

# DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

## **Untersuchung der Auswirkung von Flanschstreben auf das Tragsystem einer Stahlhalle**

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung der akademischen Grades eines Diplom – Ingenieurs  
unter der Leitung von

**Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Francesco Aigner**

und

**Univ. Ass. Dipl.-Ing. Patrik Takács**

E 212 – Institut für Tragkonstruktionen

Forschungsbereich für Stahlbau

eingrichtet an der Technische Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Anita Sipőcz, BSc.

1228021

Huttengasse 20/17

1160 Wien, Österreich

Kurzfassung

Verfasserin: Anita Sipőcz

Titel: Untersuchung bei Anwendung von Flanschstreben auf das Tragsystem einer Stahlhalle

Wirtschaftliche Aspekte sind in letzter Zeit im Baubereich immer wesentlicher geworden, somit werden immer schlankere Konstruktionen errichtet. Daher ist die Frage der Stabilisierung weitgespannter Tragkonstruktionen immer wichtiger. Der Riegelobergurt ist durch Pfetten stabilisiert. Unter abhebenden Belastungen stellt sich die Frage der Aussteifung des Riegeluntergurtes. Dafür ist eine mögliche und günstige Lösung der Einsatz von Flanschstreben.

Die vorliegende Arbeit untersucht welche Auswirkung der Einsatz von Flanschstreben auf die Tragkonstruktion einer vorgegebenen Stahlhalle hat. Einerseits ist eine optimale Gestaltung der Flanschstreben gefragt, andererseits stellt sich die Frage, wie deren Wirkung auf die Bemessung der betroffenen Bauteile berücksichtigt werden kann.

Die Riegel der vorgegebenen Halle wurden als Wellstegträger ausgeführt, demgemäß wurden die Nachweise mit den betreffenden Bemessungsregeln für Wellstegträger der europäischen Stahlbaunorm EN 1993 geführt. Dabei wurde für dieses Profil untersucht, wie die Wirkung der Flanschstreben im Stabilitätsnachweis des Riegels vereinfacht berücksichtigt werden kann. Dafür wurde die Ersatzfedersteifigkeit des Pfetten – Flanschstreben – Systems ermittelt. Danach wurde die Beanspruchung in Folge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes des aussteifenden Systems berechnet.

Als nächstes wurde die unter den maßgebenden Belastungen günstigste Gestaltung der Flanschstreben ermittelt. Dabei wurden doppelt und einzeln angeordnete, bzw. mit unterschiedlich großen Neigungen eingebaute Flanschstreben und ihre Wirkung auf den Schnittgrößenverlauf der Pfette untersucht.

Um die optimale Gestaltung der Flanschstreben finden zu können, war es erforderlich, die Bemessung der Pfette und der Flanschstrebe selbst mit verschiedenen Gestaltungsvarianten zu führen. Dafür wurden die Bemessungsregeln der kaltgeformten dünnwandigen Pfetten laut ÖNORM EN 1993-1-3 [5] theoretisch vorgestellt und mithilfe eines Berechnungsbeispiels erklärt. Die Nachweise mussten wegen des veränderten statischen Systems der Pfette händisch geführt werden. Die Flanschstreben der bestehenden Musterhalle wurden nach konstruktiver Erfahrung eingebaut. Nach Beschäftigung mit der theoretischen Grundlagen und Musterberechnungen verschiedener Systeme anhand der gewählten Musterhalle, konnte die in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht optimale Gestaltung ermittelt werden.

Abstract

Author: Anita Sipócz

Title: Effect analysis on the application of rafterstays in regard to the global structural behaviour of a steel hall

The financial aspects are becoming more and more important in the construction industry nowadays, hence the structures tend to be more economical, lighter and slenderer.

Therefore, the stability of the large span structures is a typical key question.

The main frame of hall structures is braced by the purlins on the upper flange of the beams. In the case of any uplifting load the loss of stability of the main beam still needs to be considered unless the lower flange is supported adequately. To solve this issue, which is an interesting design challenge, rafterstays can be effective and convenient answer.

The following thesis work discusses the consequences of the application of rafterstays regarding to the global structural behavior, through a steel industrial hall example. After finding an optimal geometry and size for these supporting elements, it was also the matter of thesis work how we can take their influence into account for sizing the adjacent structural members.

The main beam of the frame has a corrugated web, therefore all verifications after the structural analysis were done according to the corresponding parts of the European Standards.

In the relevant chapters a simplified method was developed to consider the effects of rafterstays on the stability of the beam. The method uses substitutional spring stiffness values for the rafterstay-purlin system. Then the corresponding equivalent force on the lower flange was calculated on these models.

The next chapter discusses the optimal geometry of rafterstays under design load. In order to find the suitable arrangement of the members, several configurations and variations were examined with different inclination, geometry of single- and double rafterstay system as well. The purlins and the rafterstays were sized for all configurations and I found the most ideal arrangement for them. To design and verify the purlins I followed the "Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting". The rafterstays are designed on a basis of common examples and they are assessed and verified by a method according to this standard.

## Dankesagung

Ich möchte mich bedanken beim Herrn Univ. Prof. DI Dr. techn Josef Fink für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an seinem Institut durchzuführen. Bei meinen Betreuern Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Francesco Aigner und Univ. Ass. Dipl.-Ing. Patrik Takács möchte ich mich für ihre freundliche Unterstützung und ihre Geduld herzlich bedanken.

