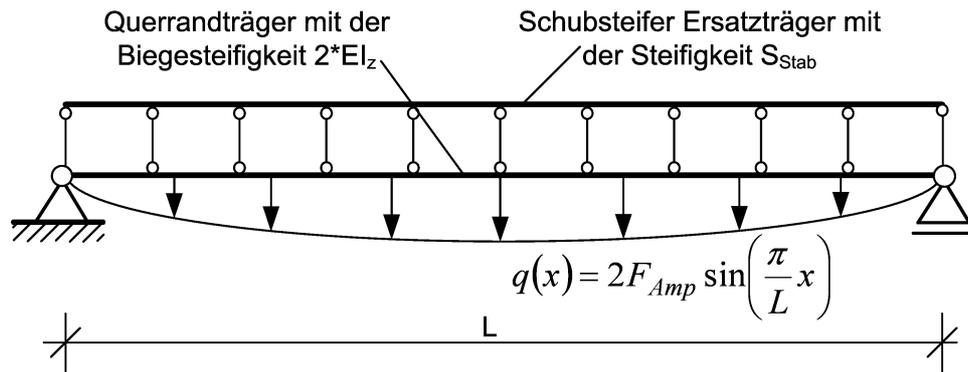


Bild 7.4 Statisches Ersatzsystem

Um auf das klassische System zweier starr gekoppelter Balken zurückzuschließen, siehe Bild 7.4, kann man über die Verschiebung in Querträgermitte  $u(L/2)$  auf die Steifigkeit  $S_{Stab}$  des schubsteifen Ersatzträgers zurückrechnen. Dies lässt sich am leichtesten über Gleichung (6.1) bewerkstelligen, welche nachfolgend noch einmal genannt werden soll.

$$S_{Stab} = 2 \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left( \frac{F_{Amp}}{u\left(\frac{L}{2}\right)} - EI_z \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \right)$$

Über die am elastisch gekoppelten System errechnete Kraftverteilung in der Bettung ist gleichzeitig die Bemessung der verwendeten Verbindungsmittel möglich. Die aufgebrachten Abtriebskräfte können entsprechend verteilt werden.

## 7.2 Bestätigung des vereinfachten Balkenmodells

In diesem Abschnitt wird das vorgestellte vereinfachte Berechnungsverfahren anhand der in Kapitel 6 durchgeführten Parameterrechnungen überprüft. Dazu werden die Ergebnisse aus den Berechnungen am Faltnetz als Referenzlösung betrachtet. Es wird verglichen, ob die vereinfachte Balkenlösung gleiche Werte für die Ersatzschubsteifigkeit liefert.

Die Berechnung der Balkenlösung erfolgt mit dem Programmsystem *Ansys* [1]. Die elastische Kopplung der beiden Träger, siehe Bild 7.2, wird mit Hilfe von Dehnstäben realisiert. Um eine möglichst gleichmäßige Bettung zu simulieren, werden die beiden Balken für alle Querträgerlängen  $L$  in 20 Teilstäbe zerlegt und jeweils an den Knoten gekoppelt. Die beiden Randkopplungen werden nur mit der halben Dehnsteifigkeit angesetzt, um die verringerte Einflussbreite der Bettung für diese beiden Elemente zu berücksichtigen.

Die untersuchten Trapezprofiltypen werden nacheinander betrachtet. Als erstes wird das Profil HSA 39/183 untersucht. In den nachfolgenden Diagrammen sind für jede der vier Blechdicken  $t_N$  die errechneten Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$  dargestellt. Ergibt sich mit dem vereinfachten Stabwerksmodell eine geringere Schubsteifigkeit  $S_{Stab}$  als mit dem Faltwerksmodell  $S_{E2n}$ , ist der Verhältniswert größer als 1,0. In diesem Fall liegt man mit dem vereinfachten Stabwerksmodell gegenüber den Faltwerksberechnungen auf der sicheren Seite. Nach Möglichkeit sollte jeder Verhältniswert  $\geq 1,0$  sein.

Zu jeder untersuchten Blechdicke  $t_N$  sind in den einzelnen Abbildungen Bild 7.5 bis Bild 7.8 sechs Diagramme dargestellt. In jedem der Diagramme sind die Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  aller  $3^5 = 243$  durchgeführten Parameterrechnungen pro Blechdicke  $t_N$  über jeweils einen der betrachteten fünf Parameter aufgetragen, wobei jede einzelne Parameterkombination durch einen Punkt dargestellt wird. Zusätzlich sind im sechsten Diagramm noch die Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  über das Seitenverhältnis  $\alpha = L_s/L$  dargestellt.

Die einzelnen Blechdicken  $t_N$  sind wie folgt den drei Abbildungen zugeordnet: Bild 7.5 zu  $t_N = 0,75$  mm, Bild 7.6 zu  $t_N = 0,88$  mm, Bild 7.7 zu  $t_N = 1$  mm und Bild 7.8 zu  $t_N = 1,25$  mm. Die mit dem vereinfachten Stabwerksmodell berechneten Schubsteifigkeiten zu jeder Parameterkombination sind auch im Anhang B.1 zusammen mit den in Kapitel 6 beschriebenen Berechnungen am Faltwerk in tabellarischer Form enthalten.

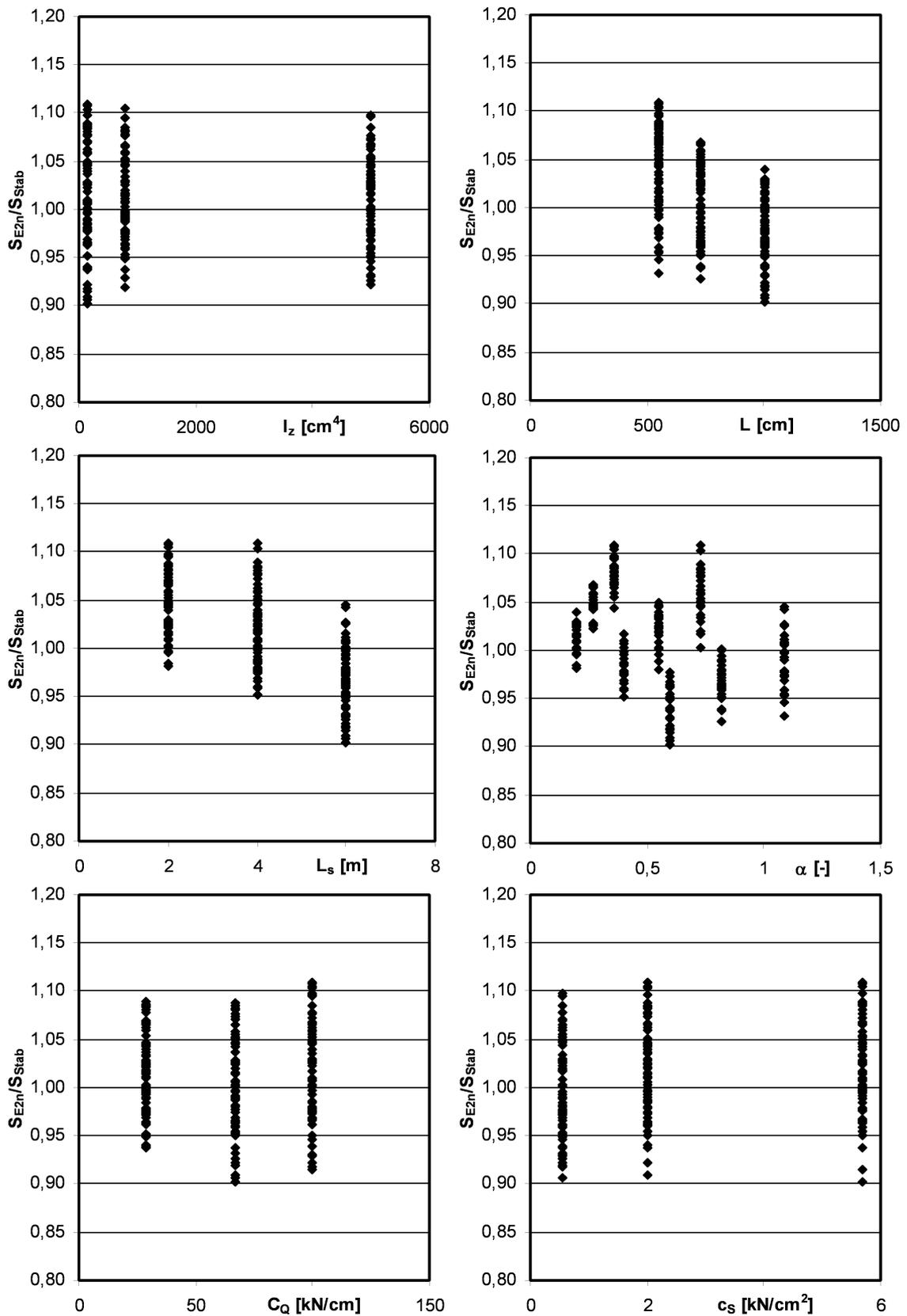


Bild 7.5  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=0,75$ mm

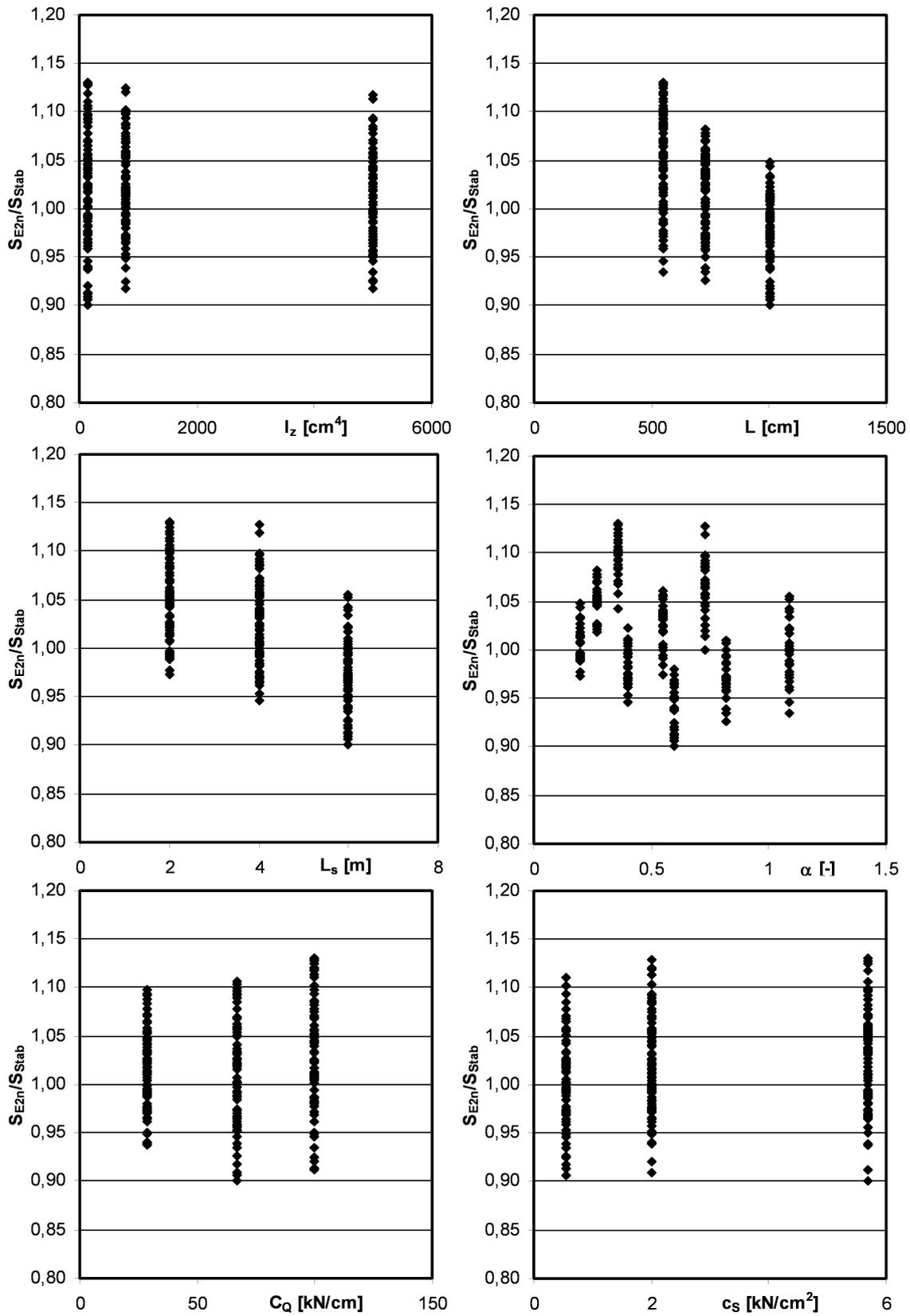


Bild 7.6  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=0,88\text{mm}$

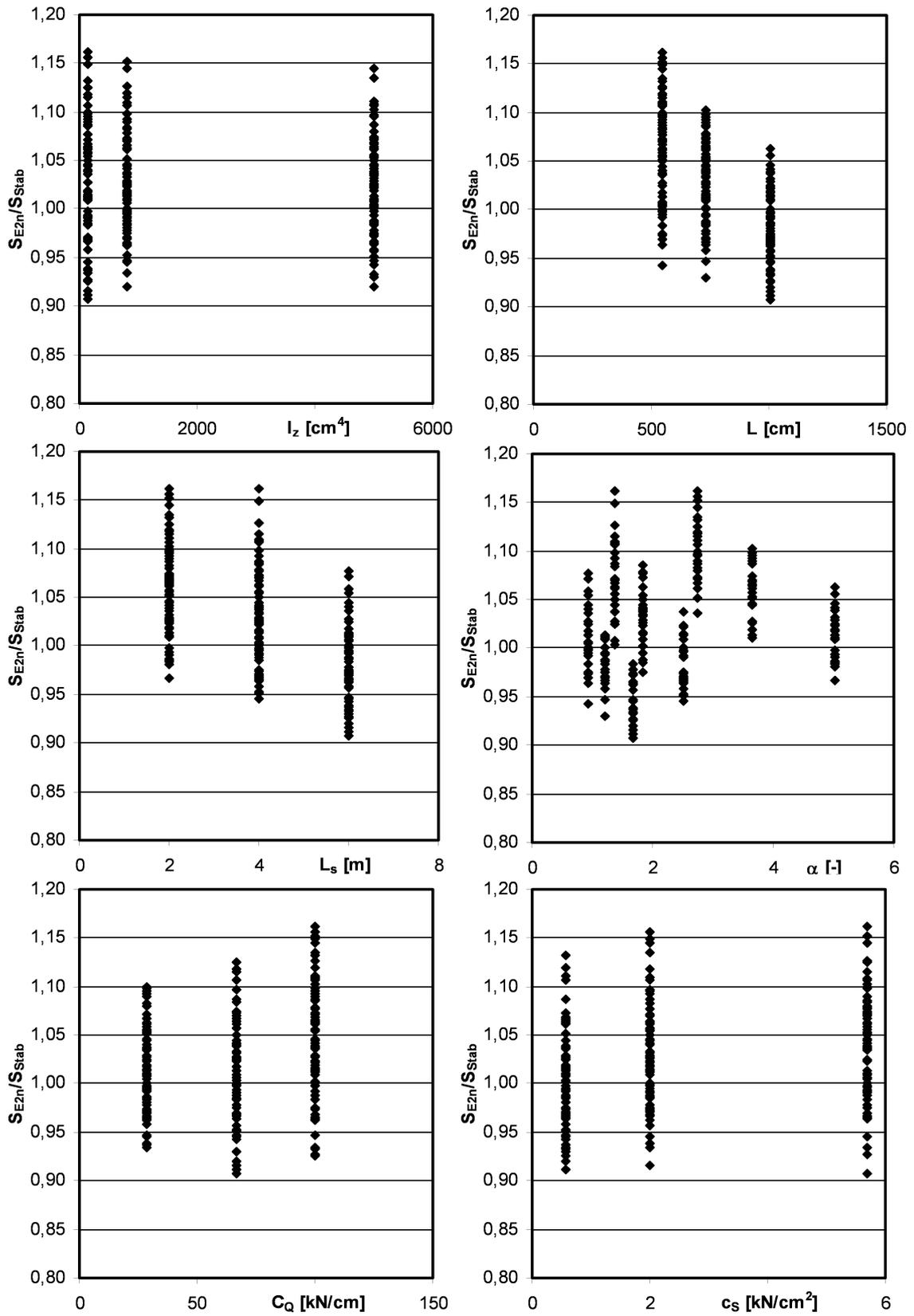


Bild 7.7  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=1\text{mm}$

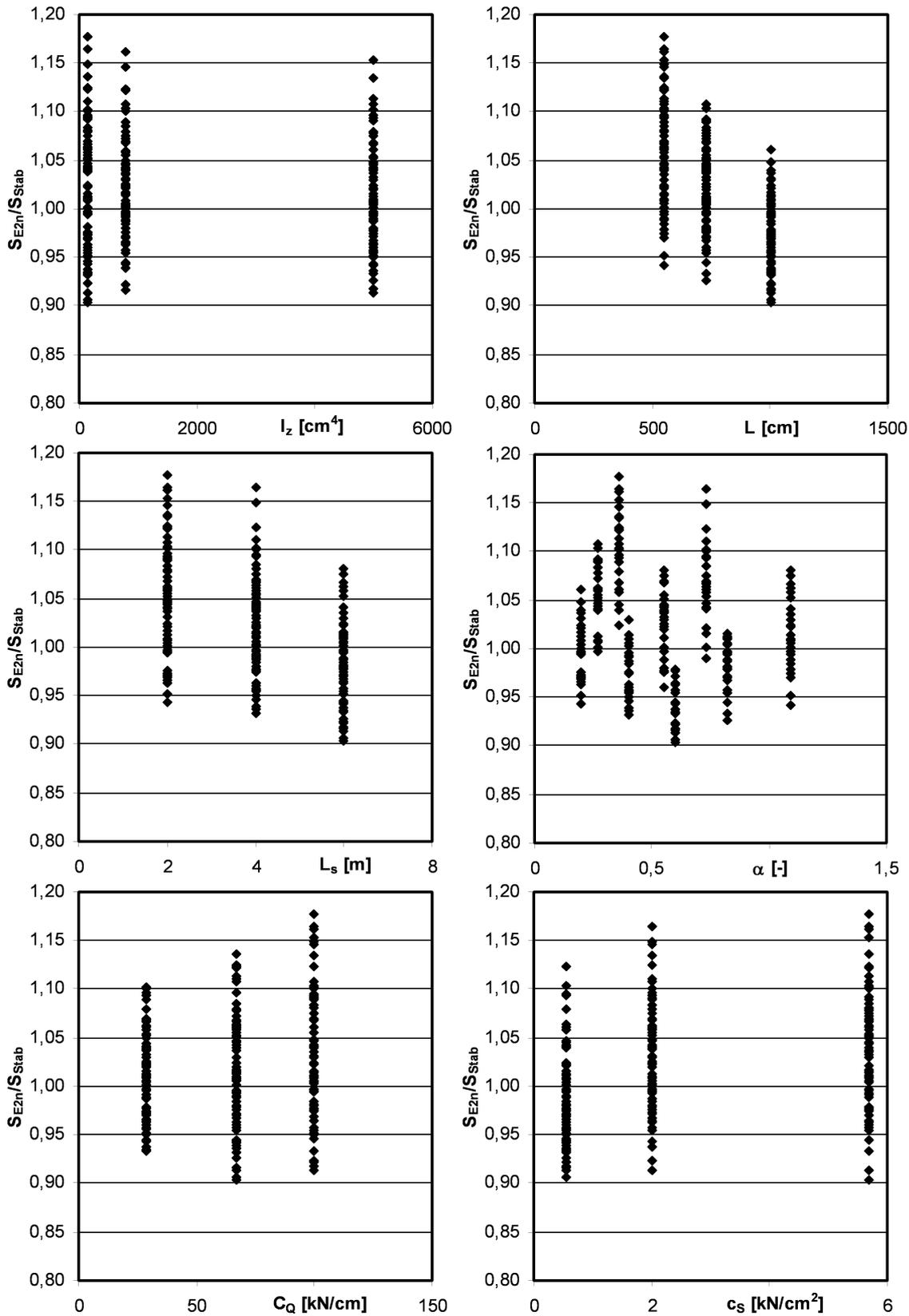


Bild 7.8  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=1,25$ mm

Wie die Diagramme in Bild 7.5 bis Bild 7.8 zeigen, liefert das vereinfachte Stabwerksmodell Schubsteifigkeiten, welche sehr gut mit den genauen Berechnungen am Faltwerk übereinstimmen. Im Mittel ergeben sich Abweichungen von etwa  $\pm 10\%$  um den idealen Verhältniswert  $S_{E2n}/S_{Stab}$  von 1,0.

Die besten Übereinstimmungen werden für eine Blechdicke  $t_N = 0,75$  mm (siehe Bild 7.5) erreicht. Es liegen praktisch alle Verhältnisse zwischen 0,9 und 1,1. Zusätzlich lassen sich über eine Analyse der einzelnen Diagramme Rückschlüsse auf den Einfluss einzelner Parameter ziehen. So ist festzustellen, dass die größte Streuung der Ergebnisse bei einer Querträgerlänge von  $L = 5$  m entsteht. Des Weiteren fallen die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$  mit zunehmender Profillänge  $L_s$  ab. Dies bedeutet, dass in diesen Fällen die Steifigkeiten des Stabwerkmodells gegenüber denen des Faltwerkmodells zunehmen.

Bei den übrigen Blechdicken  $t_N = 0,88$  mm in Bild 7.6,  $t_N = 1$  mm in Bild 7.7 und  $t_N = 1,25$  mm in Bild 7.8 streuen die Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  etwas stärker. Wobei insgesamt zu erkennen ist, dass die Streuung mit zunehmender Blechdicke  $t_N$  zunimmt. Der Einfluss der Parameter  $L$  und  $L_s$  ist vergleichbar mit dem bei  $t_N = 0,75$  mm. Die stärkere Streuung der Verhältniswerte gegenüber  $t_N = 0,75$  mm zeugt von größeren Abweichungen gegenüber der Stabwerksrechnung.

Bei allen Blechdicken  $t_N$  liegen die Werte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  bei  $\geq 0,9$ . Der obere Grenzwert nimmt mit zunehmender Blechdicke  $t_N$  zu. Bei  $t_N = 1,25$  mm liegt der größte Wert bei 1,18. Dies bedeutet, dass man bei dieser Parameterkombination mit dem Stabwerksmodell 18% Steifigkeit gegenüber dem Faltwerk „verschenken“ würde. Betrachtet man aber die Anzahl der Kombinationen, bei welchen Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab} > 1,1$  entstehen, zeigt sich, dass dies nur bei sehr wenigen der Fall ist. Bei der Blechdicke  $t_N = 1,25$  mm geschieht dies lediglich in 8% der Fälle und auch nur bei Trägerlängen von  $L = 5$  m.

Die Übereinstimmungen werden mit Hinsicht auf die starken Vereinfachungen am Balkenmodell insgesamt als sehr gut bewertet.

In den nächsten Abbildungen in Bild 7.9 bis Bild 7.12 sind äquivalente Betrachtungen für das Trapezprofil UB 85/280 und in Bild 7.13 bis Bild 7.16 für das Profil EKO 160/250 mit den vier untersuchten Blechdicken  $t_N$  dargestellt. Die genauen Ergebnisse für die einzelnen Parameterkombinationen können den Tabellen in den Abschnitten B.2 und B.3 im Anhang entnommen werden.

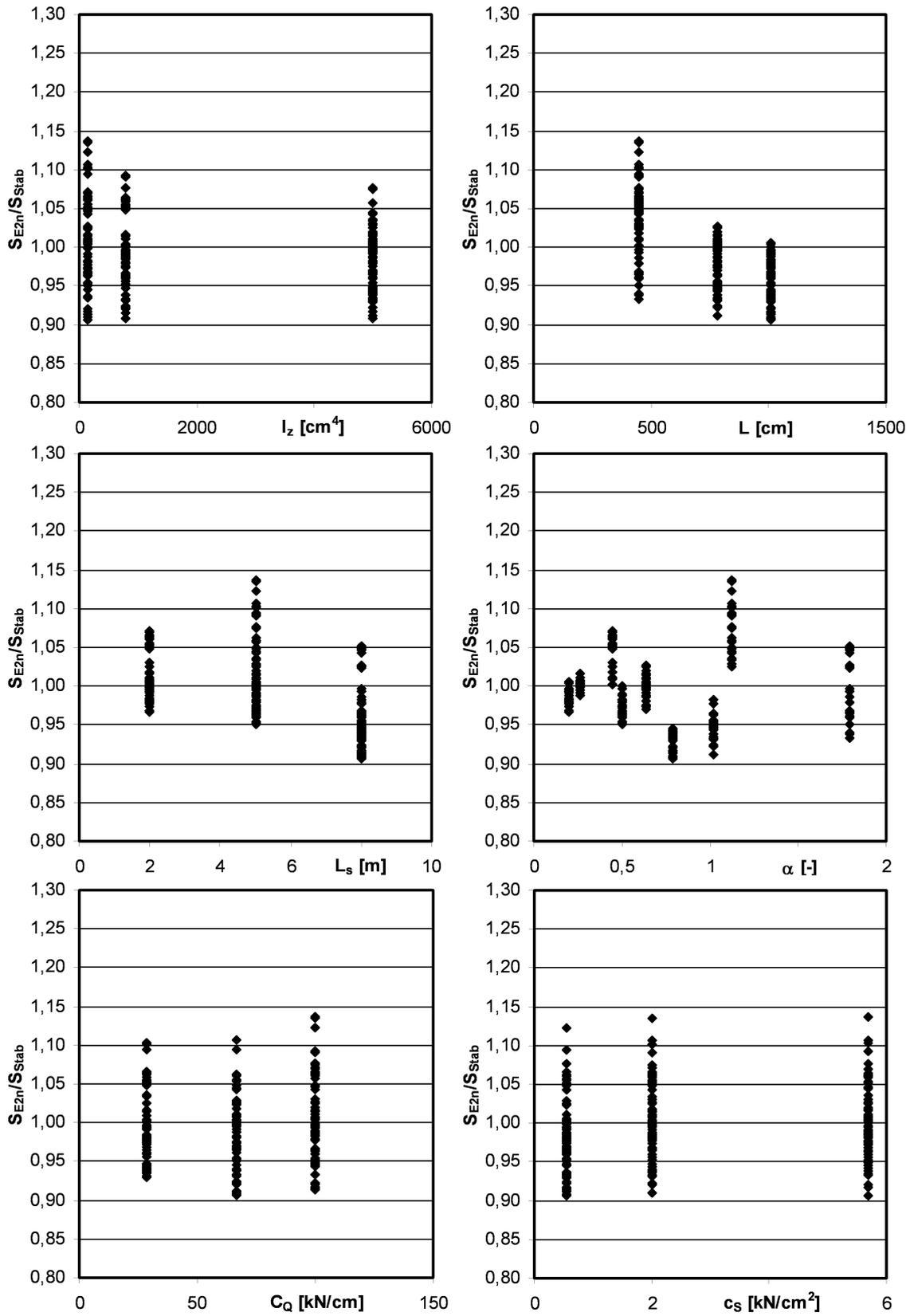


Bild 7.9  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 85/280  $t_N=0,75$  mm

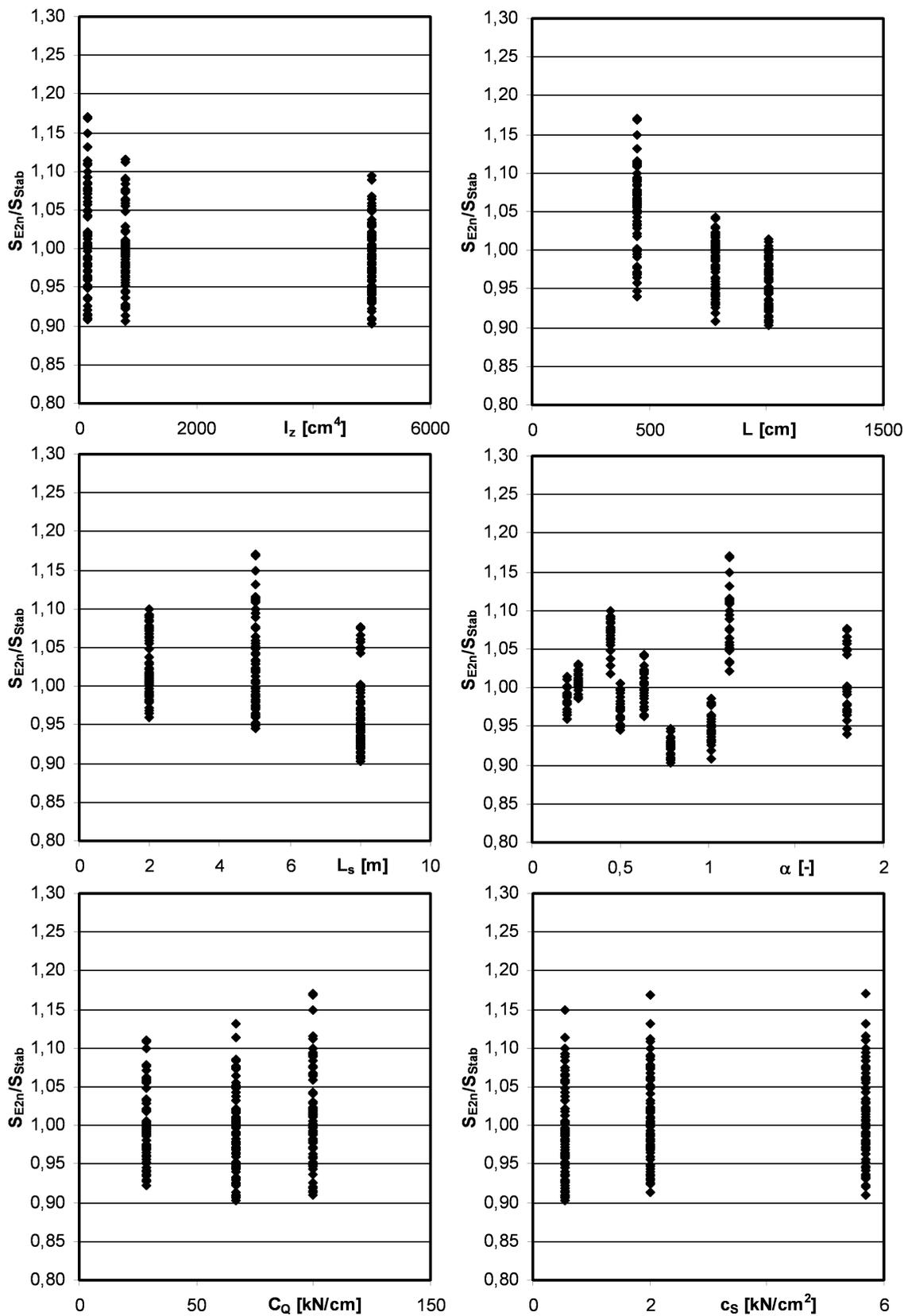


Bild 7.10  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 85/280  $t_N=0,88$  mm

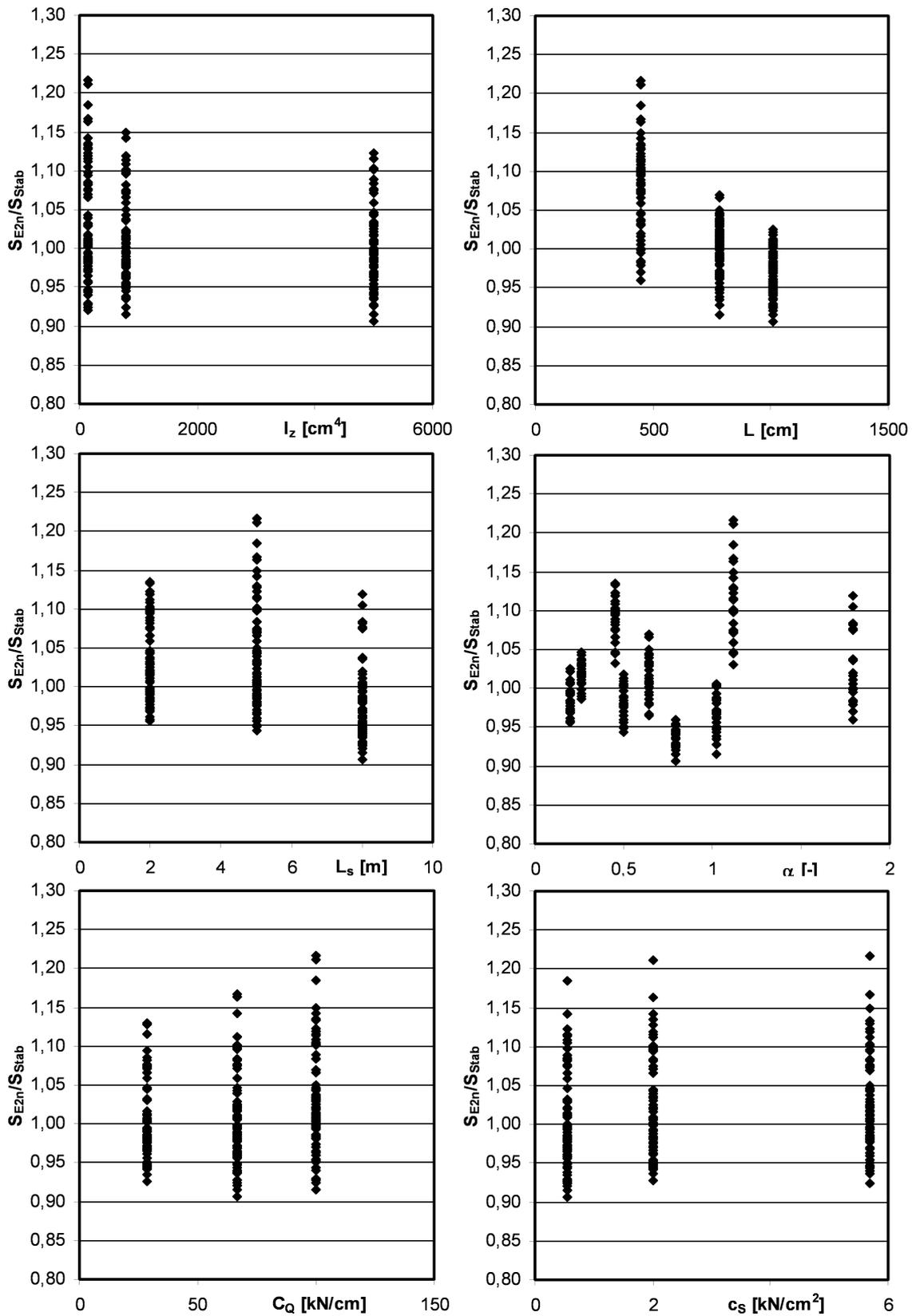


Bild 7.11  $S_{EZn}/S_{Stab}$  Profil 85/280  $t_N=1$  mm

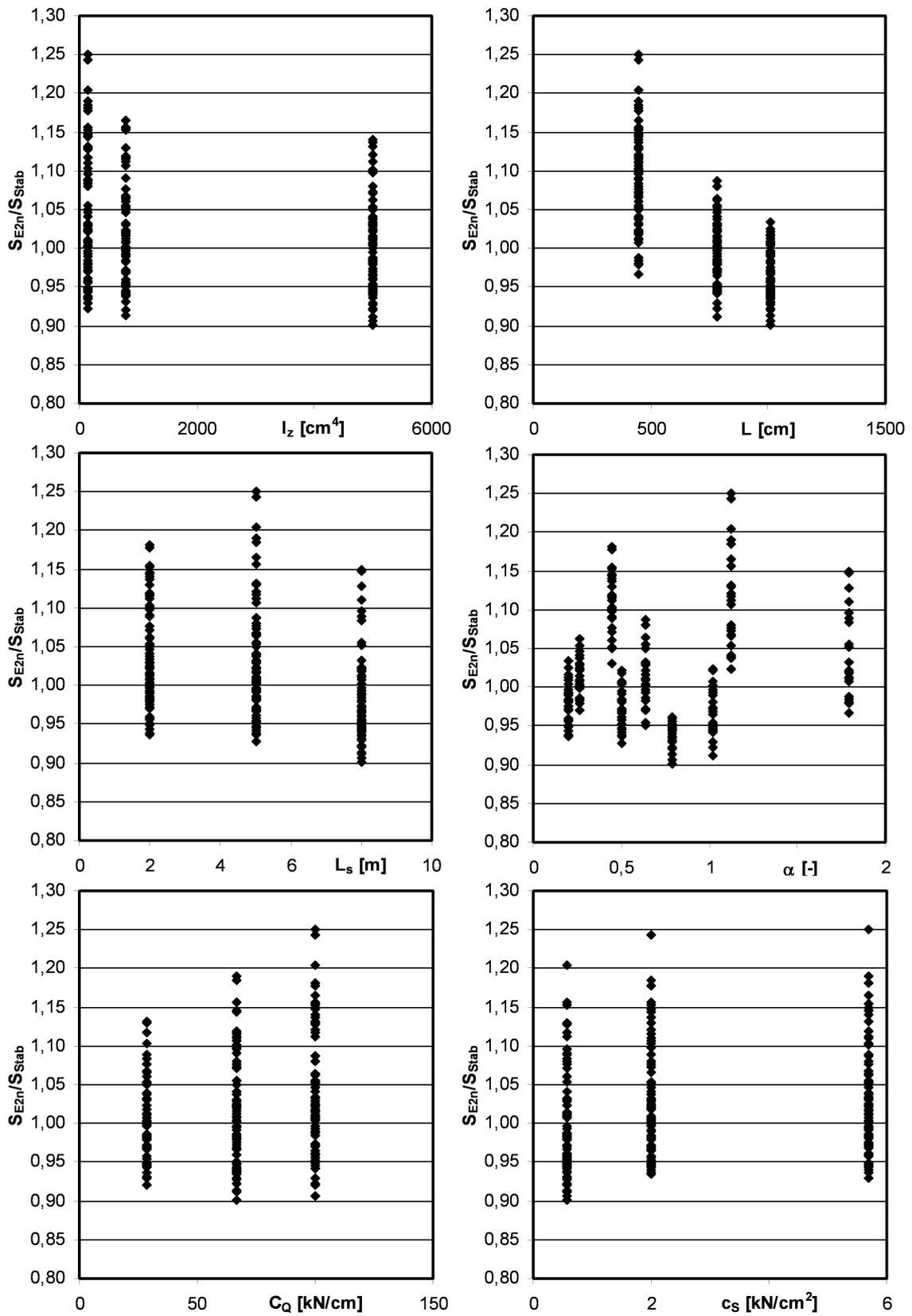


Bild 7.12  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 85/280  $t_N=1,25$  mm

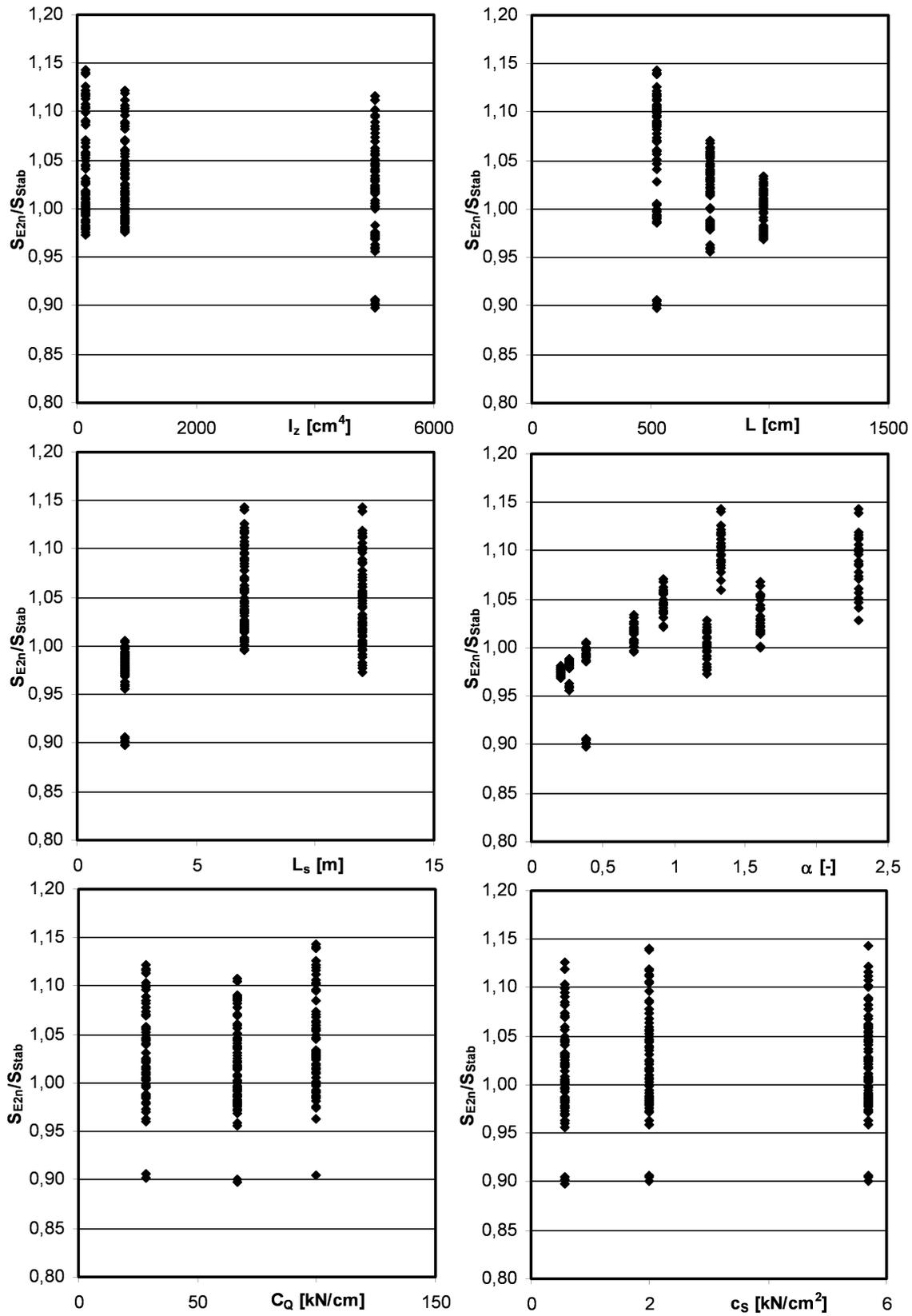


Bild 7.13  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 160/250  $t_N=0,75$  mm

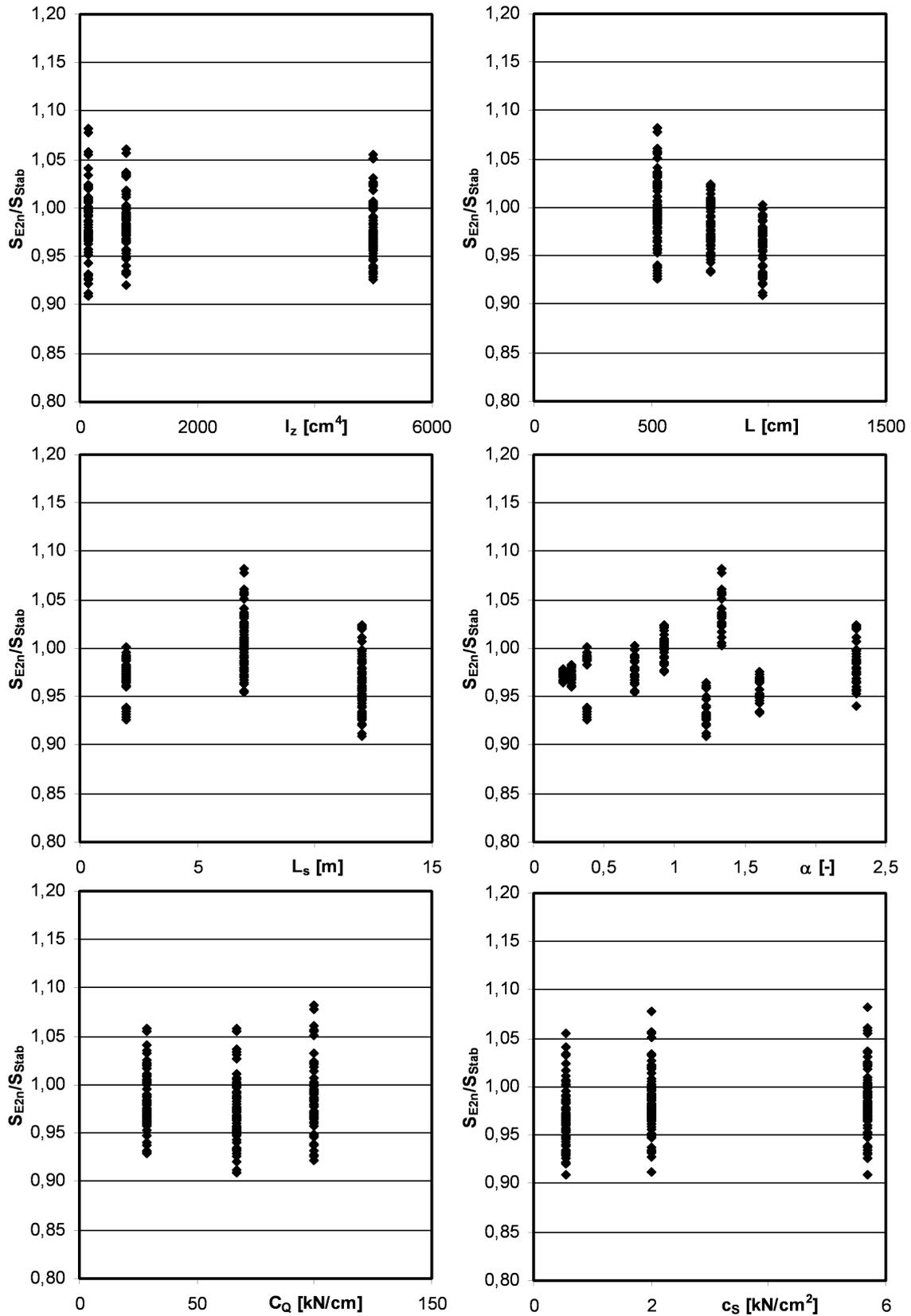


Bild 7.14  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 160/250  $t_N=0,88$  mm