Ein großes Dankeschön gilt meiner Eltern, die mir eine Studium in Österreich ermöglicht haben. Ohne ihre finanzielle und moralische Unterstützung wäre es mir nicht möglich gewesen meine Ausbildung erfolgreich abzuschließen.

Ich bedanke mich bei meinem Chef, DI Christian Salzer, der mich während meiner Studien- und Arbeitsjahren stets unterstützt hat, während diesen Jahren habe ich von ihm auch viel lernen können.

Meinen Freunden und Studienkollegen, die mich während den Jahren des Studiums sowohl in Budapest als auch in Wien begleitet und in schweren Zeiten unterstützt haben, gilt mein spezielles Dankeschön!

# Inhalt

---

1	Einleitung.....	1
1.1	Allgemeines - Stabilisierung.....	1
1.2	Stabilisierung des gedruckten Untergurtes.....	2
1.3	Anlass und Problemdarstellung.....	3
1.4	Zielstellung und Aufbau der Diplomarbeit.....	3
2	Musterhalle.....	5
2.1	Geometrie.....	5
2.2	Aufbau, Querschnitten.....	7
2.2.1	Dachpaneele: Hartschaumdachpaneele, KS1000 RW (Hersteller Kingspan).....	7
2.2.2	Pfette: Sabprofil Z Profil 300x3 S350 GD.....	7
2.2.3	Flanschstreben: Gleichschlenkige Winkel L40/40 x 4 S235.....	7
2.2.4	Riegel: Wellstegträger - Zeman & Co - WTB 1000-250-12, S355 J2.....	8
2.2.5	Stütze: Wellstegträger - Zeman & Co - WTB 1000-300-15, S355 J2.....	8
2.3	Lastaufstellung.....	9
2.3.1	Ständige Lasten.....	9
2.3.2	Veränderliche Lasten.....	9
2.4	Maßgebende Lastfallkombination.....	13
2.5	Zusammenfassung- Belastung Dach.....	14
3	BDK Nachweis - Riegel.....	15
3.1	Querschnitte - Musterhalle.....	16
3.2	Bemessung des Riegels in der Musterstatik.....	16
3.2.1	Bemessung des Wellstegträgers.....	16
3.2.2	Berücksichtigung der stabilisierenden Wirkung der Flanschstreben.....	17
3.3	Wellstegträger (Bemessung laut EN 1993-1-5/Anhang D).....	17
3.4	Ersatzfedersteifigkeiten.....	19
3.5	Bemessung des Riegels.....	21
3.5.1	Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeiten.....	21
3.5.2	Ermittlung des Abminderungsbeiwertes - SCIA Modell.....	22
3.5.3	Ermittlung der Tragfähigkeit des Wellstegträgers /laut EC/.....	23
3.5.4	Maßgebende Schnittgrößen des Rahmens.....	25
3.5.5	Tragfähigkeitsnachweis - gedrückter Untergurt.....	26
3.6	Ermittlung der Belastung des aussteifenden Systems.....	28
3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	29
4	Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem.....	30

4.1	Allgemein.....	30
4.2	Geometrie, Querschnitte.....	30
4.3	Belastungen .....	31
4.4	Beschreibung Modellaufbau .....	32
4.5	Analyse 1.....	33
4.5.1	Ermittlung der Schnittgrößen der untersuchten Systeme von Analyse 1 .....	34
4.5.2	Folgerung aus Analyse 1.....	41
4.6	Analyse 2.....	42
4.6.1	Modellbeschreibung.....	42
4.6.2	Ermittlung der Schnittgrößen der untersuchte Systeme von Analyse 2 .....	42
4.6.3	Folgerungen aus Analyse 2.....	46
4.7	Analyse 3.....	47
4.7.1	Modellbeschreibung.....	47
4.7.2	Modell: Elastisch gebettete Auflagerung.....	48
4.7.3	Folgerungen aus Analyse 3.....	49
5	Bemessung der dünnwandigen Profile.....	50
5.1	Allgemein - Stahlleichtbau.....	50
5.2	Bemessung laut EC .....	50
5.2.1	Allgemeines .....	51
5.2.2	Anwendungsbereich EC 1993-1-3.....	51
5.2.3	Versagensformen der dünnwandigen, kaltgeformten Querschnitte.....	52
5.2.4	Ermittlung des wirksamen Querschnitts von Kaltprofilen.....	53
5.2.5	Grenzzustände für Tragfähigkeit .....	57
5.2.6	Spezielle Berechnungsregeln für Pfettenquerschnitt .....	58
5.2.7	Vereinfachte Pfettenbemessung – Regelungen nach EN 1993-1-3Annex E.....	63
5.3	Darstellung des im EC 1993-1-3 geregelten Berechnungsablaufes .....	63
5.3.1	Allgemeine Vorgaben .....	64
5.3.2	Ermittlung der Querschnittswerte des Bruttoquerschnittes (= Idealisierter Querschnitt).....	67
5.3.3	Ermittlung der Federsteifigkeit der seitlichen Wegfeder.....	69
5.3.4	Ermittlung des effektiven Querschnittes – Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens und der Forminstabilität.....	73
5.3.5	GZT- Grenztragfähigkeit der Pfette unter Biegebeanspruchung im Randbereich..	76
5.3.6	GZT- Grenztragfähigkeit der Pfette unter Schubbeanspruchung .....	78
5.3.7	GZG – Durchbiegung der Pfette .....	79
5.4	Ermittlung des optimalen Querschnitts der Pfette.....	79

5.4.1	Ermittlung des optimalen Querschnitts des Ausgangssystems - ohne Flanschstreben: Schrag Z 300/3,5:.....	79
5.4.2	Nachweis des Bestandssystems – Flanschstrebe mit einer der Neigung von 30° ..	84
5.4.3	Nachweis des Systems mit 45° - Neigungen der Flanschstreben .....	89
5.4.4	Nachweis des Systems mit 60° - Neigungen der Flanschstreben .....	96
5.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	99
6	Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben .....	100
6.1	Ausgeführtes System der Musterhalle.....	100
6.1.1	Ausbildung der Details .....	101
6.1.2	Querschnitte .....	102
6.2	Ermittlung der Tragfähigkeit der ausgeführten Flanschstreben der Musterhalle.....	103
6.2.1	Querschnittsklassifizierung.....	103
6.2.2	Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstrebe auf Zug.....	103
6.2.3	Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstrebe auf Druck .....	104
6.2.4	Ermittlung der Tragfähigkeit der Anschlüsse .....	107
6.2.5	Zusammenfassung - Tragfähigkeit der Flanschstreben .....	112
6.3	Optimierung des Querschnittes der Flanschstrebe .....	112
6.3.1	Flanschstrebenquerschnitt.....	113
6.3.2	Tragwiderstand der Winkelquerschnitte .....	113
6.3.3	Aufzunehmende Normalkraft der Flanschstrebe und minimal erforderliche Querschnitte der Bauelemente .....	115
6.3.4	Gewichtvergleich - Optimale Gestaltung .....	117
7	Zusammenfassung.....	120
	Literatur.....	i

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Allgemeines - Stabilisierung

Im Stahlhallenbau sind die wirtschaftlichen Fragen in letzten Jahren immer wesentlicher geworden, so wächst der Bedarf nach leichten, filigranen Konstruktionen immer schneller.

Um geringeren Materialbedarf zu erreichen, werden schmalere Querschnitte mit größeren Steghöhen gebaut und kommen u. a. Bauteile mit profilierten Stegblechen zum Einsatz. Je schmaler die Bauteile ausgebildet werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit des Versagens auf Stabilität. Damit hat die Frage der Stabilisierung weitgespannter Tragkonstruktionen eine Schlüsselrolle.

In der Regel betrifft die Frage von Stabilitätsproblemen einer Halle sowohl die Stützen als auch die Riegel. Nach einem Vergleich von Riegel - und Stützensaussteifungen, muss man aber feststellen, dass ein Aussteifungssystem der Riegel weit komplizierter ist, als die Aussteifung von Stützen. Die Riegel weisen aufgrund ihre große Spannweite größere Biege- und Torsionsbelastungen auf [18].

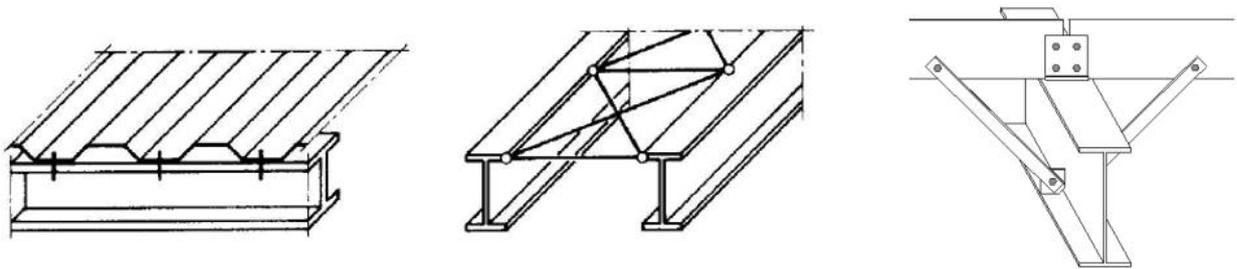


Abb. 1-1 BDK Halterung mit kontinuierliche Stützung und mit diskrete Halterungen

Die Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Bauteile kann direkt durch die kontinuierliche Stützung von flächenhaften raumabschließenden Elementen oder anhand diskreter Stützungen erfolgen. Unter diskreten Stützungen versteht man, die günstigen Wirkungen von sekundären Bauteilen wie Pfetten, Querträgern oder Verbänden für die Stabilisierung zu nutzen. Diese können als seitliche Stützung, die nur die Verschiebungen aus der Haupttragwerksebene verhindern, auch als Verdrehbehinderungen, die der Querschnittsverdrehung entgegenwirken, oder als Kombination aus beiden wirken. Derartige Abstützungen wirken in der Regel jedoch nicht als starre Auflager, sondern in Form einer diskreten federelastischen Halterung [24]. Eurocode3[5] zeigt in Abschnitt 6.3.5 Flanschstreben als Variante einer diskreten seitlichen Abstützung von Biegeträgern. Dabei wird mit Hilfe der Flanschstrebe die Verschiebung des freien Untergurtes verhindert.

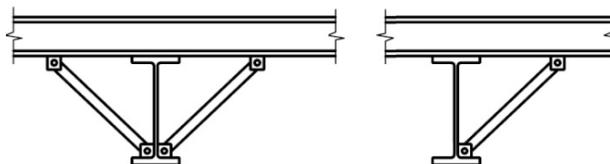


Abb. 1-2 Symmetrische und Antimetrische Anordnung der Flanschstreben

## 1.2 Stabilisierung des gedruckten Untergurtes

Flanschstreben kommen insbesondere bei Bauteilen zum Einsatz, bei denen die Druckbeanspruchung teilweise oder im ganzen freien Untergurt auftritt, d. h. eine alleinige seitliche Abstützung bei den Rahmenecken des Trägers nicht ausreicht, um den Biegedrillknicknachweis zu erfüllen [24].