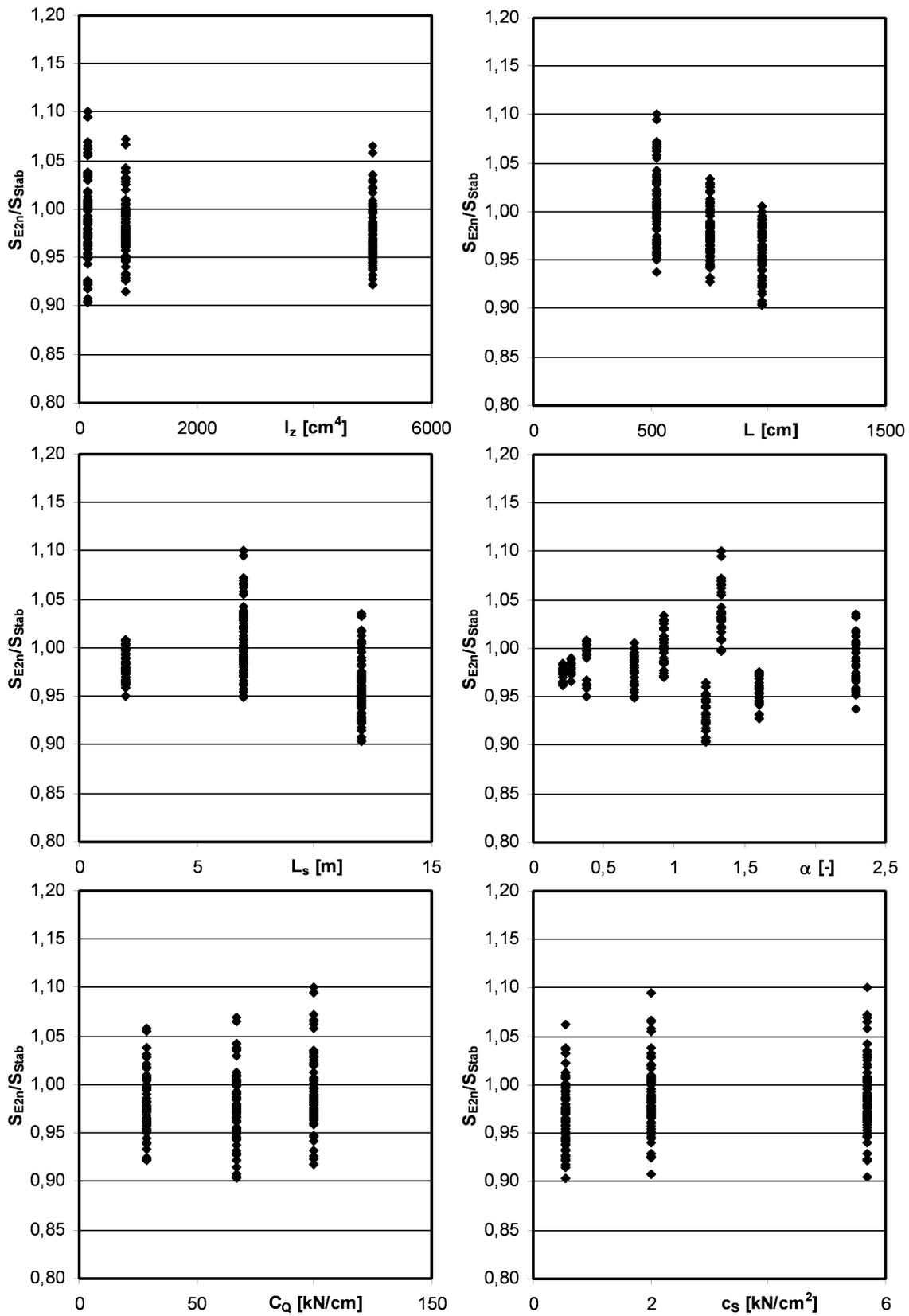
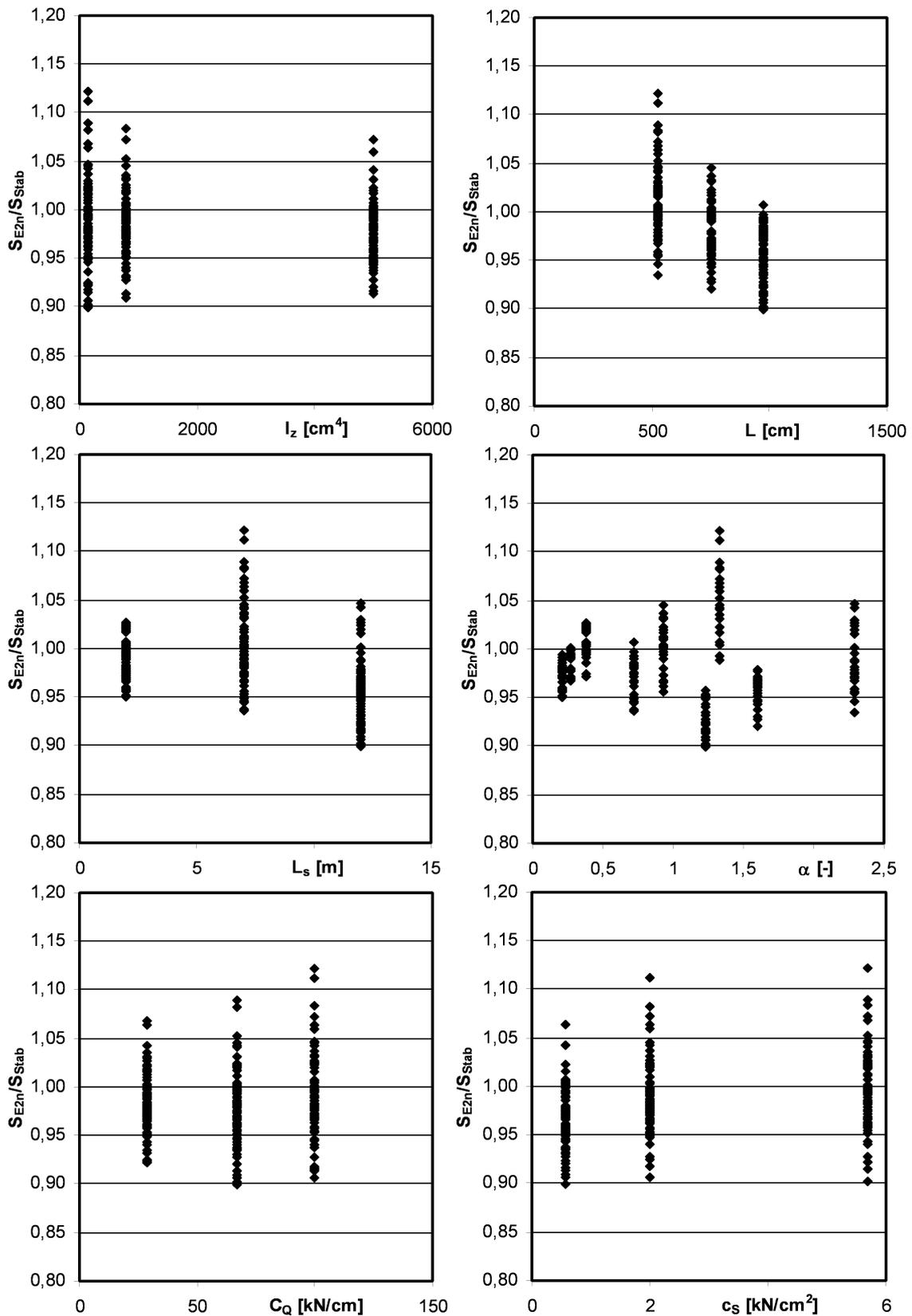


Bild 7.15  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 160/250  $t_N=1$  mm



**Bild 7.16**  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 160/250  $t_N=1,25$  mm

Die Verteilung der Schubsteifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$  ist bei den beiden Profiltypen in etwa die gleiche wie bei dem Profil HSA 39/183. Die Querträgerlänge  $L = 5$  m liefert bei beiden Profilen und allen Blechdicken  $t_N$  die größte Streubreite der Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$ . Mit zunehmender Länge  $L$  nimmt die Streubreite stark ab. Dies ist auf den großen Einfluss der Randstörungen bei einer nur geringen Profilperiodenanzahl zurückzuführen. Auch liefern nur bei der Trägerlänge  $L = 5$  m die Berechnungen Verhältniswerte über 1,1. Bei den anderen beiden Längen  $L = 7,5$  m und  $L = 10$  m liegen die Verhältnisse unterhalb dieses Wertes. Für alle Profile und Blechdicken  $t_N$  ergeben sich aber Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  oberhalb von 0,9. Der Wert kann damit als untere Grenze bezeichnet werden.

Alle Berechnungen zeigen auch für das Balkenmodell den nicht zu vernachlässigenden Einfluss aller Parameter. Eine allgemeine vereinfachte Auswertung ist auf diesem Wege nicht möglich.

Die übrigen hier nicht detailliert dargestellten Trapezprofiltypen 35/207, 106/250, 135/310 und 150/280 zeigen die gleichen Tendenzen. Die genauen Berechnungsergebnisse dieser 4 Profile können den Abschnitten B.4 bis B.7 im Anhang entnommen werden.

In Anbetracht dessen, welche starken Vereinfachungen am Balkenmodell getroffen wurden, ist aber festzustellen, dass die vereinfachte Berechnungsmethode für alle drei Profiltypen hervorragende Übereinstimmungen mit den Parameterrechnungen am Falzwerk zeigt. Es ist damit sehr gut geeignet, um schnell eine einfache Abschätzung der ansetzbaren Schubsteifigkeit am Einfeldträger vorzunehmen. Durch das breite Spektrum bei der Variation der einzelnen Parameter ist der größte Teil der im Regelfall auftretenden Kombinationen bei der Überprüfung des Verfahrens erfasst worden. Um eine sichere Abschätzung für alle möglichen Parameterkombinationen gegenüber den Berechnungen am Falzwerk zu schaffen, wird die Einführung eines Beiwertes

$$\beta = 0,9$$

vorgeschlagen. Die Schubsteifigkeit des Ersatzträgers gemäß Bild 7.4 ergibt sich dann zu

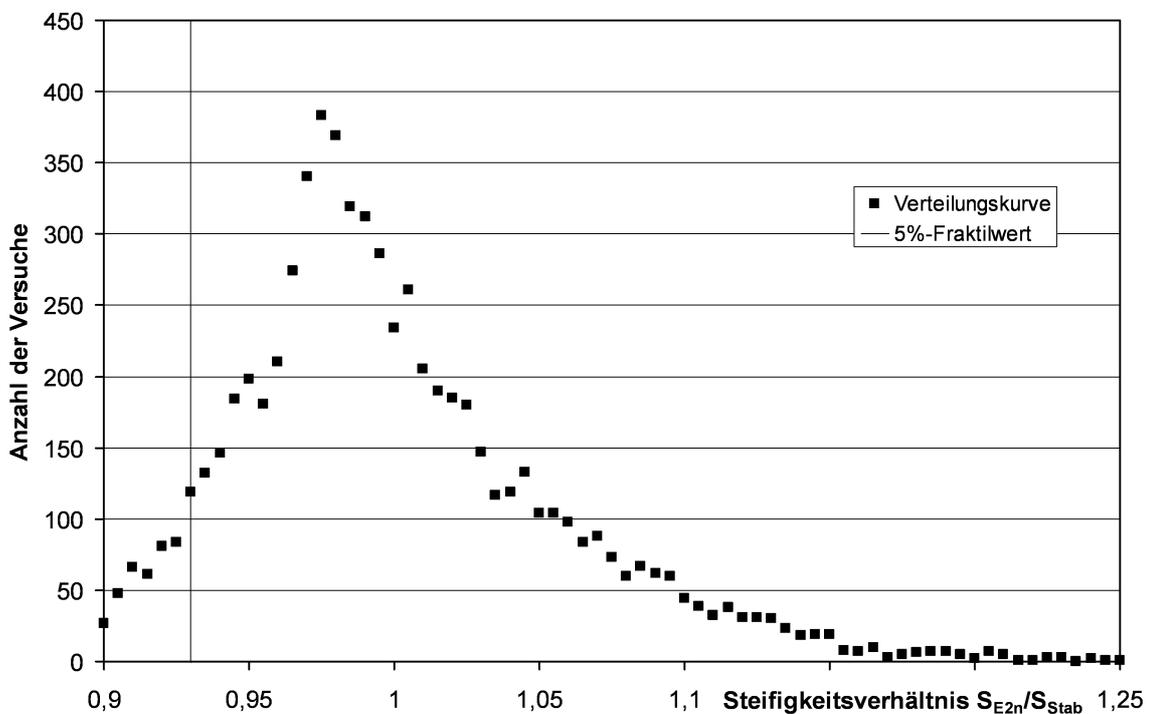
$$S = \beta * S_{Stab}.$$

Die errechneten Steifigkeiten für den Ersatzbalken liegen so stets bei einem Steifigkeitsverhältnis  $S_{E2n}/S \geq 1,0$ .

### 7.3 Statistische Betrachtung

Um den im vorangegangenen Abschnitt 7.2 vorgeschlagenen Abminderungsbeiwert für die errechnete Schubsteifigkeit  $S_{Stab}$  von  $\beta = 0,9$  besser bewerten und statistisch belegen zu können, soll in diesem Abschnitt eine einfache statistische Betrachtung zu den durchgeführten Berechnungen vorgenommen werden.

Hierzu soll der untere statistische Grenzwert aus der 5%-Fraktile bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75% ermittelt werden. Es werden dafür die Berechnungsergebnisse aller sieben Trapezprofiltypen gemeinsam berücksichtigt, um eine möglichst breite Datenbasis zu erfassen. Eingangswerte sind die Verhältniswerte der Schubsteifigkeiten  $S_{E2n}/S_{Stab}$ .



**Bild 7.17** Statistische Verteilung der Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$

Dies führt zu folgender Berechnung für den statistischen Grenzwert von  $\beta_S$ :

$$\beta_S = m - 1,645 * s$$

mit

m Mittelwert aller Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$

s Standardabweichung aller Berechnungsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Berechnungsergebnisse aller drei Trapezprofiltypen ergibt sich für den Mittelwert  $m$  ein Wert von  $m = 1,001$  und für die Standardabweichung  $s = 0,055$ .

Mit diesen beiden Werten läßt sich für den 5%-Fraktilwert ein Abminderungsfaktor von  $\beta_S = 0,91$  ermitteln. Im Bild 7.17 ist die statistische Verteilung aller 6804 berücksichtigten Versuchskonfigurationen dargestellt. Es ist deutlich die Normalverteilung der Auftrenshäufigkeit über das Steifigkeitsverhältnis  $S_{E2n}/S_{Stab}$  zu erkennen. Zur besseren Übersicht ist weiterhin der berechnete 5%-Fraktilwert  $\beta_S = 0,91$  der Verteilungsfunktion eingetragen. Aus dem Diagramm lässt sich ebenfalls gut erkennen, dass nur relativ wenige Steifigkeitsverhältnisse oberhalb des Wertes von 1,1 liegen.

Der im vorigen Abschnitt 7.2 vorgeschlagene Beiwert von  $\beta = 0,9$  wird durch diese Betrachtung bestätigt und liegt auf der sicheren Seite.

## 7.4 Beispielrechnung

Anhand eines Beispiels soll die Berechnung am vereinfachten Balkenmodell noch einmal dargestellt werden.

Gesucht ist die Ersatzsteifigkeit für zweiseitig auf zwei Einfeldträgern gelagerte Trapezprofile.

Es gilt folgende **Systemkonfiguration**:

Trapezprofil:	UB 85/280
Blechdicke:	$t_N = 1 \text{ mm}$
Trapezprofillänge:	$L_s = 4 \text{ m}$
Querträger:	IPE 400 $I_z = 1320 \text{ cm}^4$
Querträgerlänge:	$L = 8,96 \text{ m}$
Querrandverbindungsmittel:	Schrauben ohne Neoprenscheibe in jeder Sicke $C_Q = 66,7 \text{ kN/cm}$ entspricht $0,15 \text{ mm/kN}$
Blechstoßverbinder:	Schrauben im Abstand von $e_s = 30 \text{ cm}$ Steifigkeit $0,25 \text{ mm/kN}$ $c_s = \frac{1}{0,25 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} * 10^{-1} * 30 \text{ cm}} = 1,33 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

### Berechnung:

Es ist zunächst das vereinfachte elastisch gekoppelte Stabwerk gemäß Bild 7.2 zu lösen.

Für die Amplitude der aufgebrachten Sinuslast wird  $F_{Amp} = 1 \text{ kN/cm}$  pro Querträger gewählt. Es ergibt sich somit folgende Streckenlast auf die Querträger:

$$q(x) = 2F_{Amp} \sin\left(\frac{\pi}{L}x\right) = 2 * 1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} * \sin\left(\frac{\pi}{896 \text{ cm}}x\right)$$

Ermittlung der modifizierten Steifigkeit  $C_Q^*$  der Querrandverbindungsmittel:

$$C_Q^* = (mC_Q + n)C_Q = \left(-0,0048 * 66,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} + 1,27\right) 66,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} = 63,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

mit m und n nach Tabelle 7.1

Die Bettungssteifigkeit für die Kopplung der beiden Träger ergibt sich damit zu:

$$\frac{C_Q^*}{e_Q} = \frac{63,4 \frac{kN}{cm}}{28cm} = 2,264 \frac{kN}{cm^2}$$

$e_Q$  entspricht der Periodenlänge bei einer einfachen Befestigung in jeder Sicke

Als letztes ist noch die Steifigkeit des schubsteifen Ersatzträgers  $S^*$  zu ermitteln:

$$S^* = LC_{ges} = \frac{L}{\frac{1}{C_{Trapez}} + \frac{1}{C_{Sto\beta}} + \frac{1}{C_{Quer}}}$$

Nachgiebigkeit der Trapezprofile mit  $S_{S4s}$  nach Tabelle 7.2:

$$C_{Trapez} = \frac{S_{S4s}}{L} = \frac{25940kN}{8,96m * 10^2} = 28,95 \frac{kN}{cm}$$

Nachgiebigkeit der Trapezprofilstöße:

$$C_{Sto\beta} = \frac{c_s L_s + 2C_Q^*}{n_T - 1} = \frac{1,33 \frac{kN}{cm^2} * 400cm + 2 * 63,4 \frac{kN}{cm}}{8 - 1} = 94,11 \frac{kN}{cm}$$

Nachgiebigkeit der Querrandverbindungsmittel in den Stößen:

$$C_{Quer} = \frac{L_s^2}{2L(e_Q / C_Q^*)} = \frac{(400cm)^2}{2 * 896cm \left( 28cm / 63,4 \frac{kN}{cm} \right)} = 202,2 \frac{kN}{cm}$$

Damit ergibt sich  $S^*$  zu:

$$S^* = LC_{ges} = \frac{896cm}{\frac{1}{28,95 \frac{kN}{cm}} + \frac{1}{94,11 \frac{kN}{cm}} + \frac{1}{202,2 \frac{kN}{cm}}} = 17879 \text{ kN}$$

Aus der Berechnung am vereinfachten elastisch gekoppelten Stabwerk ergibt sich die Verformung in Trägermitte der Querträger zu:

$$u\left(\frac{L}{2}\right) = 12,23 \text{ cm}$$

Mit Hilfe der Verformung kann man auf die Schubsteifigkeit des Stabsystems nach Bild 7.4 zurückschließen. Sie ergibt sich wie folgt:

$$\begin{aligned} S_{\text{Stab}} &= 2\left(\frac{L}{\pi}\right)^2 \left( \frac{F_{\text{Amp}}}{u\left(\frac{L}{2}\right)} - EI_z \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \right) \\ &= 2\left(\frac{896 \text{ cm}}{\pi}\right)^2 \left( \frac{1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}{12,23 \text{ cm}} - 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} * 1320 \text{ cm}^4 \left(\frac{\pi}{896 \text{ cm}}\right)^4 \right) = 12620 \text{ kN} \end{aligned}$$

Zum Vergleich wurde für dieses Beispiel auch eine Berechnung mit dem Faltwerksmodell durchgeführt. Es ergab sich eine Ersatzschubsteifigkeit von  $S_{E2n} = 12566 \text{ kN}$ . Die Steifigkeiten stimmen bei einer Abweichung von nur 0,5% nahezu exakt überein.

Die ermittelte Ersatzschubsteifigkeit  $S_{\text{Stab}}$  ist zum Schluss noch mit dem Beiwert  $\beta = 0,9$  zu multiplizieren, um die Steifigkeit  $S$  zur sicheren Seite hin abzuschätzen.

$$S = \beta * S_{\text{Stab}} = 0,9 * 12620 \text{ kN} = 11358 \text{ kN}$$

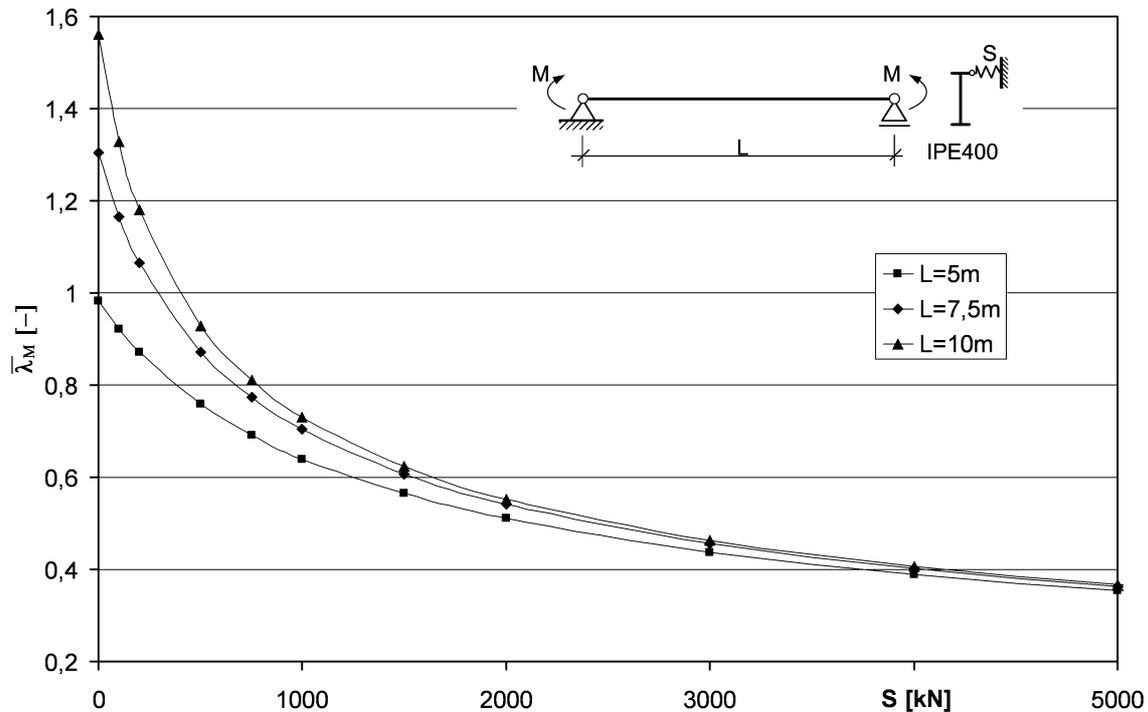
Dieser Wert kann sie für die Führung des Stabilitätsnachweises in Ansatz gebracht werden.

## 7.5 Einfluss einer Schubsteifigkeit S anhand eines Beispiels

In diesem Abschnitt soll anhand eines einfachen Beispiels der Einfluss einer vorhandenen Schubsteifigkeit  $S$  auf einen Biegeträger dargestellt werden. Als System wird ein Einfeldträger unter einer konstanten Momentenbeanspruchung gewählt. Die Schubsteifigkeit  $S$  greift am gedrückten Obergurt an. Als Trägerquerschnitt wird ein IPE400 gewählt.

Es werden drei verschiedene Trägerlängen  $L$  betrachtet. Das statische System und die Rechenergebnisse sind in Bild 7.18 zusammengestellt. Es sind die bezogenen Schlankhei-

ten  $\bar{\lambda}_M$  über die angesetzten Schubsteifigkeiten  $S$  aufgetragen. Grundlage für die dargestellten Ergebnisse ist eine analytische Lösung für das dargestellte statische System nach Fischer [15].



**Bild 7.18** Entwicklung der bezogenen Schlankheit  $\bar{\lambda}_M$  in Abhängigkeit der Schubsteifigkeit  $S$

Dem Diagramm ist deutlich zu entnehmen, dass sich bereits geringe Schubsteifigkeiten  $S$  sehr positiv auf die bezogenen Schlankheiten  $\bar{\lambda}_M$  auswirken. Das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{Ki}$  steigt deutlich an. Für alle drei Trägerlängen wird bei einer Steifigkeit von etwa  $S = 4000$  kN eine Schlankheit von  $\bar{\lambda}_M = 0,4$  erreicht. Ab dieser Schlankheit braucht ein Nachweis gegen Biegedrillknicken nicht mehr geführt zu werden. Die Berücksichtigung auch geringer Schubsteifigkeiten kann offensichtlich zu deutlich wirtschaftlicheren Ergebnissen führen.

---

## Kapitel 8

### Verallgemeinertes Verfahren

#### 8.1 Allgemeines

Mit dem in Kapitel 7 beschriebenen vereinfachten Berechnungsverfahren wird dem anwendenden Ingenieur die Möglichkeit eröffnet, auch die aussteifende Wirkung zweiseitig gelagerter Trapezprofile auf stabilitätsgefährdete Biegeträger rechnerisch berücksichtigen zu können.

In Kapitel 7 wurden insgesamt sieben Trapezprofiltypen mit jeweils vier Blechdicken  $t_N$  umfassend unter Beachtung der relevanten Parameter untersucht. Das Verfahren zeigt für alle Trapezprofiltypen eine sehr gute Übereinstimmung mit den am Falterwerkmodell numerisch ermittelten Schubsteifigkeiten  $S_{E2n}$ . Es bietet damit eine sehr gute Grundlage für die rechnerische Berücksichtigung zweiseitig gelagerter Trapezprofile.

Das beschriebene Berechnungsmodell für die Ersatzschubsteifigkeit  $S$  unterliegt trotz der sieben untersuchten Trapezprofiltypen auch einigen Einschränkungen. So wurden die für die Steifigkeitsberechnung erforderlichen Beiwerte nur für diese sieben Profiltypen ermittelt. Sollen etwa Schubsteifigkeiten weiterer nicht betrachteter Profiltypen errechnet werden, müssen zunächst die erforderlichen Beiwerte ermittelt werden. Da dies jedoch nicht ohne umfangreiche Berechnungen möglich ist, läßt sich das Berechnungsverfahren zunächst nur für die sieben betrachteten Trapezprofiltypen verwenden.

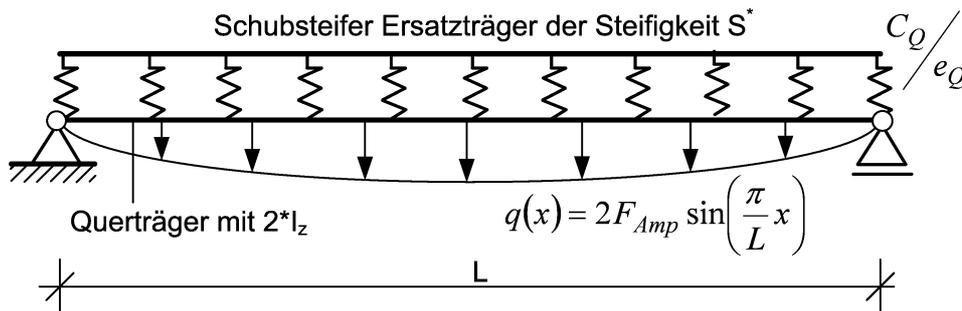
Um diese Einschränkung zu beheben, wird in diesem Kapitel eine verallgemeinerte Berechnungsmöglichkeit aufgezeigt, so dass auch die Ermittlung der Ersatzschubsteifigkeit  $S$  weiterer Trapezprofiltypen ermöglicht wird.

#### 8.2 Verallgemeinertes Modell

Die Voraussetzungen für die Anwendung des vereinfachten Verfahrens aus Kapitel 7 sind, dass die Schubsteifigkeit eines starr gelagerten Schubfeldes mit 50 mm Profilüberstand  $S_{S4s}$  und die Modifikationsfaktoren für die Steifigkeit der Querrandverbindungsmitel  $C_Q^*$  bekannt sind. Diese stehen aber nur für die sieben untersuchten Profiltypen zur Verfügung. Aus diesem Grund muss für ein verallgemeinertes Verfahren auf für alle Trapezprofile bekannte Werte zurückgegriffen werden. So wird für die Steifigkeit der Querrandverbindungsmitel  $C_Q$  auf eine Modifikation verzichtet. Es werden also die bekannten Werte  $C_Q$  für die verschiedenen Verbindungsmittel berücksichtigt.

Anstelle der Schubsteifigkeit  $S_{S4s}$  unter Berücksichtigung von 50 mm Profilüberstand wird die Schubsteifigkeit  $S_{Strehl}$ , welche aus den Zulassungstabellen der Trapezprofile bekannt ist, verwendet.

Prinzipiell gilt das gleiche vereinfachte mechanische Modell, wie es für das vereinfachte Berechnungsverfahren in Bild 7.1 dargestellt ist. Unter Beachtung der zuvor genannten Vereinfachungen läßt sich dieses Modell zu dem in Bild 8.1 dargestellten statischen System zusammenfassen.



**Bild 8.1** Vereinfachtes Stabwerk des Ersatzsystems

Es gelten die folgenden Bezeichnungen:

- $2 \cdot I_z$       Flächenträgheitsmoment der beiden Querträger
- $S^*$          Schubsteifigkeit eines Ersatzbalkens aus Trapezblech, Stoßverbindern und Querrandverbindern
- $C_Q$          Federsteifigkeit der Querrandverbindungsmittel [kN/cm]
- $e_Q$          Abstand Querrandverbindungsmittel, entspricht i.d.R. der Periodenlänge [cm]
- $L$             Länge der Querträger
- $F_{Amp}$       Amplitude der anzusetzenden Abtriebslasten pro Querträger

Die prinzipielle Darstellung und Berechnung der Ersatzschubsteifigkeit  $S$  bleibt damit zunächst erhalten. Es ergeben sich lediglich bei der Berechnung einzelner Teilkomponenten Abweichungen zum vereinfachten Verfahren.

Die Schubsteifigkeit  $S^*$  wird analog zum vereinfachten Verfahren aus den resultierenden Federsteifigkeiten der Trapezprofile, der Verbindungsmittel im Blechstoß und der Verbindungsmittel am Querrand nach Gleichung (8.1) ermittelt.

$$S^* = LC_{ges} \quad (8.1)$$

mit

L Länge der Querträger

$C_{ges}$  Resultierende Federsteifigkeit der drei genannten Teilfedersteifigkeiten [kN/cm] mit

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_{Trapez}} + \frac{1}{C_{Stoß}} + \frac{1}{C_{Quer}} \quad (8.2)$$

$C_{Trapez}$  Federsteifigkeit der Trapezprofile [kN/cm] mit

$$C_{Trapez} = \frac{S_{Strehl}}{L} \quad (8.3)$$

$S_{Strehl}$  Theoretische Schubsteifigkeit nach *Strehl* [43] [kN]

$C_{Stoß}$  Federsteifigkeit der Verbindungsmittel in den Profilstößen [kN/cm] mit

$$C_{Stoß} = \frac{c_s L_s + 2C_Q}{n_T - 1} \quad (8.4)$$

$c_s$  Steifigkeit der Profilstoßverbinder in [kN/cm<sup>2</sup>]

$L_s$  Stützweite der Trapezprofile [cm]

$C_Q$  Steifigkeit der Verbindungsmittel am Querrand [kN/cm]

$n_T$  Anzahl der nebeneinanderliegenden Trapezprofiltafeln

$C_{Quer}$  Resultierende Federsteifigkeit der Verbindungsmittel am Querrand in Analogie zu *Baehre* [3] [kN/cm] (basiert auf dem Verfahren von *Bryan/Davies* und entspricht Gleichung (2.22) im Abschnitt 2.4.4) mit

$$C_{Quer} = \frac{L_s^2}{2L(e_Q/C_Q)} \quad (8.5)$$

Mit den Gleichungen (8.1) bis (8.5) sind wiederum alle Komponenten, die für die Lösung des in Bild 8.1 dargestellten statischen Systems erforderlich sind, bekannt. Die Berechnung des Systems kann wie beim vereinfachten Verfahren mit einem beliebigen Stabwerksprogramm durchgeführt werden.

Auf das klassische System zweier starr gekoppelter Balken, siehe Bild 7.4, kann wiederum über Gleichung (6.1) zurückgeschlossen werden. Die Gleichung zur Ermittlung der Ersatzschubsteifigkeit  $S_{Stab}$  sei auch hier nachfolgend noch einmal genannt.

$$S_{Stab} = 2 \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left( \frac{F_{Amp}}{u \left( \frac{L}{2} \right)} - EI_z \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \right)$$

### 8.3 Bestätigung des verallgemeinerten Berechnungsmodells

In diesem Abschnitt wird die Lösungsqualität des verallgemeinerten Berechnungsmodells anhand der in Kapitel 6 durchgeführten Parameterrechnungen analog zu Kapitel 7 überprüft. Die Ergebnisse aus den Berechnungen am Faltwerk werden als Referenzlösung zugrunde gelegt. Es wird verglichen, ob die verallgemeinerte Balkenlösung gleiche Werte für die Ersatzschubsteifigkeit  $S_{Stab}$  liefert.

Die Berechnung der Balkenlösung erfolgt erneut mit dem Programmsystem *Ansys* [1]. Die elastische Kopplung der beiden Träger, siehe Bild 8.1, wird mit Hilfe von Dehnstäben realisiert. Die elastisch gekoppelten Träger werden abermals in 20 Teilelemente zerlegt und jeweils an den Knoten gekoppelt. Die beiden Randkopplungen werden nur mit der halben Dehnsteifigkeit angesetzt, um die verringerte Einflussbreite der Bettung für diese beiden Elemente zu berücksichtigen.

Für die Überprüfung werden ebenfalls alle sieben in den vorangegangenen Kapiteln untersuchten Trapezprofiltypen herangezogen. Als erstes wird erneut das Profil HSA 39/183 betrachtet. In den nachfolgenden Diagrammen sind für jede der vier untersuchten Blechdicken  $t_N$  die errechneten Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$  dargestellt. Ergibt sich mit dem verallgemeinerten Stabwerksmodell eine geringere Schubsteifigkeit  $S_{Stab}$  als mit dem Faltwerksmodell  $S_{E2n}$ , ist der Verhältniswert größer als 1,0. In diesem Fall liegt man mit dem vereinfachten Stabwerksmodell gegenüber den Faltwerksberechnungen auf der sicheren Seite. Im Idealfall sollte jeder Verhältniswert  $S_{E2n}/S_{Stab} \geq 1,0$  sein. Die Vorgehensweise entspricht der aus Kapitel 7, so dass ein direkter Vergleich der beiden Verfahren möglich ist.

Zu jeder untersuchten Blechdicke  $t_N$  sind in den Abbildungen Bild 8.2 bis Bild 8.5 sechs Diagramme dargestellt. In jedem der Diagramme sind die Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  aller  $3^5 = 243$  durchgeführten Parameterrechnungen pro Blechdicke  $t_N$  über jeweils einen der

betrachteten fünf Parameter aufgetragen, wobei jede einzelne Parameterkombination durch einen Punkt dargestellt wird. Zusätzlich sind im sechsten Diagramm noch die Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  über das Seitenverhältnis  $\alpha = L_s/L$  dargestellt.

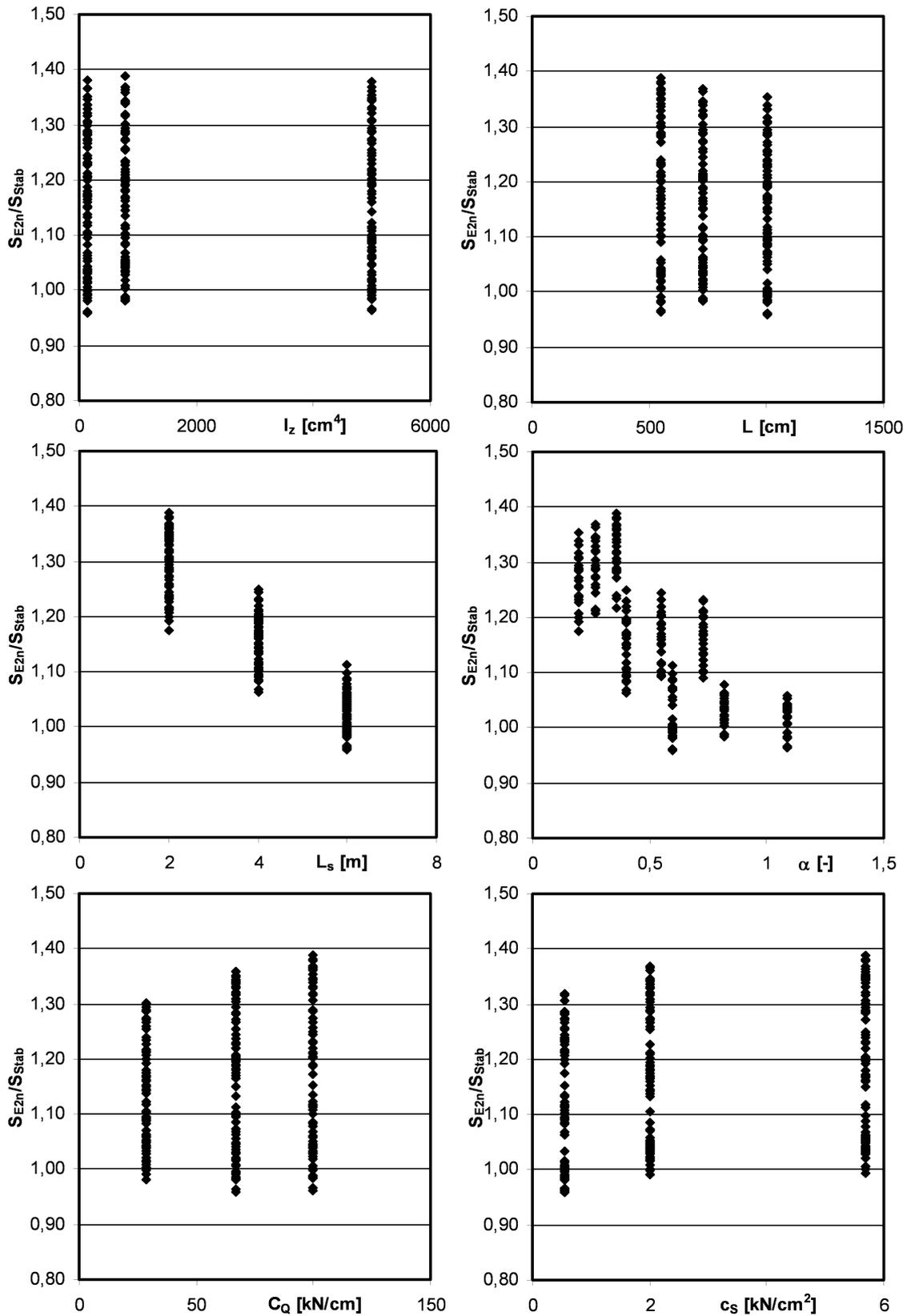
Die einzelnen Blechdicken  $t_N$  sind wie folgt den drei Abbildungen zugeordnet: Bild 8.2 zu  $t_N = 0,75$  mm, Bild 8.3 zu  $t_N = 0,88$  mm, Bild 8.4 zu  $t_N = 1$  mm und Bild 8.5 zu  $t_N = 1,25$  mm.

Die Diagramme in den Abbildungen Bild 8.2 bis Bild 8.5 zeigen, dass die mit dem verallgemeinerten Balkenmodell berechneten Ersatzschubsteifigkeiten relativ gut mit den Berechnungen an den Faltschubmodellen übereinstimmen. Es ergibt sich eine Streubreite der Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$  von -6% bis +45% um den idealen Verhältniswert von 1,0.

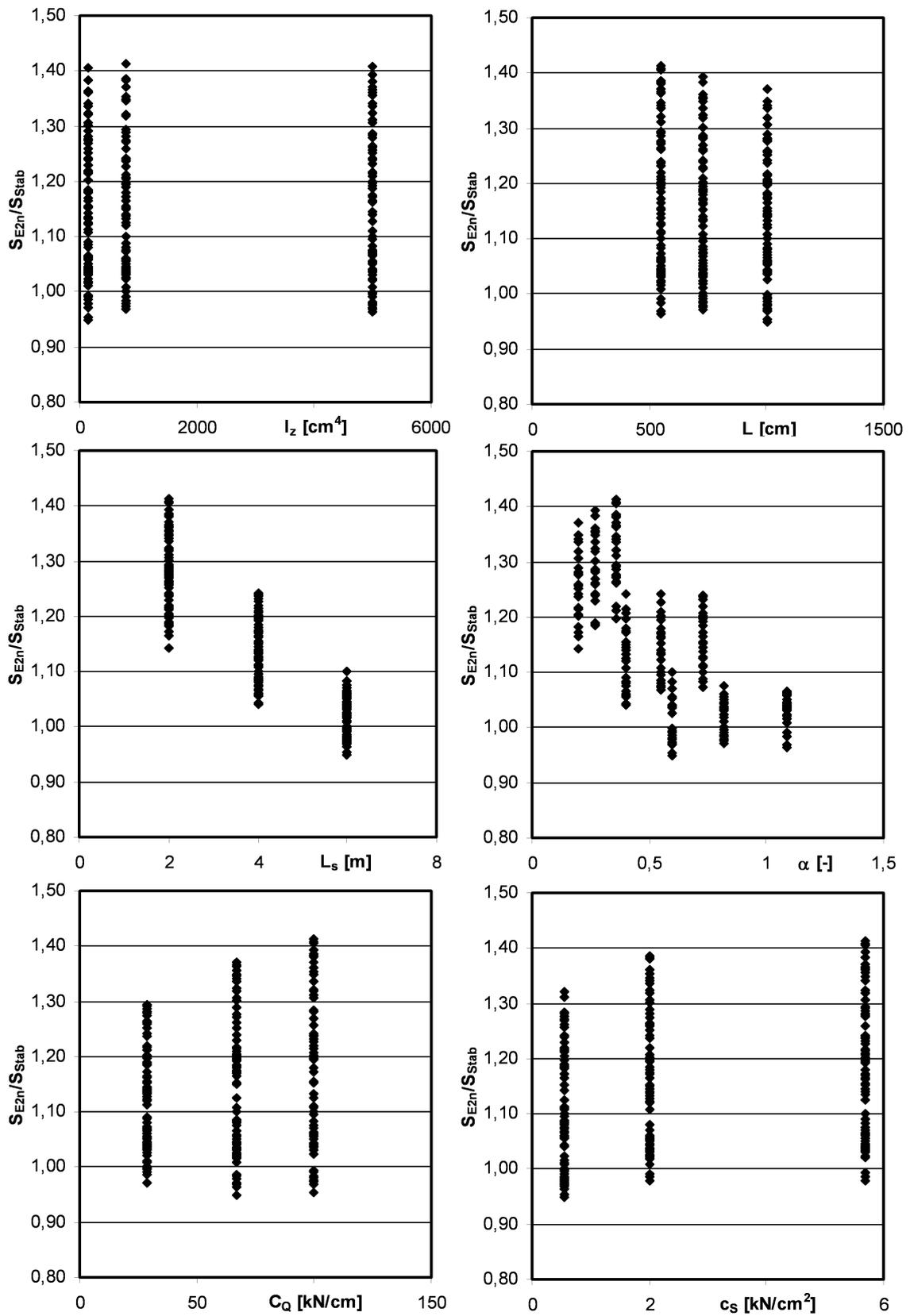
Die Streubreite liegt für alle vier Blechdicken  $t_N$  etwa im gleichen Bereich. Die Unterschiede zwischen den Blechdicken sind nur sehr gering. Für die einzelnen Parameter zeigen sich im Trend die gleichen Abhängigkeiten wie für das vereinfachte Verfahren, siehe hierzu auch Kapitel 7. So ergibt sich die größte Streubreite der Ergebnisse ebenfalls für die kurzen Querträgerlängen  $L$ . Allerdings ist der Einfluß nicht so stark ausgeprägt wie beim vereinfachten Verfahren.

Der Einfluß der Profillänge  $L_s$  ist in den Diagrammen dagegen ausgeprägter als beim vereinfachten Verfahren. Das Stabwerksmodell reagiert mit seiner Ersatzsteifigkeit  $S_{Stab}$  mit zunehmender Profillänge  $L_s$  im Verhältnis zum Faltschubmodell immer steifer. Die meisten Verhältniswerte  $S_{E2n}/S_{Stab}$  befinden sich bei einem Wert oberhalb von 1,0. Erst bei einer Profillänge  $L_s$  von 6 m werden auch Verhältniswerte unterhalb von 1,0 erreicht. Es liegen für das Trapezprofil 39/183 allerdings alle Verhältniswerte oberhalb von 0,9.

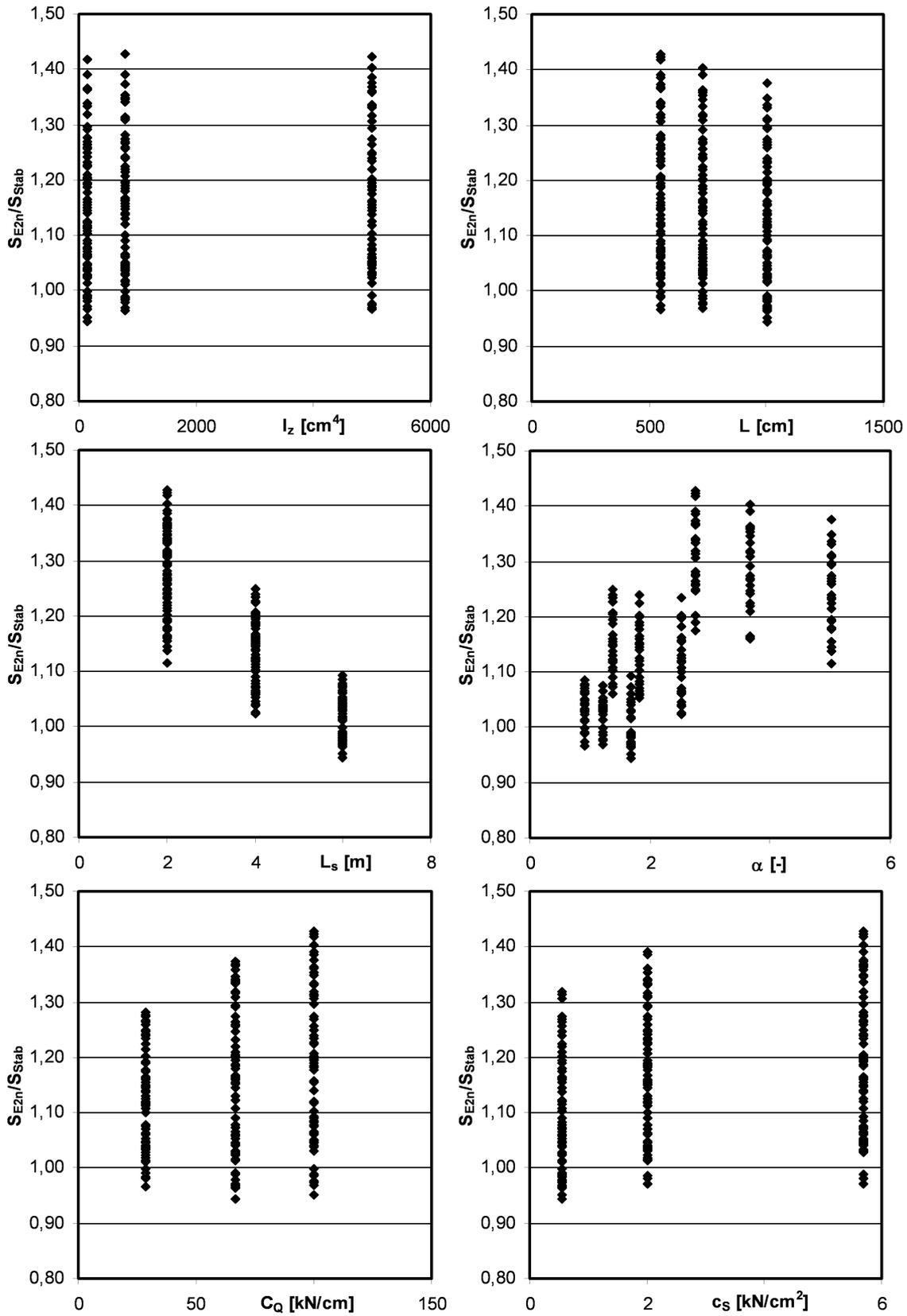
Vergleicht man die Ergebnisse direkt mit den Steifigkeitsverhältnissen  $S_{E2n}/S_{Stab}$  des vereinfachten Verfahrens in Bild 7.5 bis Bild 7.8, läßt sich sehr deutlich der Qualitätsunterschied zwischen beiden Verfahren erkennen. Während beim vereinfachten Verfahren in Kapitel 7 für den Trapezprofiltyp 39/183 lediglich eine Streubreite von im Mittel  $\pm 10\%$  auftritt, stellen sich beim verallgemeinerten Verfahren Abweichungen von bis zu +45% gegenüber der Faltschubberechnung ein. Dies bedeutet für diese Extremfälle, dass bei Verwendung dieser Steifigkeiten 45% der tatsächlich vorhandenen Schubsteifigkeit für die Nachweisführung nicht genutzt werden können. Dies entspricht etwa 30% der vorhandenen Steifigkeit.