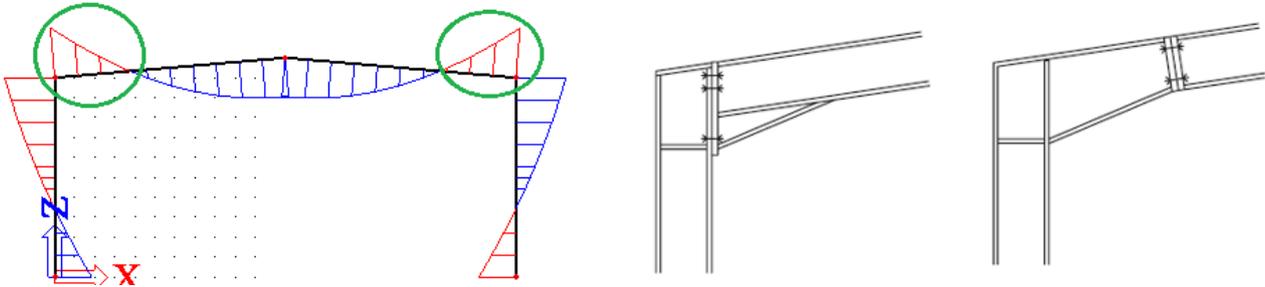


Abb. 1-3 Gevoutetes Rahmeneck [24]

Im maßgebenden Momentenverlauf (bei großen Schneelasten) eines biegesteifen Rahmens tritt typisch Druck im Untergurt des Rahmenecks auf. Dafür ist die typische Lösung die Ausbildung eines gevouteten Rahmenecks, um eine Annäherung der Materialverteilung an den Beanspruchungsverlauf zu erzielen, siehe Abb.1-3. Häufig kommen Voutungen mit zusätzlichen Flanschstreben zum Einsatz.

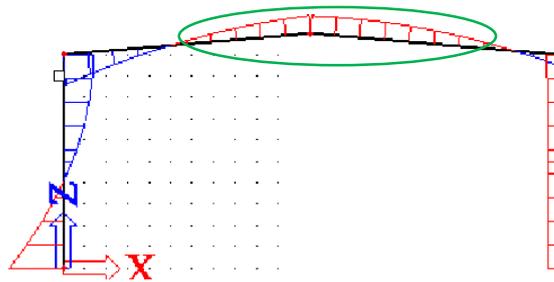


Abb. 1-4 Schematische Darstellung des maßgebenden Biegemomentenbildes mit gedrücktem Untergurt

Flanschstrebe kommt eine größere Bedeutung bei Untergurtstabilisierung zu, wo infolge des großen Windsoges die Mittelbereiche des Riegeluntergurtes gedrückt werden (Abb. 1- 4), ein solcher Momentenverlauf stellt sich unter der Belastung mit der Lastfallkombination der Windsog auch in Österreich ein. In ozeanischen, subtropischen und tropischen Klimabereichen ist aber eine geringere Schneebelastung zu berücksichtigen, somit kommt die Wirkung des Windsoges zu eine größere Bedeutung zu. Bei solchen Verhältnissen der Belastungsgrößen entstehen schlankere und leichtere Hallenkonstruktionen als aus der österreichischen Praxis gewohnt. Die Untergurtstabilisierung bekommt dann eine entscheidende Rolle bei der Durchführung einer wirtschaftlichen Bemessung von Rahmen im Stahlleichtbau. Daher ist innerhalb von Europa in Großbritannien, den Niederlanden und in Spanien die seitlichen Abstützungen mit Flanschstreben eine durchaus übliche Praxis. Im Österreich und Deutschland sind sie eher selten verwendet. Bild 1.5 zeigt Beispiele aus Großbritannien und Spanien [24]

### 1.3 Anlass und Problemdarstellung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung der Wirkung der Riegeluntergurtstabilisierung durch Flanschstreben am Beispiel einer leichten Stahlhalle mit einer Spannweite 23m. Es werden die Auswirkungen von Flanschstreben auf des statische System des Riegels und der Pfetten untersucht.

Die einzelnen Bauelemente - die Pfette, die Flanschstrebe und der Riegel- arbeiten als System zusammen und wirken miteinander. Die Pfette und die Flanschstrebe dienen einerseits als Halterung des Riegeluntergurtes gegen Stabilitätsverlust. Andererseits geben die Flanschstreben die Belastung der Pfetten auf den Riegeluntergurt weiter, somit wirkt der Riegeluntergurt samt Flanschstrebe als Federlager der Pfette. Sowohl die Pfetten als auch der Riegeluntergurt bekommen damit ein verändertes statisches System sowie veränderte Belastungen. Es stellt sich ein umfangreiches Problem dar, wo Fragen der Bemessung von Wellstegträgern, der Bemessung kaltgeformter dünnwandiger Bauteile, die Bemessung von Winkelprofilen und die Berücksichtigung der Flanschstreben als seitliche Federhalterungen an der Riegeluntergurt zusammentreffen.