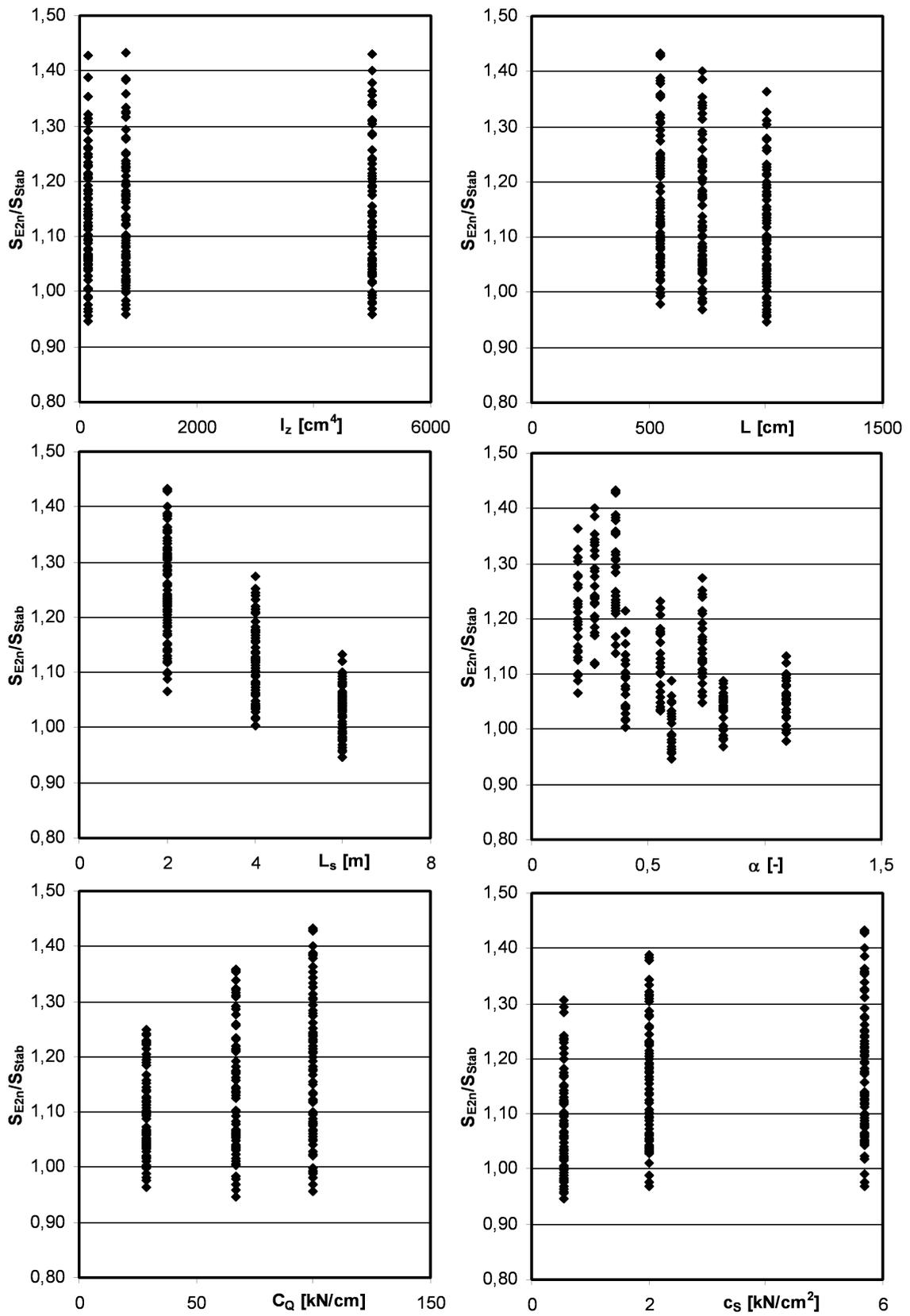
**Bild 8.2**  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=0,75\text{mm}$  - Verallgemeinertes Modell



**Bild 8.3**  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=0,88\text{mm}$  - Verallgemeinertes Modell



**Bild 8.4**  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=1\text{mm}$  - Verallgemeinertes Modell



**Bild 8.5**  $S_{E2n}/S_{Stab}$  Profil 39/183  $t_N=1,25\text{mm}$  - Verallgemeinertes Modell

Da aber auch geringe Schubsteifigkeiten  $S$  zu einer deutlichen Steigerung der idealen Biegedrillknickmomente  $M_{Ki}$  von Biegeträgern führen können (siehe hierzu Abschnitt 7.5), bietet auch dieses Verfahren eine gute Möglichkeit zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der Bemessung von stabilitätsgefährdeten Biegeträgern. Das Verfahren ist ebenfalls für die Berücksichtigung der Schubsteifigkeit  $S$  geeignet.

Für die übrigen sechs untersuchten Trapezprofile wurden identische Betrachtungen durchgeführt. Die zugehörigen Diagramme sollen an dieser Stelle aber nicht dargestellt werden. Die berechneten Schubsteifigkeiten der Falterwerksberechnung können den Tabellen im Anhang B entnommen werden. Die Stabwerksberechnungen können leicht nachvollzogen werden. Sie werden im Anhang nicht gesondert aufgeführt. Insgesamt zeigen alle Profiltypen die gleiche Tendenz. Die Streubreite der Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$  liegt bei allen Profilen deutlich über der des vereinfachten Verfahrens aus Kapitel 7. Die größten Abweichungen ergeben sich für Profil 85/280 mit einer Blechdicke von  $t_N = 1,25$  mm. Die Verhältniswerte schwanken hier von -7% bis +48%.

Die Verhältniswerte schlagen allerdings nicht nur nach oben hin aus, so dass die Schubsteifigkeit zu klein berechnet werden würde. Beim Profil 35/207 und einer Blechdicke  $t_N = 0,75$  mm werden die niedrigsten Verhältniswerte von  $S_{E2n}/S_{Stab} = 0,75$  erreicht. Dies bedeutet, dass die tatsächlich vorhandene Schubsteifigkeit der Trapezprofile deutlich überschätzt würde und die Ergebnisse auf der unsicheren Seite liegen. Dies ist allerdings nur für eine sehr geringe Anzahl von Parameterkombinationen der Fall. Für das Profil 35/207 liegen lediglich etwa 3% der Parameterkombinationen bei einem Verhältniswert  $S_{E2n}/S_{Stab}$  unterhalb von 0,8 und dies auch nur bei einer Länge der Trapezprofile von  $L_s = 6$  m. Für das Profil 35/207 bildet diese Länge die obere Grenzlänge für  $L_s$  und ist in dieser Größe sehr unwahrscheinlich. Es kann also auch hier davon ausgegangen werden, dass alle in der Realität vorkommenden Verhältniswerte oberhalb von 0,8 liegen.

Insgesamt läßt sich feststellen, dass auch die verallgemeinerte Berechnungsmethode gut zur Ermittlung der Ersatzschubsteifigkeit  $S_{Stab}$  zweiseitig gelagerter Trapezprofile geeignet ist. Allerdings wird bei einem großen Teil der Parameterkombinationen die vorhandene Schubsteifigkeit  $S_{Stab}$  unterschätzt, was sich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Um sicherzustellen, dass die berechneten Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen, ist für das verallgemeinerte Verfahren die Einführung eines Abminderungsbeiwertes analog zu Kapitel 7 erforderlich. Mit ihm werden die berechneten Schubsteifigkeiten  $S_{Stab}$  zur sicheren Seite hin abgeschätzt.

Für die Berechnung wird ein Abminderungsbeiwert von

$$\beta = 0,8$$

vorgeschlagen. Die Schubsteifigkeit des Ersatzträgers gemäß Bild 7.4 ergibt sich dann zu

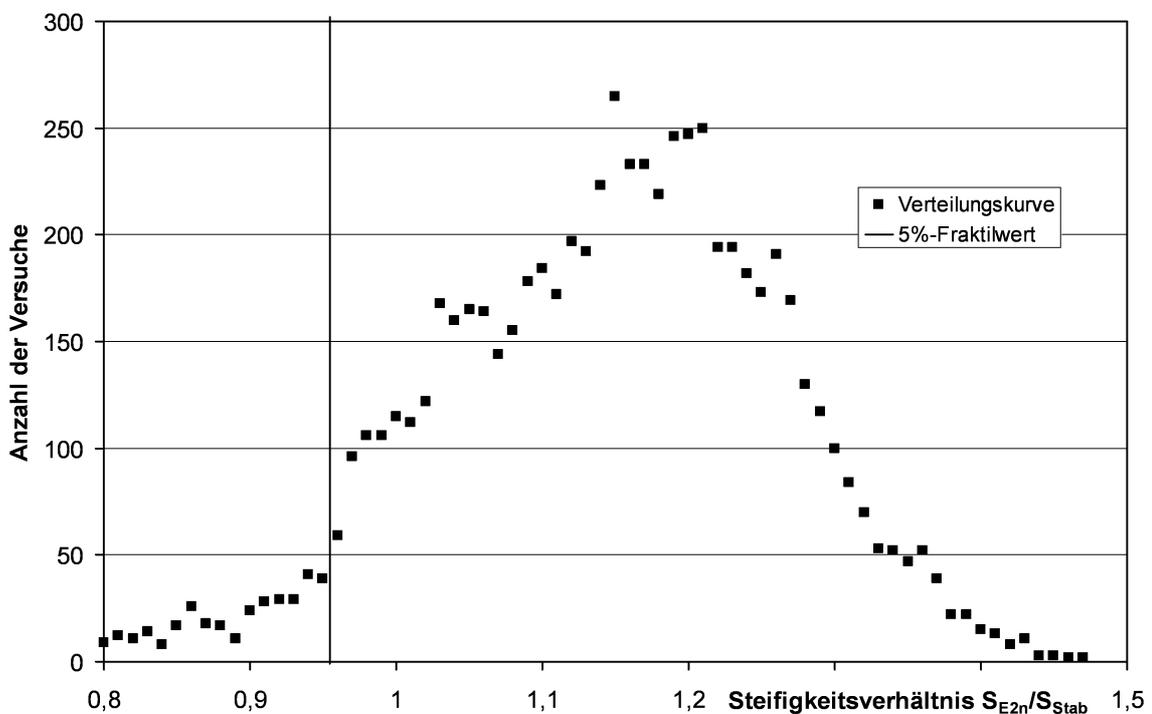
$$S = \beta * S_{Stab}.$$

Die errechneten Steifigkeiten für den Ersatzbalken liegen dann wie auch beim vereinfachte Verfahren stets bei einem Steifigkeitsverhältnis  $S_{E2n}/S \geq 1,0$ .

#### 8.4 Statistische Betrachtung

In diesem Abschnitt soll der in Abschnitt 8.3 vorgeschlagene Abminderungsbeiwert  $\beta = 0,8$  für die errechnete Schubsteifigkeit  $S_{Stab}$  statistisch bewertet werden.

Analog zu Abschnitt 7.3 wird der untere statistische Grenzwert aus der 5%-Fraktile bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75% ermittelt. Es werden die Berechnungsergebnisse aller sieben Trapezprofiltypen gemeinsam berücksichtigt. Eingangswerte für die Berechnung sind die Verhältnismerte der Schubsteifigkeiten  $S_{E2n}/S_{Stab}$ .



**Bild 8.6** Statistische Verteilung der Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$

Dies führt zu folgender Berechnung für den statistischen Grenzwert von  $\beta_S$ :

$$\beta_S = m - 1,645 * s$$

mit

m Mittelwert aller Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$

s Standardabweichung aller Berechnungsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Berechnungsergebnisse aller sieben Trapezprofiltypen ergibt sich für den Mittelwert  $m$  ein Wert von  $m = 1,15$  und für die Standardabweichung  $s = 0,12$ .

Mit diesen beiden Werten läßt sich für den 5%-Fraktilwert ein Abminderungsfaktor von  $\beta_S = 0,96$  ermitteln. Im Bild 8.6 ist die statistische Verteilung aller 6804 berücksichtigten Versuchskonfigurationen dargestellt. Es ist deutlich die Normalverteilung der Auftretenshäufigkeit über das Steifigkeitsverhältnis  $S_{E2n}/S_{Stab}$  erkennbar. Zur besseren Übersicht ist wieder der berechnete 5%-Fraktilwert  $\beta_S = 0,96$  der Verteilungsfunktion eingetragen.

Betrachtet man nun den im vorigen Abschnitt 8.3 vorgeschlagenen Beiwert  $\beta = 0,8$ , könnte man annehmen, dass dieser Beiwert viel zu weit auf der sicheren Seite liegt und damit zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führt. Man muss für diesen Vergleich aber berücksichtigen, dass die Steifigkeitsverhältnisse  $S_{E2n}/S_{Stab}$  für die einzelnen Trapezprofiltypen sehr stark schwanken. Dies führt dazu, dass der Beiwert  $\beta$  für einige Profile weit auf der sicheren Seite liegt, während er für andere gerade ausreichend bestimmt wurde.

Dies läßt sich am besten am Profil 35/207 darstellen. Führt man eine äquivalente Ermittlung des Beiwertes  $\beta_S$  nur für dieses Profil unter Berücksichtigung aller Blechdicken  $t_N$  durch, ergibt sich ein Beiwert  $\beta_S = 0,82$ . Dies belegt, dass der Beiwert mit  $\beta = 0,8$  das erforderliche Sicherheitsniveau unter Berücksichtigung aller Profiltypen sehr gut wiedergibt.

Der Beiwert kann somit für die Berechnungen verwendet werden und liefert für alle Trapezprofiltypen Werte, die auf der sicheren Seite liegen.

## 8.5 Beispielrechnung

Anhand des bereits in Abschnitt 7.4 vorgestellten Beispiels soll ein Vergleich zwischen der Qualität beider Verfahren gezogen werden.

Gesucht ist wiederum die Ersatzsteifigkeit  $S$  für zweiseitig auf zwei Einfeldträgern gelagerte Trapezprofile.

Es gilt folgende **Systemkonfiguration**:

Trapezprofil:	UB 85/280
Blechdicke:	$t_N = 1 \text{ mm}$
Trapezprofillänge:	$L_s = 4 \text{ m}$
Querträger:	IPE 400 $I_z = 1320 \text{ cm}^4$
Querträgerlänge:	$L = 8,96 \text{ m}$
Querrandverbindungsmittel:	Schrauben ohne Neoprenscheibe in jeder Sicke $C_Q = 66,7 \text{ kN/cm}$ entspricht $0,15 \text{ mm/kN}$
Blechstoßverbinder:	Schrauben im Abstand von $e_s = 30 \text{ cm}$ Nachgiebigkeit $0,25 \text{ mm/kN}$ $c_s = \frac{1}{0,25 \frac{\text{mm}}{\text{kN}} * 10^{-1} * 30 \text{ cm}} = 1,33 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

### Berechnung:

Es ist zunächst das vereinfachte elastisch gekoppelte Stabwerk gemäß Bild 8.1 zu lösen.

Für die Amplitude der aufgetragenen Sinuslast wird  $F_{Amp} = 1 \text{ kN/cm}$  pro Querträger gewählt. Es ergibt sich folgende Streckenlast auf die Querträger:

$$q(x) = 2F_{Amp} \sin\left(\frac{\pi}{L}x\right) = 2 * 1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} * \sin\left(\frac{\pi}{896 \text{ cm}}x\right)$$

Die Bettungssteifigkeit für die Kopplung der beiden Träger ergibt sich damit zu:

$$\frac{C_Q}{e_Q} = \frac{66,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}{28 \text{ cm}} = 2,382 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$e_Q$  entspricht der Periodenlänge bei einer einfachen Befestigung in jeder Sicke

Als letztes ist noch die Steifigkeit des schubsteifen Ersatzträgers  $S^*$  zu ermitteln:

$$S^* = LC_{ges} = \frac{L}{\frac{1}{C_{Trapez}} + \frac{1}{C_{Sto\beta}} + \frac{1}{C_{Quer}}}$$

Resultierende Federsteifigkeit der Trapezprofile mit  $S_{Strehl}$  nach *Strehl* [43]:

$$C_{Trapez} = \frac{S_{Strehl}}{L} = \frac{17439 \text{ kN}}{8,96 \text{ m} \cdot 10^2} = 19,46 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

Federsteifigkeit der Verbindungsmittel in den Trapezprofilstößen:

$$C_{Sto\beta} = \frac{c_s L_s + 2C_Q}{n_T - 1} = \frac{1,33 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} * 400 \text{ cm} + 2 * 66,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}{8 - 1} = 95,06 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

Resultierende Federsteifigkeit der Verbindungsmittel am Querrand:

$$C_{Quer} = \frac{L_s^2}{2L(e_Q/C_Q)} = \frac{(400 \text{ cm})^2}{2 * 896 \text{ cm} \left( 28 \text{ cm} / 66,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}} \right)} = 212,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

Damit ergibt sich  $S^*$  zu:

$$S^* = LC_{ges} = \frac{896 \text{ cm}}{\frac{1}{19,46 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}} + \frac{1}{95,06 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}} + \frac{1}{212,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}} = 13452 \text{ kN}$$

Aus der Berechnung am vereinfachten elastisch gekoppelten Stabwerk ergibt sich die Verformung in Trägermitte der Querträger zu:

$$u\left(\frac{L}{2}\right) = 14,39 \text{ cm}$$

Mit Hilfe dieser Verformung kann man auf die Schubsteifigkeit  $S_{\text{Stab}}$  des Stabwerks nach Bild 7.4 zurückschließen. Sie ergibt sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{Stab}} &= 2 \left( \frac{L}{\pi} \right)^2 \left( \frac{F_{\text{Amp}}}{u \left( \frac{L}{2} \right)} - EI_z \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \right) \\
 &= 2 \left( \frac{896 \text{ cm}}{\pi} \right)^2 \left( \frac{1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}}{14,39 \text{ cm}} - 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} * 1320 \text{ cm}^4 \left( \frac{\pi}{896 \text{ cm}} \right)^4 \right) = 10624 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Die berechnete Schubsteifigkeit  $S_{\text{Stab}}$  kann mit den Berechnungen aus dem Faltnetzmodell und dem Ergebnis des vereinfachten Verfahrens in Anlehnung an Abschnitt 7.4 verglichen werden.

Die Ersatzschubsteifigkeit aus der Faltnetzberechnung hat einen Wert von  $S_{E2n} = 12566 \text{ kN}$  und das Ergebnis des vereinfachten Verfahrens beträgt  $S_{\text{Stab}} = 12620 \text{ kN}$ . Die Steifigkeiten aus dem vereinfachten Verfahren und der Faltnetzrechnung stimmen nahezu exakt überein. Die Berechnung mit dem verallgemeinerten Modell weist dagegen eine ca. 16% geringere Schubsteifigkeit  $S_{\text{Stab}}$  auf. Dies ist infolge der geringeren berücksichtigten Steifigkeiten für  $C_Q$  und  $S_{\text{Strehl}}$  im Rahmen der Berechnung nachvollziehbar.

Der Wert ist allerdings immernoch groß genug, um eine signifikante Anhebung der idealen Biegedrillknickmomente  $M_{\text{Ki}}$  zu bewirken. Bezogen auf das zuvor berechnete Beispiel mit einem IPE400 reicht die ermittelte Steifigkeit aus, um die bezogene Schlankheit auf einen Wert unterhalb von  $\bar{\lambda}_M = 0,4$  zu senken.

Die ermittelte Ersatzschubsteifigkeit  $S_{\text{Stab}}$  ist zum Schluss noch mit dem Beiwert  $\beta = 0,8$  zu multiplizieren, um die Steifigkeit zur sicheren Seite hin abzuschätzen.

$$S = \beta * S_{\text{Stab}} = 0,8 * 10624 \text{ kN} = 8499 \text{ kN}$$

Dieser Wert kann zur Führung eines Stabilitätsnachweises in Ansatz gebracht werden.



## Kapitel 9

### Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Untersuchung der aussteifenden Wirkung von zweiseitig gelagerten Trapezprofilen auf biegedrillknickgefährdete Träger. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Ermittlung einer resultierenden Schubsteifigkeit  $S$ , welche bei der Führung eines Stabilitätsnachweises Berücksichtigung finden kann. Da neben den Trapezprofilen vor allem die Verbindungsmittel mit ihren großen Nachgiebigkeiten einen maßgeblichen Einfluß auf die Gesamtsteifigkeit besitzen, kommt ihrer Berücksichtigung eine besondere Bedeutung zu.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden anknüpfend an theoretische Vorbetrachtungen Großversuche an zwei verschiedenen Trapezprofiltypen durchgeführt. Neben den Trapezprofilen wurden bei den Versuchen die Verbindungsmittel in den Längsstößen und an den Querrändern über ihren Abstand und ihre Steifigkeit variiert.

Die Versuche bilden die Basis für das entwickelte Finite-Element-Modell, mit dessen Hilfe umfangreiche Parameterstudien durchgeführt wurden.

Aus den durchgeführten Versuchen und Parameterstudien ergeben sich für jeden Trapezprofiltyp insgesamt sechs unabhängige Parameter, die einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die resultierende Schubsteifigkeit  $S$  besitzen. Folgende Parameter sind zu berücksichtigen:

Blechdicke der Trapezprofile,

Profillänge  $L_S$ ,

Querträgerlänge  $L$ ,

Biegesteifigkeit der Querträger  $I_z$ ,

Steifigkeit der Profilstoßverbinder  $C_S$ ,

Steifigkeit der Querrandverbindungsmittel  $C_Q$ .

Die Berechnungen zeigen, dass vor allem die Systemabmessungen und die großen Nachgiebigkeiten aus den Verbindungsmitteln einen ausgeprägten Einfluß auf die resultierende Schubsteifigkeit  $S$  der Trapezprofile besitzen. Die Schubsteifigkeiten liegen dabei teilweise sehr deutlich unter den theoretischen Schubsteifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  nach *Strehl* [44], welche für echte Schubfelder nach derzeitigem Stand der Normung in Ansatz gebracht

werden können. Mit einer einfachen Übertragung der Steifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  auf die zweiseitige Lagerung liegt man damit deutlich auf der unsicheren Seite. Gleichzeitig ist eine globale Abminderung der theoretischen Schubsteifigkeiten  $S_{\text{Strehl}}$  nicht möglich, da die ermittelten Steifigkeiten in Abhängigkeit von den genannten Parametern sehr stark streuen. Eine globale Abminderung würde damit zu sehr unwirtschaftlichen Ergebnissen führen.

Aus diesem Grund wurde unter Verwendung der durchgeführten Parameterstudien ein einfaches Stabwerksmodell entwickelt, mit dessen Hilfe sich die Ersatzschubsteifigkeit  $S$  zweiseitig gelagerter Trapezprofile ermitteln läßt. Die ermittelten Schubsteifigkeiten können anschließend bei der Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes  $M_{\text{Ki}}$  berücksichtigt werden.

Aufgrund der großen Anzahl von unabhängigen Parametern war hierfür eine große Anzahl von Berechnungen erforderlich. So wurden im Rahmen der Untersuchungen etwa 20.000 Berechnungen an Falt- und Stabwerksmodellen durchgeführt und ausgewertet.

Mit dem entwickelten Verfahren ist es nun möglich, auch die aussteifende Wirkung zweiseitig gelagerter Trapezprofile über eine Schubsteifigkeit  $S$  zu berücksichtigen. Auf die Durchführung aufwändiger Berechnungen an Faltwerksmodellen kann damit verzichtet werden.

Wie in den vorangegangenen Absätzen erläutert wurde, ist die Schubsteifigkeit  $S$  zweiseitig gelagerter Trapezprofile von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Eine allumfassende Betrachtung anhand des vorgestellten Modells ist daher nicht möglich. Um das vorgestellte Verfahren weiterzuentwickeln und zu ergänzen, sollte in weiteren Untersuchungen der Einfluß von Durchlaufträgern und mehreren parallel gestützten Trägern betrachtet werden.

Da Trapezprofile nicht ausschließlich zur Aussteifung von stabilitätsgefährdeten Trägern und Stützen eingesetzt werden, sind unter Umständen andere als die in dieser Arbeit untersuchten Abtriebskräfte als Belastung vorhanden. Die Betrachtung weiterer ergänzender Lastfälle wäre daher wünschenswert.

## Literaturverzeichnis

- [1] Ansys Release 10.0, ANSYS Inc., CAD-FEM GmbH, München 2005
- [2] Arcelor Bauteile GmbH: Belastungstabellen für Trapez- und Kassettenprofile, Arcelor Gruppe, März 2004
- [3] Baehre, R.: Kaltgeformte, leichte Stahlprofile als Tragwerkskomponenten in bautechnischer Anwendung, Forschungsbericht eines an der TH Karlsruhe durchgeführten und von der AiF geförderten Vorhabens, Düsseldorf 1985
- [4] Baehre, R., Fick, K.: Berechnung und Bemessung von Trapezprofilen - Mit Erläuterungen zur DIN 18807, Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana, Karlsruhe 1982
- [5] Baehre, R., Wolfram, R.: Zur Schubfeldberechnung von Trapezprofilen, Stahlbau 55 (1986), S. 175 - 179
- [6] Bamm, D., Lindner, J.: KIBAL - EDV-Programm zur Berechnung der idealen Biegedrillknicklasten von beliebig gelagerten geraden Stabsystemen - Fassung Lindner KIBL2F, TU Berlin 2004
- [7] Bryan, E. R.: Wand-, Dach- und Deckenscheiben im Stahlbau, Der Bauingenieur 50 (1975), S. 341 - 346
- [8] Davies, J.M., Lawson, R.M.: The Shear Deformation of Profiled Metal Sheeting, International Journal for Numerical Methods in Engineering Vol. 12 (1978), S. 1507 - 1541
- [9] Dickel, T., Klemens, H.-P., Rothert, H.: Ideale Biegedrillknickmomente - Kurventafeln für Durchlaufträger mit doppelt-symmetrischem I-Querschnitt, Verlag Vieweg, Braunschweig 1991
- [10] Dürr, M., Kathage, K., Saal, H.: Schubsteifigkeit zweiseitig gelagerter Stahltrapezbleche, Stahlbau 75 (2006), S. 280 bis 286
- [11] ECCS: European Recommendations for the Application of Metal Sheeting acting as a Diaphragm, Publication No. 88, 1995
- [12] ECCS: Recommendations for Steel Construction: Mechanical Fasteners for Use in Steel Sheeting and Sections, Publication No. 42, 1983
- [13] ECCS TC-7: Recommendations for Steel Construction: The Design and Testing of Connections in Steel Sheeting and Sections, Publication No. 21, 1990
- [14] European Convention for Constructional Steelwork ECCS: European Recommendations for the Stressed Skin Design of Steel Structures, Constrado 1977
- [15] Fischer, M.: Zum Kippproblem von kontinuierlich seitlich gestützten I-Trägern, Stahlbau 46 (1976), S. 120 - 124
- [16] Heil, W.: Stabilisierung von biegedrillknickgefährdeten Trägern durch Trapezblechscheiben, Stahlbau 64 (1995), S. 169 - 178
- [17] Institut für Bautechnik: Zulassungsbescheid Nr. Z-14.1-4 für Verbindungselemente zur Verwendung bei Konstruktionen mit Kaltprofilen aus Stahlblech - insbesondere mit Stahlprofiltafeln, Berlin 1990
- [18] Kitipornchai, S., Al-Bermani, F.G.A.: Advances in nonlinear Analysis of spatial and thin-walled Structures, Department of Civil Engineering, The University of Queensland Brisbane,
- [19] Lawson, R. M., Nethercot, D. A.: Lateral stability of I-beams restrained by profiled sheeting, The Structural Engineer Volume 63B No. 1 (März 1985)
- [20] Lindner, J.: restraint of beams by trapezoidally sheeting using different types of connection, in: Stability and Ductility of Steel Structures, pp. 27 - 36, Elsevier Publ., London 1998
- [21] Lindner, J.: Stahlbau Handbuch 1 Teil A, Deutscher Stahlbau-Verband, Köln 1993

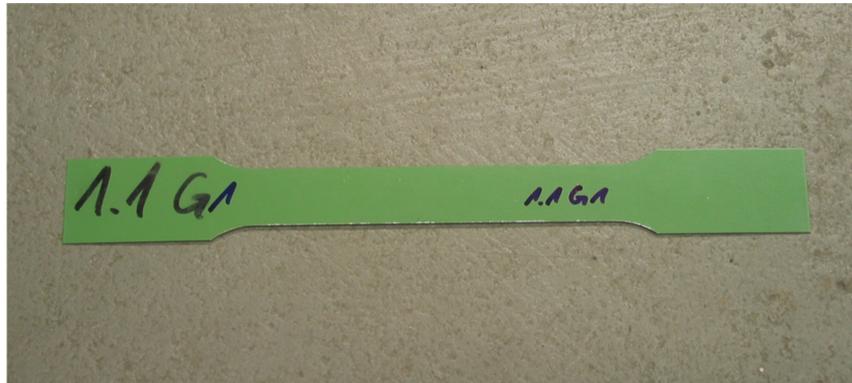
- [22] Lindner, J.: Stabilisierung von Biegeträgern durch Drehbettung - eine Klarstellung, Stahlbau 56 (1987), S. 365 - 373
- [23] Lindner, J.: Zur Frage der Mindeststeifigkeiten angrenzender Bauteile beim Biegedrillknicken von Biegeträgern. S. 127 - 145, In: Kindmann Festschrift, Shaker Verlag, Aachen 2007
- [24] Lindner, J., Gregull, T.: Grundsatzversuche zur Ermittlung von Drehbettungswerten unter Auflast, Versuchsbericht VR2074, TU Berlin 1985
- [25] Lindner, J., Groeschel, F.: Drehbettungswerte für die Profilblechbefestigung mit Setzbolzen bei unterschiedlich großen Auflasten, Stahlbau 65 (1996), S. 218 - 224
- [26] Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H. (Herausg.): Stahlbauten, Erläuterungen zur DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4, Berlin, Beuth und Ernst u. Sohn, 1993, 3. Aufl. 1998
- [27] Lindner, J., Seidel, F.: Stabilisierung von Biegeträgern durch Trapezprofile ohne Schubfeldausbildung, Schriftenreihe 25. Steinfurter Stahlbauseminar, 2006, FH Münster
- [28] Maass, G.: Stahltrapezprofile: Konstruktion und Berechnung, Werner-Verlag 1985, Düsseldorf
- [29] Möller, R., Pöter, H., Schwarze, K.: Planen und Bauen mit Trapezprofilen und Sandwichelementen, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2003
- [30] Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, 2. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig 1982
- [31] Pöter, H.: Geschichtliche Entwicklung der Stahlleichtbauweise, IFBS 3/04
- [32] Roik, K., Carl, J., Lindner, J.: Biegetorsionsprobleme gerader dünnwandiger Stäbe, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1972
- [33] Saal, H., Dürr, M.: Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger durch die Schubsteifigkeit zweiseitig gelagerter Trapezbleche, Forschungsbericht Fraunhofer IRB-Verlag 2006
- [34] Sauer, R., Wagner, W.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur aussteifenden Wirkung von Trapezblechscheiben, Stahlbau 64 (1995), S. 289 - 294
- [35] Schardt, R.: Eine Erweiterung der technischen Biegelehre für die Berechnung biegesteifer prismatischer Falwerke, Stahlbau 35 (1966), S. 161 - 171
- [36] Schardt, R., Strehl, C.: Stand der Theorie zur Bemessung von Trapezblechscheiben, Stahlbau 49 (1980), S. 325 - 334
- [37] Schardt, R., Strehl, C.: Theoretische Grundlagen für die Bestimmung der Schubsteifigkeit von Trapezblechscheiben - Vergleich mit anderen Berechnungsansätzen und Versuchsergebnissen, Stahlbau 45 (1976), S. 97 - 108
- [38] Schwarze, K.: Bemessung von Stahltrapezprofilen nach DIN 18807 unter Beachtung der Anpassungsrichtlinie Stahlbau, Sonderdruck aus Der Bauingenieur Nr. 7/8 (1998), S. 347 - 356, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf 1999
- [39] Schwarze, K., Berner, K.: Temperaturbedingte Zwängungskräfte in Verbindungen bei Konstruktionen mit Stahltrapezprofilen, Stahlbau 57 (1988), S. 103 - 114
- [40] Schwarze, K., Kech, K.: Bemessung von Stahltrapezprofilen für Biegung und Normalkraft, IFBS-Info 5.01, 2003
- [41] Schwarze, K., Kech, J.: Bemessung von Stahltrapezprofilen nach DIN 18807 - Schubfeldbeanspruchung, IFBS-Info 3.06, 2000
- [42] Steinhardt, O., Einsfeld, U.: Trapezblechscheiben im Stahlhochbau - Wirkungsweise und Berechnung, Die Bautechnik 47 (1970), S. 331 - 335
- [43] Strehl, C.: Berechnung regelmäßig periodisch aufgebauter Falwerksquerschnitte unter Schubbelastung am Beispiel des Trapezbleches, Dissertation Universität Darmstadt, 1976

- 
- [44] Strehl, C.: Bestimmung der Schubsteifigkeitswerte von Trapezprofilen mit Tabellen-Kalkulationsprogramm, Stahlbau 74 (2005), S. 708 bis 716
- [45] Walter, E.: Systemintegrierte Befestigungstechnik - Untersuchungen des statischen und dynamischen nichtlinearen Verhaltens von Elementen zur Befestigung der Ausbauelemente, sowie deren Einfluss auf das Last-Verformungsverhalten eines Gebäudes, Dissertation Universität Innsbruck, 1994
- [46] Yang Liu, Qilin Zhang, Weijun Qian: Testing and finite element modeling of stressed skin diaphragms, Steel and Composite Structures, Vol. 7, No. 1 (2007), Seiten 35 - 52
- [47] DIN 18800-2:1990-11: Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken
- [48] DIN 18807-1:1987-06: Stahltrapezprofile - Allgemeine Anforderungen, Ermittlung der Tragfähigkeitswerte durch Berechnung
- [49] E DIN 18807-4:1999-12: Verbindungen zwischen Stahltrapezprofilen und Bauteilen aus Stahl - Teil 4: Ermittlung der Tragfähigkeit durch Versuche
- [50] DIN EN 1993-1-1:2005-05: EC 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [51] DIN ENV 1993-1-3:2005-09: EC 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regelungen für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche
- [52] DIN 50125:2004-01: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben



## Anhang A - Versuche

### A.1 Zugversuche



**Bild A.1** Abbildung einer Zugprobe

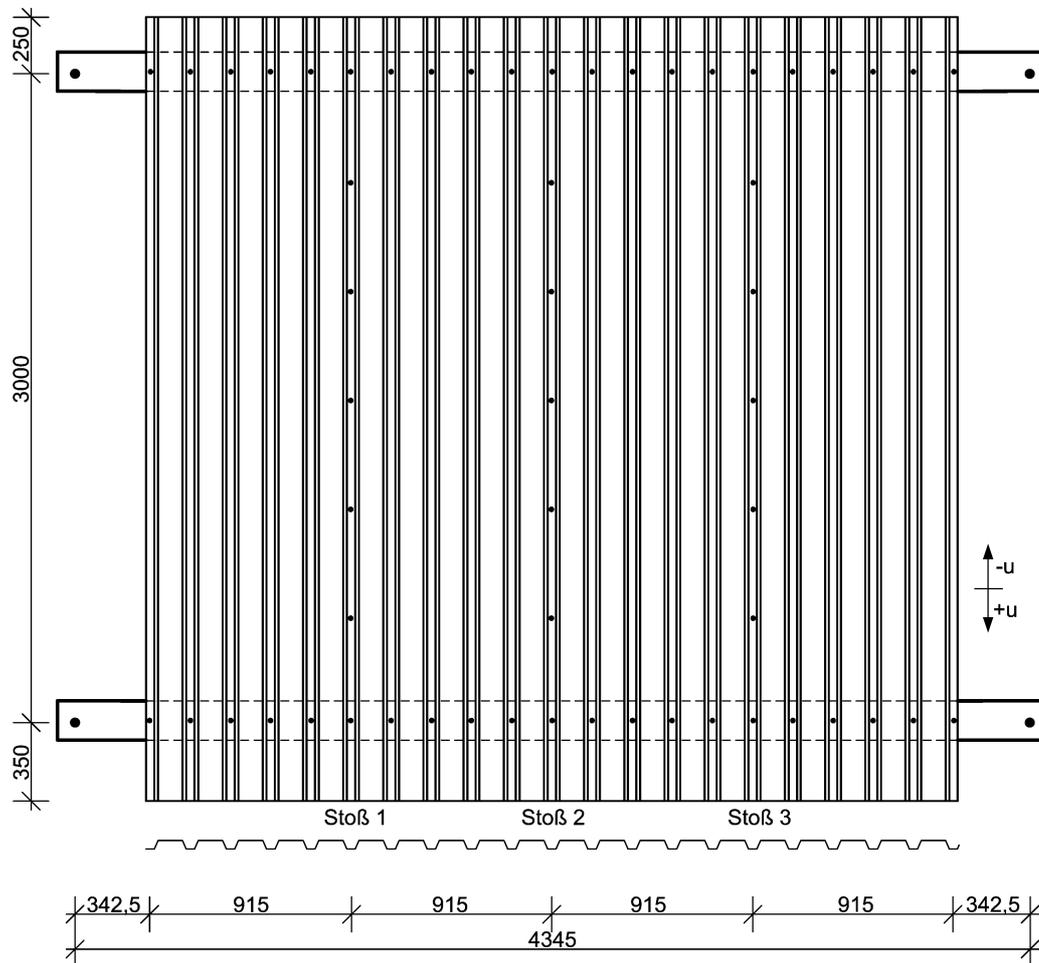


**Bild A.2** Eingespannte Zugprobe in der Prüfmaschine

## A.2 Großversuche

### A.2.1 Versuch 1.1

#### A.2.1.1 Versuchsanordnung



**Bild A.3** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

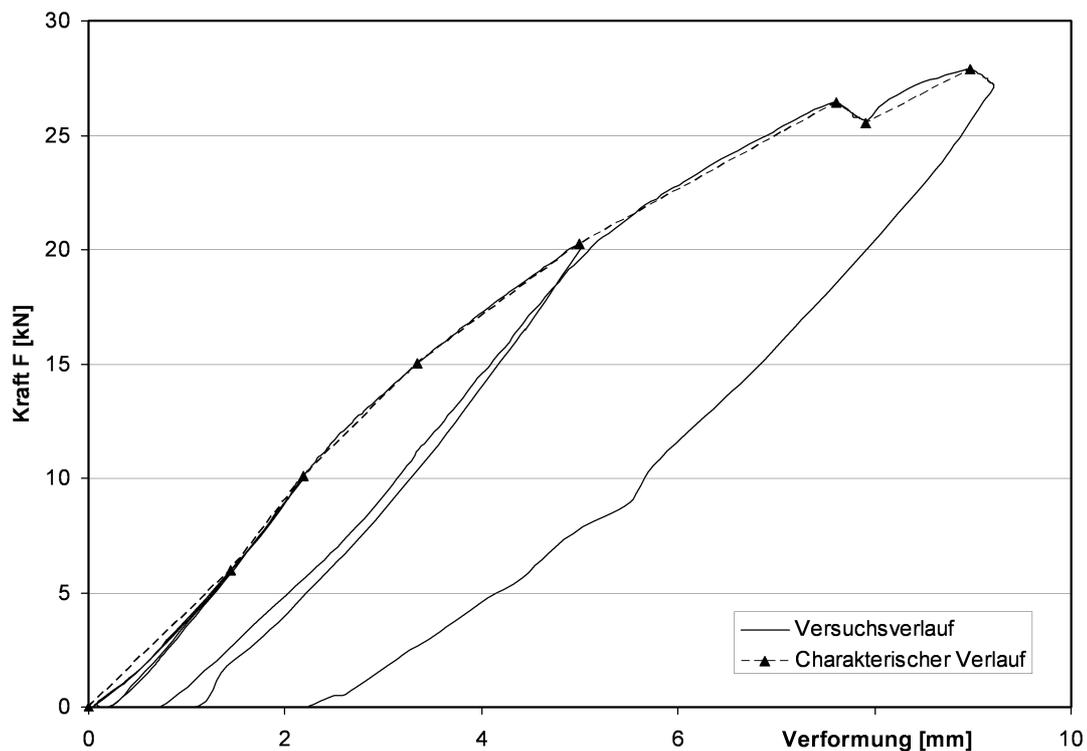
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 500$  mm

### A.2.1.2 Versuchsergebnisse

In diesem Versuch wurde die Anordnung nur in die positive Lastrichtung verformt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.4 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.

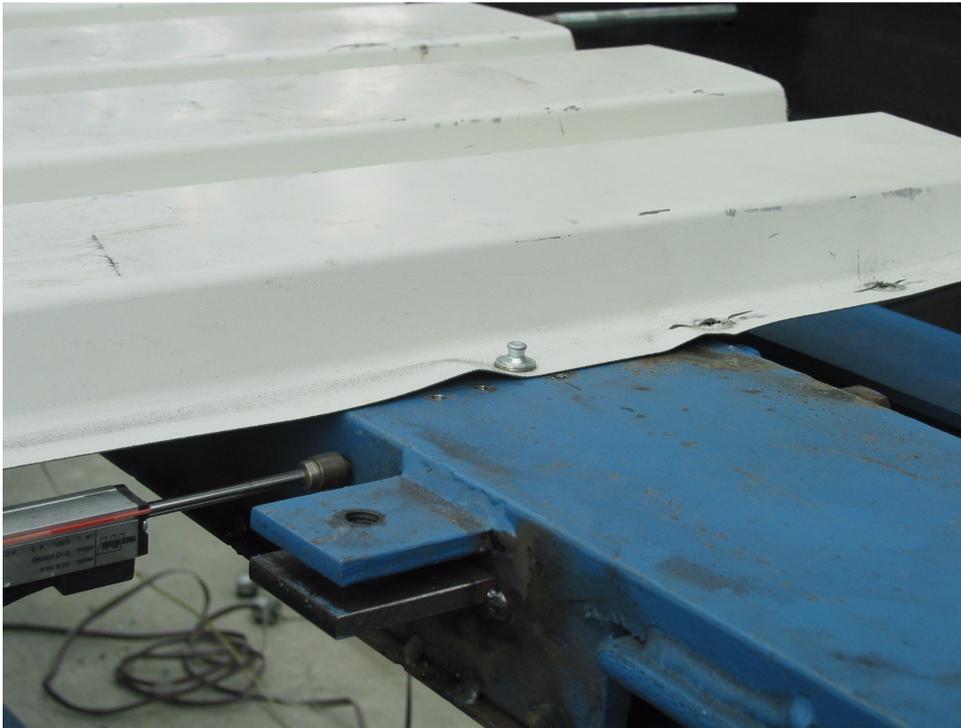


**Bild A.4** Last-Verformungsverlauf Versuch 1.1

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Das Versagen der Versuchsanordnung erfolgte durch das Abscheren aller Niete des Blechstoßes 3. Die vorhandene Unstetigkeit im Versuchsverlauf bei ca. 25 kN zeigt das Abscheren des ersten Nietes. Die Belastung wurde danach aber noch fortgesetzt bis schließlich der gesamte Stoß versagte. Es wurde eine Versagenslast von  $F = 27,8$  kN mit einer zugehörigen Verformung von 9,0 mm in Trägermitte festgestellt. An den Setzbolzen auf den Querträgern konnten ausgeprägte Langlochbildungen festgestellt werden, welche an den äußeren Setzbolzen erwartungsgemäß größer waren. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3 mm.

Am nicht abgekanteten Blechrand kam es zudem bereits bei einer Last von etwa 10 kN zu Beulerscheinungen vor den Verbindungsmitteln, siehe hierzu Bild A.5. Die Beule vergrößerte sich mit zunehmender Last und verschwand bei Entlastung auch nicht vollständig.

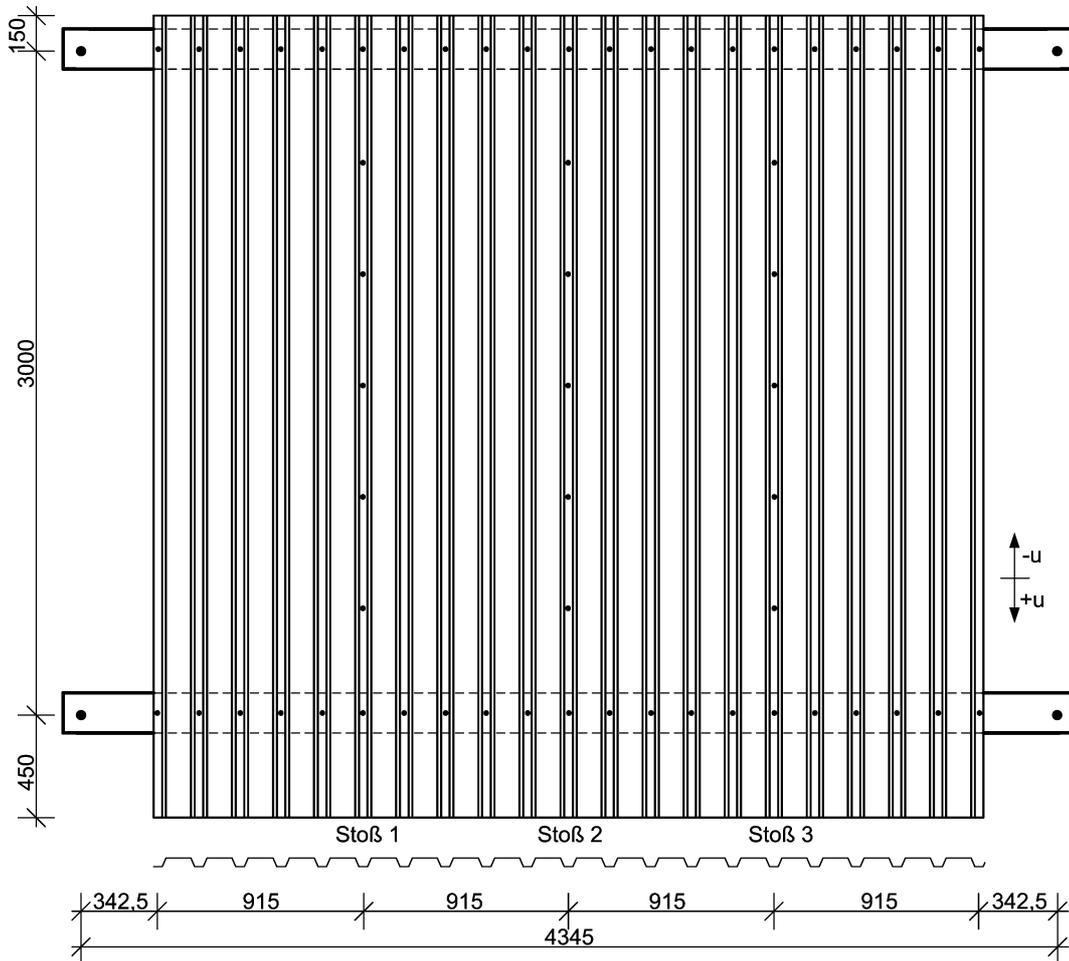
Es bleiben also Plastizierungen in der Konstruktion, was die bleibenden Verformungen bei Entlastung erklärt.



**Bild A.5** Beulen vor Setzbolzen am freien Blechrand

## A.2.2 Versuch 1.2

### A.2.2.1 Versuchsanordnung



**Bild A.6** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

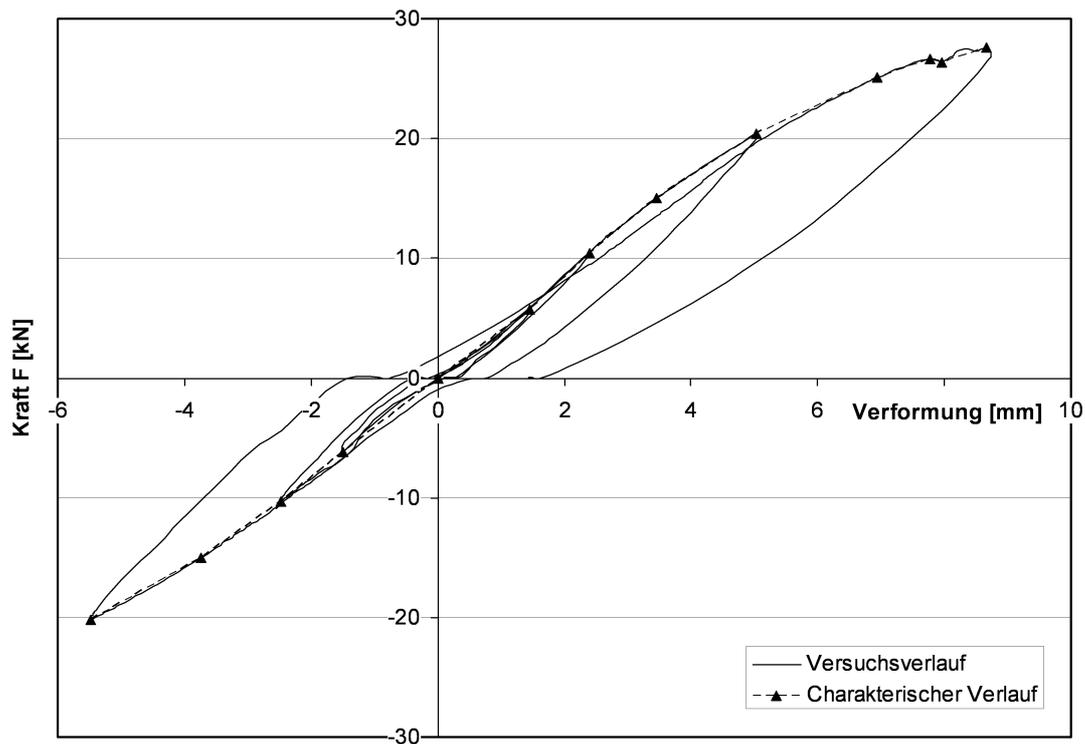
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 500$  mm

### A.2.2.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsanordnung wurde in einer wechselseitigen Belastung verformt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.7 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.

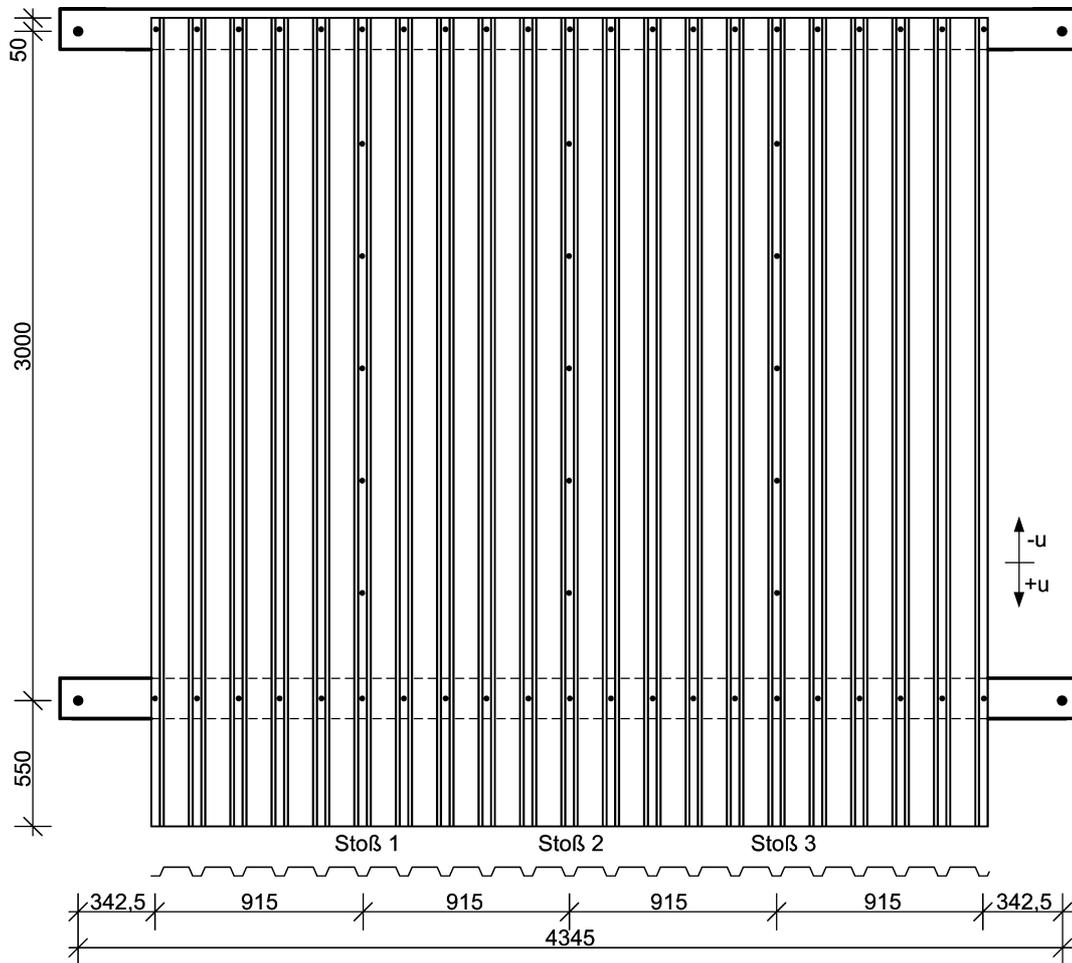


**Bild A.7** Last-Verformungsverlauf Versuch 1.2

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Das Versagen der Versuchsanordnung erfolgte durch das Abscheren aller Niete des Blechstoßes 3. Die vorhandene Unstetigkeit im Versuchsverlauf bei ca. 26 kN zeigt das Abscheren des ersten Nietes. Die Belastung wurde danach aber noch fortgesetzt bis schließlich der gesamte Stoß versagte. Es wurde eine Versagenslast von  $F = 27,6$  kN mit einer zugehörigen Verformung von 8,7 mm in Trägermitte festgestellt. An den Setzbolzen auf den Querträgern konnten vor allem an den äußeren Verbindungsmitteln ausgeprägte Langlochbildungen festgestellt werden. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3 mm. Am nicht abgekanteten Blechrand traten analog zu Versuch 1.1 Beulerscheinungen auf, siehe hierzu auch Bild A.5.

## A.2.3 Versuch 1.3

### A.2.3.1 Versuchsanordnung



**Bild A.8** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

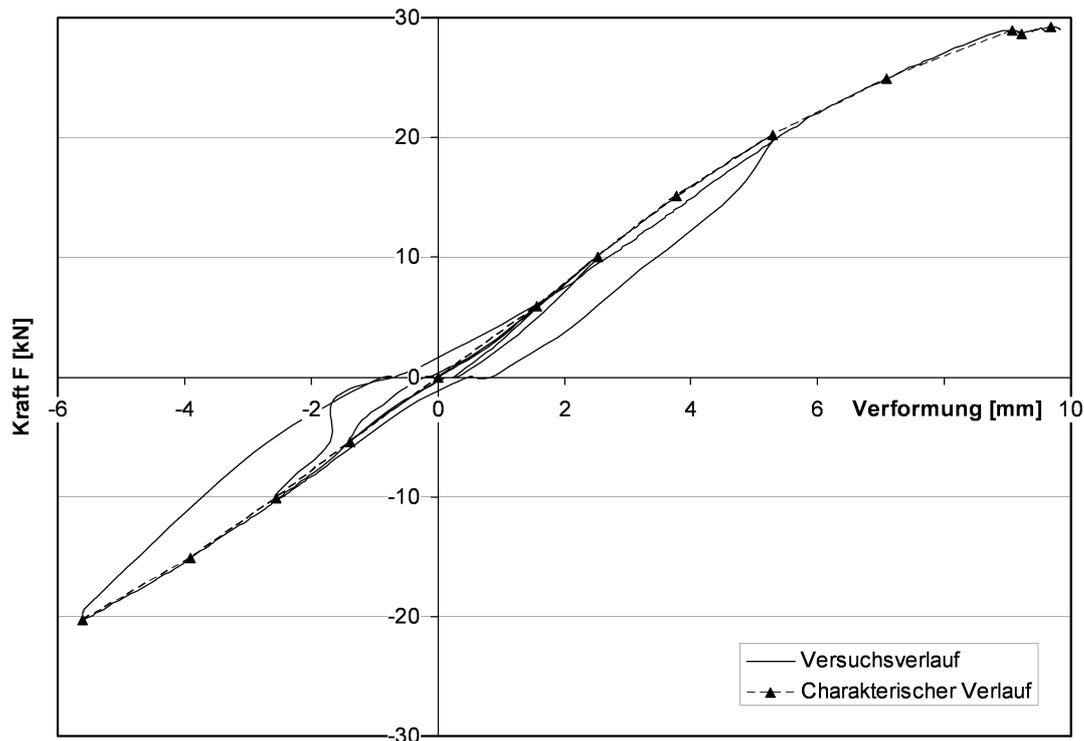
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 500$  mm

### A.2.3.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsanordnung wurde mit einer wechselseitigen Belastung verformt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.9 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.

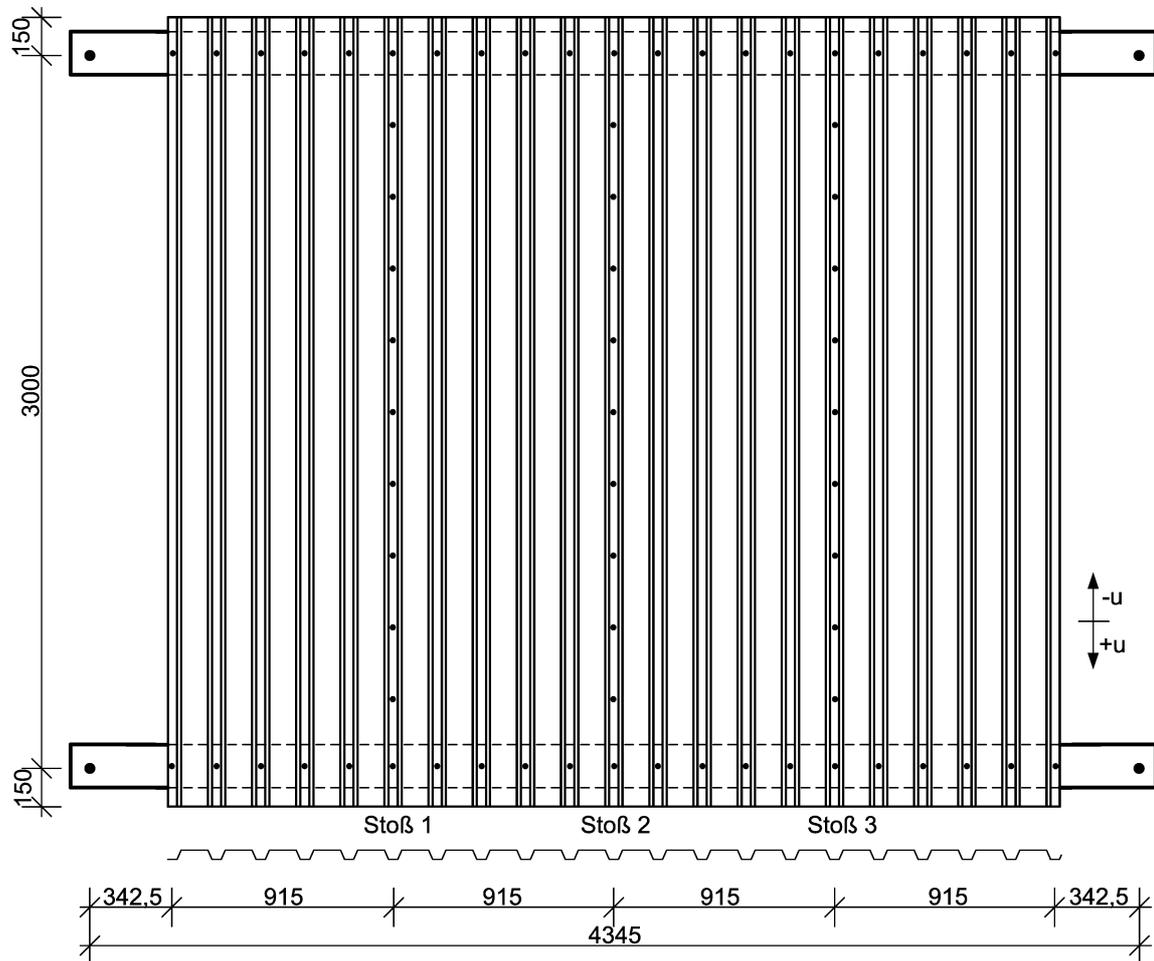


**Bild A.9** Last-Verformungsverlauf Versuch 1.3

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Das Versagen der Versuchsanordnung erfolgte durch das Abscheren aller Niete des Blechstoßes 3. Die vorhandene Unstetigkeit im Versuchsverlauf bei ca. 28,8 kN zeigt das Abscheren des ersten Nietes. Die Belastung wurde danach noch fortgesetzt bis schließlich der gesamte Stoß versagte. Es wurde eine Versagenslast von  $F = 29,2$  kN mit einer zugehörigen Verformung von 9,7 mm in Trägermitte festgestellt. An den Setzbolzen auf den Querträgern konnten ausgeprägte Langlochbildungen festgestellt werden, welche an den äußeren Setzbolzen erwartungsgemäß größer waren. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3 mm. Am nicht abgekanteten Blechrand kam es wie bei den beiden vorangegangenen Versuchen zu Beulerscheinungen vor den Verbindungsmitteln, siehe hierzu Bild A.5.

## A.2.4 Versuch 2.1

### A.2.4.1 Versuchsanordnung



**Bild A.10** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3300$  mm

Querrandverbinder:

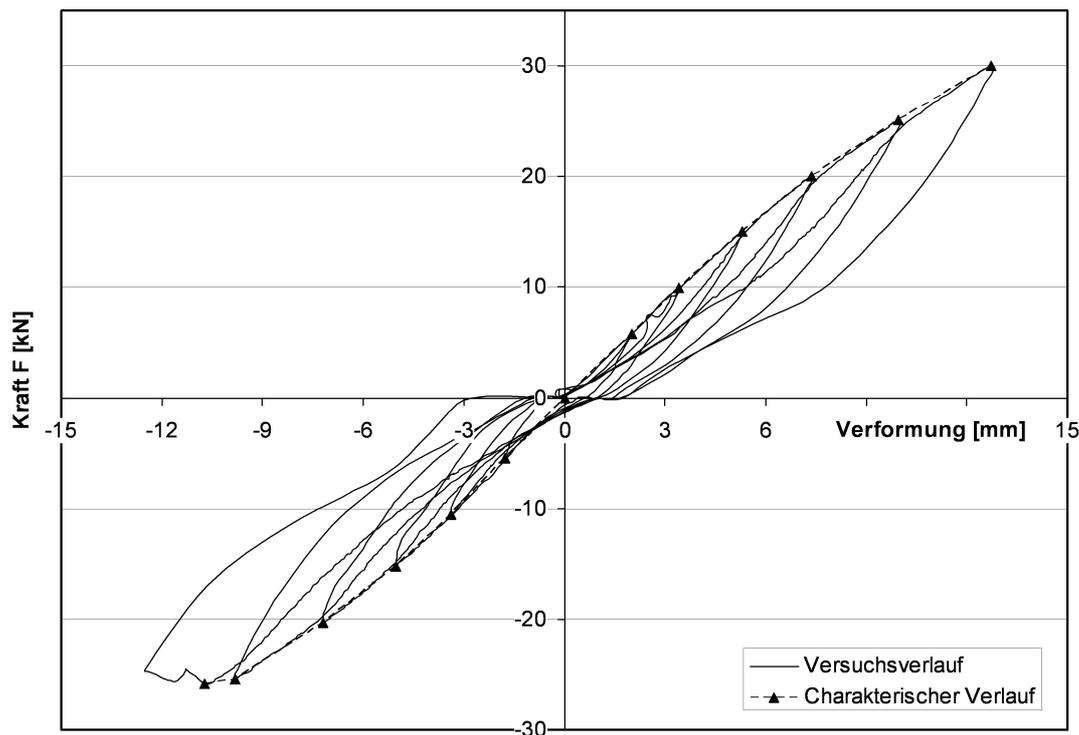
Bohrschrauben EJOT-JT2-8-5,5-V16 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.4.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsanordnung wurde mit einer wechselseitigen Belastung verformt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.11 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Der Verlauf zeigt keinen so deutlichen Übergang von einem linearen in ein nichtlineares Verformungsverhalten wie im Versuch 1. Die Ursache hierfür liegt in der weichen und nachgiebigen Neoprenunterlegscheibe der Bohrschrauben. Der Aufbau großer Reibungskräfte kann so nicht erfolgen.



**Bild A.11** Last-Verformungsverlauf Versuch 2.1

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Das Versagen der Versuchsanordnung erfolgte durch das Abscheren aller Niete des Blechstoßes 1. Es wurde eine Versagenslast von  $F = -25,8$  kN mit einer zugehörigen Verformung von  $-10,7$  mm in Trägermitte festgestellt. Der Versuch erreichte zunächst eine Last von  $F = 30$  kN bevor er bei entgegengesetzter Last bereits vor diesem Wert versagte. An den Schrauben auf den Querträgern konnten ausgeprägte Langlochbildungen festgestellt werden, welche an den äußeren Befestigungsmitteln erwartungsgemäß größer waren, siehe hierzu auch Bild A.13. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3mm. Eine Fotografie des durchgeführten Versuches kann Bild A.12 entnommen werden.

Am nicht abgekanteten Blechrand kam es wie bei den vorangegangenen Versuchen zu Beulerscheinungen vor den Verbindungsmitteln, siehe hierzu Bild A.5.



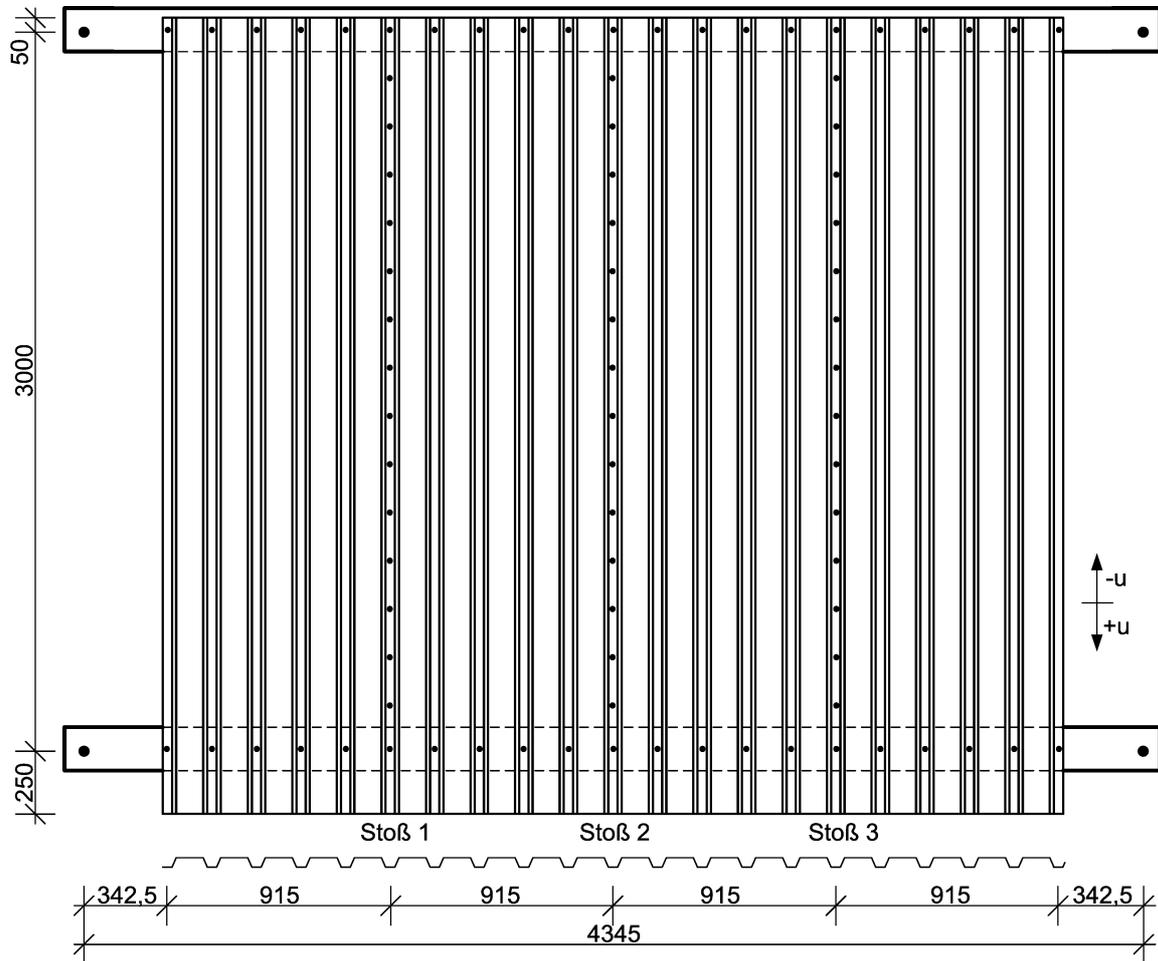
**Bild A.12** Versuchsaufbau Versuch 3.1



**Bild A.13** Langlochbildung infolge des Versuchs

## A.2.5 Versuch 2.2

### A.2.5.1 Versuchsanordnung



**Bild A.14** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3300$  mm

Querrandverbinder:

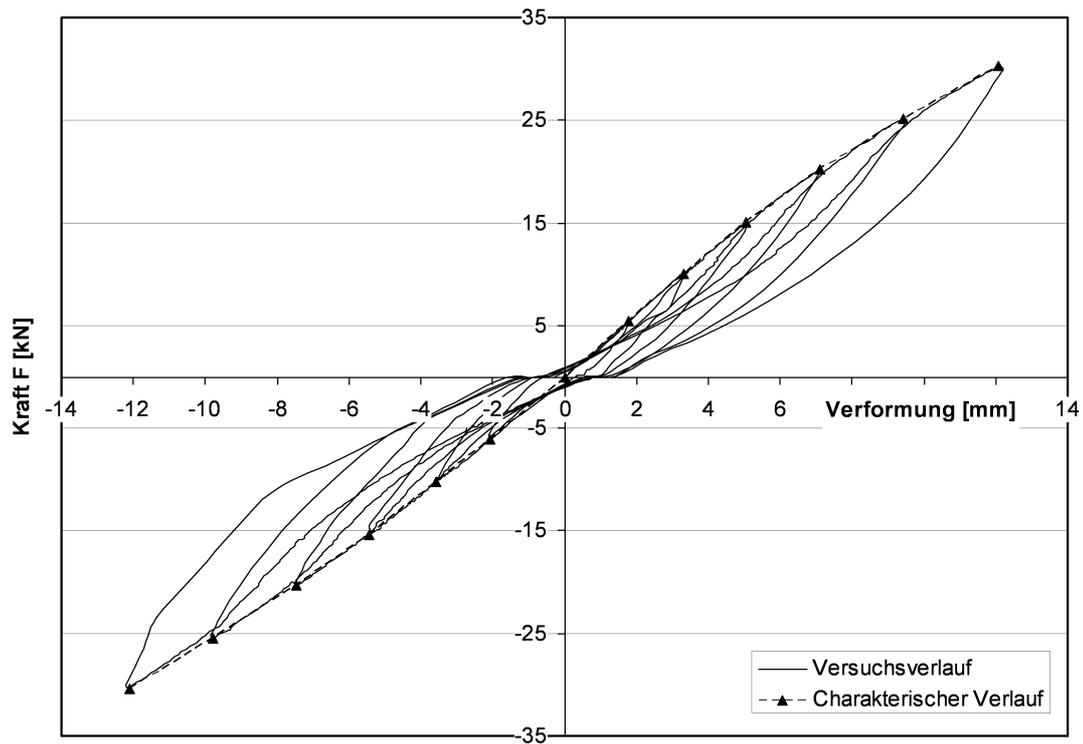
Bohrschrauben EJOT-JT2-8-5,5-V16 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 200$  mm

### A.2.5.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsanordnung wurde mit einer wechselseitigen Belastung verformt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.15 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Das Verformungsverhalten zeigt die gleichen Charakteristiken wie Versuch 2.1. Nichtlineare Verformungsanteile sind deutlich erkennbar.



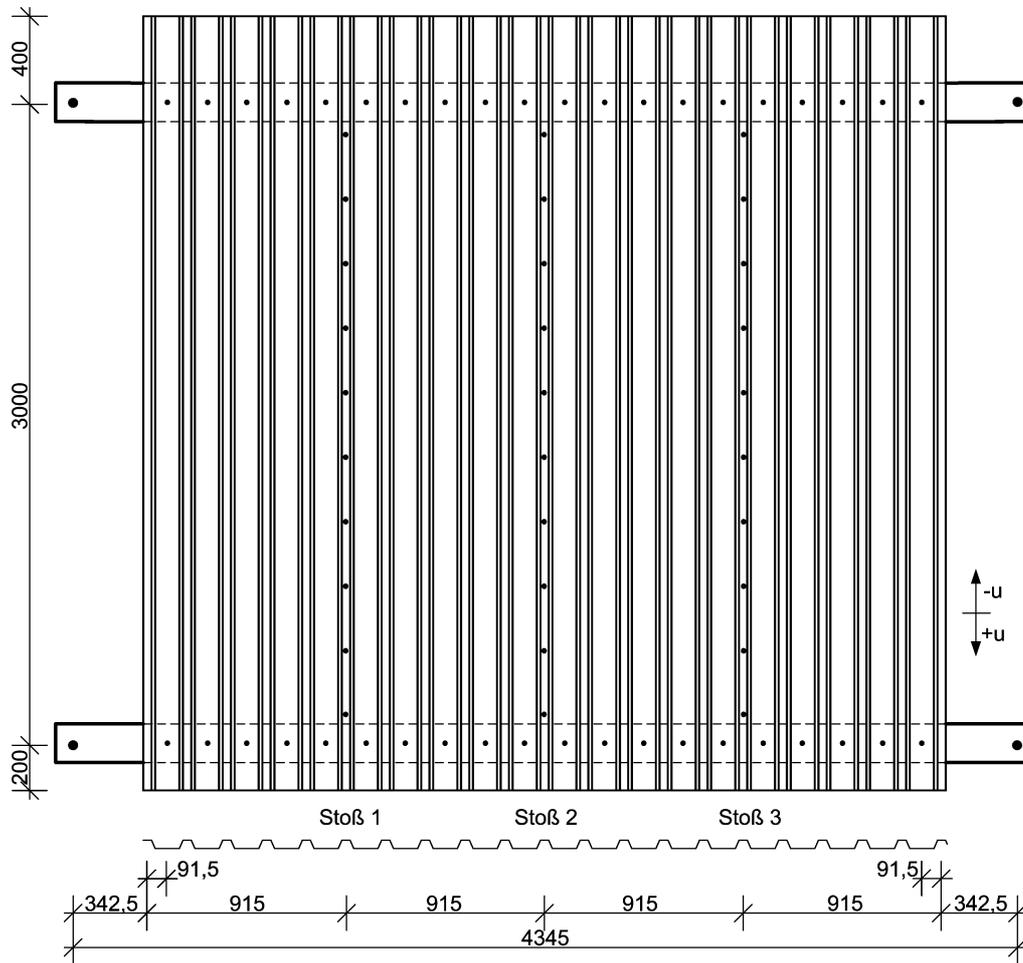
**Bild A.15** Last-Verformungsverlauf Versuch 2.2

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Der Versuch wurde nach einer beidseitigen Belastung von 30 kN abgebrochen. Zu diesem Zeitpunkt war bereits eine deutliche Langlochbildung aufgetreten, was als Versagen der Konstruktion gewertet wurde. Die Versagenslast kann mit ca. 30 kN und einer zugehörigen Verformung von 12,1 mm in Trägermitte festgestellt werden. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3 mm.

Am nicht abgekanteten Blechrand kam es abermals zu Beulerscheinungen vor den Verbindungsmitteln, siehe hierzu Bild A.5.

## A.2.6 Versuch 3.1

### A.2.6.1 Versuchsanordnung



**Bild A.16** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Negativlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

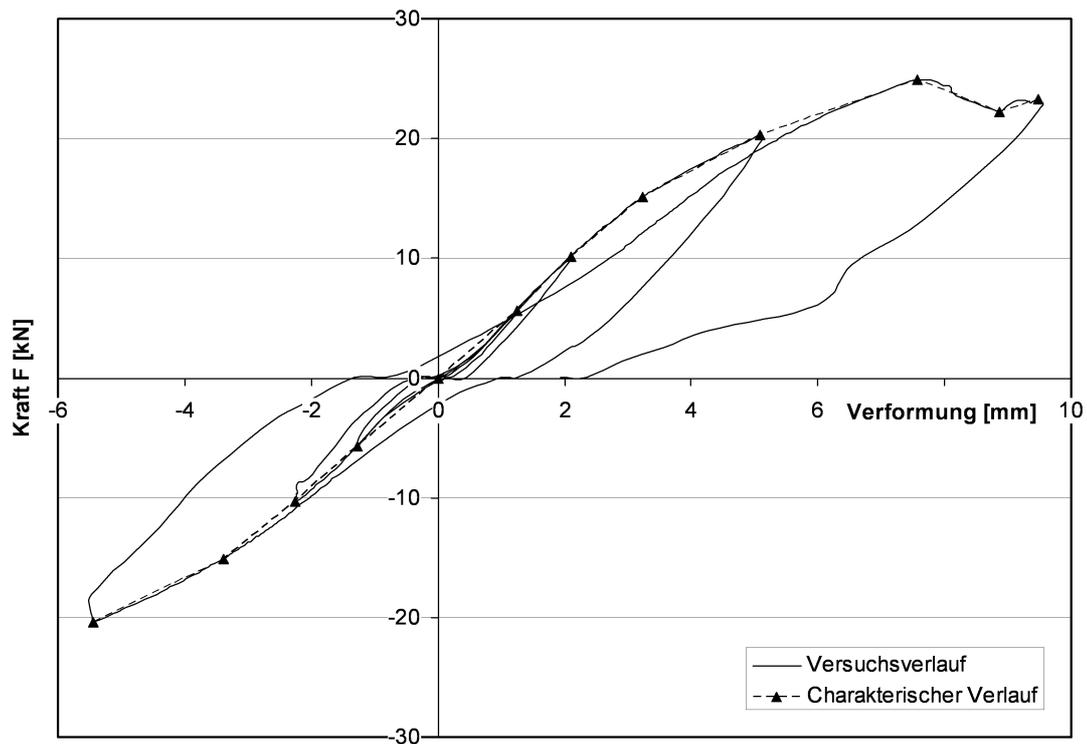
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.6.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsanordnung wurde mit einer wechselseitigen Belastung verformt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.17 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.

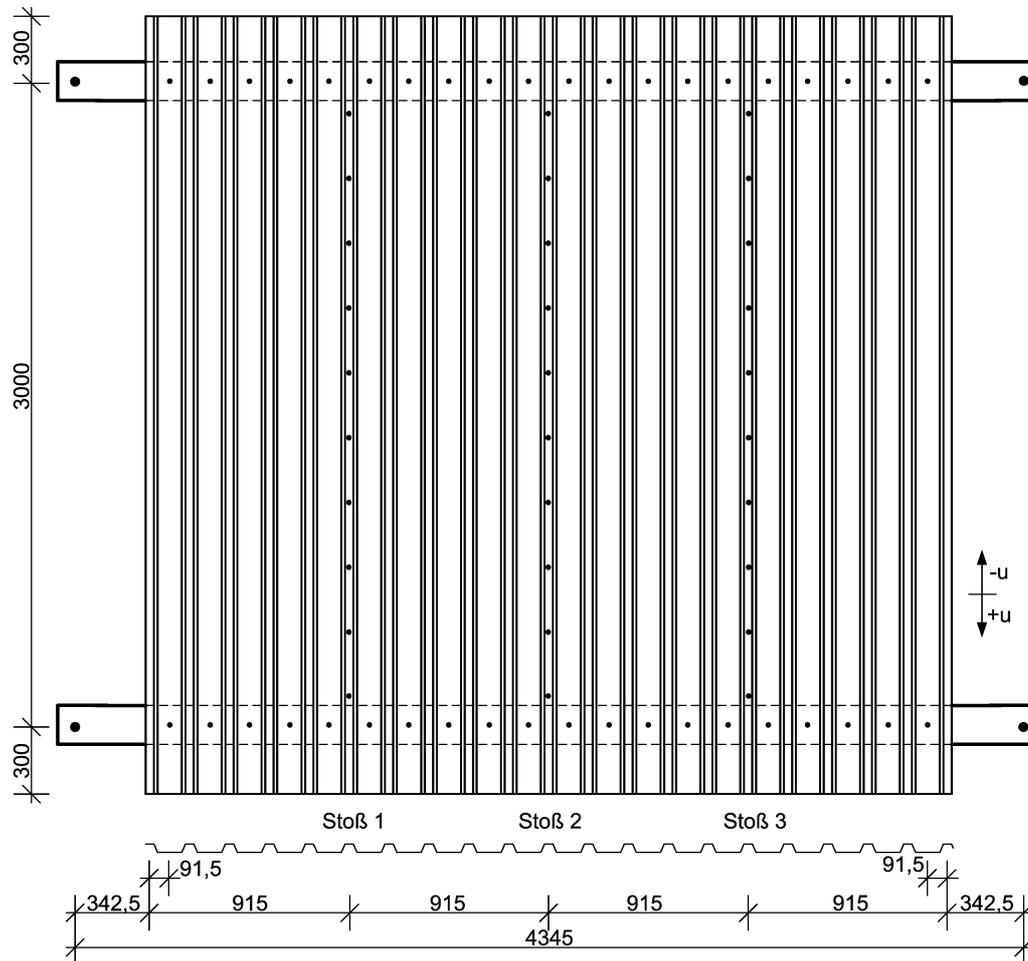


**Bild A.17** Last-Verformungsverlauf Versuch 3.1

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Das Versagen der Versuchsanordnung erfolgte durch das Abscheren aller Nieten der Blechstöße 1 und 3. Alle Nieten versagten gleichzeitig. Es wurde eine Versagenslast von  $F = 24,9$  kN mit einer zugehörigen Verformung von 7,6 mm in Trägermitte festgestellt. An den Setzbolzen auf den Querträgern konnten wieder ausgeprägte Langlochbildungen festgestellt werden. Wobei die längsten wieder an den äußeren Sicken auftraten. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3mm.

## A.2.7 Versuch 3.2

### A.2.7.1 Versuchsanordnung



**Bild A.18** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Negativlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

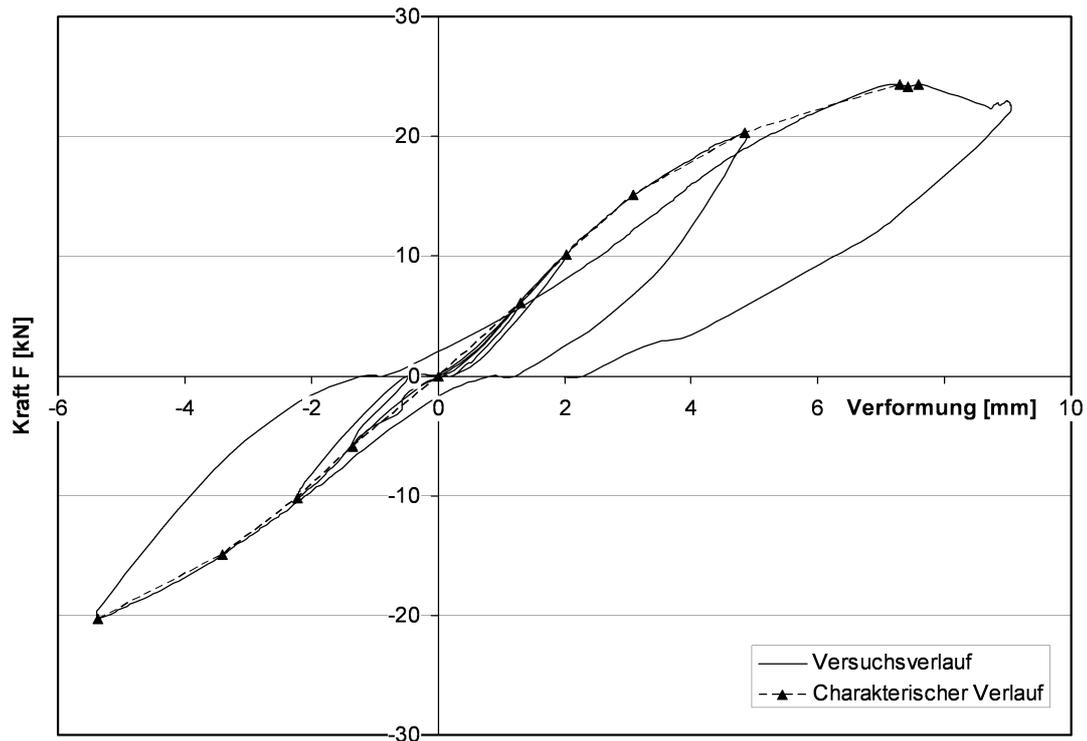
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.7.2 Versuchsergebnisse

In diesem Versuch wurde die Anordnung einer wechselseitigen Belastung unterzogen. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.19 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.

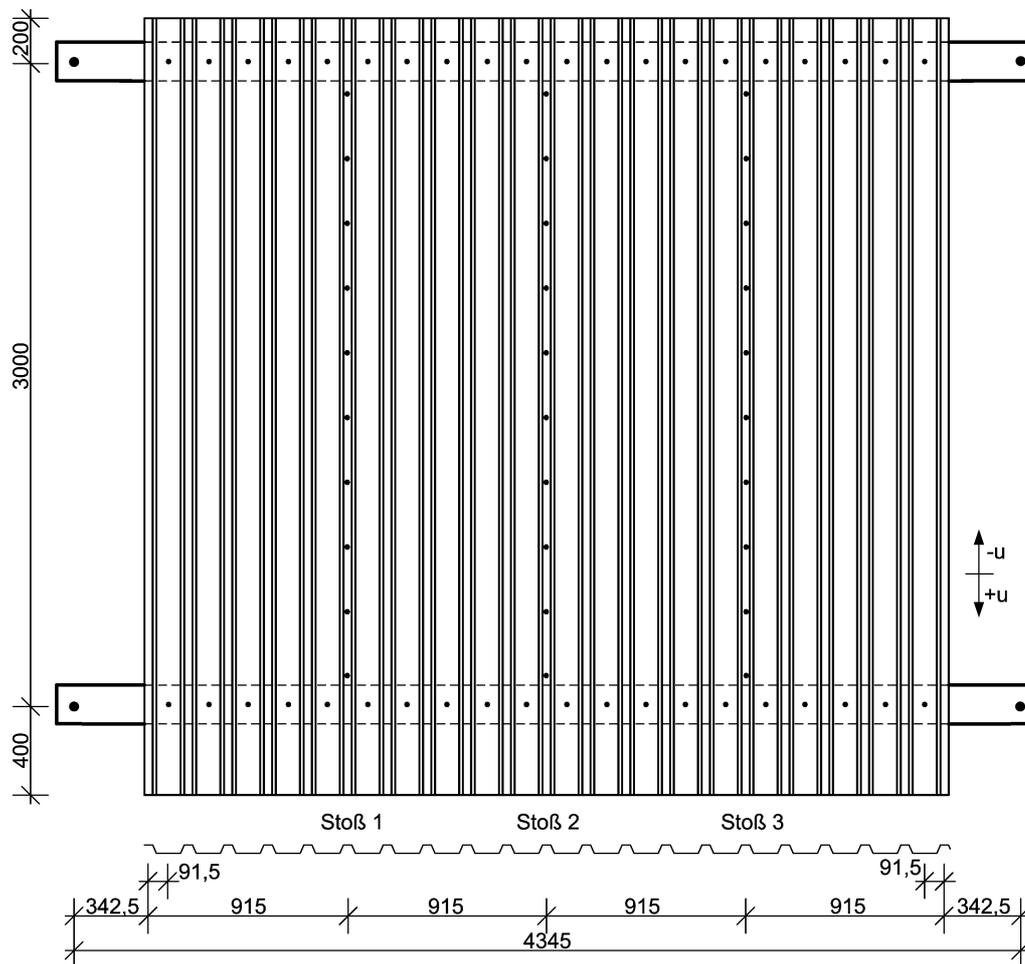


**Bild A.19** Last-Verformungsverlauf Versuch 3.2

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Das Versagen der Versuchsanordnung erfolgte durch das gleichzeitige Abscheren aller Nieten der Blechstöße 1 und 3. Es wurde eine Versagenslast von  $F = 24,4$  kN mit einer zugehörigen Verformung von 7,3 mm in Trägermitte festgestellt. An den Setzbolzen auf den Querträgern wurden ausgeprägte Langlöcher festgestellt. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3mm und traten an den äußeren Setzbolzen auf.

## A.2.8 Versuch 3.3

### A.2.8.1 Versuchsanordnung



**Bild A.20** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

4 Tafeln HSA 39/183 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Negativlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

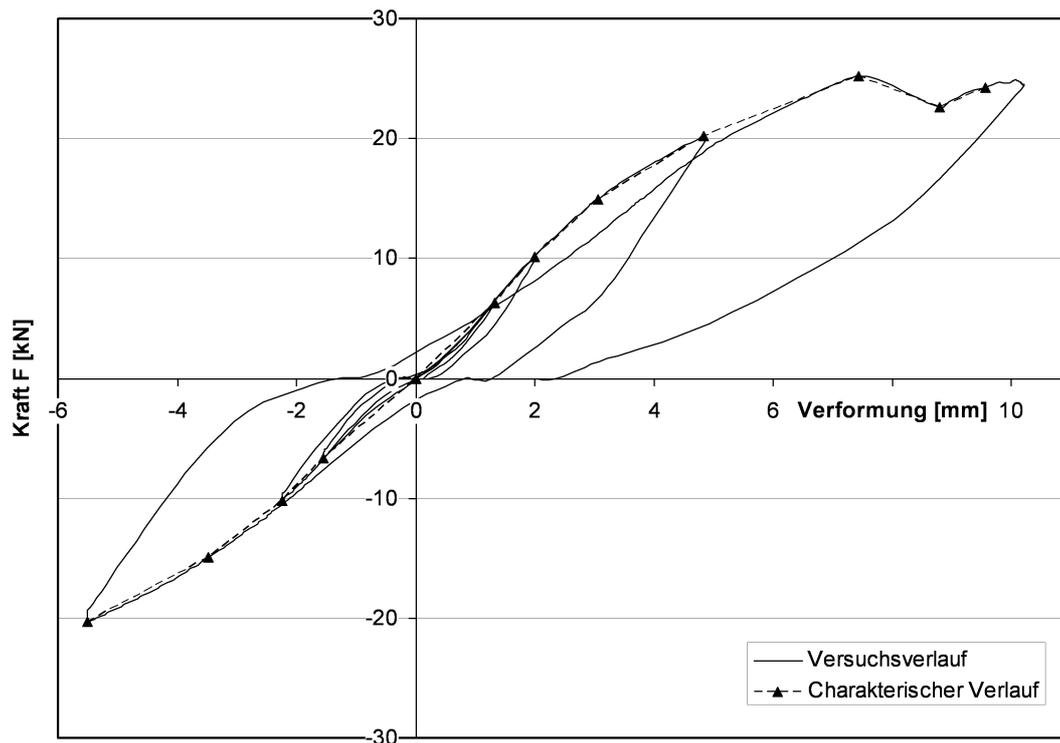
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.8.2 Versuchsergebnisse

In dem Versuch wurde die Anordnung einer wechselseitigen Beanspruchung unterzogen. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.21 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.