*Abb. 1-5 Beispiele für Rahmenriegel, die durch Flanschstreben ausgesteift werden*

### 1.4 Zielstellung und Aufbau der Diplomarbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, durch Untersuchungen die Funktion eines derartigen Systems näher kennenzulernen. Es stellt sich auch die Frage nach der optimalen Ausbildung der Flanschstreben. Weiter soll herausgefunden werden, wie die Wirkung der Flanschstreben in der Bemessung der Tragkonstruktion berücksichtigt werden kann.

## Einleitung

Als Einleitung wird die vorgegebene Bestandshalle vorgestellt - im Weiteren als „Musterhalle“ bezeichnet - und es erfolgt die Lastermittlung nach den Regelungen der Europäischen Belastungsnormen [2],[3],[4]. In den weiteren Kapiteln werden die Überlegungen an den Bauteilen der Musterhalle durchgeführt.

Zuerst wird der Riegel, in der Musterhalle als Wellstegträger ausgeführt, analysiert. Es werden die Bemessungsregeln der Wellstegträger laut EC vorgestellt, und die Nachweise des Riegels geführt. Ziel ist herauszufinden, wie die stabilisierende Wirkung der Flanschstreben für die Bemessung des Riegels berücksichtigt werden kann und die Belastung infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes zu bestimmen. Weiters stellt sich die Frage, welche Belastungen die Flanschstreben infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes aufnehmen müssen.

Im Weiteren wird die Steifigkeit des Riegeluntergurtes, der Flanschstreben und der Pfetten untersucht. Diese arbeiten als System zusammen, somit ist ihre Analyse nur in einem gemeinsamen Modell möglich. Für diese Untersuchungen wird ein einfaches Stabmodell in SCIA in zahlreichen Varianten aufgebaut. Dabei wird einerseits die optimale Ausbildungsvariante und der erforderliche Querschnitt der Flanschstreben gesucht. Andererseits wird die Bemessung der Pfette untersucht. Nach einer übersichtlichen Beschreibung und Erklärung der Bemessungsregeln der kaltgeformten, dünnwandigen Pfetten in der europäischen Stahlbaunorm [6], wird der exakte Bemessungsablauf anhand der Berechnung der Pfetten in der Musterhalle detailliert dargestellt. Es wird die in der Hallenstatik angenommene vereinfachte Pfettenbemessung überprüft. Daneben werden die erforderliche Pfettenquerschnitte für die unterschiedlichen Ausbildungen der Flanschstreben bestimmt.

Schließlich kann nach den obigen Berechnungen die optimale Gestaltung des Pfetten - Flanschstreben - Systems ermittelt werden.

## 2 Musterhalle

In der Rahmen der Diplomarbeit werden Überlegungen an einer bestehenden Halle durchgeführt. Es wurden Übersichtspläne und statische Berechnung vorgegeben, wie derzeit die Bemessung (von einer österreichische Firma) erfolgt. Die Halle befindet sich im Gedersdorf, Niederösterreich (Seehöhe: 195m). Es handelt sich dabei um eine klassische einschiffige freitragende Kranhalle aus Stahl mit Sandwichelement - Eindeckung, die 2010 geplant wurde. Die Rahmen sind mit biegesteifen Stützenfüßen ausgeführt und die Rahmen sind in der Rahmenebene durch die Rahmenwirkung und senkrecht zur Rahmenebene durch Wand,- und Windverbände ausgesteift. Seitlich zweimal - bei jeder zweiten Pfette (siehe Abb.2.2) - sind Flanschstreben angeordnet, wodurch eine Stabilisierung des Riegels gegen Biegedrillknicken erfolgt.

### 2.1 Geometrie

Länge:	$L = 76\text{m}$	
Breite:	$b = 24,6\text{m}$	
Grundfläche:	$A = 24,6\text{m} * 76\text{m} = 1870\text{m}^2$	
Besteht aus 9 Felder:	$8 * 8,4\text{m} + 1 * 7,9\text{m}$	
(das entspricht	$8 * \text{Riegel} + 2 * \text{Giebelwände}$ )	
Dachverbände:	insgesamt zwei (im Feld2 und im Feld8)	
Wandverbände:	einmal pro Seite (Feld5)	
Spannweite des Riegels:	$e = 24\text{m}$	
Abstand der Pfetten	$d = 2,22\text{m}$	
Höhe der Stütze	$h = 10,53\text{m}$	} $\Delta h = 1,02\text{m}$
Firsthöhe:	$h_{\text{Frist}} = 11,55\text{m}$	
Dachneigung:	$\alpha = 4,7^\circ$	

Wie die Riegel, werden auch die Stützen als Wellstegträger, mit biegesteifen Rahmenecke ausgeführt. Der Riegel ist bei jeder zweiten Pfette - insgesamt viermal - durch Flanschstreben ausgesteift.