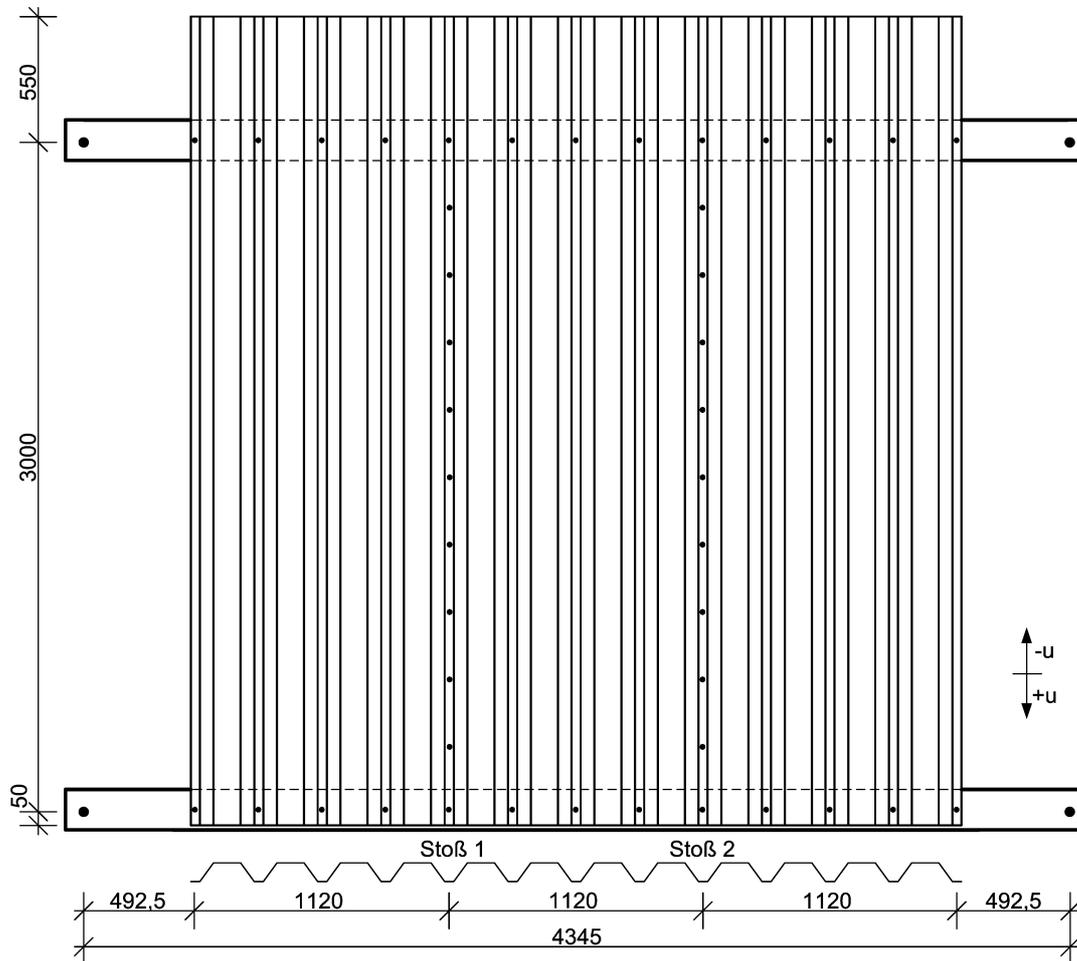
**Bild A.21** Last-Verformungsverlauf Versuch 3.3

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Das Versagen der Versuchsanordnung erfolgte durch das Abscheren aller Niete der Blechstöße 1 und 3. Es wurde eine Versagenslast von  $F = 25,2$  kN mit einer zugehörigen Verformung von 7,4 mm in Trägermitte festgestellt. An den Setzbolzen auf den Querträgern konnten ausgeprägte Langlochbildungen festgestellt werden, welche an den äußeren Setzbolzen erwartungsgemäß größer waren. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3 mm.

Nach dem Versagen der Nieteinstöße wurde noch einmal die Belastung fortgesetzt. Daraus resultiert die Unstetigkeit im positiven Lastbereich.

## A.2.9 Versuch 4.1

### A.2.9.1 Versuchsanordnung



**Bild A.22** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

3 Tafeln UB 85/280 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

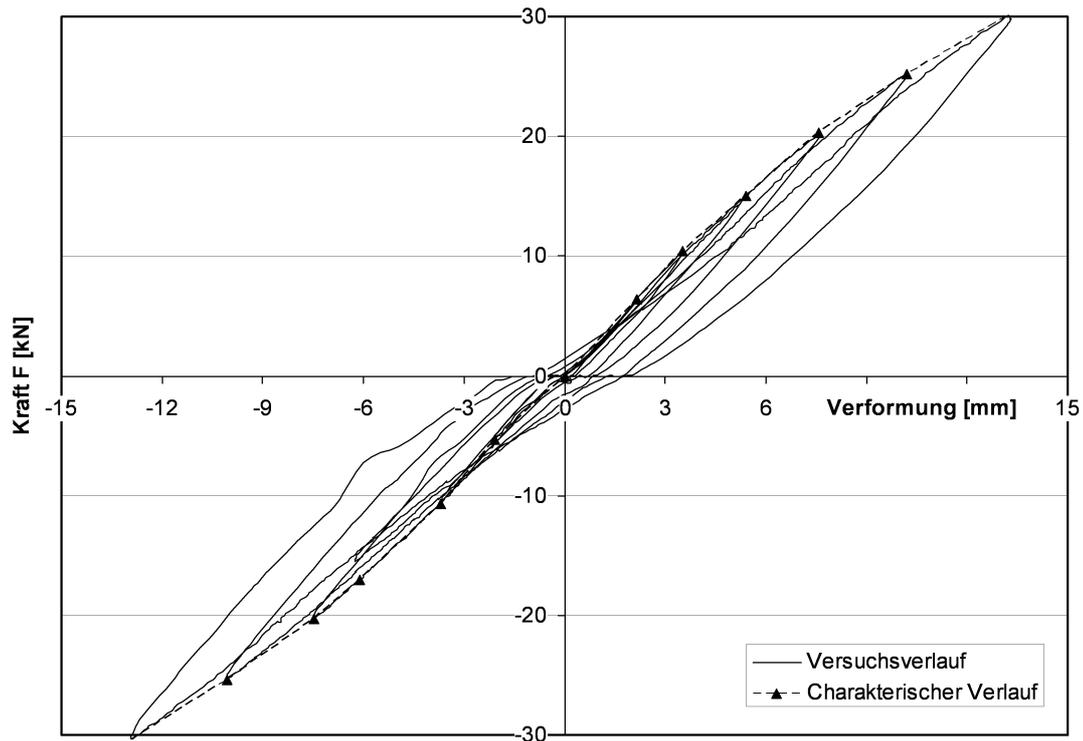
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.9.2 Versuchsergebnisse

In diesem Versuch wurde die Anordnung einer wechselseitigen Belastung ausgesetzt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.23 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastifizierungseffekten.



**Bild A.23** Last-Verformungsverlauf Versuch 4.1

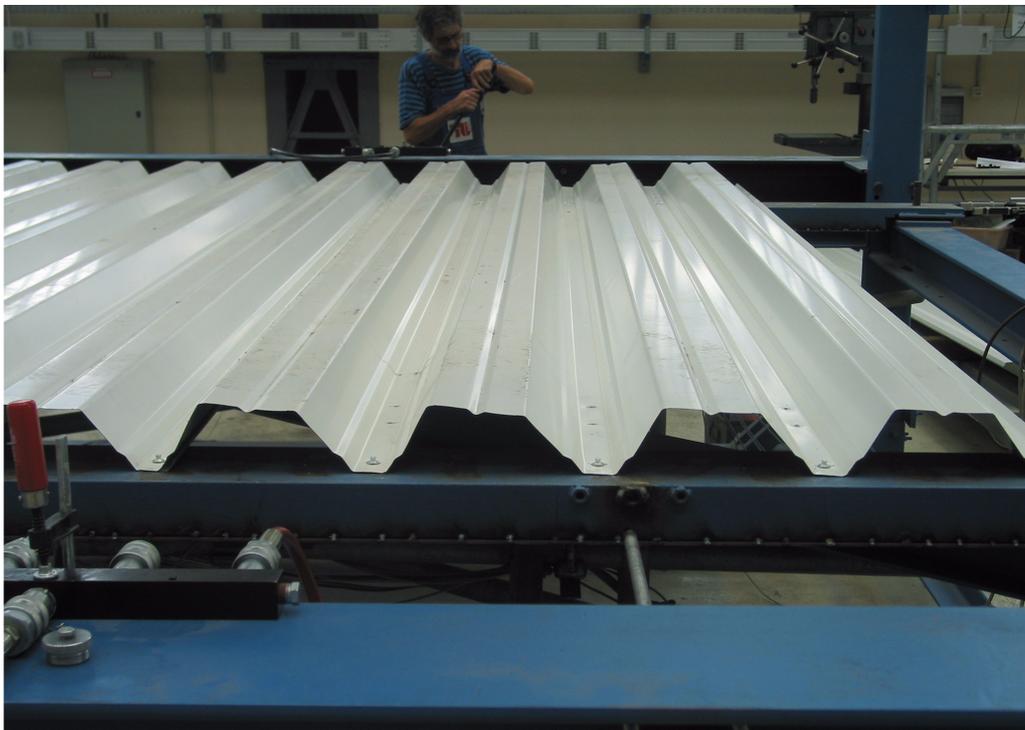
Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Der Versuch wurde nach einer Belastung bis 30 kN in jeder Lastrichtung abgebrochen. Zu diesem Zeitpunkt konnten bereits deutliche Langlochbildungen an den äußeren Bolzenverbindungen festgestellt werden. Ihre Länge betrug deutlich mehr als 3 mm. Die Versagenslast wird für diesen Fall mit 30 kN festgestellt. Die zugehörige Verformung beträgt in beiden Lastrichtungen 13,2 mm in Trägermitte.

Am nicht abgekanteten Blechrand kam es zu Beulerscheinungen vor den Verbindungsmitteln. Im Bild A.24 ist ein verschobener Setzbolzen mit einer sich bildenden Beule dargestellt. Die Abbildung ist charakteristisch für die Verbindungsmittel.

Bei dem weichen Profil ist unter Belastung auch die Profilendverformung deutlich sichtbar. Es kommt zu der erwarteten symmetrischen Verformung über den Träger, siehe Bild A.25.



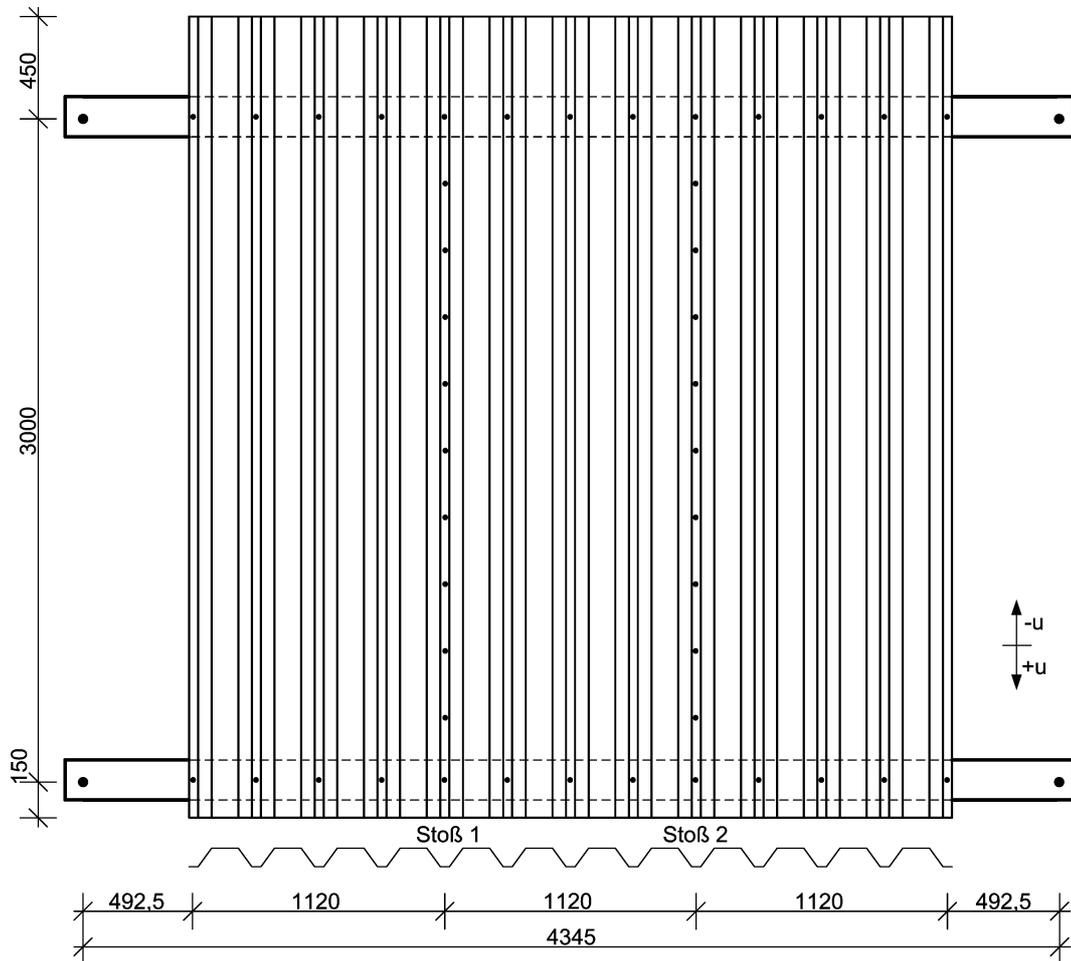
**Bild A.24** Verschobener Setbolzen mit Beule



**Bild A.25** Verformter Blechrand unter Last

## A.2.10 Versuch 4.2

### A.2.10.1 Versuchsanordnung



**Bild A.26** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

3 Tafeln UB 85/280 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

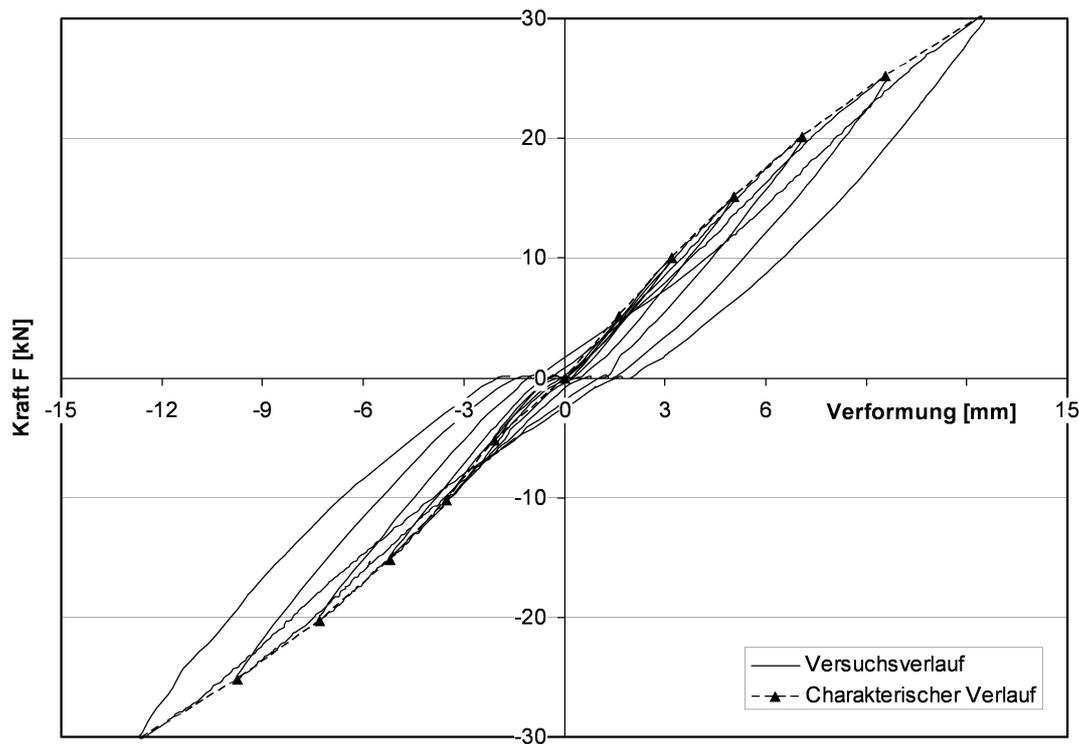
Setzbolzen Hilti ENP 19L15 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.10.2 Versuchsergebnisse

Der Versuchsaufbau wurde in diesem Versuch einer wechselseitigen Belastung ausgesetzt. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.27 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.



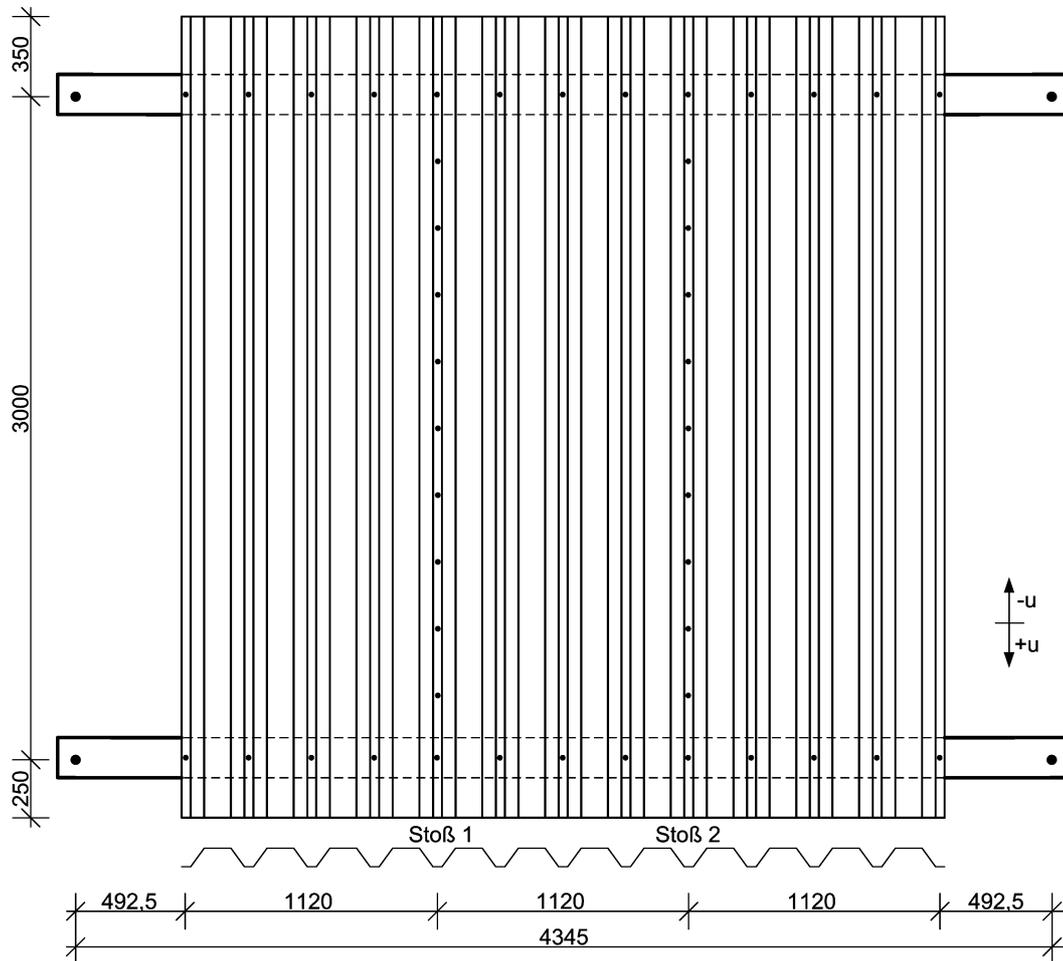
**Bild A.27** Last-Verformungsverlauf Versuch 4.2

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Der Versuch wurde nach einer Belastung bis 30 kN in jeder Lastrichtung abgebrochen. Zu diesem Zeitpunkt konnten bereits deutliche Langlochbildungen an den äußeren Bolzenverbindungen festgestellt werden. Ihre Länge betrug deutlich mehr als 3 mm. Die Versagenslast wird für diesen Fall mit 30 kN festgestellt. Die zugehörige Verformung beträgt in beiden Lastrichtungen 12,5 mm in Trägermitte.

Am nicht abgekanteten Blechrand kam es zu Beulerscheinungen vor den Verbindungsmitteln, siehe Bild A.24. Wie im Versuch 4.1 kam es zu einer deutlichen symmetrischen Biegelinie der Blechränder.

## A.2.11 Versuch 5.1

### A.2.11.1 Versuchsanordnung



**Bild A.28** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

3 Tafeln UB 85/280 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

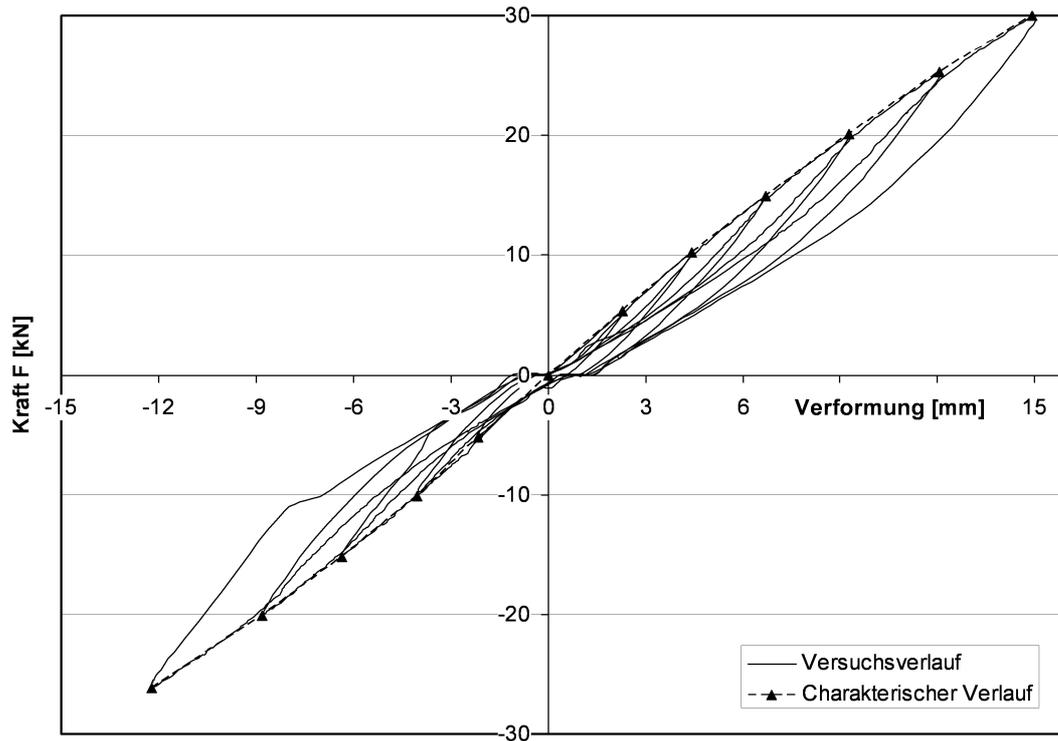
Bohrschrauben EJOT-JT2-8-5,5-V16 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.11.2 Versuchsergebnisse

In dem Versuch wurde die Anordnung einer wechselseitigen Belastung unterzogen. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.29 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.



**Bild A.29** Last-Verformungsverlauf Versuch 5.1

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Der Versuch wurde bis zu einer Last von 30 kN belastet und anschließend abgebrochen. Es waren bereits deutliche Langlochbildungen zu erkennen, was als Versagen gewertet wurde. Es wurde eine Versagenslast von  $F = 30$  kN mit einer zugehörigen Verformung von 14,9 mm in Trägermitte festgestellt. An den Schrauben auf den Querträgern konnten ausgeprägte Langlochbildungen festgestellt werden, welche an den äußeren Schrauben erwartungsgemäß größer waren. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3 mm.

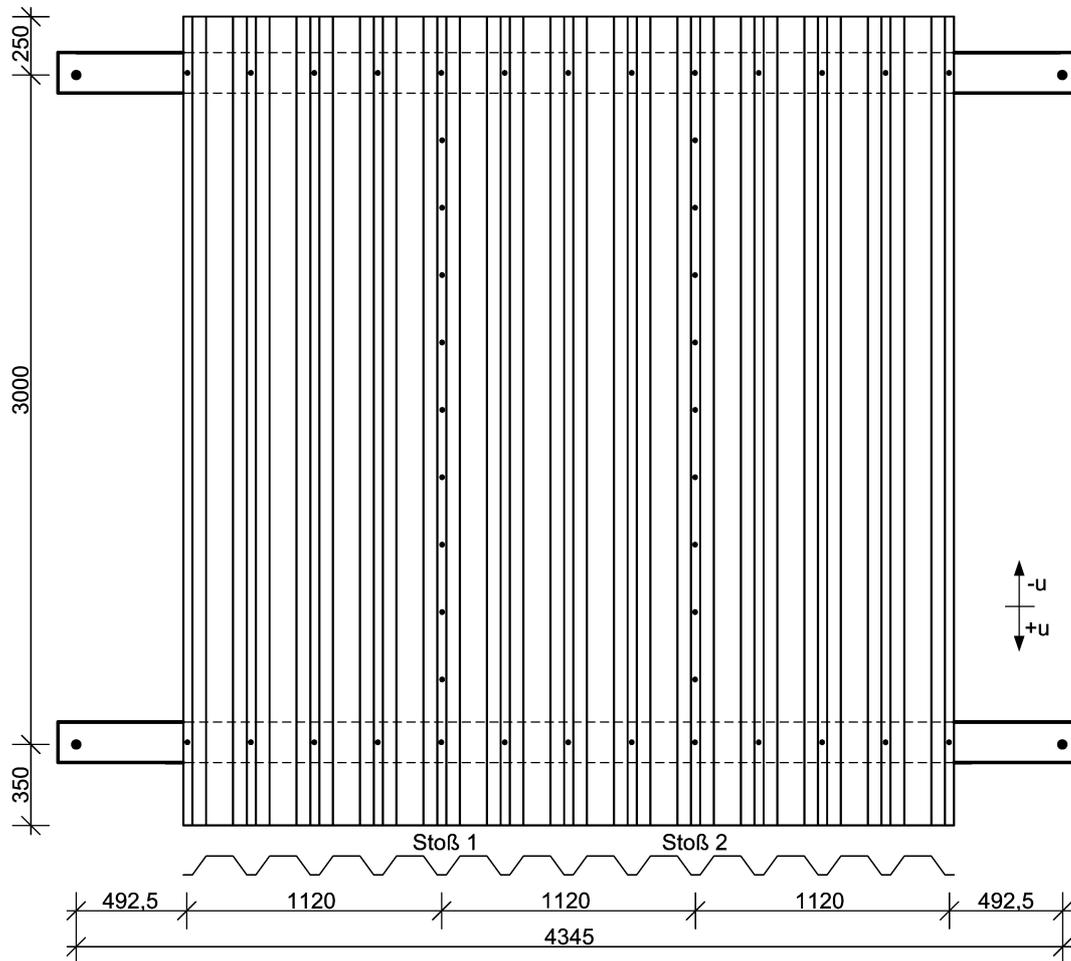
Am nicht abgekanteten Blechrand kam es zu Beulerscheinungen vor den Verbindungsmitteln, siehe hierzu Bild A.30. In dem Bild ist gut zu erkennen, wie sich die Neoprenunterlegscheibe bei einer Verschiebung unter dem Schraubenkopf herausgedrückt wird.



**Bild A.30** Bohrschraube mit herausgepresster Neoprenscheibe und Beule

## A.2.12 Versuch 5.2

### A.2.12.1 Versuchsanordnung



**Bild A.31** Geometrische Abmessungen und Verbindungsmittelanordnung

Trapezprofil:

3 Tafeln UB 85/280 von Arcelor

Blechdicke  $t = 0,75$  mm

Einbau in Positivlage

Blechlänge  $l = 3600$  mm

Querrandverbinder:

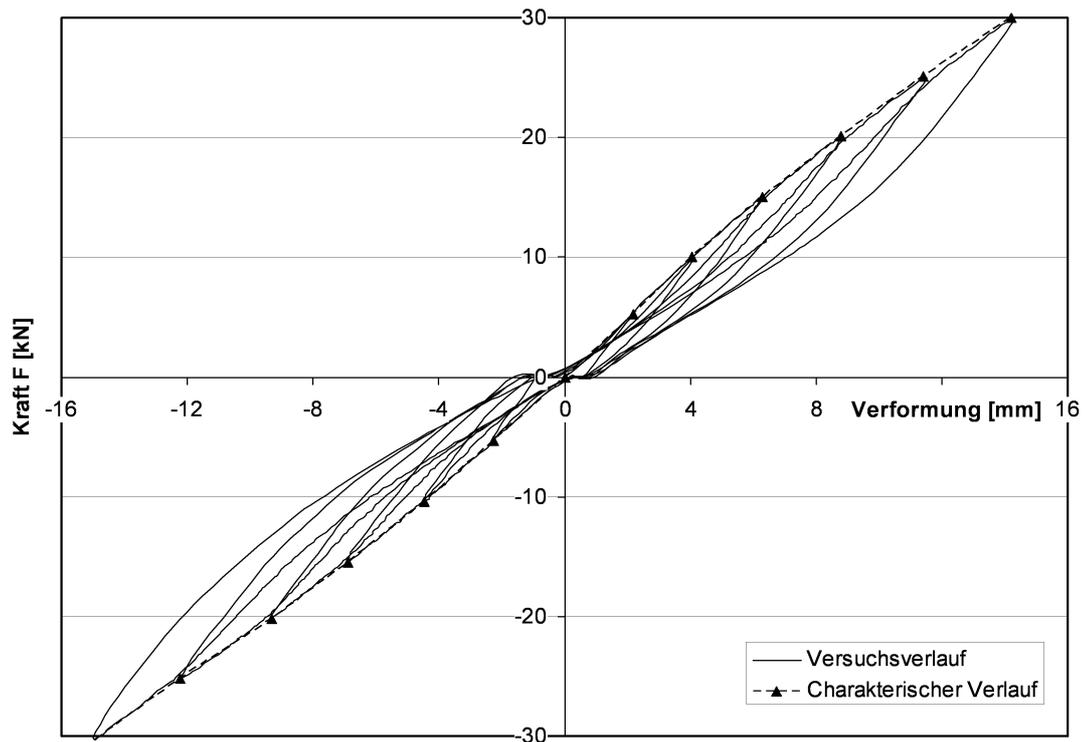
Bohrschrauben EJOT-JT2-8-5,5-V16 in jeder Sicke

Blechstoßverbinder:

Blindniet EJOT  $\varnothing 4,8$  aus Stahl Abstand  $e = 300$  mm

### A.2.12.2 Versuchsergebnisse

Es wurde eine wechselseitige Belastung auf die Konstruktion aufgebracht. Die Lastzyklen können dem Last-Verformungsverlauf in Bild A.32 entnommen werden. Dargestellt ist die gemittelte Verformung beider Randträger in Trägermitte. Die bleibenden Verformungen im nichtlinearen Bereich resultieren aus Reibungs- und Plastizierungseffekten.



**Bild A.32** Last-Verformungsverlauf Versuch 5.2

Der dargestellte Verlauf ist nicht um die Effekte aus Auflagernachgiebigkeiten bereinigt. Der Versuch wurde wechselseitig bis zu einer Belastung von jeweils  $F = 30$  kN und einer zugehörigen Verformung von 14,2 mm in Trägermitte beansprucht. Dann wurde der Versuch abgebrochen, da es bereits zu deutlichen Langlochbildungen vor allem an den äußeren Verbindungsmitteln gekommen war. Dies wurde als Versagen gewertet. Die Langlöcher erreichten eine Länge von deutlich mehr als 3mm.

Am nicht abgekanteten Blechrand kam es zu Beulerscheinungen, siehe auch Bild A.30. Die Verformung des Blechrandes war ebenfalls deutlich zu erkennen.



## Anhang B - Parameterstudien

### B.1 Parameterrechnungen Profil 39/183

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Profil HSA 39/183 in tabellarischer Form dargestellt. In den ersten Spalten sind die Werte der einzelnen Variablen und in den weiteren Spalten die errechneten Steifigkeiten der Berechnungen am Faltenwerk  $S_{E2n}$  mit den zugehörigen Ergebnissen der vereinfachten Stabwerksrechnung  $S_{Stab}$  für die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  zusammengestellt.

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	549	2	28,57	0,56	3210	3002	3895	3636	4396	4116	5117	4824
150	549	2	28,57	2	3670	3381	4596	4202	5312	4849	6404	5844
150	549	2	28,57	5,7	3849	3540	4883	4450	5700	5181	6980	6331
150	549	2	66,7	0,56	4048	3778	5195	4817	6123	5633	7618	7056
150	549	2	66,7	2	4552	4186	6043	5479	7323	6546	9532	8469
150	549	2	66,7	5,7	4783	4394	6458	5838	7942	7062	10608	9336
150	549	2	100	0,56	4393	4000	5781	5207	6959	6145	8972	7987
150	549	2	100	2	4874	4396	6617	5863	8178	7069	11028	9468
150	549	2	100	5,7	5113	4613	7064	6247	8870	7632	12314	10464
150	549	4	28,57	0,56	6372	5997	7084	6648	7555	7105	8189	7717
150	549	4	28,57	2	7592	7002	8620	7896	9323	8537	10292	9417
150	549	4	28,57	5,7	8037	7379	9199	8379	10002	9102	11126	10106
150	549	4	66,7	0,56	8572	8163	9928	9394	10896	10210	12307	11564
150	549	4	66,7	2	10389	9656	12405	11380	13911	12573	16195	14575
150	549	4	66,7	5,7	11144	10316	13492	12302	15288	13704	18077	16097
150	549	4	100	0,56	9531	8845	11258	10379	12542	11329	14497	13232
150	549	4	100	2	11535	10449	14079	12572	16059	13968	19205	16723
150	549	4	100	5,7	12415	11198	15402	13657	17791	15316	21704	18643
150	549	6	28,57	0,56	7948	7736	8568	8282	8981	8668	9552	9179
150	549	6	28,57	2	9320	8943	10175	9673	10753	10194	11566	10892
150	549	6	28,57	5,7	9788	9364	10734	10166	11377	10742	12288	11518
150	549	6	66,7	0,56	10929	11033	12173	12150	13058	12834	14373	14036
150	549	6	66,7	2	13232	13161	15048	14736	16373	15729	18390	17474
150	549	6	66,7	5,7	14112	14022	16187	15818	17721	16964	20091	18997
150	549	6	100	0,56	12209	12113	13815	13579	14994	14364	16817	16154
150	549	6	100	2	14889	14528	17249	16595	19033	17759	21864	20346
150	549	6	100	5,7	15964	15555	18692	17936	20788	19299	24176	22355
150	732	2	28,57	0,56	3392	3304	4151	4051	4713	4626	5532	5487
150	732	2	28,57	2	3940	3780	5001	4783	5840	5593	7150	6874
150	732	2	28,57	5,7	4155	3984	5355	5113	6330	6048	7902	7572
150	732	2	66,7	0,56	4155	4052	5355	5224	6332	6163	7917	7817
150	732	2	66,7	2	4731	4539	6334	6036	7730	7308	10184	9648
150	732	2	66,7	5,7	4997	4793	6820	6487	8467	7976	11501	10823
150	732	2	100	0,56	4469	4263	5895	5606	7108	6677	9190	8781
150	732	2	100	2	5011	4732	6844	6400	8502	7820	11569	10670
150	732	2	100	5,7	5283	4991	7358	6874	9307	8536	13101	11993
150	732	4	28,57	0,56	7261	7133	8151	8004	8745	8615	9544	9441
150	732	4	28,57	2	8945	8627	10326	9918	11288	10854	12636	12165
150	732	4	28,57	5,7	9584	9216	11187	10703	12324	11798	13946	13359
150	732	4	66,7	0,56	9359	9342	10918	10885	12038	11934	13667	13651
150	732	4	66,7	2	11701	11409	14187	13729	16078	15400	18988	18200
150	732	4	66,7	5,7	12711	12367	15693	15130	18034	17178	21759	20704
150	732	4	100	0,56	10257	10026	12186	11903	13625	13115	15810	15457
150	732	4	100	2	12781	12206	15814	14980	18213	16913	22071	20627
150	732	4	100	5,7	13929	13269	17598	16592	20606	18991	25644	23724
150	732	6	28,57	0,56	9556	9663	10369	10439	10906	10980	11643	11694
150	732	6	28,57	2	11661	11653	12880	12787	13706	13591	14864	14676
150	732	6	28,57	5,7	12414	12388	13803	13675	14754	14596	16100	15852
150	732	6	66,7	0,56	12595	13227	14102	14716	15164	15650	16723	17229

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	C <sub>S</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
150	732	6	66,7	2	15907	16498	18312	18807	20074	20318	22753	22892
150	732	6	66,7	5,7	17239	17909	20090	20652	22221	22482	25527	25652
150	732	6	100	0,56	13871	14368	15759	16262	17135	17332	19232	19600
150	732	6	100	2	17640	18009	20676	20940	22980	22709	26624	26376
150	732	6	100	5,7	19232	19659	22879	23183	25713	25365	30315	29963
150	1006,5	2	28,57	0,56	3510	3564	4318	4421	4922	5090	5811	6110
150	1006,5	2	28,57	2	4125	4138	5286	5328	6220	6315	7708	7926
150	1006,5	2	28,57	5,7	4369	4389	5697	5750	6798	6914	8620	8887
150	1006,5	2	66,7	0,56	4198	4276	5416	5569	6409	6627	8024	8507
150	1006,5	2	66,7	2	4823	4839	6484	6531	7942	8011	10533	10795
150	1006,5	2	66,7	5,7	5114	5137	7021	7078	8764	8844	12032	12330
150	1006,5	2	100	0,56	4481	4475	5906	5939	7116	7134	9189	9488
150	1006,5	2	100	2	5064	5011	6926	6868	8618	8498	11763	11810
150	1006,5	2	100	5,7	5358	5312	7485	7433	9497	9376	13459	13504
150	1006,5	4	28,57	0,56	8052	8316	9120	9460	9840	10268	10813	11375
150	1006,5	4	28,57	2	10243	10467	12025	12320	13296	13696	15109	15683
150	1006,5	4	28,57	5,7	11109	11363	13237	13578	14793	15265	17071	17766
150	1006,5	4	66,7	0,56	9991	10500	11723	12396	12971	13719	14786	15864
150	1006,5	4	66,7	2	12846	13265	15790	16345	18069	18664	21626	22583
150	1006,5	4	66,7	5,7	14123	14612	17757	18423	20687	21413	25468	26684
150	1006,5	4	100	0,56	10808	11161	12894	13412	14450	14922	16805	17757
150	1006,5	4	100	2	13815	14020	17290	17586	20075	20222	24599	25201
150	1006,5	4	100	5,7	15230	15481	19551	19915	23173	23354	29377	30132
150	1006,5	6	28,57	0,56	11192	11917	12233	13026	12920	13792	13852	14808
150	1006,5	6	28,57	2	14267	15167	15982	16985	17157	18281	18806	20062
150	1006,5	6	28,57	5,7	15431	16459	17456	18618	18865	20183	20873	22370
150	1006,5	6	66,7	0,56	14176	15635	15949	17603	17192	18869	18992	20938
150	1006,5	6	66,7	2	18702	20567	21818	23992	24118	26337	27613	30251
150	1006,5	6	66,7	5,7	20632	22864	24478	27158	27399	30193	31973	35404
150	1006,5	6	100	0,56	15395	16784	17554	19203	19113	20643	21453	23489
150	1006,5	6	100	2	20423	22144	24228	26321	27128	29037	31702	34330
150	1006,5	6	100	5,7	22669	24763	27432	30068	31186	33654	37331	40858
800	549	2	28,57	0,56	3222	3041	3924	3710	4442	4226	5196	4998
800	549	2	28,57	2	3710	3442	4683	4323	5449	5033	6644	6155
800	549	2	28,57	5,7	3903	3611	5002	4595	5892	5407	7326	6725
800	549	2	66,7	0,56	4059	3809	5225	4891	6174	5758	7718	7293
800	549	2	66,7	2	4583	4233	6124	5596	7467	6750	9834	8882
800	549	2	66,7	5,7	4828	4451	6578	5983	8162	7321	11096	9885
800	549	2	100	0,56	4408	4027	5817	5278	7021	6270	9097	8241
800	549	2	100	2	4901	4437	6692	5972	8317	7269	11339	9895
800	549	2	100	5,7	5153	4663	7177	6382	9085	7886	12826	11035
800	549	4	28,57	0,56	6583	6368	7364	7133	7886	7675	8591	8411
800	549	4	28,57	2	8035	7581	9236	8685	10072	9491	11247	10622
800	549	4	28,57	5,7	8588	8051	9979	9309	10966	10241	12377	11570
800	549	4	66,7	0,56	8768	8597	10209	10012	11244	10973	12758	12567
800	549	4	66,7	2	10887	10359	13169	12439	14906	13932	17583	16459
800	549	4	66,7	5,7	11813	11163	14554	13613	16708	15420	20143	18555
800	549	4	100	0,56	9715	9285	11529	11024	12885	12139	14955	14336
800	549	4	100	2	12022	11159	14852	13674	17091	15410	20698	18799
800	549	4	100	5,7	13090	12060	16518	15038	19331	17165	24054	21414
800	549	6	28,57	0,56	8438	8502	9146	9183	9617	9663	10269	10302
800	549	6	28,57	2	10199	10089	11245	11054	11959	11747	12969	12687
800	549	6	28,57	5,7	10829	10664	12016	11748	12835	12533	14004	13607
800	549	6	66,7	0,56	11495	12054	12866	13417	13837	14271	15275	15738
800	549	6	66,7	2	14429	14814	16599	16872	18195	18214	20637	20534
800	549	6	66,7	5,7	15622	15984	18193	18401	20121	20006	23131	22819
800	549	6	100	0,56	12783	13185	14524	14938	15799	15919	17758	18046
800	549	6	100	2	16168	16286	18943	18927	21056	20502	24412	23835
800	549	6	100	5,7	17618	17667	20951	20802	23550	22719	27785	26826
800	732	2	28,57	0,56	3430	3344	4220	4131	4812	4745	5687	5680
800	732	2	28,57	2	4018	3846	5156	4920	6075	5807	7550	7249
800	732	2	28,57	5,7	4254	4063	5558	5282	6646	6318	8463	8062
800	732	2	66,7	0,56	4193	4078	5428	5290	6443	6276	8106	8033
800	732	2	66,7	2	4799	4582	6478	6145	7966	7501	10640	10045
800	732	2	66,7	5,7	5084	4845	7016	6625	8800	8227	12193	11367

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	c <sub>S</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
800	732	2	100	0,56	4511	4285	5976	5666	7234	6784	9414	8997
800	732	2	100	2	5076	4767	6983	6496	8733	7997	12035	11050
800	732	2	100	5,7	5364	5035	7544	6995	9631	8767	13810	12517
800	732	4	28,57	0,56	7618	7596	8622	8620	9299	9344	10217	10336
800	732	4	28,57	2	9678	9408	11359	11015	12560	12206	14278	13914
800	732	4	28,57	5,7	10501	10149	12514	12045	13989	13481	16156	15592
800	732	4	66,7	0,56	9656	9774	11332	11504	12542	12704	14309	14659
800	732	4	66,7	2	12393	12151	15242	14871	17452	16894	20909	20303
800	732	4	66,7	5,7	13633	13285	17162	16596	20013	19151	24680	23609
800	732	4	100	0,56	10528	10436	12573	12504	14104	13877	16435	16480
800	732	4	100	2	13424	12906	16821	16080	19549	18385	23997	22749
800	732	4	100	5,7	14805	14143	19041	18022	22603	20962	28723	26728
800	732	6	28,57	0,56	10415	10720	11382	11696	12021	12373	12893	13271
800	732	6	28,57	2	13260	13388	14852	14928	15945	16025	17484	17527
800	732	6	28,57	5,7	14345	14424	16226	16226	17538	17528	19413	19336
800	732	6	66,7	0,56	13429	14323	15109	16082	16289	17206	18007	19059
800	732	6	66,7	2	17692	18431	20634	21354	22806	23329	26111	26627
800	732	6	66,7	5,7	19528	20288	23164	23875	25925	26363	30249	30613
800	732	6	100	0,56	14671	15442	16734	17620	18230	18898	20486	21468
800	732	6	100	2	19425	19922	23039	23509	25795	25789	30145	30276
800	732	6	100	5,7	21573	22044	26102	26491	29670	29416	35506	35301
800	1006,5	2	28,57	0,56	3581	3595	4435	4483	5081	5183	6045	6260
800	1006,5	2	28,57	2	4247	4190	5508	5439	6544	6489	8237	8234
800	1006,5	2	28,57	5,7	4517	4453	5975	5888	7217	7137	9341	9303
800	1006,5	2	66,7	0,56	4276	4293	5549	5612	6600	6699	8328	8643
800	1006,5	2	66,7	2	4939	4867	6706	6603	8284	8137	11152	11055
800	1006,5	2	66,7	5,7	5254	5172	7302	7169	9217	9011	12915	12698
800	1006,5	2	100	0,56	4566	4489	6055	5975	7334	7198	9554	9615
800	1006,5	2	100	2	5179	5033	7149	6926	8968	8607	12420	12042
800	1006,5	2	100	5,7	5494	5339	7763	7508	9954	9520	14389	13833
800	1006,5	4	28,57	0,56	8489	8711	9694	9990	10513	10900	11629	12154
800	1006,5	4	28,57	2	11130	11178	13288	13350	14865	14988	17165	17399
800	1006,5	4	28,57	5,7	12224	12237	14880	14885	16887	16947	19917	20087
800	1006,5	4	66,7	0,56	10349	10793	12215	12819	13568	14249	15541	16559
800	1006,5	4	66,7	2	13626	13800	16978	17187	19624	19793	23826	24212
800	1006,5	4	66,7	5,7	15152	15292	19412	19550	22945	22982	28884	29098
800	1006,5	4	100	0,56	11144	11424	13366	13796	15032	15415	17563	18412
800	1006,5	4	100	2	14538	14493	18417	18343	21577	21262	26790	26723
800	1006,5	4	100	5,7	16198	16087	21154	20939	25415	24821	32916	32448
800	1006,5	6	28,57	0,56	12248	12901	13478	14208	14290	15106	15388	16301
800	1006,5	6	28,57	2	16323	16945	18559	19240	20110	20885	22302	23172
800	1006,5	6	28,57	5,7	17969	18626	20715	21434	22664	23490	25479	26414
800	1006,5	6	66,7	0,56	15103	16438	17069	18612	18442	20029	20417	22299
800	1006,5	6	66,7	2	20740	22125	24506	26106	27312	28896	31592	33491
800	1006,5	6	66,7	5,7	23297	24866	28144	29989	31894	33718	37846	40082
800	1006,5	6	100	0,56	16270	17524	18620	20140	20312	21736	22832	24777
800	1006,5	6	100	2	22402	23589	26883	28309	30323	31486	35758	37467
800	1006,5	6	100	5,7	25310	26645	31155	32783	35841	37108	43605	45554
5000	549	2	28,57	0,56	3191	3057	3893	3733	4412	4257	5169	5046
5000	549	2	28,57	2	3685	3462	4667	4357	5444	5084	6667	6245
5000	549	2	28,57	5,7	3883	3634	4995	4636	5904	5471	7385	6842
5000	549	2	66,7	0,56	4029	3819	5192	4908	6141	5785	7685	7348
5000	549	2	66,7	2	4556	4245	6101	5622	7455	6797	9858	8993
5000	549	2	66,7	5,7	4805	4465	6568	6015	8175	7384	11189	10044
5000	549	2	100	0,56	4380	4035	5788	5291	6992	6295	9069	8297
5000	549	2	100	2	4875	4447	6669	5993	8303	7311	11359	10006
5000	549	2	100	5,7	5130	4673	7163	6409	9093	7944	12921	11198
5000	549	4	28,57	0,56	6585	6478	7383	7283	7920	7856	8649	8639
5000	549	4	28,57	2	8117	7766	9379	8952	10269	9827	11533	11071
5000	549	4	28,57	5,7	8711	8271	10192	9635	11257	10659	12802	12141
5000	549	4	66,7	0,56	8745	8718	10200	10199	11250	11218	12788	12914
5000	549	4	66,7	2	10967	10581	13345	12812	15179	14447	18044	17248
5000	549	4	66,7	5,7	11963	11445	14868	14105	17194	16119	20982	19676
5000	549	4	100	0,56	9679	9404	11504	11218	12870	12401	14961	14728
5000	549	4	100	2	12088	11381	15019	14065	17366	15967	21197	19704