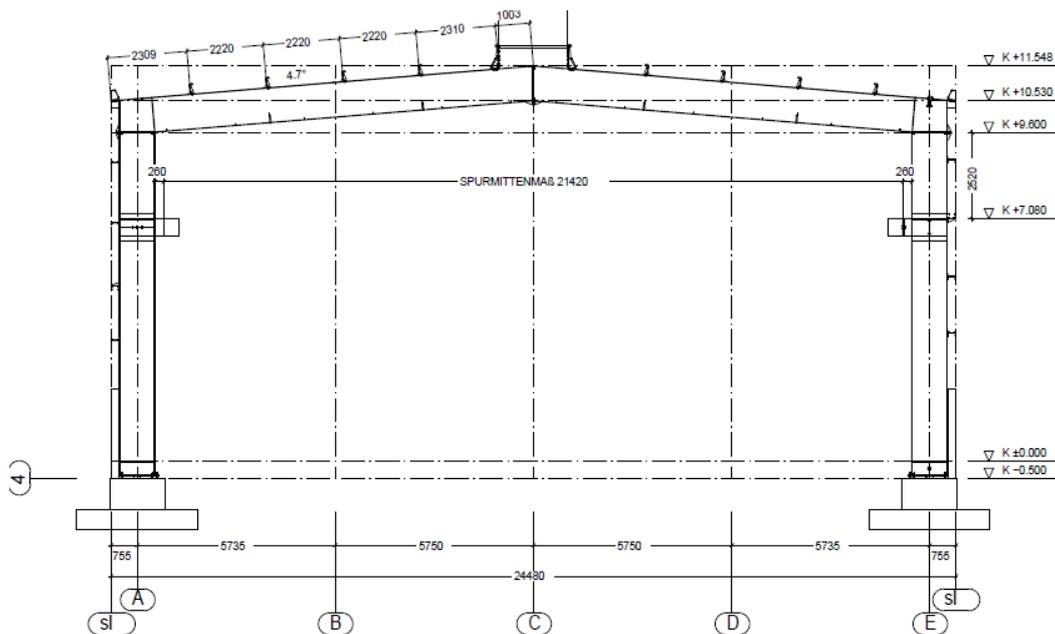


Abb. 2-1 Querschnitt Musterhalle 1

# Musterhalle

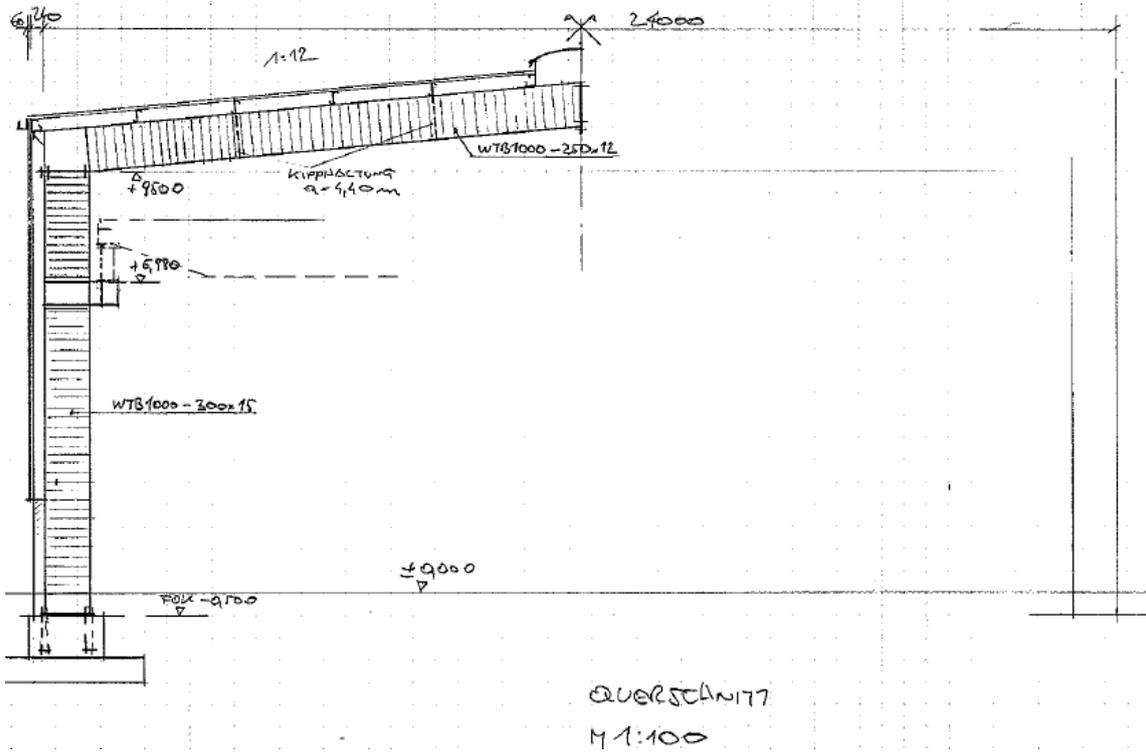


Abb. 2-2 Querschnitt Musterhalle 2

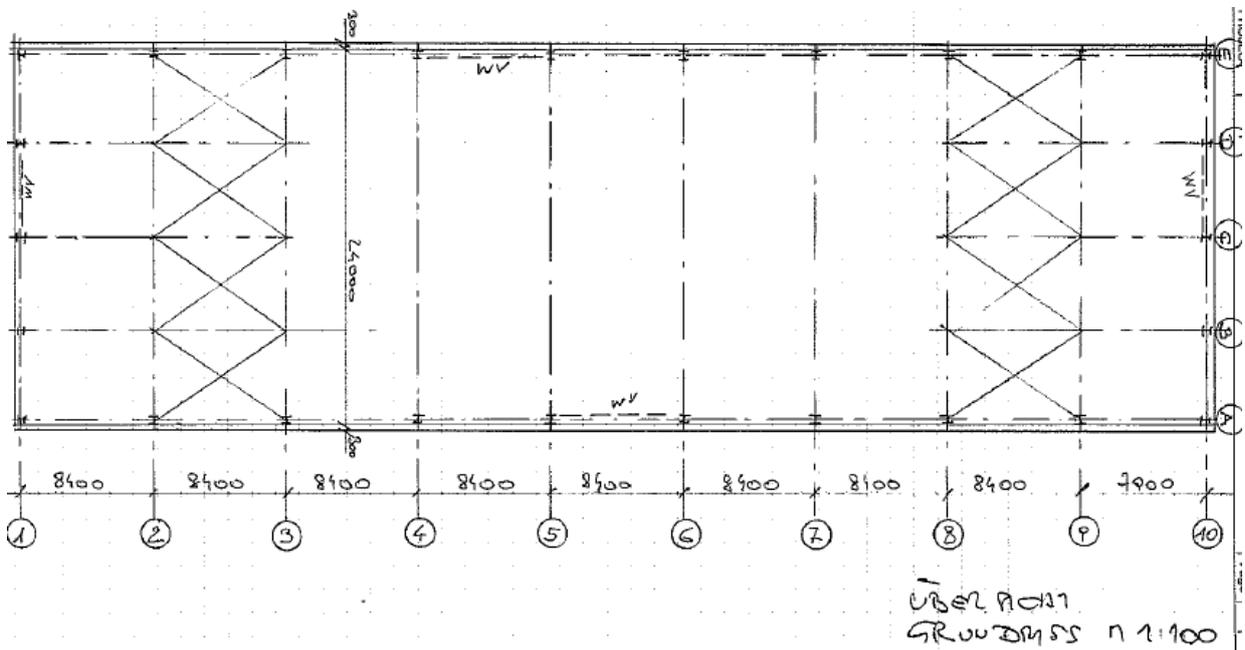


Abb. 2-3 Grundriss Musterhalle

## 2.2 Aufbau, Querschnitten

### 2.2.1 Dachpaneele: Hartschaumdachpaneele, KS1000 RW (Hersteller Kingspan)

Profilhöhe:  $t=80\text{mm}$

Dämmkern: Polyurethan Hartschaum.

Elastizitätsmodul:  $3,8\text{MPa}$

Deckschichtdicken: Standardblechdicke außen  $0,50\text{ mm}$ / innen  $0,40\text{ mm}$ .

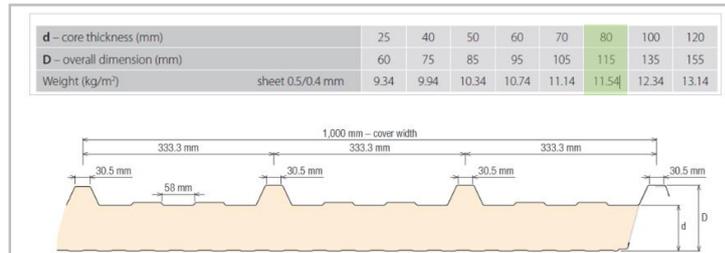


Abb. 2-4 Darstellung Dachpanelquerschnitt

### 2.2.2 Pfette: Sabprofil Z Profil 300x3 S350 GD

Die Pfetten wurden in der Halle als Neunfeldträger ausgeführt, mit  $2 \times 0,8\text{m}$  langen Überlappungen in der Stützenbereich.

Typ	Gewichte (kg/m)			Aufmaß Profil (mm)				Aufmaß Steg (mm)			Löcher	
	1,50	2,00	2,50	H	Wfb	Wfo	D1	A	B	C		e
SAB Z-120	2,84	3,78		120	50	45	15	31	60	29	14	
SAB Z-140	3,07	4,10		140	50	45	15	36	70	34	14	
SAB Z-180	4,02	5,35	6,69	180	65	60	20	46	90	44	18	
SAB Z-210	4,37	5,82	7,28	8,74	210	65	60	20	61	90	59	18
SAB Z-240		6,61	8,26	9,91	240	75	70	20	46	150	44	18
SAB Z-270		7,08	8,85	10,62	270	75	70	20	51	170	49	18
SAB Z-300		7,55	9,44	11,33	300	75	70	20	61	180	59	18

Produktinformation	
Länge	1,5 - 16,0 meter
Lochmuster serienmäßig	K 1 = 500 oder 600 mm, K 2 = 750 of 900 mm, K 3 = 30 mm
Befestigung	auf Pfettenschuhen, d = 6 mm oder mehr, Breite 130 mm oder mehr, mit Langlöchern, mittels Bolzen M12 (Z-120/140) oder M16, Qualität 8.8

Abb. 2-5 Darstellung Geometrie- Pfettenprofil

### 2.2.3 Flanschstreben: Gleichschenkige Winkel L40/40 x 4 S235

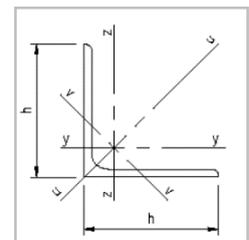


Abb. 2-6 Flanschstrebenquerschnitt

Profil	Abmessungen		Fläche	Biegung um y Achse			Biegung um v Achse		
	$a \times t$	$r_1$		$r_2$	$I_y$	$W_y$	$i_y$	$I_v$	$W_v$
mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
40 x 4	6	3	3,08	4,47	2,85	1,2	1,858	1,174	0,777