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	c <sub>s</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
5000	549	4	100	5,7	13233	12345	16846	15564	19868	17938	25055	22742
5000	549	6	28,57	0,56	8518	8761	9256	9497	9750	10017	10437	10714
5000	549	6	28,57	2	10434	10511	11565	11586	12344	12363	13455	13428
5000	549	6	28,57	5,7	11135	11157	12436	12379	13342	13272	14652	14507
5000	549	6	66,7	0,56	11567	12411	12979	13888	13983	14825	15473	16429
5000	549	6	66,7	2	14781	15479	17127	17802	18871	19350	21563	22033
5000	549	6	66,7	5,7	16129	16815	18969	19596	21133	21491	24564	24840
5000	549	6	100	0,56	12841	13563	14623	15454	15932	16535	17944	18847
5000	549	6	100	2	16549	17008	19535	19977	21831	21806	25511	25645
5000	549	6	100	5,7	18190	18586	21867	22184	24782	24470	29613	29358
5000	732	2	28,57	0,56	3427	3349	4222	4144	4820	4768	5708	5725
5000	732	2	28,57	2	4027	3856	5184	4948	6129	5859	7666	7360
5000	732	2	28,57	5,7	4270	4076	5603	5320	6732	6390	8651	8223
5000	732	2	66,7	0,56	4194	4077	5434	5294	6455	6291	8136	8079
5000	732	2	66,7	2	4807	4582	6505	6159	8022	7540	10780	10165
5000	732	2	66,7	5,7	5098	4847	7062	6647	8897	8287	12452	11559
5000	732	2	100	0,56	4516	4282	5989	5667	7256	6795	9460	9042
5000	732	2	100	2	5085	4765	7011	6504	8790	8029	12180	11164
5000	732	2	100	5,7	5379	5034	7589	7010	9727	8818	14082	12704
5000	732	4	28,57	0,56	7708	7745	8758	8838	9472	9618	10447	10698
5000	732	4	28,57	2	9946	9708	11789	11488	13131	12832	15089	14802
5000	732	4	28,57	5,7	10867	10528	13119	12664	14814	14321	17371	16826
5000	732	4	66,7	0,56	9716	9909	11438	11732	12688	13016	14520	15117
5000	732	4	66,7	2	12648	12446	15705	15408	18122	17672	21979	21553
5000	732	4	66,7	5,7	14018	13681	17897	17352	21121	20285	26571	25548
5000	732	4	100	0,56	10577	10564	12665	12730	14234	14194	16631	16968
5000	732	4	100	2	13656	13184	17262	16609	20209	19174	25097	24075
5000	732	4	100	5,7	15172	14522	19776	18779	23751	22137	30801	28845
5000	732	6	28,57	0,56	10737	11170	11787	12263	12486	13025	13443	14044
5000	732	6	28,57	2	14027	14260	15878	16088	17169	17409	19012	19248
5000	732	6	28,57	5,7	15338	15505	17587	17697	19189	19311	21525	21604
5000	732	6	66,7	0,56	13742	14827	15524	16767	16779	18029	18606	20096
5000	732	6	66,7	2	18628	19523	21987	22952	24508	25341	28396	29353
5000	732	6	66,7	5,7	20841	21735	25148	26074	28503	29207	33888	34637
5000	732	6	100	0,56	14968	15948	17133	18326	18706	19758	21075	22583
5000	732	6	100	2	20382	21033	24458	25184	27612	27937	32649	33289
5000	732	6	100	5,7	22957	23541	28264	28851	32551	32531	39737	39917
5000	1006,5	2	28,57	0,56	3598	3593	4466	4488	5127	5198	6120	6299
5000	1006,5	2	28,57	2	4284	4193	5584	5461	6667	6538	8470	8358
5000	1006,5	2	28,57	5,7	4564	4458	6079	5922	7392	7212	9693	9496
5000	1006,5	2	66,7	0,56	4301	4286	5593	5609	6664	6705	8437	8679
5000	1006,5	2	66,7	2	4979	4861	6788	6609	8423	8168	11438	11169
5000	1006,5	2	66,7	5,7	5304	5167	7414	7183	9417	9064	13375	12891
5000	1006,5	2	100	0,56	4597	4481	6109	5970	7415	7202	9694	9649
5000	1006,5	2	100	2	5222	5025	7236	6928	9113	8630	12723	12143
5000	1006,5	2	100	5,7	5546	5332	7877	7516	10158	9563	14871	14008
5000	1006,5	4	28,57	0,56	8676	8885	9965	10258	10850	11242	12065	12616
5000	1006,5	4	28,57	2	11618	11578	14069	14014	15907	15894	18658	18733
5000	1006,5	4	28,57	5,7	12884	12766	15984	15802	18411	18238	22218	22082
5000	1006,5	4	66,7	0,56	10498	10925	12443	13048	13862	14567	15942	17029
5000	1006,5	4	66,7	2	14057	14116	17726	17784	20683	20677	25480	25659
5000	1006,5	4	66,7	5,7	15772	15733	20559	20427	24655	24340	31794	31498
5000	1006,5	4	100	0,56	11280	11541	13579	14009	15310	15720	17949	18876
5000	1006,5	4	100	2	14931	14774	19114	18889	22582	22097	28403	28125
5000	1006,5	4	100	5,7	16774	16484	22250	21754	27091	26125	35889	34834
5000	1006,5	6	28,57	0,56	12866	13522	14252	15007	15173	16033	16422	17408
5000	1006,5	6	28,57	2	17821	18318	20591	21138	22557	23197	25389	26125
5000	1006,5	6	28,57	5,7	19953	20418	23500	23991	26102	26680	29972	30627
5000	1006,5	6	66,7	0,56	15660	16991	17785	19370	19273	20944	21407	23445
5000	1006,5	6	66,7	2	22284	23451	26726	28095	30096	31450	35302	36990
5000	1006,5	6	66,7	5,7	25479	26704	31457	32888	36223	37578	44002	45695
5000	1006,5	6	100	0,56	16793	18045	19299	20866	21103	22626	23778	25908
5000	1006,5	6	100	2	23901	24844	29074	30226	33102	33995	39523	40966
5000	1006,5	6	100	5,7	27474	28410	34522	35634	40325	40992	50179	51375

## B.2 Parameterrechnungen Profil UB 85/820

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Profil UB 85/280 in tabellarischer Form dargestellt. In den ersten Spalten sind die Werte der einzelnen Variablen und in den weiteren Spalten die errechneten Steifigkeiten der Berechnungen am Faltenwerk  $S_{E2n}$  mit den zugehörigen Ergebnissen der vereinfachten Stabwerksrechnung  $S_{Stab}$  für die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  zusammengestellt.

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	448	2	28,57	0,56	1720	1620	2278	2126	2746	2530	3518	3233
150	448	2	28,57	2	1801	1690	2425	2249	2964	2707	3891	3525
150	448	2	28,57	5,7	1829	1718	2476	2299	3043	2780	4030	3650
150	448	2	66,7	0,56	2056	1947	2896	2695	3688	3360	5213	4664
150	448	2	66,7	2	2136	2013	3058	2820	3955	3557	5759	5037
150	448	2	66,7	5,7	2169	2046	3126	2884	4070	3660	6008	5245
150	448	2	100	0,56	2173	2038	3132	2869	4077	3633	6021	5219
150	448	2	100	2	2246	2098	3284	2986	4336	3822	6589	5593
150	448	2	100	5,7	2278	2131	3354	3052	4458	3932	6877	5824
150	448	5	28,57	0,56	4906	4480	5539	5034	5964	5342	6540	5857
150	448	5	28,57	2	5289	4800	6033	5439	6540	5801	7239	6408
150	448	5	28,57	5,7	5409	4906	6189	5576	6725	5957	7465	6598
150	448	5	66,7	0,56	7009	6402	8368	7512	9374	8211	10881	9410
150	448	5	66,7	2	7657	6920	9302	8224	10549	9067	12474	10524
150	448	5	66,7	5,7	7880	7121	9631	8507	10976	9413	13073	10988
150	448	5	100	0,56	7912	7050	9689	8435	11066	9341	13243	10995
150	448	5	100	2	8653	7620	10807	9242	12525	10335	15333	12339
150	448	5	100	5,7	8921	7853	11227	9584	13089	10765	16179	12946
150	448	8	28,57	0,56	5980	5701	6464	6119	6787	6305	7237	6682
150	448	8	28,57	2	6369	6056	6918	6527	7288	6739	7806	7168
150	448	8	28,57	5,7	6483	6165	7053	6653	7437	6874	7977	7321
150	448	8	66,7	0,56	8995	8795	10140	9722	10967	10203	12211	11134
150	448	8	66,7	2	9773	9519	11128	10602	12118	11176	13630	12281
150	448	8	66,7	5,7	10021	9770	11448	10914	12496	11523	14104	12697
150	448	8	100	0,56	10346	9928	11898	11156	13062	11824	14887	13187
150	448	8	100	2	11309	10791	13166	12236	14580	13037	16838	14667
150	448	8	100	5,7	11627	11106	13595	12638	15102	13495	17527	15241
150	784	2	28,57	0,56	1902	1919	2574	2607	3160	3194	4173	4264
150	784	2	28,57	2	2028	2028	2812	2809	3527	3504	4838	4825
150	784	2	28,57	5,7	2072	2072	2897	2894	3661	3637	5096	5080
150	784	2	66,7	0,56	2166	2192	3079	3115	3955	3983	5675	5760
150	784	2	66,7	2	2284	2284	3321	3300	4357	4288	6531	6394
150	784	2	66,7	5,7	2332	2330	3422	3397	4534	4453	6935	6762
150	784	2	100	0,56	2259	2264	3270	3264	4274	4231	6364	6317
150	784	2	100	2	2365	2347	3491	3433	4653	4516	7216	6928
150	784	2	100	5,7	2411	2393	3593	3529	4836	4684	7662	7320
150	784	5	28,57	0,56	6789	6762	7917	7883	8706	8591	9808	9705
150	784	5	28,57	2	7680	7567	9153	8990	10223	9922	11771	11421
150	784	5	28,57	5,7	7972	7850	9572	9391	10747	10413	12469	12074
150	784	5	66,7	0,56	8701	8774	10656	10698	12150	12042	14443	14304
150	784	5	66,7	2	9959	9863	12585	12331	14704	14145	18152	17290
150	784	5	66,7	5,7	10413	10306	13318	13028	15712	15070	19705	18678
150	784	5	100	0,56	9464	9413	11835	11690	13721	13336	16755	16276
150	784	5	100	2	10821	10552	13999	13448	16678	15657	21276	19710
150	784	5	100	5,7	11335	11043	14867	14247	17919	16748	23325	21443
150	784	8	28,57	0,56	9511	9732	10499	10708	11157	11225	12060	12098
150	784	8	28,57	2	10686	10877	11945	12102	12800	12767	13991	13895
150	784	8	28,57	5,7	11053	11253	12404	12569	13328	13287	14623	14512
150	784	8	66,7	0,56	12888	13635	14811	15536	16195	16661	18247	18594
150	784	8	66,7	2	14872	15605	17469	18111	19400	19652	22362	22326
150	784	8	66,7	5,7	15547	16342	18403	19108	20555	20831	23901	23850
150	784	8	100	0,56	14285	14977	16712	17356	18521	18815	21313	21477

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	784	8	100	2	16603	17213	19928	20367	22506	22386	26647	26103
150	784	8	100	5,7	17421	18091	21113	21600	24020	23882	28777	28138
150	1008	2	28,57	0,56	1945	2009	2645	2758	3260	3412	4335	4626
150	1008	2	28,57	2	2084	2132	2908	2991	3669	3776	5090	5311
150	1008	2	28,57	5,7	2131	2182	3002	3090	3821	3935	5388	5628
150	1008	2	66,7	0,56	2186	2259	3110	3239	3997	4175	5747	6127
150	1008	2	66,7	2	2314	2361	3371	3445	4434	4522	6682	6871
150	1008	2	66,7	5,7	2365	2412	3481	3554	4626	4711	7128	7310
150	1008	2	100	0,56	2271	2325	3285	3378	4293	4412	6388	6676
150	1008	2	100	2	2385	2416	3523	3564	4700	4731	7304	7384
150	1008	2	100	5,7	2435	2466	3633	3671	4896	4922	7788	7843
150	1008	5	28,57	0,56	7467	7737	8816	9177	9777	10128	11138	11624
150	1008	5	28,57	2	8596	8833	10431	10747	11802	12075	13836	14236
150	1008	5	28,57	5,7	8974	9228	10993	11337	12525	12824	14840	15286
150	1008	5	66,7	0,56	9259	9715	11442	12048	13133	13746	15753	16620
150	1008	5	66,7	2	10764	11106	13810	14221	16327	16640	20523	20921
150	1008	5	66,7	5,7	11318	11686	14734	15181	17632	17968	22622	23045
150	1008	5	100	0,56	9956	10325	12541	13030	14617	15063	17980	18706
150	1008	5	100	2	11549	11753	15134	15320	18218	18188	23625	23544
150	1008	5	100	5,7	12162	12381	16200	16394	19780	19719	26307	26132
150	1008	8	28,57	0,56	11063	11817	12338	13191	13194	13964	14368	15215
150	1008	8	28,57	2	12732	13586	14445	15421	15627	16488	17288	18240
150	1008	8	28,57	5,7	13269	14189	15139	16202	16442	17383	18288	19339
150	1008	8	66,7	0,56	14486	15979	16799	18506	18470	20081	20944	22711
150	1008	8	66,7	2	17149	18832	20456	22389	22956	24725	26830	28716
150	1008	8	66,7	5,7	18085	19944	21797	23972	24653	26669	29166	31356
150	1008	8	100	0,56	15854	17353	18695	20434	20817	22418	24080	25931
150	1008	8	100	2	18896	20520	23016	24872	26256	27845	31510	33223
150	1008	8	100	5,7	20005	21815	24675	26787	28427	30264	34668	36687
800	448	2	28,57	0,56	1711	1628	2267	2147	2735	2568	3512	3313
800	448	2	28,57	2	1793	1700	2418	2275	2962	2754	3906	3629
800	448	2	28,57	5,7	1821	1729	2471	2327	3045	2832	4056	3766
800	448	2	66,7	0,56	2046	1951	2883	2710	3674	3396	5204	4770
800	448	2	66,7	2	2126	2017	3046	2838	3946	3601	5774	5173
800	448	2	66,7	5,7	2158	2050	3116	2904	4066	3709	6044	5401
800	448	2	100	0,56	2163	2040	3119	2881	4064	3666	6016	5329
800	448	2	100	2	2235	2101	3271	3000	4325	3862	6603	5732
800	448	2	100	5,7	2268	2134	3342	3068	4452	3976	6913	5983
800	448	5	28,57	0,56	4948	4709	5605	5345	6049	5709	6653	6317
800	448	5	28,57	2	5375	5079	6164	5826	6707	6263	7461	6998
800	448	5	28,57	5,7	5510	5203	6344	5990	6923	6454	7730	7238
800	448	5	66,7	0,56	7052	6723	8453	8004	9498	8841	11071	10289
800	448	5	66,7	2	7779	7325	9523	8862	10868	9902	12966	11725
800	448	5	66,7	5,7	8038	7560	9917	9209	11388	10339	13716	12340
800	448	5	100	0,56	7952	7390	9778	8980	11204	10062	13468	12053
800	448	5	100	2	8783	8049	11059	9951	12905	11295	15960	13798
800	448	5	100	5,7	9095	8322	11562	10371	13599	11841	17037	14611
800	448	8	28,57	0,56	6114	6155	6625	6656	6967	6887	7442	7344
800	448	8	28,57	2	6565	6592	7158	7169	7559	7438	8119	7972
800	448	8	28,57	5,7	6701	6728	7319	7330	7739	7612	8326	8172
800	448	8	66,7	0,56	9224	9598	10437	10743	11314	11363	12631	12536
800	448	8	66,7	2	10161	10521	11646	11901	12739	12667	14407	14117
800	448	8	66,7	5,7	10469	10847	12051	12320	13225	13144	15028	14709
800	448	8	100	0,56	10616	10846	12258	12361	13489	13220	15418	14939
800	448	8	100	2	11787	11950	13828	13791	15395	14865	17897	17010
800	448	8	100	5,7	12188	12361	14382	14339	16081	15504	18823	17844
800	784	2	28,57	0,56	1906	1924	2591	2628	3194	3240	4253	4382
800	784	2	28,57	2	2036	2035	2841	2838	3587	3568	4992	4998
800	784	2	28,57	5,7	2081	2080	2931	2926	3735	3710	5287	5282
800	784	2	66,7	0,56	2171	2191	3097	3125	3991	4015	5774	5871
800	784	2	66,7	2	2290	2284	3346	3314	4415	4331	6701	6547
800	784	2	66,7	5,7	2339	2331	3452	3413	4603	4503	7151	6944
800	784	2	100	0,56	2264	2262	3289	3271	4316	4258	6478	6418
800	784	2	100	2	2371	2346	3515	3442	4709	4550	7387	7064

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
800	784	2	100	5,7	2418	2392	3621	3541	4902	4724	7877	7481
800	784	5	28,57	0,56	7117	7257	8399	8608	9314	9500	10610	10911
800	784	5	28,57	2	8202	8239	9960	10019	11275	11252	13234	13267
800	784	5	28,57	5,7	8568	8592	10508	10546	11986	11922	14226	14207
800	784	5	66,7	0,56	8973	9212	11090	11408	12728	13001	15269	15699
800	784	5	66,7	2	10436	10464	13401	13359	15854	15594	19948	19541
800	784	5	66,7	5,7	10981	10983	14316	14213	17153	16771	22047	21410
800	784	5	100	0,56	9708	9818	12236	12366	14268	14273	17564	17689
800	784	5	100	2	11257	11105	14769	14421	17794	17068	23104	21989
800	784	5	100	5,7	11861	11666	15828	15375	19353	18419	25792	24249
800	784	8	28,57	0,56	10461	11045	11668	12337	12478	13062	13586	14242
800	784	8	28,57	2	12074	12635	13709	14344	14836	15336	16418	16969
800	784	8	28,57	5,7	12598	13174	14389	15042	15636	16137	17401	17954
800	784	8	66,7	0,56	13885	15035	16094	17390	17687	18853	20039	21295
800	784	8	66,7	2	16487	17576	19670	20837	22069	22967	25769	26589
800	784	8	66,7	5,7	17413	18558	21000	22226	23752	24665	28078	28877
800	784	8	100	0,56	15262	16349	17990	19214	20022	21048	23141	24294
800	784	8	100	2	18239	19160	22216	23131	25332	25821	30358	30654
800	784	8	100	5,7	19340	20297	23864	24798	27487	27912	33477	33613
800	1008	2	28,57	0,56	1959	2013	2678	2775	3319	3451	4457	4726
800	1008	2	28,57	2	2103	2137	2958	3016	3762	3832	5302	5460
800	1008	2	28,57	5,7	2153	2188	3059	3117	3929	3998	5644	5804
800	1008	2	66,7	0,56	2201	2259	3146	3246	4063	4198	5897	6206
800	1008	2	66,7	2	2331	2361	3418	3455	4526	4553	6918	6982
800	1008	2	66,7	5,7	2384	2412	3535	3566	4733	4748	7418	7443
800	1008	2	100	0,56	2287	2324	3324	3383	4365	4430	6559	6745
800	1008	2	100	2	2402	2415	3570	3571	4792	4755	7548	7477
800	1008	2	100	5,7	2454	2465	3685	3679	5002	4950	8084	7955
800	1008	5	28,57	0,56	7863	8194	9396	9859	10509	11000	12108	12801
800	1008	5	28,57	2	9224	9476	11411	11762	13094	13425	15671	16174
800	1008	5	28,57	5,7	9693	9947	12139	12495	14064	14391	17081	17593
800	1008	5	66,7	0,56	9561	10050	11916	12598	13760	14503	16649	17742
800	1008	5	66,7	2	11282	11579	14695	15052	17581	17847	22517	22870
800	1008	5	66,7	5,7	11934	12224	15820	16156	19217	19420	25267	25497
800	1008	5	100	0,56	10224	10618	12973	13525	15202	15761	18844	19775
800	1008	5	100	2	12013	12163	15951	16061	19406	19293	25601	25394
800	1008	5	100	5,7	12720	12850	17220	17269	21314	21061	29014	28499
800	1008	8	28,57	0,56	12248	13152	13808	14876	14863	15896	16308	17496
800	1008	8	28,57	2	14518	15470	16757	17894	18329	19391	20559	21795
800	1008	8	28,57	5,7	15280	16285	17779	18993	19558	20689	22115	23443
800	1008	8	66,7	0,56	15575	17145	18205	20080	20111	21976	22921	25080
800	1008	8	66,7	2	18963	20564	22973	24867	26047	27831	30852	32840
800	1008	8	66,7	5,7	20205	21931	24816	26886	28437	30384	34245	36431
800	1008	8	100	0,56	16883	18433	20044	21922	22406	24240	26022	28255
800	1008	8	100	2	20666	22135	25532	27243	29405	30883	35733	37375
800	1008	8	100	5,7	22103	23683	27755	29610	32381	33958	40192	41922
5000	448	2	28,57	0,56	1651	1647	2208	2168	2676	2592	3451	3347
5000	448	2	28,57	2	1735	1719	2361	2296	2906	2780	3852	3669
5000	448	2	28,57	5,7	1763	1748	2415	2349	2991	2859	4007	3809
5000	448	2	66,7	0,56	1989	1967	2829	2728	3621	3418	5148	4806
5000	448	2	66,7	2	2071	2034	2995	2856	3897	3624	5728	5217
5000	448	2	66,7	5,7	2104	2067	3065	2923	4019	3734	6005	5449
5000	448	2	100	0,56	2109	2056	3069	2897	4016	3686	5968	5364
5000	448	2	100	2	2182	2117	3222	3017	4279	3883	6561	5774
5000	448	2	100	5,7	2214	2150	3294	3085	4409	3998	6879	6030
5000	448	5	28,57	0,56	4903	4784	5561	5443	6004	5824	6608	6461
5000	448	5	28,57	2	5345	5168	6141	5947	6690	6408	7450	7186
5000	448	5	28,57	5,7	5487	5297	6331	6120	6916	6610	7733	7442
5000	448	5	66,7	0,56	7012	6820	8412	8154	9453	9038	11019	10576
5000	448	5	66,7	2	7772	7447	9533	9062	10894	10173	13023	12138
5000	448	5	66,7	5,7	8045	7694	9953	9432	11451	10645	13834	12817
5000	448	5	100	0,56	7914	7490	9737	9145	11155	10288	13405	12405
5000	448	5	100	2	8783	8177	11082	10173	12949	11611	16050	14316
5000	448	5	100	5,7	9113	8463	11620	10621	13697	12201	17226	15221

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	C <sub>s</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
5000	448	8	28,57	0,56	6076	6297	6586	6826	6926	7072	7399	7557
5000	448	8	28,57	2	6547	6762	7143	7374	7545	7663	8107	8234
5000	448	8	28,57	5,7	6689	6907	7313	7547	7735	7851	8326	8451
5000	448	8	66,7	0,56	9205	9858	10418	11085	11290	11761	12604	13034
5000	448	8	66,7	2	10199	10856	11705	12356	12813	13203	14509	14807
5000	448	8	66,7	5,7	10529	11212	12144	12820	13340	13737	15187	15481
5000	448	8	100	0,56	10603	11146	12244	12774	13469	13714	15392	15588
5000	448	8	100	2	11853	12346	13930	14353	15522	15550	18078	17943
5000	448	8	100	5,7	12287	12796	14536	14965	16277	16274	19105	18908
5000	784	2	28,57	0,56	1910	1926	2598	2630	3204	3247	4271	4405
5000	784	2	28,57	2	2042	2037	2853	2842	3608	3579	5039	5038
5000	784	2	28,57	5,7	2088	2082	2946	2931	3760	3723	5350	5332
5000	784	2	66,7	0,56	2179	2191	3111	3124	4012	4014	5808	5886
5000	784	2	66,7	2	2300	2284	3364	3312	4444	4332	6766	6576
5000	784	2	66,7	5,7	2349	2331	3472	3411	4638	4505	7240	6982
5000	784	2	100	0,56	2275	2262	3308	3269	4344	4255	6527	6429
5000	784	2	100	2	2382	2346	3537	3439	4743	4548	7462	7085
5000	784	2	100	5,7	2430	2392	3644	3537	4941	4722	7975	7510
5000	784	5	28,57	0,56	7241	7428	8588	8893	9560	9886	10952	11476
5000	784	5	28,57	2	8432	8497	10337	10474	11794	11895	14014	14269
5000	784	5	28,57	5,7	8842	8885	10969	11077	12631	12684	15224	15426
5000	784	5	66,7	0,56	9088	9361	11271	11702	12977	13448	15646	16454
5000	784	5	66,7	2	10674	10697	13833	13851	16503	16381	21073	20984
5000	784	5	66,7	5,7	11278	11257	14881	14810	18031	17749	23658	23285
5000	784	5	100	0,56	9818	9953	12410	12651	14509	14724	17935	18494
5000	784	5	100	2	11488	11316	15197	14895	18453	17858	24302	23524
5000	784	5	100	5,7	12154	11918	16401	15956	20273	19414	27589	26282
5000	784	8	28,57	0,56	10904	11675	12240	13180	13145	14054	14391	15469
5000	784	8	28,57	2	12811	13567	14708	15644	16039	16902	17935	18980
5000	784	8	28,57	5,7	13449	14225	15561	16529	17061	17944	19227	20307
5000	784	8	66,7	0,56	14395	15780	16793	18488	18534	20231	21114	23141
5000	784	8	66,7	2	17466	18762	21126	22689	23943	25386	28364	30032
5000	784	8	66,7	5,7	18600	19945	22819	24448	26145	27618	31511	33203
5000	784	8	100	0,56	15778	17100	18707	20358	20903	22521	24274	26337
5000	784	8	100	2	19275	20368	23806	25091	27426	28457	33362	34569
5000	784	8	100	5,7	20620	21727	25900	27184	30246	31188	37621	38656
5000	1008	2	28,57	0,56	1970	2011	2695	2773	3343	3452	4500	4744
5000	1008	2	28,57	2	2117	2135	2983	3014	3802	3836	5389	5498
5000	1008	2	28,57	5,7	2168	2186	3087	3116	3976	4005	5755	5855
5000	1008	2	66,7	0,56	2217	2256	3172	3241	4101	4193	5966	6215
5000	1008	2	66,7	2	2350	2358	3451	3449	4578	4549	7033	7005
5000	1008	2	66,7	5,7	2404	2409	3570	3560	4793	4744	7566	7476
5000	1008	2	100	0,56	2305	2321	3355	3377	4411	4423	6646	6749
5000	1008	2	100	2	2423	2412	3606	3564	4849	4748	7676	7492
5000	1008	2	100	5,7	2475	2462	3724	3673	5067	4943	8244	7978
5000	1008	5	28,57	0,56	8071	8399	9718	10218	10933	11504	12708	13562
5000	1008	5	28,57	2	9600	9805	12048	12380	13991	14336	17065	17665
5000	1008	5	28,57	5,7	10139	10331	12920	13236	15190	15503	18899	19480
5000	1008	5	66,7	0,56	9740	10201	12202	12911	14150	14990	17234	18578
5000	1008	5	66,7	2	11631	11829	15329	15604	18536	18756	24185	24597
5000	1008	5	66,7	5,7	12363	12525	16641	16840	20502	20582	27667	27827
5000	1008	5	100	0,56	10394	10749	13241	13811	15568	16224	19399	20608
5000	1008	5	100	2	12340	12379	16551	16561	20323	20149	27256	27095
5000	1008	5	100	5,7	13127	13111	18010	17894	22578	22164	31491	30832
5000	1008	8	28,57	0,56	13041	14042	14850	16102	16090	17371	17804	19354
5000	1008	8	28,57	2	15877	16886	18657	19953	20663	21954	23577	25195
5000	1008	8	28,57	5,7	16870	17922	20049	21420	22390	23750	25855	27592
5000	1008	8	66,7	0,56	16366	18004	19290	21369	21426	23624	24583	27307
5000	1008	8	66,7	2	20484	22013	25266	27204	29028	30975	35031	37438
5000	1008	8	66,7	5,7	22062	23666	27719	29775	32318	34363	39930	42484
5000	1008	8	100	0,56	17646	19249	21099	23179	23693	25881	27659	30534
5000	1008	8	100	2	22181	23518	27867	29542	32496	34057	40186	42179
5000	1008	8	100	5,7	23982	25354	30776	32490	36519	38043	46497	48409

### B.3 Parameterrechnungen Profil EKO 160/250

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Profil EKO 160/250 in tabellarischer Form dargestellt. In den ersten Spalten sind die Werte der einzelnen Variablen und in den weiteren Spalten die errechneten Steifigkeiten der Berechnungen am Falzwerk  $S_{E2n}$  mit den zugehörigen Ergebnissen der vereinfachten Stabwerksrechnung  $S_{Stab}$  für die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  zusammengestellt.

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	525	2	28,57	0,56	503	501	761	765	1034	1035	1654	1648
150	525	2	28,57	2	516	512	791	790	1090	1081	1806	1769
150	525	2	28,57	5,7	520	517	801	800	1109	1100	1860	1820
150	525	2	66,7	0,56	527	530	816	827	1135	1144	1922	1925
150	525	2	66,7	2	537	540	840	846	1184	1180	2066	2027
150	525	2	66,7	5,7	541	544	850	856	1203	1199	2126	2081
150	525	2	100	0,56	535	535	834	841	1171	1172	2024	2010
150	525	2	100	2	543	544	855	859	1212	1204	2151	2099
150	525	2	100	5,7	547	548	864	868	1230	1222	2209	2152
150	525	7	28,57	0,56	4207	3811	5147	4943	5855	5641	6919	6640
150	525	7	28,57	2	4604	4117	5754	5449	6655	6306	8064	7576
150	525	7	28,57	5,7	4725	4212	5944	5616	6912	6529	8444	7901
150	525	7	66,7	0,56	5164	4737	6638	6420	7856	7572	9882	9480
150	525	7	66,7	2	5691	5150	7532	7139	9135	8578	11981	11072
150	525	7	66,7	5,7	5863	5291	7837	7405	9587	8963	12769	11718
150	525	7	100	0,56	5514	4897	7227	6846	8694	8178	11254	10577
150	525	7	100	2	6072	5324	8208	7610	10144	9269	13773	12387
150	525	7	100	5,7	6261	5473	8556	7905	10680	9706	14776	13168
150	525	12	28,57	0,56	6392	5811	7213	7136	7777	7721	8572	8437
150	525	12	28,57	2	6966	6257	7950	7800	8640	8500	9627	9372
150	525	12	28,57	5,7	7136	6389	8171	8004	8900	8742	9951	9667
150	525	12	66,7	0,56	8533	7963	10061	10207	11200	11315	12953	12943
150	525	12	66,7	2	9491	8736	11410	11438	12889	12832	15240	14934
150	525	12	66,7	5,7	9790	8983	11845	11857	13444	13359	16016	15648
150	525	12	100	0,56	9371	8369	11253	11181	12707	12544	15038	14804
150	525	12	100	2	10483	9207	12879	12601	14803	14331	18013	17276
150	525	12	100	5,7	10840	9480	13422	13101	15518	14977	19073	18214
150	750	2	28,57	0,56	516	523	786	805	1074	1102	1741	1793
150	750	2	28,57	2	531	537	820	834	1139	1156	1920	1940
150	750	2	28,57	5,7	535	541	831	846	1161	1178	1984	2002
150	750	2	66,7	0,56	536	546	832	855	1160	1192	1973	2038
150	750	2	66,7	2	547	557	859	877	1214	1233	2136	2156
150	750	2	66,7	5,7	552	561	870	887	1236	1254	2204	2219
150	750	2	100	0,56	543	550	848	867	1191	1215	2063	2112
150	750	2	100	2	552	559	871	886	1237	1251	2205	2214
150	750	2	100	5,7	556	564	881	896	1257	1271	2271	2275
150	750	7	28,57	0,56	4877	4671	6110	6138	7077	7143	8584	8669
150	750	7	28,57	2	5427	5140	7000	6943	8300	8249	10449	10342
150	750	7	28,57	5,7	5599	5291	7288	7216	8707	8637	11102	10958
150	750	7	66,7	0,56	5689	5514	7438	7544	8921	9063	11462	11688
150	750	7	66,7	2	6359	6090	8620	8575	10670	10570	14501	14257
150	750	7	66,7	5,7	6581	6291	9032	8968	11309	11170	15704	15362
150	750	7	100	0,56	5980	5655	7946	7936	9666	9647	12739	12818
150	750	7	100	2	6670	6243	9201	9004	11576	11235	16232	15644
150	750	7	100	5,7	6907	6452	9655	9427	12303	11897	17694	16936
150	750	12	28,57	0,56	8172	7847	9407	9708	10275	10652	11509	11871
150	750	12	28,57	2	9139	8680	10709	10981	11846	12197	13509	13812
150	750	12	28,57	5,7	9433	8936	11114	11390	12342	12702	14157	14463
150	750	12	66,7	0,56	10299	10152	12362	13107	13929	14771	16356	17281
150	750	12	66,7	2	11755	11457	14510	15243	16705	17510	20290	21089
150	750	12	66,7	5,7	12225	11891	15230	16006	17664	18521	21717	22565
150	750	12	100	0,56	11098	10571	13546	14141	15467	16124	18559	19435
150	750	12	100	2	12733	11962	16042	16537	18785	19265	23489	24036

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	750	12	100	5,7	13274	12432	16907	17424	19979	20473	25374	25927
150	975	2	28,57	0,56	523	534	798	825	1092	1135	1779	1869
150	975	2	28,57	2	538	548	834	856	1162	1194	1972	2031
150	975	2	28,57	5,7	543	553	846	869	1185	1218	2040	2101
150	975	2	66,7	0,56	540	553	838	868	1169	1215	1990	2094
150	975	2	66,7	2	552	564	868	891	1227	1259	2162	2221
150	975	2	66,7	5,7	557	569	879	902	1250	1281	2234	2289
150	975	2	100	0,56	546	556	853	878	1198	1235	2073	2161
150	975	2	100	2	556	566	878	898	1247	1273	2223	2271
150	975	2	100	5,7	560	571	888	909	1268	1294	2292	2336
150	975	7	28,57	0,56	5264	5230	6693	6951	7841	8209	9677	10200
150	975	7	28,57	2	5918	5830	7787	8011	9386	9716	12143	12619
150	975	7	28,57	5,7	6124	6025	8148	8379	9914	10262	13042	13556
150	975	7	66,7	0,56	5976	5994	7888	8260	9535	10053	12410	13247
150	975	7	66,7	2	6734	6690	9258	9532	11607	11970	16140	16701
150	975	7	66,7	5,7	6987	6936	9744	10027	12380	12757	17672	18260
150	975	7	100	0,56	6228	6119	8337	8616	10206	10598	13588	14354
150	975	7	100	2	6998	6823	9765	9911	12415	12580	17755	18060
150	975	7	100	5,7	7263	7076	10289	10434	13273	13428	19557	19832
150	975	12	28,57	0,56	9398	9436	10981	11795	12112	13109	13738	14875
150	975	12	28,57	2	10706	10673	12808	13743	14371	15548	16712	18081
150	975	12	28,57	5,7	11114	11065	13395	14394	15112	16385	17721	19221
150	975	12	66,7	0,56	11452	11775	13919	15316	15814	17493	18773	20858
150	975	12	66,7	2	13308	13588	16746	18358	19554	21531	24248	26764
150	975	12	66,7	5,7	13920	14209	17725	19490	20899	23100	26343	29220
150	975	12	100	0,56	12200	12183	15054	16339	17313	18871	20968	23140
150	975	12	100	2	14239	14093	18261	19678	21669	23395	27635	30093
150	975	12	100	5,7	14928	14757	19407	20964	23297	25227	30326	33163
800	525	2	28,57	0,56	500	502	758	765	1030	1035	1649	1651
800	525	2	28,57	2	513	514	787	790	1086	1081	1803	1773
800	525	2	28,57	5,7	517	518	797	800	1105	1100	1858	1825
800	525	2	66,7	0,56	524	532	813	827	1131	1143	1917	1924
800	525	2	66,7	2	534	541	837	846	1179	1179	2061	2026
800	525	2	66,7	5,7	538	545	846	856	1198	1198	2121	2080
800	525	2	100	0,56	532	536	831	842	1167	1171	2019	2007
800	525	2	100	2	540	545	852	859	1208	1203	2146	2097
800	525	2	100	5,7	544	549	860	868	1226	1221	2204	2150
800	525	7	28,57	0,56	4277	3953	5282	5193	6056	5995	7242	7187
800	525	7	28,57	2	4712	4296	5970	5782	6985	6793	8624	8367
800	525	7	28,57	5,7	4847	4405	6191	5979	7291	7067	9099	8789
800	525	7	66,7	0,56	5212	4872	6752	6677	8044	7973	10232	10195
800	525	7	66,7	2	5780	5326	7745	7494	9501	9155	12723	12178
800	525	7	66,7	5,7	5969	5483	8092	7800	10032	9617	13700	13009
800	525	7	100	0,56	5551	5028	7324	7095	8862	8578	11584	11325
800	525	7	100	2	6150	5496	8405	7955	10496	9845	14533	13551
800	525	7	100	5,7	6355	5661	8797	8291	11118	10364	15761	14544
800	525	12	28,57	0,56	6744	6300	7687	7853	8343	8582	9273	9502
800	525	12	28,57	2	7441	6858	8608	8718	9441	9623	10650	10794
800	525	12	28,57	5,7	7651	7027	8892	8990	9783	9955	11087	11214
800	525	12	66,7	0,56	8955	8607	10676	11196	11973	12570	13978	14639
800	525	12	66,7	2	10115	9572	12366	12794	14136	14603	16998	17432
800	525	12	66,7	5,7	10488	9888	12928	13353	14875	15335	18076	18482
800	525	12	100	0,56	9806	9032	11899	12224	13530	13892	16157	16697
800	525	12	100	2	11145	10075	13924	14050	16200	16268	20062	20143
800	525	12	100	5,7	11586	10422	14622	14712	17151	17160	21534	21516
800	750	2	28,57	0,56	515	523	784	804	1072	1100	1743	1794
800	750	2	28,57	2	529	536	818	833	1138	1154	1926	1942
800	750	2	28,57	5,7	534	541	829	844	1160	1176	1992	2005
800	750	2	66,7	0,56	535	546	830	854	1159	1190	1975	2036
800	750	2	66,7	2	546	557	858	876	1213	1231	2140	2154
800	750	2	66,7	5,7	550	561	868	886	1235	1252	2209	2217
800	750	2	100	0,56	541	550	846	866	1190	1213	2066	2109
800	750	2	100	2	551	559	870	885	1236	1249	2209	2211
800	750	2	100	5,7	555	564	879	895	1256	1269	2276	2272

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
800	750	7	28,57	0,56	5022	4868	6382	6483	7478	7648	9235	9493
800	750	7	28,57	2	5643	5403	7429	7431	8963	8997	11625	11658
800	750	7	28,57	5,7	5840	5576	7776	7759	9476	9484	12506	12490
800	750	7	66,7	0,56	5781	5662	7627	7812	9219	9489	11995	12469
800	750	7	66,7	2	6510	6291	8952	8962	11229	11217	15632	15565
800	750	7	66,7	5,7	6755	6512	9425	9406	11984	11920	17142	16946
800	750	7	100	0,56	6052	5793	8100	8177	9914	10037	13196	13554
800	750	7	100	2	6795	6430	9484	9351	12063	11827	17262	16876
800	750	7	100	5,7	7053	6659	9996	9821	12904	12586	19039	18444
800	750	12	28,57	0,56	8926	8702	10443	10914	11532	12130	13098	13760
800	750	12	28,57	2	10191	9801	12219	12651	13737	14303	16016	16616
800	750	12	28,57	5,7	10587	10148	12794	13227	14468	15045	17018	17625
800	750	12	66,7	0,56	11005	10993	13382	14312	15210	16321	18056	19415
800	750	12	66,7	2	12814	12613	16149	17018	18879	19898	23432	24608
800	750	12	66,7	5,7	13416	13165	17115	18016	20211	21272	25513	26734
800	750	12	100	0,56	11762	11393	14517	15302	16697	17639	20210	21565
800	750	12	100	2	13753	13100	17658	18268	20966	21636	26738	27642
800	750	12	100	5,7	14431	13690	18789	19399	22577	23233	29402	30275
800	975	2	28,57	0,56	522	534	797	824	1094	1133	1789	1869
800	975	2	28,57	2	537	548	834	855	1164	1192	1987	2033
800	975	2	28,57	5,7	542	553	846	867	1187	1216	2059	2103
800	975	2	66,7	0,56	540	553	839	867	1171	1213	2001	2092
800	975	2	66,7	2	552	564	868	890	1229	1257	2176	2219
800	975	2	66,7	5,7	556	569	879	901	1252	1279	2250	2288
800	975	2	100	0,56	546	556	853	877	1200	1233	2085	2159
800	975	2	100	2	556	566	878	897	1249	1272	2237	2269
800	975	2	100	5,7	560	571	889	908	1271	1293	2308	2334
800	975	7	28,57	0,56	5438	5416	7011	7265	8306	8673	10437	10978
800	975	7	28,57	2	6172	6082	8287	8467	10164	10433	13556	13944
800	975	7	28,57	5,7	6407	6301	8717	8893	10820	11086	14750	15136
800	975	7	66,7	0,56	6082	6111	8096	8462	9855	10374	12972	13845
800	975	7	66,7	2	6900	6851	9612	9829	12194	12475	17340	17761
800	975	7	66,7	5,7	7177	7114	10159	10366	13090	13350	19210	19577
800	975	7	100	0,56	6313	6225	8507	8788	10470	10877	14065	14883
800	975	7	100	2	7135	6968	10061	10164	12916	13016	18816	18993
800	975	7	100	5,7	7421	7238	10641	10724	13888	13943	20952	21002
800	975	12	28,57	0,56	10308	10330	12248	13018	13661	14626	15722	16860
800	975	12	28,57	2	12004	11894	14717	15529	16805	17857	20029	21284
800	975	12	28,57	5,7	12547	12401	15543	16396	17889	19011	21586	22942
800	975	12	66,7	0,56	12210	12496	15017	16307	17199	18784	20623	22671
800	975	12	66,7	2	14459	14618	18559	19897	21995	23658	27872	30041
800	975	12	66,7	5,7	15221	15359	19832	21267	23803	25614	30833	33253
800	975	12	100	0,56	12890	12866	16064	17244	18596	20063	22699	24834
800	975	12	100	2	15309	15074	19981	21098	24023	25389	31238	33240
800	975	12	100	5,7	16148	15856	21431	22617	26146	27610	34910	37114
5000	525	2	28,57	0,56	465	515	723	778	995	1047	1615	1663
5000	525	2	28,57	2	477	526	753	803	1052	1094	1771	1786
5000	525	2	28,57	5,7	481	531	762	813	1071	1112	1826	1837
5000	525	2	66,7	0,56	489	544	778	839	1098	1155	1885	1935
5000	525	2	66,7	2	499	554	803	859	1146	1191	2030	2036
5000	525	2	66,7	5,7	503	558	812	868	1165	1210	2090	2091
5000	525	2	100	0,56	497	549	797	854	1134	1183	1988	2018
5000	525	2	100	2	505	558	817	871	1175	1215	2116	2107
5000	525	2	100	5,7	508	562	826	880	1193	1233	2174	2160
5000	525	7	28,57	0,56	4273	3997	5295	5267	6087	6101	7306	7360
5000	525	7	28,57	2	4724	4351	6015	5882	7066	6946	8784	8634
5000	525	7	28,57	5,7	4865	4463	6248	6089	7393	7238	9301	9096
5000	525	7	66,7	0,56	5205	4910	6760	6745	8069	8085	10298	10421
5000	525	7	66,7	2	5793	5375	7795	7592	9602	9329	12967	12566
5000	525	7	66,7	5,7	5988	5536	8160	7912	10168	9820	14039	13483
5000	525	7	100	0,56	5545	5063	7329	7158	8881	8686	11640	11559
5000	525	7	100	2	6161	5542	8452	8046	10594	10015	14789	13962
5000	525	7	100	5,7	6374	5711	8863	8395	11256	10564	16135	15055
5000	525	12	28,57	0,56	6825	6456	7807	8091	8493	8877	9470	9883

$l_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
5000	525	12	28,57	2	7571	7055	8806	9037	9693	10029	10990	11335
5000	525	12	28,57	5,7	7798	7237	9116	9337	10072	10401	11481	11815
5000	525	12	66,7	0,56	9066	8812	10855	11536	12208	13028	14311	15309
5000	525	12	66,7	2	10315	9853	12708	13299	14608	15312	17724	18538
5000	525	12	66,7	5,7	10722	10196	13334	13925	15447	16151	18981	19787
5000	525	12	100	0,56	9919	9243	12092	12583	13790	14390	16531	17468
5000	525	12	100	2	11365	10367	14314	14597	16760	17063	20968	21474
5000	525	12	100	5,7	11847	10744	15096	15339	17846	18088	22705	23121
5000	750	2	28,57	0,56	508	529	779	810	1067	1104	1739	1796
5000	750	2	28,57	2	523	542	813	838	1133	1158	1924	1944
5000	750	2	28,57	5,7	527	547	824	850	1155	1180	1990	2008
5000	750	2	66,7	0,56	528	552	825	860	1155	1195	1973	2037
5000	750	2	66,7	2	540	563	853	881	1209	1236	2140	2155
5000	750	2	66,7	5,7	544	567	863	892	1231	1257	2210	2218
5000	750	2	100	0,56	535	556	841	872	1186	1218	2066	2110
5000	750	2	100	2	545	566	865	891	1233	1254	2210	2213
5000	750	2	100	5,7	549	570	875	901	1253	1274	2277	2274
5000	750	7	28,57	0,56	5071	4919	6477	6585	7624	7819	9497	9820
5000	750	7	28,57	2	5726	5475	7603	7593	9252	9285	12204	12272
5000	750	7	28,57	5,7	5935	5657	7982	7946	9826	9823	13239	13242
5000	750	7	66,7	0,56	5819	5691	7700	7880	9335	9625	12225	12794
5000	750	7	66,7	2	6578	6336	9103	9080	11498	11465	16266	16227
5000	750	7	66,7	5,7	6835	6565	9610	9547	12329	12225	18009	17805
5000	750	7	100	0,56	6087	5818	8164	8234	10016	10158	13400	13864
5000	750	7	100	2	6858	6470	9621	9452	12310	12051	17866	17512
5000	750	7	100	5,7	7127	6705	10166	9944	13226	12864	19894	19281
5000	750	12	28,57	0,56	9250	9044	10920	11458	12139	12844	13922	14757
5000	750	12	28,57	2	10694	10289	13009	13490	14789	15456	17544	18323
5000	750	12	28,57	5,7	11156	10689	13705	14183	15699	16376	18848	19638
5000	750	12	66,7	0,56	11332	11338	13897	14894	15900	17146	19060	20701
5000	750	12	66,7	2	13373	13145	17118	18002	20276	21379	25722	27144
5000	750	12	66,7	5,7	14068	13771	18282	19180	21938	23067	28472	29932
5000	750	12	100	0,56	12079	11732	15025	15872	17387	18466	21232	22902
5000	750	12	100	2	14311	13628	18653	19250	22438	23153	29251	30370
5000	750	12	100	5,7	15089	14295	20006	20573	24434	25097	32753	33792
5000	975	2	28,57	0,56	521	537	798	827	1095	1135	1793	1868
5000	975	2	28,57	2	537	551	834	858	1166	1193	1994	2031
5000	975	2	28,57	5,7	541	556	846	870	1189	1217	2066	2101
5000	975	2	66,7	0,56	539	557	840	870	1174	1215	2008	2091
5000	975	2	66,7	2	551	567	869	893	1232	1259	2185	2217
5000	975	2	66,7	5,7	556	572	880	904	1255	1281	2260	2286
5000	975	2	100	0,56	546	559	855	880	1203	1235	2093	2158
5000	975	2	100	2	556	570	879	900	1253	1274	2247	2267
5000	975	2	100	5,7	560	574	890	911	1274	1295	2319	2333
5000	975	7	28,57	0,56	5516	5467	7161	7380	8540	8878	10859	11401
5000	975	7	28,57	2	6299	6163	8557	8666	10622	10808	14514	14814
5000	975	7	28,57	5,7	6551	6394	9036	9128	11378	11540	15982	16241
5000	975	7	66,7	0,56	6142	6134	8208	8526	10031	10512	13310	14191
5000	975	7	66,7	2	6999	6893	9826	9950	12574	12743	18228	18517
5000	975	7	66,7	5,7	7292	7164	10420	10514	13571	13686	20425	20584
5000	975	7	100	0,56	6369	6243	8606	8839	10624	10994	14359	15193
5000	975	7	100	2	7225	7003	10252	10262	13254	13245	19621	19668
5000	975	7	100	5,7	7526	7280	10875	10846	14322	14233	22078	21915
5000	975	12	28,57	0,56	10842	10816	13059	13789	14712	15665	17174	18362
5000	975	12	28,57	2	12855	12635	16116	16815	18728	19687	22935	24155
5000	975	12	28,57	5,7	13519	13239	17181	17895	20188	21189	25173	26468
5000	975	12	66,7	0,56	12688	12907	15776	16979	18216	19751	22097	24205
5000	975	12	66,7	2	15277	15285	20004	21105	24105	25523	31391	33363
5000	975	12	66,7	5,7	16178	16132	21587	22727	26448	27937	35496	37613
5000	975	12	100	0,56	13337	13257	16779	17867	19560	20975	24110	26311
5000	975	12	100	2	16087	15714	21381	22231	26102	27174	34808	36523
5000	975	12	100	5,7	17065	16602	23151	23999	28796	29861	39773	41514

## B.4 Parameterrechnungen Profil 35/207

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Profil 35/207 in tabellarischer Form dargestellt. In den ersten Spalten sind die Werte der einzelnen Variablen und in den weiteren Spalten die errechneten Steifigkeiten der Berechnungen am Faltwerk  $S_{E2n}$  mit den zugehörigen Ergebnissen der vereinfachten Stabwerksrechnung  $S_{Stab}$  für die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  zusammengestellt.

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	517,5	2	28,57	0,56	4135	3734	4673	4179	5030	4519	5502	5064
150	517,5	2	28,57	2	4788	4244	5527	4825	6031	5274	6721	5999
150	517,5	2	28,57	5,7	5048	4462	5878	5107	6453	5612	7251	6435
150	517,5	2	66,7	0,56	5784	5091	6893	6049	7696	6767	8862	7899
150	517,5	2	66,7	2	6670	5752	8170	6965	9305	7894	11020	9384
150	517,5	2	66,7	5,7	7094	6097	8816	7469	10151	8540	12223	10287
150	517,5	2	100	0,56	6541	5422	8002	6705	9113	7650	10812	9133
150	517,5	2	100	2	7458	6100	9378	7669	10901	8859	13330	10768
150	517,5	2	100	5,7	7937	6472	10144	8241	11945	9614	14909	11864
150	517,5	4	28,57	0,56	6874	6294	7353	6648	7665	6949	8089	7468
150	517,5	4	28,57	2	8054	7231	8713	7699	9148	8094	9744	8779
150	517,5	4	28,57	5,7	8476	7575	9209	8091	9694	8527	10364	9286
150	517,5	4	66,7	0,56	9948	9047	11012	9994	11750	10662	12820	11698
150	517,5	4	66,7	2	12003	10630	13533	11903	14618	12812	16217	14228
150	517,5	4	66,7	5,7	12852	11320	14614	12764	15880	13807	17768	15448
150	517,5	4	100	0,56	11377	9764	12815	11227	13851	12172	15412	13559
150	517,5	4	100	2	13789	11497	15861	13420	17382	14691	19719	16577
150	517,5	4	100	5,7	14852	12285	17265	14478	19070	15950	21885	18162
150	517,5	6	28,57	0,56	7859	7530	8300	7800	8600	8065	9035	8563
150	517,5	6	28,57	2	8962	8490	9531	8831	9921	9166	10490	9795
150	517,5	6	28,57	5,7	9325	8814	9940	9182	10365	9543	10985	10225
150	517,5	6	66,7	0,56	11374	11157	12361	12013	13073	12620	14168	13587
150	517,5	6	66,7	2	13424	12997	14769	14126	15754	14931	17287	16221
150	517,5	6	66,7	5,7	14179	13715	15680	14970	16787	15872	18524	17325
150	517,5	6	100	0,56	12946	12122	14270	13589	15257	14487	16826	15795
150	517,5	6	100	2	15426	14205	17251	16123	18632	17317	20860	19070
150	517,5	6	100	5,7	16387	15049	18447	17197	20020	18549	22586	20552
150	724,5	2	28,57	0,56	4543	4358	5181	4938	5607	5378	6177	6074
150	724,5	2	28,57	2	5415	5093	6343	5898	6991	6520	7893	7519
150	724,5	2	28,57	5,7	5771	5419	6839	6339	7599	7060	8677	8237
150	724,5	2	66,7	0,56	6086	5749	7294	6913	8176	7795	9462	9197
150	724,5	2	66,7	2	7190	6645	8912	8190	10238	9401	12278	11374
150	724,5	2	66,7	5,7	7731	7129	9757	8925	11368	10369	13934	12787
150	724,5	2	100	0,56	6783	6084	8331	7595	9514	8734	11327	10548
150	724,5	2	100	2	7899	6991	10028	8916	11740	10426	14510	12907
150	724,5	2	100	5,7	8494	7505	11000	9735	13089	11536	16612	14589
150	724,5	4	28,57	0,56	8363	8087	9009	8627	9427	9056	9988	9768
150	724,5	4	28,57	2	10286	9749	11267	10536	11917	11164	12803	12211
150	724,5	4	28,57	5,7	11014	10402	12145	11302	12902	12025	13943	13242
150	724,5	4	66,7	0,56	11469	11129	12764	12407	13658	13309	14937	14692
150	724,5	4	66,7	2	14544	13730	16614	15627	18090	16995	20260	19119
150	724,5	4	66,7	5,7	15895	14946	18389	17205	20205	18863	22928	21481
150	724,5	4	100	0,56	12874	11906	14566	13778	15776	15015	17577	16838
150	724,5	4	100	2	16381	14711	19075	17403	21067	19246	24115	22019
150	724,5	4	100	5,7	18020	16079	21314	19302	23812	21564	27732	25040
150	724,5	6	28,57	0,56	10175	10191	10779	10625	11183	11014	11756	11707
150	724,5	6	28,57	2	12193	12081	13054	12689	13639	13233	14477	14207
150	724,5	6	28,57	5,7	12898	12763	13863	13443	14522	14053	15471	15152
150	724,5	6	66,7	0,56	14013	14445	15253	15646	16133	16490	17459	17810
150	724,5	6	66,7	2	17497	17824	19393	19595	20770	20858	22884	22852
150	724,5	6	66,7	5,7	18874	19251	21088	21322	22714	22814	25245	25195
150	724,5	6	100	0,56	15685	15555	17302	17489	18486	18696	20331	20453
150	724,5	6	100	2	19801	19324	22304	22138	24181	23945	27168	26612

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_S$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	724,5	6	100	5,7	21517	20982	24483	24303	26742	26472	30399	29723
150	1035	2	28,57	0,56	4798	4894	5503	5611	5977	6153	6615	7007
150	1035	2	28,57	2	5837	5871	6911	6925	7673	7745	8750	9071
150	1035	2	28,57	5,7	6271	6320	7530	7557	8446	8541	9772	10169
150	1035	2	66,7	0,56	6213	6295	7464	7653	8378	8697	9713	10371
150	1035	2	66,7	2	7460	7429	9308	9315	10746	10830	12984	13348
150	1035	2	66,7	5,7	8081	8061	10295	10313	12086	12184	14993	15413
150	1035	2	100	0,56	6845	6628	8410	8348	9605	9670	11436	11808
150	1035	2	100	2	8080	7762	10297	10040	12094	11880	15020	14982
150	1035	2	100	5,7	8747	8425	11403	11131	13645	13401	17482	17393
150	1035	4	28,57	0,56	9690	10004	10510	10792	11039	11396	11744	12362
150	1035	4	28,57	2	12485	12759	13861	14056	14781	15062	16040	16697
150	1035	4	28,57	5,7	13610	13931	15260	15490	16380	16716	17937	18741
150	1035	4	66,7	0,56	12708	13251	14207	14928	15237	16115	16698	17920
150	1035	4	66,7	2	16853	17269	19493	20058	21391	22106	24187	25297
150	1035	4	66,7	5,7	18787	19306	22116	22830	24582	25494	28322	29766
150	1035	4	100	0,56	14040	14060	15936	16389	17284	17963	19269	20293
150	1035	4	100	2	18629	18320	21932	22031	24389	24672	28143	28717
150	1035	4	100	5,7	20901	20570	25129	25285	28384	28768	33545	34299
150	1035	6	28,57	0,56	12554	13400	13356	14094	13886	14669	14623	15647
150	1035	6	28,57	2	15889	16974	17171	18091	18037	19020	19265	20617
150	1035	6	28,57	5,7	17140	18387	18637	19703	19659	20807	21121	22724
150	1035	6	66,7	0,56	16570	18227	18076	19894	19129	21057	20682	22841
150	1035	6	66,7	2	21957	24190	24563	27039	26443	29080	29295	32263
150	1035	6	66,7	5,7	24265	26990	27471	30559	29829	33168	33478	37322
150	1035	6	100	0,56	18267	19442	20171	21946	21542	23541	23632	25857
150	1035	6	100	2	24468	25978	27793	30156	30267	32936	34149	37077
150	1035	6	100	5,7	27270	29175	31436	34474	34608	38104	39715	43658
800	517,5	2	28,57	0,56	4170	3838	4729	4324	5101	4698	5598	5300
800	517,5	2	28,57	2	4882	4400	5675	5051	6225	5559	6987	6388
800	517,5	2	28,57	5,7	5175	4643	6080	5375	6720	5954	7623	6912
800	517,5	2	66,7	0,56	5836	5218	6983	6254	7821	7042	9047	8302
800	517,5	2	66,7	2	6784	5941	8377	7282	9603	8332	11487	10049
800	517,5	2	66,7	5,7	7256	6324	9120	7860	10599	9090	12953	11150
800	517,5	2	100	0,56	6608	5552	8122	6925	9284	7956	11079	9602
800	517,5	2	100	2	7576	6290	9604	8002	11238	9335	13891	11523
800	517,5	2	100	5,7	8103	6701	10475	8655	12454	10218	15800	12855
800	517,5	4	28,57	0,56	7127	6791	7652	7221	7994	7580	8459	8194
800	517,5	4	28,57	2	8563	7966	9329	8562	9838	9060	10539	9917
800	517,5	4	28,57	5,7	9101	8413	9972	9081	10556	9642	11368	10614
800	517,5	4	66,7	0,56	10277	9774	11421	10897	12216	11695	13370	12932
800	517,5	4	66,7	2	12775	11770	14537	13366	15799	14522	17668	16334
800	517,5	4	66,7	5,7	13876	12676	15979	14536	17512	15903	19824	18077
800	517,5	4	100	0,56	11736	10539	13274	12231	14385	13345	16061	14992
800	517,5	4	100	2	14646	12720	17008	15061	18761	16652	21464	19046
800	517,5	4	100	5,7	16021	13752	18880	16495	21051	18398	24475	21317
800	517,5	6	28,57	0,56	8317	8354	8808	8695	9142	9022	9624	9626
800	517,5	6	28,57	2	9731	9637	10401	10092	10862	10526	11535	11332
800	517,5	6	28,57	5,7	10216	10085	10956	10585	11469	11062	12219	11953
800	517,5	6	66,7	0,56	12027	12460	13106	13514	13883	14261	15072	15445
800	517,5	6	66,7	2	14704	14975	16290	16458	17453	17522	19262	19221
800	517,5	6	66,7	5,7	15755	16004	17583	17700	18937	18929	21068	20908
800	517,5	6	100	0,56	13669	13535	15107	15287	16173	16375	17864	17963
800	517,5	6	100	2	16913	16383	19052	18821	20669	20372	23273	22665
800	517,5	6	100	5,7	18261	17595	20763	20407	22681	22223	25817	24943
800	724,5	2	28,57	0,56	4638	4484	5317	5121	5775	5606	6394	6375
800	724,5	2	28,57	2	5615	5297	6649	6207	7385	6918	8428	8070
800	724,5	2	28,57	5,7	6029	5664	7243	6719	8129	7557	9418	8946
800	724,5	2	66,7	0,56	6198	5876	7469	7120	8406	8074	9783	9604
800	724,5	2	66,7	2	7404	6845	9272	8531	10738	9876	13033	12101
800	724,5	2	66,7	5,7	8016	7375	10260	9359	12089	10990	15083	13778
800	724,5	2	100	0,56	6911	6209	8538	7803	9794	9022	11738	10985
800	724,5	2	100	2	8112	7182	10400	9249	12272	10900	15353	13660
800	724,5	2	100	5,7	8776	7742	11518	10161	13858	12160	17908	15628

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	C <sub>S</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
800	724,5	4	28,57	0,56	8910	8847	9652	9516	10134	10039	10778	10888
800	724,5	4	28,57	2	11396	11004	12628	12052	13452	12877	14584	14232
800	724,5	4	28,57	5,7	12399	11892	13872	13127	14873	14108	16266	15740
800	724,5	4	66,7	0,56	12027	11981	13445	13463	14424	14512	15821	16113
800	724,5	4	66,7	2	15839	15208	18299	17546	20070	19250	22684	21896
800	724,5	4	66,7	5,7	17634	16786	20731	19658	23022	21801	26498	25205
800	724,5	4	100	0,56	13430	12765	15258	14861	16566	16265	18508	18339
800	724,5	4	100	2	17689	16202	20818	19374	23149	21595	26722	24964
800	724,5	4	100	5,7	19824	17951	23818	21862	26892	24687	31768	29095
800	724,5	6	28,57	0,56	11240	11602	11954	12176	12429	12667	13096	13516
800	724,5	6	28,57	2	14091	14292	15210	15166	15970	15912	17054	17212
800	724,5	6	28,57	5,7	15155	15318	16456	16326	17346	17191	18627	18708
800	724,5	6	66,7	0,56	15203	16131	16588	17572	17562	18578	19011	20131
800	724,5	6	66,7	2	19955	20709	22295	23009	23986	24647	26561	27202
800	724,5	6	66,7	5,7	21991	22761	24850	25550	26952	27567	30209	30760
800	724,5	6	100	0,56	16897	17275	18671	19485	19956	20880	21935	22903
800	724,5	6	100	2	22411	22308	25427	25750	27675	28002	31212	31328
800	724,5	6	100	5,7	24907	24654	28656	28864	31510	31682	36105	35929
800	1035	2	28,57	0,56	4953	4994	5715	5757	6233	6336	6936	7246
800	1035	2	28,57	2	6127	6040	7337	7186	8213	8085	9473	9543
800	1035	2	28,57	5,7	6633	6528	8079	7887	9157	8979	10755	10799
800	1035	2	66,7	0,56	6399	6377	7735	7784	8722	8873	10176	10624
800	1035	2	66,7	2	7773	7561	9805	9541	11416	11145	13965	13834
800	1035	2	66,7	5,7	8479	8227	10959	10609	13013	12611	16433	16107
800	1035	2	100	0,56	7054	6703	8727	8471	10018	9839	12017	12061
800	1035	2	100	2	8401	7883	10823	10246	12817	12173	16125	15447
800	1035	2	100	5,7	9152	8577	12099	11401	14643	13799	19109	18066
800	1035	4	28,57	0,56	10385	10696	11324	11614	11932	12303	12740	13385
800	1035	4	28,57	2	13937	14024	15661	15628	16827	16857	18434	18823
800	1035	4	28,57	5,7	15458	15499	17607	17481	19092	19026	21183	21549
800	1035	4	66,7	0,56	13345	13859	14980	15680	16103	16970	17692	18922
800	1035	4	66,7	2	18340	18430	21446	21593	23701	23930	27039	27568
800	1035	4	66,7	5,7	20817	20822	24900	24916	27978	28047	32713	33092
800	1035	4	100	0,56	14663	14642	16708	17107	18161	18786	20298	21271
800	1035	4	100	2	20090	19429	23894	23494	26745	26427	31120	30940
800	1035	4	100	5,7	22942	22033	28011	27310	31980	31284	38357	37659
800	1035	6	28,57	0,56	13968	14825	14910	15677	15528	16353	16377	17464
800	1035	6	28,57	2	18613	19506	20289	20990	21420	22177	23012	24152
800	1035	6	28,57	5,7	20489	21460	22534	23268	23933	24729	25928	27192
800	1035	6	66,7	0,56	17928	19548	19588	21399	20737	22683	22409	24628
800	1035	6	66,7	2	24987	26777	28164	30145	30449	32556	33883	36277
800	1035	6	66,7	5,7	28259	30336	32367	34698	35399	37897	40078	42961
800	1035	6	100	0,56	19593	20721	21656	23396	23127	25113	25342	27596
800	1035	6	100	2	27549	28517	31506	33214	34435	36383	38984	41101
800	1035	6	100	5,7	31438	32508	36653	38651	40635	42940	47025	49531
5000	517,5	2	28,57	0,56	4130	3872	4689	4369	5063	4752	5563	5369
5000	517,5	2	28,57	2	4858	4447	5661	5118	6221	5644	7003	6507
5000	517,5	2	28,57	5,7	5161	4697	6083	5455	6740	6058	7676	7060
5000	517,5	2	66,7	0,56	5796	5251	6941	6307	7779	7115	9007	8413
5000	517,5	2	66,7	2	6757	5990	8363	7368	9606	8456	11532	10253
5000	517,5	2	66,7	5,7	7244	6384	9138	7969	10655	9254	13101	11433
5000	517,5	2	100	0,56	6572	5584	8085	6979	9248	8034	11049	9731
5000	517,5	2	100	2	7548	6338	9588	8089	11242	9468	13944	11757
5000	517,5	2	100	5,7	8089	6760	10493	8768	12519	10396	15987	13187
5000	517,5	4	28,57	0,56	7118	6948	7654	7405	8005	7785	8484	8435
5000	517,5	4	28,57	2	8639	8211	9443	8858	9980	9397	10726	10327
5000	517,5	4	28,57	5,7	9219	8698	10143	9429	10768	10042	11643	11109
5000	517,5	4	66,7	0,56	10246	10006	11402	11198	12208	12050	13381	13375
5000	517,5	4	66,7	2	12907	12175	14756	13918	16088	15195	18077	17212
5000	517,5	4	66,7	5,7	14112	13178	16361	15240	18019	16777	20549	19250
5000	517,5	4	100	0,56	11690	10787	13239	12572	14359	13759	16053	15526
5000	517,5	4	100	2	14789	13159	17257	15698	19101	17453	21966	20130
5000	517,5	4	100	5,7	16297	14305	19352	17326	21703	19468	25456	22813
5000	517,5	6	28,57	0,56	8348	8633	8858	9004	9206	9355	9712	10004

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	c <sub>S</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
5000	517,5	6	28,57	2	9878	10052	10592	10557	11086	11035	11811	11924
5000	517,5	6	28,57	5,7	10413	10554	11209	11114	11763	11645	12581	12638
5000	517,5	6	66,7	0,56	12073	12937	13183	14084	13985	14899	15212	16193
5000	517,5	6	66,7	2	15019	15787	16717	17461	17969	18672	19927	20615
5000	517,5	6	66,7	5,7	16214	16982	18208	18930	19698	20355	22061	22670
5000	517,5	6	100	0,56	13711	14063	15182	15953	16274	17138	18004	18877
5000	517,5	6	100	2	17296	17301	19585	20034	21325	21803	24139	24445
5000	517,5	6	100	5,7	18844	18718	21583	21932	23703	24051	27196	27271
5000	724,5	2	28,57	0,56	4644	4511	5331	5164	5797	5664	6428	6459
5000	724,5	2	28,57	2	5657	5348	6725	6294	7493	7039	8595	8257
5000	724,5	2	28,57	5,7	6093	5729	7360	6833	8298	7721	9684	9207
5000	724,5	2	66,7	0,56	6211	5897	7494	7164	8442	8144	9841	9727
5000	724,5	2	66,7	2	7451	6887	9367	8626	10886	10029	13296	12383
5000	724,5	2	66,7	5,7	8093	7434	10422	9495	12351	11215	15575	14212
5000	724,5	2	100	0,56	6933	6227	8577	7847	9849	9094	11828	11123
5000	724,5	2	100	2	8162	7221	10501	9341	12433	11056	15652	13967
5000	724,5	2	100	5,7	8855	7797	11690	10294	14146	12393	18486	16109
5000	724,5	4	28,57	0,56	9072	9132	9856	9869	10367	10441	11054	11369
5000	724,5	4	28,57	2	11854	11559	13233	12769	14168	13721	15465	15290
5000	724,5	4	28,57	5,7	13023	12591	14715	14045	15884	15206	17538	17150
5000	724,5	4	66,7	0,56	12178	12327	13649	13931	14667	15074	16121	16824
5000	724,5	4	66,7	2	16416	15941	19134	18598	21116	20567	24075	23661
5000	724,5	4	66,7	5,7	18512	17770	22055	21124	24734	23687	28884	27839
5000	724,5	4	100	0,56	13573	13120	15456	15358	16804	16876	18810	19136
5000	724,5	4	100	2	18281	16957	21701	20498	24279	23038	28270	26954
5000	724,5	4	100	5,7	20762	18980	25293	23466	28856	26809	34626	32166
5000	724,5	6	28,57	0,56	11658	12252	12436	12914	12954	13471	13682	14427
5000	724,5	6	28,57	2	15039	15479	16344	16551	17237	17456	18519	19026
5000	724,5	6	28,57	5,7	16364	16762	17923	18030	19002	19108	20569	20998
5000	724,5	6	66,7	0,56	15689	17005	17162	18628	18198	19765	19734	21515
5000	724,5	6	66,7	2	21346	22522	24054	25308	26026	27317	29042	30463
5000	724,5	6	66,7	5,7	23930	25132	27380	28636	29953	31217	33987	35348
5000	724,5	6	100	0,56	17391	18192	19260	20629	20611	22187	22684	24454
5000	724,5	6	100	2	23939	24244	27399	28309	29992	31032	34084	35103
5000	724,5	6	100	5,7	27112	27225	31614	32389	35089	35955	40747	41441
5000	1035	2	28,57	0,56	5001	5013	5785	5796	6321	6391	7053	7333
5000	1035	2	28,57	2	6239	6090	7520	7284	8459	8230	9832	9778
5000	1035	2	28,57	5,7	6784	6597	8335	8025	9514	9188	11298	11152
5000	1035	2	66,7	0,56	6466	6388	7835	7819	8852	8933	10359	10737
5000	1035	2	66,7	2	7904	7595	10033	9632	11741	11300	14487	14128
5000	1035	2	66,7	5,7	8659	8280	11292	10747	13515	12852	17305	16588
5000	1035	2	100	0,56	7136	6712	8852	8504	10183	9899	12256	12182
5000	1035	2	100	2	8540	7913	11065	10328	13169	12320	16708	15744
5000	1035	2	100	5,7	9338	8624	12450	11529	15184	14031	20093	18558
5000	1035	4	28,57	0,56	10750	11088	11776	12111	12444	12875	13334	14068
5000	1035	4	28,57	2	14911	14910	16957	16820	18365	18286	20336	20637
5000	1035	4	28,57	5,7	16797	16681	19448	19115	21329	21029	24039	24180
5000	1035	4	66,7	0,56	13682	14241	15412	16200	16603	17594	18287	19705
5000	1035	4	66,7	2	19377	19341	22917	22923	25525	25610	29428	29828
5000	1035	4	66,7	5,7	22367	22114	27224	26894	30978	30635	36890	36773
5000	1035	4	100	0,56	14988	15016	17128	17622	18652	19413	20888	22077
5000	1035	4	100	2	21101	20317	25355	24802	28582	28102	33574	33241
5000	1035	4	100	5,7	24493	23307	30404	29294	35137	33929	42903	41530
5000	1035	6	28,57	0,56	14919	15866	15995	16879	16701	17665	17666	18935
5000	1035	6	28,57	2	20883	21754	23024	23696	24484	25225	26551	27737
5000	1035	6	28,57	5,7	23489	24379	26234	26850	28144	28824	30902	32129
5000	1035	6	66,7	0,56	18881	20627	20690	22695	21936	24130	23732	26287
5000	1035	6	66,7	2	27676	29361	31542	33453	34336	36408	38535	40964
5000	1035	6	66,7	5,7	32109	33947	37411	39497	41382	43641	47571	50245
5000	1035	6	100	0,56	20527	21791	22738	24688	24304	26567	26640	29282
5000	1035	6	100	2	30298	31105	35001	36566	38490	40326	43885	45962
5000	1035	6	100	5,7	35487	36177	42067	43641	47155	49008	55375	57390

## B.5 Parameterrechnungen Profil 106-250

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Profil 106/250 in tabellarischer Form dargestellt. In den ersten Spalten sind die Werte der einzelnen Variablen und in den weiteren Spalten die errechneten Steifigkeiten der Berechnungen am Falzwerk  $S_{E2n}$  mit den zugehörigen Ergebnissen der vereinfachten Stabwerksrechnung  $S_{Stab}$  für die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  dargestellt. Die Klammerwerte gelten für  $t_N = 0,75$  mm.

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75$ mm		$t_N=0,88$ mm		$t_N=1$ mm		$t_N=1,25$ mm	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	525	2 (2,5)	28,57	0,56	1102	1085	1036	1021	1367	1343	2075	2032
150	525	2 (2,5)	28,57	2	1157	1132	1092	1068	1468	1425	2322	2224
150	525	2 (2,5)	28,57	5,7	1175	1150	1111	1086	1503	1458	2413	2306
150	525	2 (2,5)	66,7	0,56	1200	1196	1138	1131	1548	1528	2510	2465
150	525	2 (2,5)	66,7	2	1249	1236	1187	1169	1640	1597	2761	2642
150	525	2 (2,5)	66,7	5,7	1267	1254	1206	1188	1677	1632	2870	2738
150	525	2 (2,5)	100	0,56	1233	1225	1174	1159	1614	1576	2685	2600
150	525	2 (2,5)	100	2	1277	1261	1216	1193	1694	1638	2914	2762
150	525	2 (2,5)	100	5,7	1295	1279	1234	1211	1730	1672	3022	2857
150	525	6	28,57	0,56	4176	4013	5059	4806	5718	5417	6696	6307
150	525	6	28,57	2	4624	4391	5735	5358	6599	6126	7940	7283
150	525	6	28,57	5,7	4765	4515	5955	5545	6891	6371	8367	7633
150	525	6	66,7	0,56	5160	5058	6561	6296	7702	7315	9573	9026
150	525	6	66,7	2	5754	5552	7553	7080	9102	8385	11825	10672
150	525	6	66,7	5,7	5956	5736	7905	7383	9618	8812	12710	11368
150	525	6	100	0,56	5529	5365	7167	6736	8551	7903	10927	10054
150	525	6	100	2	6156	5878	8252	7569	10131	9060	13615	11915
150	525	6	100	5,7	6377	6078	8654	7905	10744	9544	14741	12753
150	525	10	28,57	0,56	6200	6122	6980	6799	7517	7296	8272	7948
150	525	10	28,57	2	6843	6700	7805	7519	8481	8127	9451	8940
150	525	10	28,57	5,7	7038	6880	8059	7746	8781	8393	9824	9262
150	525	10	66,7	0,56	8243	8500	9684	9714	10756	10644	12392	12100
150	525	10	66,7	2	9299	9490	11165	11028	12604	12230	14887	14157
150	525	10	66,7	5,7	9641	9833	11658	11493	13234	12804	15770	14926
150	525	10	100	0,56	9046	9268	10817	10650	12182	11758	14348	13758
150	525	10	100	2	10263	10387	12586	12158	14452	13607	17555	16272
150	525	10	100	5,7	10668	10789	13197	12712	15259	14304	18753	17267
150	750	2 (2,5)	28,57	0,56	1148	1163	1073	1090	1427	1451	2198	2247
150	750	2 (2,5)	28,57	2	1211	1219	1138	1145	1545	1549	2494	2489
150	750	2 (2,5)	28,57	5,7	1232	1240	1159	1166	1585	1589	2603	2594
150	750	2 (2,5)	66,7	0,56	1227	1253	1159	1182	1581	1611	2578	2645
150	750	2 (2,5)	66,7	2	1283	1298	1214	1224	1684	1690	2865	2856
150	750	2 (2,5)	66,7	5,7	1303	1318	1235	1246	1726	1730	2989	2971
150	750	2 (2,5)	100	0,56	1254	1275	1190	1204	1638	1651	2733	2766
150	750	2 (2,5)	100	2	1304	1316	1237	1242	1728	1723	2990	2957
150	750	2 (2,5)	100	5,7	1324	1336	1257	1263	1768	1762	3112	3069
150	750	6	28,57	0,56	4816	4844	5969	5964	6860	6850	8229	8199
150	750	6	28,57	2	5437	5410	6954	6843	8195	8029	10227	9935
150	750	6	28,57	5,7	5636	5601	7284	7152	8656	8458	10955	10598
150	750	6	66,7	0,56	5657	5793	7310	7399	8689	8756	11012	11103
150	750	6	66,7	2	6409	6464	8613	8526	10589	10364	14235	13753
150	750	6	66,7	5,7	6668	6719	9088	8975	11316	11034	15578	14949
150	750	6	100	0,56	5965	6065	7836	7811	9447	9330	12274	12174
150	750	6	100	2	6738	6744	9216	8977	11514	11022	15961	15078
150	750	6	100	5,7	7014	7014	9739	9462	12341	11761	17592	16472
150	750	10	28,57	0,56	7849	8079	9010	9186	9823	9995	10970	11088
150	750	10	28,57	2	8918	9118	10446	10550	11552	11625	13166	13121
150	750	10	28,57	5,7	9252	9455	10907	11003	12117	12177	13904	13827
150	750	10	66,7	0,56	9858	10556	11779	12387	13228	13798	15450	16015
150	750	10	66,7	2	11442	12153	14103	14640	16220	16632	19657	19894
150	750	10	66,7	5,7	11972	12727	14914	15482	17300	17725	21260	21470
150	750	10	100	0,56	10617	11322	12893	13375	14665	15019	17488	17920
150	750	10	100	2	12383	13072	15572	15891	18208	18237	22697	22537

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_S$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	750	10	100	5,7	12991	13726	16542	16869	19543	19533	24799	24529
150	1050	2 (2,5)	28,57	0,56	1174	1212	1093	1132	1458	1519	2262	2391
150	1050	2 (2,5)	28,57	2	1243	1274	1163	1193	1586	1629	2586	2672
150	1050	2 (2,5)	28,57	5,7	1265	1297	1186	1217	1630	1675	2706	2795
150	1050	2 (2,5)	66,7	0,56	1241	1285	1168	1210	1593	1660	2601	2758
150	1050	2 (2,5)	66,7	2	1300	1334	1226	1257	1703	1746	2906	2993
150	1050	2 (2,5)	66,7	5,7	1322	1356	1249	1279	1748	1790	3038	3123
150	1050	2 (2,5)	100	0,56	1265	1304	1195	1229	1645	1695	2741	2869
150	1050	2 (2,5)	100	2	1317	1348	1245	1270	1740	1772	3012	3079
150	1050	2 (2,5)	100	5,7	1338	1369	1267	1292	1782	1815	3141	3204
150	1050	6	28,57	0,56	5274	5516	6650	6959	7744	8136	9474	10008
150	1050	6	28,57	2	6038	6271	7914	8198	9514	9874	12268	12751
150	1050	6	28,57	5,7	6288	6532	8349	8651	10148	10536	13343	13876
150	1050	6	66,7	0,56	5988	6347	7826	8280	9387	9959	12067	12950
150	1050	6	66,7	2	6861	7177	9381	9745	11710	12134	16177	16781
150	1050	6	66,7	5,7	7165	7498	9959	10347	12625	13079	17976	18629
150	1050	6	100	0,56	6248	6578	8280	8649	10053	10492	13210	14001
150	1050	6	100	2	7128	7402	9887	10133	12509	12728	17747	18077
150	1050	6	100	5,7	7445	7735	10507	10767	13518	13742	19846	20160
150	1050	10	28,57	0,56	9265	9992	10827	11649	11943	12879	13543	14598
150	1050	10	28,57	2	10805	11648	12989	13957	14627	15750	17095	18380
150	1050	10	28,57	5,7	11303	12208	13714	14768	15552	16789	18370	19809
150	1050	10	66,7	0,56	11158	12414	13527	14949	15339	16936	18142	20101
150	1050	10	66,7	2	13274	14724	16752	18421	19608	21501	24391	26747
150	1050	10	66,7	5,7	14003	15589	17929	19796	21236	23393	26955	29724
150	1050	10	100	0,56	11849	13123	14571	15915	16711	18175	20139	22125
150	1050	10	100	2	14145	15583	18177	19686	21604	23214	27602	29792
150	1050	10	100	5,7	14957	16538	19538	21236	23550	25394	30846	33442
800	525	2 (2,5)	28,57	0,56	1098	1086	1032	1021	1363	1344	2072	2042
800	525	2 (2,5)	28,57	2	1153	1133	1088	1068	1465	1427	2324	2239
800	525	2 (2,5)	28,57	5,7	1171	1150	1107	1087	1500	1460	2417	2324
800	525	2 (2,5)	66,7	0,56	1196	1195	1135	1131	1545	1527	2506	2469
800	525	2 (2,5)	66,7	2	1245	1235	1184	1168	1636	1596	2760	2649
800	525	2 (2,5)	66,7	5,7	1263	1253	1202	1187	1673	1631	2870	2746
800	525	2 (2,5)	100	0,56	1229	1224	1171	1158	1611	1574	2683	2601
800	525	2 (2,5)	100	2	1273	1260	1213	1192	1691	1636	2912	2765
800	525	2 (2,5)	100	5,7	1291	1277	1231	1210	1726	1670	3022	2862
800	525	6	28,57	0,56	4239	4153	5181	5044	5896	5746	6980	6800
800	525	6	28,57	2	4730	4576	5944	5686	6914	6595	8468	8023
800	525	6	28,57	5,7	4887	4717	6196	5907	7261	6896	8999	8476
800	525	6	66,7	0,56	5200	5184	6659	6547	7863	7698	9871	9685
800	525	6	66,7	2	5839	5724	7754	7439	9447	8956	12518	11728
800	525	6	66,7	5,7	6059	5927	8152	7789	10050	9470	13609	12625
800	525	6	100	0,56	5558	5482	7249	6982	8693	8288	11205	10751
800	525	6	100	2	6227	6037	8435	7920	10459	9635	14319	13035
800	525	6	100	5,7	6466	6255	8885	8304	11165	10212	15688	14103
800	525	10	28,57	0,56	6509	6613	7395	7446	8015	8063	8889	8891
800	525	10	28,57	2	7283	7334	8414	8374	9228	9162	10407	10244
800	525	10	28,57	5,7	7522	7562	8737	8675	9617	9523	10905	10699
800	525	10	66,7	0,56	8601	9118	10202	10605	11409	11760	13257	13592
800	525	10	66,7	2	9863	10336	12029	12294	13738	13865	16491	16444
800	525	10	66,7	5,7	10282	10766	12660	12911	14567	14656	17700	17564
800	525	10	100	0,56	9406	9902	11353	11589	12868	12956	15276	15419
800	525	10	100	2	10852	11263	13521	13513	15709	15394	19404	18887
800	525	10	100	5,7	11347	11763	14299	14244	16767	16349	21042	20333
800	750	2 (2,5)	28,57	0,56	1146	1161	1072	1088	1427	1449	2207	2255
800	750	2 (2,5)	28,57	2	1210	1217	1137	1143	1546	1548	2513	2503
800	750	2 (2,5)	28,57	5,7	1231	1238	1159	1165	1588	1589	2626	2611
800	750	2 (2,5)	66,7	0,56	1226	1250	1159	1180	1582	1608	2587	2646
800	750	2 (2,5)	66,7	2	1281	1296	1214	1222	1686	1687	2879	2860
800	750	2 (2,5)	66,7	5,7	1302	1316	1235	1243	1728	1728	3007	2976
800	750	2 (2,5)	100	0,56	1253	1273	1190	1202	1640	1648	2743	2766
800	750	2 (2,5)	100	2	1303	1314	1237	1240	1730	1720	3004	2958
800	750	2 (2,5)	100	5,7	1323	1333	1257	1261	1770	1759	3130	3072

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	C <sub>S</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
800	750	6	28,57	0,56	4951	5028	6217	6294	7220	7324	8801	8946
800	750	6	28,57	2	5650	5666	7370	7329	8830	8761	11334	11181
800	750	6	28,57	5,7	5878	5884	7766	7702	9407	9299	12308	12076
800	750	6	66,7	0,56	5741	5921	7480	7663	8954	9168	11475	11831
800	750	6	66,7	2	6556	6644	8934	8922	11124	11016	15301	15026
800	750	6	66,7	5,7	6842	6921	9477	9432	11980	11805	16977	16527
800	750	6	100	0,56	6031	6174	7974	8050	9667	9713	12670	12870
800	750	6	100	2	6859	6898	9488	9334	11979	11626	16929	16292
800	750	6	100	5,7	7159	7187	10074	9876	12932	12479	18903	17994
800	750	10	28,57	0,56	8509	8863	9916	10267	10919	11308	12352	12752
800	750	10	28,57	2	9887	10204	11843	12110	13304	13579	15493	15705
800	750	10	28,57	5,7	10332	10651	12489	12745	14125	14384	16617	16791
800	750	10	66,7	0,56	10459	11275	12646	13468	14312	15180	16879	17895
800	750	10	66,7	2	12401	13196	15594	16303	18197	18858	22516	23142
800	750	10	66,7	5,7	13071	13904	16668	17400	19676	20340	24819	25403
800	750	10	100	0,56	11176	11995	13710	14418	15693	16375	18857	19801
800	750	10	100	2	13299	14055	17029	17514	20175	20453	25625	25870
800	750	10	100	5,7	14051	14841	18281	18757	21953	22165	28552	28640
800	1050	2 (2,5)	28,57	0,56	1176	1210	1096	1130	1466	1518	2287	2397
800	1050	2 (2,5)	28,57	2	1246	1272	1167	1191	1596	1628	2626	2683
800	1050	2 (2,5)	28,57	5,7	1268	1295	1190	1215	1641	1674	2753	2809
800	1050	2 (2,5)	66,7	0,56	1243	1283	1172	1209	1602	1658	2628	2759
800	1050	2 (2,5)	66,7	2	1303	1332	1231	1255	1714	1744	2943	2996
800	1050	2 (2,5)	66,7	5,7	1325	1354	1254	1278	1759	1788	3081	3126
800	1050	2 (2,5)	100	0,56	1267	1302	1200	1228	1654	1693	2770	2868
800	1050	2 (2,5)	100	2	1320	1346	1250	1269	1751	1770	3049	3080
800	1050	2 (2,5)	100	5,7	1341	1367	1272	1291	1794	1813	3184	3206
800	1050	6	28,57	0,56	5440	5669	6946	7239	8168	8544	10150	10671
800	1050	6	28,57	2	6294	6488	8406	8629	10271	10542	13622	13959
800	1050	6	28,57	5,7	6577	6775	8920	9145	11049	11322	15029	15360
800	1050	6	66,7	0,56	6090	6431	8018	8456	9676	10237	12562	13450
800	1050	6	66,7	2	7027	7297	9727	10018	12278	12595	17317	17727
800	1050	6	66,7	5,7	7359	7634	10374	10666	13330	13636	19489	19845
800	1050	6	100	0,56	6330	6646	8438	8798	10294	10733	13632	14444
800	1050	6	100	2	7265	7498	10177	10362	12994	13127	18757	18908
800	1050	6	100	5,7	7606	7844	10860	11037	14130	14226	21221	21239
800	1050	10	28,57	0,56	10070	10723	11944	12690	13308	14168	15289	16277
800	1050	10	28,57	2	12020	12718	14792	15578	16941	17852	20280	21310
800	1050	10	28,57	5,7	12671	13409	15790	16628	18263	19243	22200	23320
800	1050	10	66,7	0,56	11800	12929	14453	15751	16502	17984	19686	21558
800	1050	10	66,7	2	14313	15509	18400	19750	21838	23351	27731	29604
800	1050	10	66,7	5,7	15203	16493	19897	21373	23977	25651	31266	33381
800	1050	10	100	0,56	12426	13571	15410	16638	17772	19133	21558	23472
800	1050	10	100	2	15099	16270	19718	20894	23724	24930	30870	32498
800	1050	10	100	5,7	16070	17332	21405	22682	26206	27514	35192	36982
5000	525	2	28,57	0,56	669	717	997	1034	1328	1356	2036	2055
5000	525	2	28,57	2	695	739	1053	1080	1430	1439	2291	2253
5000	525	2	28,57	5,7	703	748	1072	1099	1465	1472	2384	2338
5000	525	2	66,7	0,56	718	773	1101	1143	1510	1538	2472	2479
5000	525	2	66,7	2	738	790	1149	1180	1602	1607	2726	2659
5000	525	2	66,7	5,7	746	798	1168	1199	1639	1642	2837	2756
5000	525	2	100	0,56	733	787	1137	1170	1577	1585	2650	2610
5000	525	2	100	2	751	802	1179	1204	1657	1647	2879	2774
5000	525	2	100	5,7	759	809	1197	1222	1693	1681	2990	2871
5000	525	6	28,57	0,56	4221	4196	5177	5115	5907	5845	7019	6955
5000	525	6	28,57	2	4727	4632	5970	5785	6974	6741	8600	8271
5000	525	6	28,57	5,7	4889	4778	6235	6018	7341	7062	9174	8764
5000	525	6	66,7	0,56	5174	5217	6643	6614	7859	7805	9899	9890
5000	525	6	66,7	2	5828	5769	7774	7539	9511	9128	12707	12096
5000	525	6	66,7	5,7	6055	5976	8190	7904	10148	9675	13894	13083
5000	525	6	100	0,56	5530	5510	7226	7044	8678	8393	11218	10965
5000	525	6	100	2	6212	6076	8448	8014	10513	9806	14511	13428
5000	525	6	100	5,7	6458	6298	8915	8414	11258	10418	15994	14603
5000	525	10	28,57	0,56	6562	6768	7480	7658	8125	8321	9040	9220

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
5000	525	10	28,57	2	7385	7541	8576	8668	9438	9530	10702	10730
5000	525	10	28,57	5,7	7642	7788	8927	8999	9866	9933	11258	11247
5000	525	10	66,7	0,56	8664	9310	10314	10904	11566	12156	13493	14162
5000	525	10	66,7	2	10011	10616	12292	12758	14117	14506	17099	17429
5000	525	10	66,7	5,7	10464	11083	12988	13446	15048	15407	18491	18751
5000	525	10	100	0,56	9467	10095	11464	11905	13031	13386	15530	16071
5000	525	10	100	2	11008	11553	13812	14016	16148	16110	20146	20063
5000	525	10	100	5,7	11543	12094	14672	14831	17341	17203	22048	21785
5000	750	2	28,57	0,56	720	745	1066	1093	1421	1453	2202	2257
5000	750	2	28,57	2	749	770	1131	1147	1541	1552	2510	2505
5000	750	2	28,57	5,7	758	780	1153	1169	1582	1592	2625	2614
5000	750	2	66,7	0,56	760	790	1153	1184	1577	1611	2584	2646
5000	750	2	66,7	2	784	809	1208	1227	1682	1690	2878	2859
5000	750	2	66,7	5,7	792	818	1230	1248	1724	1730	3007	2975
5000	750	2	100	0,56	774	801	1185	1207	1636	1652	2742	2765
5000	750	2	100	2	794	818	1232	1245	1726	1723	3004	2956
5000	750	2	100	5,7	802	826	1252	1265	1767	1762	3130	3070
5000	750	6	28,57	0,56	4981	5072	6285	6391	7330	7480	9006	9233
5000	750	6	28,57	2	5710	5734	7513	7491	9078	9040	11845	11749
5000	750	6	28,57	5,7	5951	5963	7942	7892	9719	9636	12978	12790
5000	750	6	66,7	0,56	5754	5942	7521	7730	9029	9298	11643	12124
5000	750	6	66,7	2	6596	6681	9045	9044	11341	11266	15844	15659
5000	750	6	66,7	5,7	6893	6966	9622	9582	12274	12120	17760	17373
5000	750	6	100	0,56	6040	6188	8004	8107	9726	9830	12810	13154
5000	750	6	100	2	6891	6924	9581	9439	12168	11855	17437	16908
5000	750	6	100	5,7	7201	7220	10201	10008	13197	12771	19665	18832
5000	750	10	28,57	0,56	8762	9169	10298	10735	11410	11916	13020	13589
5000	750	10	28,57	2	10313	10675	12530	12874	14231	14616	16852	17225
5000	750	10	28,57	5,7	10825	11186	13301	13632	15240	15606	18295	18625
5000	750	10	66,7	0,56	10697	11560	13035	13967	14839	15881	17649	18968
5000	750	10	66,7	2	12853	13671	16407	17200	19388	20194	24487	25397
5000	750	10	66,7	5,7	13614	14464	17680	18488	21202	22003	27473	28333
5000	750	10	100	0,56	11399	12261	14083	14908	16208	17079	19622	20919
5000	750	10	100	2	13741	14505	17849	18408	21410	21824	27756	28293
5000	750	10	100	5,7	14590	15377	19321	19855	23574	23896	31524	31864
5000	1050	2	28,57	0,56	740	764	1097	1131	1468	1517	2293	2394
5000	1050	2	28,57	2	771	791	1168	1192	1599	1628	2636	2679
5000	1050	2	28,57	5,7	781	802	1192	1216	1644	1673	2765	2805
5000	1050	2	66,7	0,56	774	801	1174	1210	1606	1658	2638	2754
5000	1050	2	66,7	2	800	821	1233	1256	1718	1744	2956	2991
5000	1050	2	66,7	5,7	809	831	1256	1279	1764	1788	3096	3121
5000	1050	2	100	0,56	787	810	1202	1230	1659	1693	2782	2864
5000	1050	2	100	2	808	828	1253	1270	1756	1770	3064	3075
5000	1050	2	100	5,7	817	837	1274	1292	1799	1812	3200	3200
5000	1050	6	28,57	0,56	5502	5711	7074	7349	8373	8736	10523	11051
5000	1050	6	28,57	2	6405	6563	8660	8834	10712	10923	14558	14814
5000	1050	6	28,57	5,7	6708	6863	9230	9394	11605	11797	16278	16486
5000	1050	6	66,7	0,56	6129	6444	8102	8517	9817	10365	12843	13756
5000	1050	6	66,7	2	7103	7327	9912	10141	12621	12864	18140	18451
5000	1050	6	66,7	5,7	7451	7672	10609	10823	13782	13985	20667	20852
5000	1050	6	100	0,56	6364	6652	8508	8846	10413	10843	13871	14719
5000	1050	6	100	2	7330	7517	10334	10462	13289	13357	19486	19554
5000	1050	6	100	5,7	7685	7870	11062	11166	14525	14528	22291	22151
5000	1050	10	28,57	0,56	10538	11149	12664	13382	14246	15094	16588	17604
5000	1050	10	28,57	2	12827	13432	16148	16830	18830	19633	23180	24105
5000	1050	10	28,57	5,7	13615	14243	17425	18132	20597	21434	25929	26890
5000	1050	10	66,7	0,56	12189	13239	15077	16321	17341	18801	20901	22833
5000	1050	10	66,7	2	15035	16062	19705	20859	23765	25065	30980	32635
5000	1050	10	66,7	5,7	16072	17158	21535	22759	26487	27867	35785	37547
5000	1050	10	100	0,56	12779	13842	15983	17159	18547	19896	22689	24684
5000	1050	10	100	2	15769	16755	20950	21916	25571	26550	34071	35440
5000	1050	10	100	5,7	16883	17922	22971	23973	28655	29634	39780	41114

## B.6 Parameterrechnungen Profil 135/310

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Profil 135/310 in tabellarischer Form dargestellt. In den ersten Spalten sind die Werte der einzelnen Variablen und in den weiteren Spalten die errechneten Steifigkeiten der Berechnungen am Falzwerk  $S_{E2n}$  mit den zugehörigen Ergebnissen der vereinfachten Stabwerksrechnung  $S_{Stab}$  für die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  zusammengestellt.

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	465	2	28,57	0,56	591	576	877	862	1171	1146	1816	1764
150	465	2	28,57	2	603	587	905	885	1222	1187	1946	1864
150	465	2	28,57	5,7	607	591	914	894	1239	1204	1991	1907
150	465	2	66,7	0,56	631	624	965	958	1330	1309	2217	2145
150	465	2	66,7	2	640	632	988	975	1376	1342	2350	2235
150	465	2	66,7	5,7	644	636	997	985	1394	1359	2405	2284
150	465	2	100	0,56	643	633	993	984	1384	1355	2368	2263
150	465	2	100	2	651	641	1013	999	1424	1384	2488	2343
150	465	2	100	5,7	655	645	1022	1008	1441	1401	2543	2392
150	465	6	28,57	0,56	3657	3281	4435	4197	5010	4736	5856	5495
150	465	6	28,57	2	3899	3470	4798	4500	5481	5124	6509	6022
150	465	6	28,57	5,7	3972	3530	4910	4599	5628	5253	6718	6202
150	465	6	66,7	0,56	4699	4257	6045	5728	7152	6709	8984	8227
150	465	6	66,7	2	5038	4521	6623	6179	7973	7328	10315	9169
150	465	6	66,7	5,7	5149	4615	6815	6349	8258	7569	10794	9548
150	465	6	100	0,56	5087	4500	6700	6249	8086	7424	10507	9311
150	465	6	100	2	5451	4778	7347	6732	9038	8106	12157	10391
150	465	6	100	5,7	5575	4880	7571	6927	9387	8388	12789	10857
150	465	10	28,57	0,56	5251	4773	5887	5766	6323	6180	6932	6693
150	465	10	28,57	2	5579	5036	6302	6143	6804	6614	7512	7204
150	465	10	28,57	5,7	5674	5114	6424	6258	6945	6748	7684	7362
150	465	10	66,7	0,56	7391	6866	8710	8688	9696	9555	11207	10704
150	465	10	66,7	2	7983	7350	9540	9431	10732	10454	12601	11836
150	465	10	66,7	5,7	8166	7507	9801	9685	11062	10766	13056	12237
150	465	10	100	0,56	8267	7447	9953	9793	11265	10902	13367	12408
150	465	10	100	2	8970	7994	10982	10676	12590	11993	15247	13823
150	465	10	100	5,7	9194	8176	11317	10992	13031	12392	15892	14355
150	744	2	28,57	0,56	616	621	925	943	1250	1277	1985	2039
150	744	2	28,57	2	632	635	961	973	1317	1331	2163	2181
150	744	2	28,57	5,7	637	640	973	985	1339	1354	2225	2242
150	744	2	66,7	0,56	647	656	994	1016	1376	1408	2317	2373
150	744	2	66,7	2	659	666	1024	1038	1434	1449	2487	2489
150	744	2	66,7	5,7	664	671	1035	1049	1457	1470	2558	2554
150	744	2	100	0,56	656	663	1016	1035	1420	1443	2443	2472
150	744	2	100	2	667	672	1042	1054	1470	1479	2594	2574
150	744	2	100	5,7	671	677	1053	1065	1492	1499	2663	2637
150	744	6	28,57	0,56	4553	4395	5729	5757	6650	6691	8082	8112
150	744	6	28,57	2	4967	4751	6401	6360	7573	7514	9487	9348
150	744	6	28,57	5,7	5095	4866	6614	6566	7873	7802	9963	9797
150	744	6	66,7	0,56	5404	5276	7137	7233	8621	8715	11193	11196
150	744	6	66,7	2	5910	5707	8043	7999	9976	9837	13575	13096
150	744	6	66,7	5,7	6077	5862	8356	8299	10461	10293	14488	13914
150	744	6	100	0,56	5709	5486	7681	7711	9431	9414	12609	12369
150	744	6	100	2	6228	5924	8641	8497	10912	10593	15372	14450
150	744	6	100	5,7	6406	6088	8987	8823	11468	11102	16496	15409
150	744	10	28,57	0,56	7493	7268	8656	8906	9476	9748	10640	10856
150	744	10	28,57	2	8221	7909	9641	9861	10667	10899	12161	12298
150	744	10	28,57	5,7	8439	8107	9942	10167	11036	11273	12641	12776
150	744	10	66,7	0,56	9645	9585	11675	12309	13235	13877	15666	16104
150	744	10	66,7	2	10761	10589	13343	13918	15410	15938	18785	18922
150	744	10	66,7	5,7	11117	10928	13893	14499	16146	16702	19885	20006
150	744	10	100	0,56	10470	10191	12917	13524	14866	15440	18039	18242
150	744	10	100	2	11725	11284	14866	15347	17490	17832	22006	21634

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_S$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	744	10	100	5,7	12137	11664	15532	16038	18415	18768	23483	23022
150	1023	2	28,57	0,56	626	640	943	978	1278	1334	2045	2167
150	1023	2	28,57	2	643	655	982	1010	1352	1395	2243	2331
150	1023	2	28,57	5,7	649	661	995	1024	1377	1420	2313	2403
150	1023	2	66,7	0,56	653	668	1003	1039	1389	1447	2342	2470
150	1023	2	66,7	2	666	679	1035	1062	1453	1492	2527	2601
150	1023	2	66,7	5,7	671	685	1048	1074	1478	1515	2604	2673
150	1023	2	100	0,56	661	674	1023	1055	1429	1478	2455	2559
150	1023	2	100	2	673	684	1051	1075	1483	1516	2618	2673
150	1023	2	100	5,7	677	689	1063	1086	1506	1538	2693	2742
150	1023	6	28,57	0,56	4994	5038	6402	6714	7540	7957	9371	9952
150	1023	6	28,57	2	5510	5519	7277	7563	8784	9171	11373	11915
150	1023	6	28,57	5,7	5672	5678	7560	7860	9200	9611	12080	12667
150	1023	6	66,7	0,56	5723	5826	7650	8087	9335	9919	12322	13147
150	1023	6	66,7	2	6318	6367	8748	9082	11019	11439	15421	15920
150	1023	6	66,7	5,7	6517	6566	9134	9480	11637	12075	16658	17176
150	1023	6	100	0,56	5980	6007	8120	8515	10048	10572	13612	14317
150	1023	6	100	2	6579	6550	9257	9512	11839	12125	17079	17266
150	1023	6	100	5,7	6787	6755	9672	9934	12524	12814	18542	18689
150	1023	10	28,57	0,56	8858	9059	10435	11287	11574	12572	13222	14348
150	1023	10	28,57	2	9916	10092	11933	12893	13444	14590	15716	17025
150	1023	10	28,57	5,7	10241	10420	12406	13430	14047	15279	16543	17971
150	1023	10	66,7	0,56	10915	11411	13431	14864	15400	17080	18515	20397
150	1023	10	66,7	2	12416	12897	15770	17336	18547	20398	23232	25268
150	1023	10	66,7	5,7	12907	13415	16568	18268	19658	21697	24997	27287
150	1023	10	100	0,56	11670	11995	14606	16070	16979	18696	20883	22744
150	1023	10	100	2	13313	13577	17257	18785	20651	22426	26669	28436
150	1023	10	100	5,7	13864	14145	18192	19858	22000	23965	28954	30947
800	465	2	28,57	0,56	589	578	874	863	1167	1148	1810	1774
800	465	2	28,57	2	601	589	901	887	1218	1189	1941	1876
800	465	2	28,57	5,7	605	593	910	896	1235	1206	1987	1920
800	465	2	66,7	0,56	628	625	961	958	1326	1309	2211	2149
800	465	2	66,7	2	638	634	985	976	1371	1342	2343	2240
800	465	2	66,7	5,7	642	638	994	985	1389	1359	2398	2289
800	465	2	100	0,56	640	635	990	984	1380	1355	2362	2265
800	465	2	100	2	649	643	1010	999	1419	1383	2481	2345
800	465	2	100	5,7	652	647	1018	1008	1436	1400	2536	2394
800	465	6	28,57	0,56	3675	3386	4480	4382	5081	4993	5975	5879
800	465	6	28,57	2	3932	3595	4874	4727	5600	5447	6714	6520
800	465	6	28,57	5,7	4011	3661	4997	4842	5764	5600	6954	6742
800	465	6	66,7	0,56	4705	4368	6080	5948	7224	7051	9141	8830
800	465	6	66,7	2	5064	4656	6705	6456	8130	7773	10656	9989
800	465	6	66,7	5,7	5183	4759	6918	6650	8450	8057	11219	10466
800	465	6	100	0,56	5090	4609	6731	6469	8155	7782	10673	9980
800	465	6	100	2	5472	4910	7425	7010	9201	8570	12544	11306
800	465	6	100	5,7	5604	5021	7674	7229	9593	8901	13287	11891
800	465	10	28,57	0,56	5375	5089	6058	6227	6528	6727	7189	7361
800	465	10	28,57	2	5746	5404	6535	6694	7087	7275	7873	8022
800	465	10	28,57	5,7	5855	5498	6677	6838	7254	7446	8080	8231
800	465	10	66,7	0,56	7563	7340	8973	9435	10036	10503	11675	11967
800	465	10	66,7	2	8242	7926	9947	10372	11271	11671	13376	13501
800	465	10	66,7	5,7	8455	8119	10261	10698	11676	12087	13951	14061
800	465	10	100	0,56	8454	7954	10250	10625	11659	11985	13930	13906
800	465	10	100	2	9262	8615	11462	11736	13248	13405	16243	15839
800	465	10	100	5,7	9524	8838	11867	12142	13793	13938	17069	16589
800	744	2	28,57	0,56	615	621	924	942	1248	1275	1989	2046
800	744	2	28,57	2	631	635	959	971	1316	1330	2172	2190
800	744	2	28,57	5,7	636	640	971	983	1339	1352	2236	2253
800	744	2	66,7	0,56	646	656	993	1015	1376	1405	2322	2373
800	744	2	66,7	2	658	666	1022	1036	1434	1446	2495	2490
800	744	2	66,7	5,7	663	671	1034	1048	1457	1468	2567	2555
800	744	2	100	0,56	656	663	1016	1034	1420	1441	2449	2471
800	744	2	100	2	666	672	1041	1053	1470	1476	2601	2574
800	744	2	100	5,7	670	677	1052	1063	1492	1497	2672	2636

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	C <sub>S</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
800	744	6	28,57	0,56	4659	4579	5937	6092	6964	7187	8605	8929
800	744	6	28,57	2	5123	4984	6719	6804	8072	8197	10378	10542
800	744	6	28,57	5,7	5268	5116	6974	7050	8444	8559	11003	11151
800	744	6	66,7	0,56	5468	5416	7282	7504	8859	9158	11641	12037
800	744	6	66,7	2	6017	5884	8295	8361	10410	10454	14479	14363
800	744	6	66,7	5,7	6201	6055	8652	8700	10981	10990	15614	15395
800	744	6	100	0,56	5759	5612	7798	7952	9629	9820	12996	13182
800	744	6	100	2	6315	6084	8855	8816	11292	11154	16205	15668
800	744	6	100	5,7	6509	6262	9243	9179	11933	11739	17563	16844
800	744	10	28,57	0,56	8052	8039	9442	10017	10442	11120	11880	12631
800	744	10	28,57	2	8980	8878	10747	11318	12063	12743	14024	14763
800	744	10	28,57	5,7	9265	9142	11159	11746	12585	13289	14734	15501
800	744	10	66,7	0,56	10173	10358	12467	13468	14252	15402	17055	18257
800	744	10	66,7	2	11536	11596	14576	15510	17071	18110	21232	22162
800	744	10	66,7	5,7	11982	12024	15296	16267	18066	19150	22791	23737
800	744	10	100	0,56	10964	10940	13670	14644	15846	16946	19401	20442
800	744	10	100	2	12470	12265	16084	16897	19166	20001	24567	25005
800	744	10	100	5,7	12976	12735	16936	17772	20387	21235	26601	26959
800	1023	2	28,57	0,56	626	639	944	976	1282	1332	2062	2171
800	1023	2	28,57	2	643	654	984	1009	1357	1393	2269	2338
800	1023	2	28,57	5,7	649	660	997	1022	1383	1419	2342	2411
800	1023	2	66,7	0,56	653	668	1005	1038	1394	1445	2361	2470
800	1023	2	66,7	2	666	679	1037	1061	1458	1490	2552	2601
800	1023	2	66,7	5,7	672	684	1050	1073	1484	1514	2631	2674
800	1023	2	100	0,56	662	673	1026	1054	1434	1476	2476	2558
800	1023	2	100	2	673	684	1053	1074	1489	1514	2643	2672
800	1023	2	100	5,7	678	689	1065	1085	1513	1536	2721	2742
800	1023	6	28,57	0,56	5141	5209	6678	7017	7950	8415	10053	10737
800	1023	6	28,57	2	5718	5740	7692	7978	9436	9830	12562	13143
800	1023	6	28,57	5,7	5901	5916	8028	8318	9947	10353	13486	14095
800	1023	6	66,7	0,56	5812	5929	7830	8279	9618	10237	12839	13774
800	1023	6	66,7	2	6453	6501	9041	9344	11513	11897	16450	16922
800	1023	6	66,7	5,7	6669	6712	9474	9774	12224	12601	17944	18379
800	1023	6	100	0,56	6051	6095	8267	8674	10284	10842	14057	14876
800	1023	6	100	2	6689	6664	9502	9727	12260	12510	17998	18152
800	1023	6	100	5,7	6913	6880	9960	10175	13034	13258	19718	19762
800	1023	10	28,57	0,56	9608	9870	11502	12431	12899	14018	14954	16285
800	1023	10	28,57	2	10950	11156	13483	14482	15444	16673	18482	19967
800	1023	10	28,57	5,7	11374	11573	14130	15185	16299	17611	19718	21328
800	1023	10	66,7	0,56	11519	12043	14336	15780	16568	18315	20128	22214
800	1023	10	66,7	2	13307	13753	17210	18666	20520	22285	26244	28284
800	1023	10	66,7	5,7	13905	14358	18221	19776	21973	23882	28664	30902
800	1023	10	100	0,56	12212	12572	15429	16889	18052	19821	23289	24458
800	1023	10	100	2	14131	14362	18607	19980	22539	24163	29656	31334
800	1023	10	100	5,7	14788	15012	19761	21222	24253	25997	32687	34479
5000	465	2	28,57	0,56	534	594	819	880	1112	1164	1755	1791
5000	465	2	28,57	2	546	605	847	903	1163	1205	1887	1894
5000	465	2	28,57	5,7	550	609	856	912	1180	1222	1933	1937
5000	465	2	66,7	0,56	573	641	907	974	1272	1324	2157	2164
5000	465	2	66,7	2	583	650	931	992	1318	1357	2290	2255
5000	465	2	66,7	5,7	587	654	940	1001	1336	1375	2345	2304
5000	465	2	100	0,56	586	651	936	1000	1326	1370	2310	2279
5000	465	2	100	2	594	659	956	1015	1366	1399	2429	2360
5000	465	2	100	5,7	598	663	965	1024	1383	1416	2484	2409
5000	465	6	28,57	0,56	3630	3426	4439	4443	5044	5074	5948	5999
5000	465	6	28,57	2	3894	3640	4844	4800	5580	5548	6715	6677
5000	465	6	28,57	5,7	3974	3708	4971	4919	5750	5708	6966	6914
5000	465	6	66,7	0,56	4660	4406	6036	6013	7184	7152	9110	9016
5000	465	6	66,7	2	5026	4700	6678	6537	8119	7906	10695	10255
5000	465	6	66,7	5,7	5148	4805	6899	6738	8452	8205	11286	10770
5000	465	6	100	0,56	5046	4645	6686	6531	8110	7884	10633	10186
5000	465	6	100	2	5434	4952	7397	7088	9189	8706	12590	11603
5000	465	6	100	5,7	5569	5065	7654	7314	9594	9053	13373	12237
5000	465	10	28,57	0,56	5353	5189	6044	6373	6521	6901	7193	7577

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
5000	465	10	28,57	2	5739	5520	6541	6870	7105	7489	7911	8292
5000	465	10	28,57	5,7	5851	5619	6690	7024	7281	7673	8130	8520
5000	465	10	66,7	0,56	7551	7487	8978	9675	10058	10819	11726	12411
5000	465	10	66,7	2	8262	8107	10006	10685	11368	12096	13547	14123
5000	465	10	66,7	5,7	8487	8312	10340	11040	11802	12556	14171	14757
5000	465	10	100	0,56	8444	8110	10260	10893	11688	12351	13997	14449
5000	465	10	100	2	9292	8809	11543	12093	13382	13911	16491	16625
5000	465	10	100	5,7	9569	9048	11977	12537	13972	14503	17398	17483
5000	744	2	28,57	0,56	609	627	917	947	1242	1279	1983	2049
5000	744	2	28,57	2	624	641	954	976	1311	1334	2167	2193
5000	744	2	28,57	5,7	629	646	965	988	1333	1356	2233	2256
5000	744	2	66,7	0,56	640	662	987	1020	1371	1409	2318	2374
5000	744	2	66,7	2	652	672	1017	1042	1429	1450	2492	2491
5000	744	2	66,7	5,7	657	677	1029	1053	1452	1472	2565	2556
5000	744	2	100	0,56	650	669	1011	1039	1416	1445	2447	2471
5000	744	2	100	2	660	678	1036	1058	1466	1480	2600	2574
5000	744	2	100	5,7	664	683	1047	1068	1488	1501	2671	2636
5000	744	6	28,57	0,56	4685	4626	5997	6191	7063	7353	8794	9250
5000	744	6	28,57	2	5170	5047	6830	6947	8263	8450	10772	11073
5000	744	6	28,57	5,7	5322	5185	7104	7211	8673	8848	11490	11777
5000	744	6	66,7	0,56	5484	5442	7321	7574	8932	9300	11807	12388
5000	744	6	66,7	2	6051	5922	8385	8467	10587	10681	14931	14976
5000	744	6	66,7	5,7	6243	6098	8765	8824	11208	11259	16222	16154
5000	744	6	100	0,56	5772	5632	7830	8008	9689	9947	13140	13526
5000	744	6	100	2	6345	6115	8934	8905	11451	11358	16639	16271
5000	744	6	100	5,7	6546	6297	9344	9282	12142	11983	18170	17599
5000	744	10	28,57	0,56	8268	8335	9773	10497	10872	11758	12473	13532
5000	744	10	28,57	2	9306	9277	11271	12007	12769	13689	15053	16166
5000	744	10	28,57	5,7	9630	9578	11755	12514	13397	14356	15939	17111
5000	744	10	66,7	0,56	10389	10662	12830	14007	14757	16187	17820	19516
5000	744	10	66,7	2	11899	12032	15238	16339	18050	19379	22874	24357
5000	744	10	66,7	5,7	12403	12511	16082	17224	19255	20641	24859	26400
5000	744	10	100	0,56	11169	11235	14027	15176	16353	17747	20190	21790
5000	744	10	100	2	12830	12692	16766	17725	20209	21315	26405	27409
5000	744	10	100	5,7	13399	13215	17762	18736	21681	22800	28992	29929
5000	1023	2	28,57	0,56	626	642	944	978	1283	1332	2066	2169
5000	1023	2	28,57	2	643	657	984	1010	1359	1393	2275	2335
5000	1023	2	28,57	5,7	648	663	998	1024	1384	1419	2349	2408
5000	1023	2	66,7	0,56	653	671	1006	1040	1397	1446	2369	2467
5000	1023	2	66,7	2	666	682	1039	1063	1461	1490	2560	2598
5000	1023	2	66,7	5,7	672	687	1051	1075	1487	1514	2641	2670
5000	1023	2	100	0,56	662	676	1027	1056	1438	1477	2486	2555
5000	1023	2	100	2	673	686	1055	1076	1492	1515	2654	2668
5000	1023	2	100	5,7	678	692	1067	1087	1516	1537	2732	2738
5000	1023	6	28,57	0,56	5199	5256	6801	7133	8152	8627	10439	11185
5000	1023	6	28,57	2	5812	5811	7906	8161	9810	10181	13367	13966
5000	1023	6	28,57	5,7	6007	5996	8278	8529	10395	10766	14491	15103
5000	1023	6	66,7	0,56	5853	5949	7917	8345	9766	10383	13149	14162
5000	1023	6	66,7	2	6521	6534	9205	9453	11819	12147	17207	17656
5000	1023	6	66,7	5,7	6749	6751	9671	9903	12607	12904	18952	19314
5000	1023	6	100	0,56	6088	6109	8343	8723	10412	10963	14326	15230
5000	1023	6	100	2	6750	6688	9645	9811	12529	12718	18681	18813
5000	1023	6	100	5,7	6983	6909	10134	10276	13374	13512	20649	20613
5000	1023	10	28,57	0,56	10046	10320	12193	13171	13817	15038	16263	17805
5000	1023	10	28,57	2	11621	11805	14616	15634	17030	18339	20932	22640
5000	1023	10	28,57	5,7	12130	12297	15436	16503	18158	19552	22673	24528
5000	1023	10	66,7	0,56	11899	12410	14972	16422	17450	19275	21471	23816
5000	1023	10	66,7	2	13933	14309	18361	19719	22248	23960	29238	31383
5000	1023	10	66,7	5,7	14628	14992	19596	21018	24095	25910	32527	34828
5000	1023	10	100	0,56	12561	12909	16019	17473	18879	20720	23669	26022
5000	1023	10	100	2	14716	14876	19708	20942	24225	25740	32683	34400
5000	1023	10	100	5,7	15471	15602	21093	22367	26358	27927	36702	38429

## B.7 Parameterrechnungen Profil 150/280

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Profil 150/280 in tabellarischer Form dargestellt. In den ersten Spalten sind die Werte der einzelnen Variablen und in den weiteren Spalten die errechneten Steifigkeiten der Berechnungen am Faltenwerk  $S_{E2n}$  mit den zugehörigen Ergebnissen der vereinfachten Stabwerksrechnung  $S_{Stab}$  für die vier verwendeten Blechdicken  $t_N$  zusammengestellt.

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	504	2	28,57	0,56	655	663	970	969	1291	1285	1981	1962
150	504	2	28,57	2	674	679	1012	1004	1367	1345	2170	2108
150	504	2	28,57	5,7	680	685	1026	1018	1393	1371	2237	2171
150	504	2	66,7	0,56	698	714	1065	1074	1462	1465	2405	2384
150	504	2	66,7	2	713	725	1101	1100	1531	1514	2598	2513
150	504	2	66,7	5,7	719	731	1115	1114	1559	1539	2680	2585
150	504	2	100	0,56	712	726	1097	1102	1522	1516	2570	2519
150	504	2	100	2	725	737	1128	1125	1582	1559	2745	2635
150	504	2	100	5,7	730	742	1141	1138	1609	1584	2827	2705
150	504	6	28,57	0,56	3953	3890	4819	4658	5464	5271	2130	2206
150	504	6	28,57	2	4292	4186	5335	5092	6139	5831	2368	2397
150	504	6	28,57	5,7	4397	4284	5498	5237	6356	6023	2454	2481
150	504	6	66,7	0,56	4953	4914	6378	6186	7549	7275	2494	2585
150	504	6	66,7	2	5413	5293	7158	6801	8664	8130	2726	2744
150	504	6	66,7	5,7	5566	5436	7428	7039	9061	8471	2824	2833
150	504	6	100	0,56	5326	5219	7007	6685	8446	7995	2638	2703
150	504	6	100	2	5813	5609	7867	7337	9718	8924	2844	2843
150	504	6	100	5,7	5980	5763	8177	7603	10195	9318	2941	2930
150	504	10	28,57	0,56	5873	5973	6619	6573	7130	7054	2191	2329
150	504	10	28,57	2	6362	6438	7246	7141	7861	7711	2452	2547
150	504	10	28,57	5,7	6507	6581	7434	7319	8082	7918	2546	2644
150	504	10	66,7	0,56	8031	8355	9491	9587	10580	10597	2522	2680
150	504	10	66,7	2	8872	9146	10680	10644	12069	11892	2769	2856
150	504	10	66,7	5,7	9138	9419	11066	11016	12562	12356	2874	2955
150	504	10	100	0,56	8898	9142	10731	10669	12151	11984	2654	2788
150	504	10	100	2	9882	10034	12179	11901	14022	13534	2873	2941
150	504	10	100	5,7	10203	10354	12667	12354	14668	14119	2975	3036
150	756	2	28,57	0,56	681	702	1016	1043	1364	1403	1974	1972
150	756	2	28,57	2	703	720	1067	1085	1457	1478	2166	2122
150	756	2	28,57	5,7	710	727	1084	1102	1489	1510	2235	2186
150	756	2	66,7	0,56	715	740	1095	1127	1507	1554	2397	2387
150	756	2	66,7	2	733	753	1137	1158	1589	1611	2591	2519
150	756	2	66,7	5,7	740	760	1154	1174	1621	1642	2674	2591
150	756	2	100	0,56	727	749	1122	1149	1558	1596	2563	2520
150	756	2	100	2	742	761	1158	1176	1629	1646	2737	2637
150	756	2	100	5,7	748	767	1174	1191	1660	1675	2820	2708
150	756	6	28,57	0,56	4694	4816	5884	5980	6810	6932	2136	2213
150	756	6	28,57	2	5203	5286	6705	6726	7934	7949	2383	2409
150	756	6	28,57	5,7	5362	5445	6972	6985	8311	8313	2472	2495
150	756	6	66,7	0,56	5530	5727	7255	7442	8717	8951	2501	2585
150	756	6	66,7	2	6149	6265	8353	8377	10343	10320	2737	2747
150	756	6	66,7	5,7	6357	6471	8741	8750	10944	10889	2838	2837
150	756	6	100	0,56	5833	5989	7788	7901	9501	9649	2645	2702
150	756	6	100	2	6467	6527	8950	8861	11276	11083	2855	2843
150	756	6	100	5,7	6689	6743	9379	9264	11963	11717	2954	2930
150	756	10	28,57	0,56	7763	8204	8959	9320	9796	10183	2210	2334
150	756	10	28,57	2	8664	9117	10179	10518	11272	11626	2483	2557
150	756	10	28,57	5,7	8940	9410	10561	10910	11741	12107	2583	2655
150	756	10	66,7	0,56	9880	10695	11920	12689	13470	14313	2543	2680
150	756	10	66,7	2	11244	12063	13952	14662	16111	16848	2798	2858
150	756	10	66,7	5,7	11690	12553	14642	15393	17036	17817	2907	2957
150	756	10	100	0,56	10688	11476	13130	13842	15050	15859	2676	2787
150	756	10	100	2	12219	12964	15496	16058	18219	18784	2901	2941

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$C_S$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
150	756	10	100	5,7	12732	13519	16328	16918	19377	19964	3008	3037
150	1008	2	28,57	0,56	692	719	1036	1078	1394	1459	1937	1987
150	1008	2	28,57	2	715	739	1090	1123	1495	1543	2132	2137
150	1008	2	28,57	5,7	723	747	1109	1142	1529	1578	2201	2202
150	1008	2	66,7	0,56	722	751	1106	1150	1523	1593	2363	2399
150	1008	2	66,7	2	742	765	1151	1183	1610	1655	2558	2530
150	1008	2	66,7	5,7	749	772	1169	1200	1644	1688	2642	2603
150	1008	2	100	0,56	733	758	1130	1169	1569	1630	2530	2530
150	1008	2	100	2	749	770	1169	1197	1644	1684	2706	2647
150	1008	2	100	5,7	756	777	1186	1213	1678	1715	2789	2719
150	1008	6	28,57	0,56	5100	5375	6495	6835	7610	8057	2135	2215
150	1008	6	28,57	2	5717	5976	7530	7839	9070	9483	2386	2412
150	1008	6	28,57	5,7	5913	6182	7873	8198	9572	10012	2477	2498
150	1008	6	66,7	0,56	5830	6184	7728	8197	9364	10006	2504	2585
150	1008	6	66,7	2	6542	6829	9024	9370	11327	11785	2742	2746
150	1008	6	66,7	5,7	6784	7079	9489	9848	12070	12547	2844	2836
150	1008	6	100	0,56	6091	6411	8198	8613	10069	10660	2650	2702
150	1008	6	100	2	6809	7045	9541	9792	12155	12479	2862	2842
150	1008	6	100	5,7	7062	7303	10043	10296	12981	13304	2962	2929
150	1008	10	28,57	0,56	9000	9840	10562	11458	11678	12713	2219	2332
150	1008	10	28,57	2	10249	11200	12322	13348	13867	15073	2497	2553
150	1008	10	28,57	5,7	10641	11651	12892	13994	14591	15901	2599	2652
150	1008	10	66,7	0,56	11027	12284	13487	14938	15387	17117	2557	2676
150	1008	10	66,7	2	12792	14160	16213	17805	19024	20951	2815	2853
150	1008	10	66,7	5,7	13382	14852	17170	18914	20353	22498	2927	2952
150	1008	10	100	0,56	11772	13016	14635	16073	16916	18690	2693	2784
150	1008	10	100	2	13704	15004	17721	19207	21148	22987	2921	2937
150	1008	10	100	5,7	14368	15767	18842	20473	22760	24814	3029	3032
800	504	2	28,57	0,56	652	664	965	970	1285	1286	6418	6142
800	504	2	28,57	2	670	680	1007	1004	1361	1347	7370	6914
800	504	2	28,57	5,7	676	686	1021	1018	1387	1372	7684	7185
800	504	2	66,7	0,56	695	715	1061	1074	1456	1464	9484	8977
800	504	2	66,7	2	710	726	1096	1100	1524	1513	11300	10298
800	504	2	66,7	5,7	715	732	1110	1114	1552	1538	11984	10849
800	504	2	100	0,56	709	727	1093	1101	1516	1515	10951	10120
800	504	2	100	2	721	737	1123	1124	1576	1557	13155	11621
800	504	2	100	5,7	727	743	1136	1137	1602	1582	14039	12292
800	504	6	28,57	0,56	3991	4018	4902	4880	5592	5583	8237	8373
800	504	6	28,57	2	4359	4346	5477	5380	6358	6249	9941	9895
800	504	6	28,57	5,7	4473	4455	5661	5550	6609	6481	10538	10466
800	504	6	66,7	0,56	4973	5029	6442	6426	7665	7653	11208	11461
800	504	6	66,7	2	5465	5440	7301	7122	8919	8653	14029	13773
800	504	6	66,7	5,7	5631	5596	7603	7394	9378	9059	15156	14802
800	504	6	100	0,56	5337	5325	7059	6919	8548	8378	12558	12665
800	504	6	100	2	5855	5744	7997	7650	9966	9454	15808	15193
800	504	6	100	5,7	6037	5911	8343	7952	10512	9918	17187	16399
800	504	10	28,57	0,56	6097	6428	6924	7172	7498	7769	9380	9993
800	504	10	28,57	2	6671	7000	7677	7896	8390	8626	11699	12271
800	504	10	28,57	5,7	6844	7180	7908	8127	8666	8902	12547	13172
800	504	10	66,7	0,56	8305	8944	9902	10454	11104	11705	12209	13146
800	504	10	66,7	2	9295	9909	11344	11805	12948	13414	15750	16348
800	504	10	66,7	5,7	9616	10247	11826	12292	13580	14046	17221	17847
800	504	10	100	0,56	9180	9750	11167	11600	12718	13205	13456	14338
800	504	10	100	2	10336	10828	12919	13162	15030	15238	17406	17744
800	504	10	100	5,7	10722	11221	13528	13752	15860	16032	19143	19446
800	756	2	28,57	0,56	679	701	1014	1042	1363	1401	6627	6616
800	756	2	28,57	2	700	719	1065	1083	1457	1477	7742	7576
800	756	2	28,57	5,7	708	727	1082	1100	1489	1509	8121	7922
800	756	2	66,7	0,56	714	740	1093	1125	1506	1551	9716	9648
800	756	2	66,7	2	731	753	1135	1156	1588	1609	11831	11286
800	756	2	66,7	5,7	738	759	1152	1172	1621	1639	12660	11991
800	756	2	100	0,56	725	749	1120	1147	1558	1593	11170	10842
800	756	2	100	2	740	760	1156	1174	1628	1643	13711	12686
800	756	2	100	5,7	747	767	1172	1189	1660	1672	14776	13538

I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	L <sub>s</sub> [m]	C <sub>Q</sub> [kN/cm]	C <sub>S</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>N</sub> =0,75mm		t <sub>N</sub> =0,88mm		t <sub>N</sub> =1mm		t <sub>N</sub> =1,25mm	
					S <sub>E2n</sub> [kN]	S <sub>Stab</sub> [kN]						
800	756	6	28,57	0,56	4818	4989	6120	6311	7160	7419	8807	9167
800	756	6	28,57	2	5390	5516	7082	7185	8518	8657	10970	11135
800	756	6	28,57	5,7	5572	5695	7402	7496	8988	9113	11765	11903
800	756	6	66,7	0,56	5607	5844	7421	7701	8980	9368	11686	12242
800	756	6	66,7	2	6279	6420	8648	8740	10843	10935	15047	15033
800	756	6	66,7	5,7	6509	6642	9092	9160	11552	11600	16452	16318
800	756	6	100	0,56	5893	6088	7923	8130	9722	10028	12973	13409
800	756	6	100	2	6574	6657	9202	9179	11713	11638	16741	16384
800	756	6	100	5,7	6815	6887	9683	9625	12506	12360	18412	17845
800	756	10	28,57	0,56	8391	8992	9835	10432	10867	11555	10062	10733
800	756	10	28,57	2	9548	10162	11467	12049	12896	13568	12966	13506
800	756	10	28,57	5,7	9913	10547	11998	12597	13571	14266	14079	14642
800	756	10	66,7	0,56	10457	11404	12773	13796	14554	15760	12714	13725
800	756	10	66,7	2	12125	13037	15346	16267	17981	19039	16834	17339
800	756	10	66,7	5,7	12684	13634	16253	17210	19239	20340	18617	19072
800	756	10	100	0,56	11225	12135	13934	14901	16084	17268	13885	14851
800	756	10	100	2	13059	13872	16859	17606	20087	20943	18368	18613
800	756	10	100	5,7	13692	14531	17928	18683	21619	22478	20415	20530
800	1008	2	28,57	0,56	691	718	1037	1076	1398	1458	6652	6764
800	1008	2	28,57	2	715	738	1092	1121	1501	1542	7830	7792
800	1008	2	28,57	5,7	722	746	1110	1140	1536	1577	8235	8166
800	1008	2	66,7	0,56	722	750	1107	1149	1527	1591	9743	9857
800	1008	2	66,7	2	741	764	1153	1181	1616	1653	11987	11621
800	1008	2	66,7	5,7	748	771	1170	1198	1651	1686	12885	12392
800	1008	2	100	0,56	733	758	1132	1167	1575	1628	11190	11065
800	1008	2	100	2	749	770	1171	1196	1651	1682	13882	13049
800	1008	2	100	5,7	756	777	1187	1212	1684	1713	15037	13979
800	1008	6	28,57	0,56	5255	5524	6781	7127	8029	8496	9033	9481
800	1008	6	28,57	2	5945	6177	7981	8259	9772	10149	11469	11704
800	1008	6	28,57	5,7	6167	6403	8388	8670	10391	10777	12396	12596
800	1008	6	66,7	0,56	5922	6266	7912	8382	9648	10307	11891	12568
800	1008	6	66,7	2	6689	6939	9341	9635	11857	12244	15616	15662
800	1008	6	66,7	5,7	6952	7202	9864	10151	12714	13086	17235	17127
800	1008	6	100	0,56	6164	6477	8347	8767	10304	10916	13159	13725
800	1008	6	100	2	6929	7133	9806	10010	12607	12864	17294	16993
800	1008	6	100	5,7	7201	7401	10360	10547	13540	13758	19195	18640
800	1008	10	28,57	0,56	9772	10589	11650	12560	13021	14098	10455	11144
800	1008	10	28,57	2	11359	12236	13980	14953	16000	17176	13852	14330
800	1008	10	28,57	5,7	11871	12794	14763	15797	17034	18297	15216	15684
800	1008	10	66,7	0,56	11642	12821	14397	15807	16548	18274	13037	14073
800	1008	10	66,7	2	13744	14925	17744	19136	21112	22829	17676	18059
800	1008	10	66,7	5,7	14464	15713	18961	20453	22856	24722	19771	20026
800	1008	10	100	0,56	12323	13483	15458	16850	17974	19739	14171	15165
800	1008	10	100	2	14576	15672	19151	20404	23137	24707	19138	19255
800	1008	10	100	5,7	15368	16521	20539	21868	25190	26876	21494	21391
5000	504	2	28,57	0,56	612	678	927	983	1247	1299	7840	7656
5000	504	2	28,57	2	631	694	969	1018	1324	1361	8729	8433
5000	504	2	28,57	5,7	637	700	983	1032	1350	1386	9002	8682
5000	504	2	66,7	0,56	656	729	1023	1087	1420	1476	12236	11946
5000	504	2	66,7	2	671	740	1059	1113	1489	1525	14252	13601
5000	504	2	66,7	5,7	677	746	1073	1127	1516	1551	14939	14209
5000	504	2	100	0,56	670	741	1055	1114	1481	1527	14409	13786
5000	504	2	100	2	682	751	1086	1138	1541	1570	17072	15842
5000	504	2	100	5,7	688	757	1099	1151	1567	1595	18030	16645
5000	504	6	28,57	0,56	3977	4059	4898	4947	5598	5678	10975	11318
5000	504	6	28,57	2	4358	4396	5496	5468	6400	6378	12856	13122
5000	504	6	28,57	5,7	4477	4509	5689	5646	6665	6624	13468	13738
5000	504	6	66,7	0,56	4960	5061	6438	6492	7670	7760	15854	16608
5000	504	6	66,7	2	5468	5480	7330	7211	8983	8809	19615	20085
5000	504	6	66,7	5,7	5640	5639	7647	7495	9469	9239	20996	21474
5000	504	6	100	0,56	5325	5353	7053	6980	8550	8482	18129	18795
5000	504	6	100	2	5860	5779	8028	7733	10031	9607	22869	22974
5000	504	6	100	5,7	6048	5949	8390	8046	10610	10097	24712	24755
5000	504	10	28,57	0,56	6134	6571	6983	7365	7573	8005	13276	14429

$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	L [cm]	$L_s$ [m]	$C_Q$ [kN/cm]	$c_s$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$t_N=0,75\text{mm}$		$t_N=0,88\text{mm}$		$t_N=1\text{mm}$		$t_N=1,25\text{mm}$	
					$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]	$S_{E2n}$ [kN]	$S_{Stab}$ [kN]
5000	504	10	28,57	2	6742	7181	7785	8148	8530	8940	16172	17536
5000	504	10	28,57	5,7	6926	7373	8033	8399	8829	9245	17164	18667
5000	504	10	66,7	0,56	8366	9124	10001	10741	11240	12091	18345	20336
5000	504	10	66,7	2	9422	10154	11556	12216	13247	13988	23722	25925
5000	504	10	66,7	5,7	9767	10518	12084	12753	13949	14701	25817	28329
5000	504	10	100	0,56	9246	9933	11275	11908	12870	13636	20603	22674
5000	504	10	100	2	10480	11081	13171	13613	15399	15898	27160	29200
5000	504	10	100	5,7	10896	11504	13841	14265	16327	16796	29867	32198
5000	756	2	28,57	0,56	674	707	1011	1046	1360	1405	8297	8534
5000	756	2	28,57	2	696	725	1062	1088	1455	1481	9404	9580
5000	756	2	28,57	5,7	703	732	1079	1105	1488	1512	9753	9923
5000	756	2	66,7	0,56	709	745	1090	1130	1505	1555	12942	13435
5000	756	2	66,7	2	727	758	1133	1161	1588	1612	15501	15723
5000	756	2	66,7	5,7	734	765	1150	1177	1621	1642	16415	16599
5000	756	2	100	0,56	721	755	1118	1152	1558	1597	15192	15492
5000	756	2	100	2	736	766	1154	1179	1629	1646	18570	18328
5000	756	2	100	5,7	743	772	1170	1194	1661	1675	19850	19486
5000	756	6	28,57	0,56	4866	5030	6207	6407	7290	7582	12340	13084
5000	756	6	28,57	2	5469	5575	7240	7336	8775	8926	15023	15721
5000	756	6	28,57	5,7	5662	5762	7589	7669	9299	9429	15947	16667
5000	756	6	66,7	0,56	5647	5861	7490	7766	9088	9502	17314	18637
5000	756	6	66,7	2	6348	6448	8791	8848	11092	11168	22356	23359
5000	756	6	66,7	5,7	6589	6676	9268	9290	11872	11884	24329	25345
5000	756	6	100	0,56	5931	6098	7987	8183	9820	10146	19541	20834
5000	756	6	100	2	6639	6676	9334	9269	11946	11844	25702	26331
5000	756	6	100	5,7	6892	6911	9849	9734	12810	12615	28255	28792
5000	756	10	28,57	0,56	8660	9302	10234	10923	11375	12204	15011	16268
5000	756	10	28,57	2	9970	10613	12132	12801	13783	14604	19108	20495
5000	756	10	28,57	5,7	10391	11052	12766	13452	14612	15463	20600	22112
5000	756	10	66,7	0,56	10728	11687	13203	14319	15132	16518	19919	22012
5000	756	10	66,7	2	12595	13476	16169	17134	19175	20367	26877	28903
5000	756	10	66,7	5,7	13236	14139	17251	18235	20725	21949	29761	31999
5000	756	10	100	0,56	11486	12397	14357	15410	16661	18028	22056	24238
5000	756	10	100	2	13529	14282	17704	18461	21346	22298	30267	32038
5000	756	10	100	5,7	14247	15008	18969	19706	23221	24142	33865	35763
5000	1008	2	28,57	0,56	692	721	1039	1077	1403	1458	8399	8834
5000	1008	2	28,57	2	716	740	1095	1123	1507	1542	9593	9990
5000	1008	2	28,57	5,7	724	748	1114	1141	1542	1576	9975	10375
5000	1008	2	66,7	0,56	724	753	1111	1151	1534	1592	13135	13993
5000	1008	2	66,7	2	743	767	1157	1183	1623	1653	15960	16598
5000	1008	2	66,7	5,7	750	774	1175	1200	1659	1686	16994	17618
5000	1008	2	100	0,56	735	761	1136	1170	1582	1629	15414	16152
5000	1008	2	100	2	751	773	1176	1198	1659	1682	19165	19402
5000	1008	2	100	5,7	758	780	1192	1214	1693	1713	20631	20764
5000	1008	6	28,57	0,56	5334	5562	6927	7236	8252	8693	13027	13997
5000	1008	6	28,57	2	6071	6239	8241	8444	10206	10504	16307	17264
5000	1008	6	28,57	5,7	6311	6474	8695	8888	10919	11205	17487	18486
5000	1008	6	66,7	0,56	5986	6276	8025	8442	9822	10441	18159	19840
5000	1008	6	66,7	2	6792	6962	9555	9744	12228	12493	24320	25663
5000	1008	6	66,7	5,7	7071	7230	10124	10284	13184	13397	26883	28242
5000	1008	6	100	0,56	6225	6481	8451	8813	10460	11026	20400	22099
5000	1008	6	100	2	7025	7145	9999	10095	12941	13070	27867	28814
5000	1008	6	100	5,7	7312	7418	10597	10652	13968	14018	31168	31982
5000	1008	10	28,57	0,56	10242	11004	12367	13260	13954	15055	16306	17675
5000	1008	10	28,57	2	12113	12881	15226	16115	17721	18853	21724	23168
5000	1008	10	28,57	5,7	12733	13530	16226	17155	19097	20298	23840	25402
5000	1008	10	66,7	0,56	12057	13128	15057	16401	17436	19152	21217	23449
5000	1008	10	66,7	2	14457	15426	19014	20184	22980	24486	30024	31938
5000	1008	10	66,7	5,7	15301	16299	20510	21720	25210	26787	33961	35983
5000	1008	10	100	0,56	12708	13750	16074	17390	18808	20555	23285	25626
5000	1008	10	100	2	15251	16110	20372	21362	24961	26260	33435	35013
5000	1008	10	100	5,7	16166	17038	22047	23039	27531	28835	38221	39747