2.2.4 Riegel: Wellstegträger - Zeman & Co - WTB 1000-250-12, S355 J2

Steghöhe:  $h_s = 1000\text{mm}$   
 Stegstärke:  $t = 2,5\text{mm}$   
 Gurtbreite:  $b_{go} = b_{gu} = 250\text{mm}$   
 Gurtstärke:  $t_{go} = t_{gu} = 12\text{mm}$

Querschnittsdaten:

Abmessungen			lfm Gewicht							Querschnittswerte						
$b_g \times t_g$ mm	H mm	U m <sup>2</sup> /m	WTD kg/m	WTA kg/m	WTB kg/m	WTC kg/m	WTD kg/m	WTE kg/m	WTF kg/m	$2 A_g$ cm <sup>2</sup>	$I_y$ cm <sup>4</sup>	$i_y$ cm	$I_z$ cm <sup>4</sup>	$i_z$ cm	$I_t$ cm <sup>4</sup>	$I_w$ cm <sup>6</sup>
200 x 12	1024	3,25	51,8	56,5	61,2	65,9	75,4	84,8	94,2	48,0	122.900	50,60	1600	5,77	23,6	4.097.000
220 x 12	1024	3,33	55,6	60,3	65,0	69,7	79,1	88,5	98,0	52,80	135.200	50,60	2.130	6,35	25,9	5.453.000
250 x 12	1024	3,45	61,2	65,9	70,7	75,4	84,8	94,2	103,6	60,00	153.600	50,60	3.130	7,22	29,3	8.001.000
300 x 12	1024	3,65	70,7	75,4	80,1	84,8	94,2	103,6	113,0	72,00	184.300	50,59	5.400	8,66	35,1	13.826.000

(siehe auch Abb. 2-7)

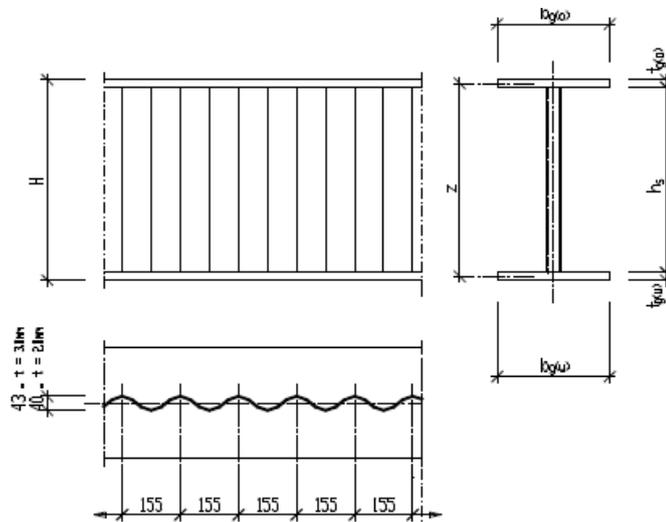


Abb. 2-7 Darstellung Wellstegträger [17]

2.2.5 Stütze: Wellstegträger - Zeman & Co - WTB 1000-300-15, S355 J2

Steghöhe:  $h_s = 1000\text{mm}$   
 Stegstärke:  $t_s = 2,5\text{mm}$   
 Gurtbreite:  $b_{go} = b_{gu} = 300\text{mm}$   
 Gurtstärke:  $t_{go} = t_{gu} = 15\text{mm}$

Querschnittsdaten:

Abmessungen			lfm Gewicht							Querschnittswerte						
$b_g \times t_g$ mm	H mm	U m <sup>2</sup> /m	WTD kg/m	WTA kg/m	WTB kg/m	WTC kg/m	WTD kg/m	WTE kg/m	WTF kg/m	$2 A_g$ cm <sup>2</sup>	$I_y$ cm <sup>4</sup>	$i_y$ cm	$I_z$ cm <sup>4</sup>	$i_z$ cm	$I_t$ cm <sup>4</sup>	$I_w$ cm <sup>6</sup>
220 x 15	1030	3,34	65,9	70,7	75,4	80,1	89,5	98,9	108,3	66,0	170.000	50,75	2.660	6,35	50,0	6.856.000
250 x 15	1030	3,46	73,0	77,7	82,4	87,1	96,6	106,0	115,4	75,0	193.200	50,75	3.910	7,22	56,8	10.061.000
300 x 15	1030	3,66	84,8	89,5	94,2	98,9	108,3	117,8	127,2	90,0	231.800	50,75	6.750	8,66	68,0	17.385.000
350 x 15	1030	3,86	96,6	101,3	106,0	110,7	120,1	129,5	138,9	105,0	270.400	50,75	10.720	10,10	79,3	27.607.000

(siehe auch: Abb.2-7)

## 2.3 Lastaufstellung

ÖNORM EN 1991-1- 1 (2011-9-1); ÖNORM B EN 1991-1-1 (2003- 12-1) [2]

ÖNORM EN 1991-1- 3 (2012-3-1); ÖNORM B EN 1991-1-3 (2013- 9-1) [3]

ÖNORM EN 1991-1- 4 (2011-5-15); ÖNORM B EN 1991-1-4 (2013- 5-1) [4]

### 2.3.1 Ständige Lasten

- › Eigengewicht Sandwichpaneel (80mm stark):  $g_{\text{Dach}} = 0,115 \text{ kN/m}^2$
- › Eigengewicht Pfette:  $g_{\text{Pfette}} = 0,051 \text{ kN/m}^2$
- › Eigengewicht Riegel:  $g_{\text{Riegel}} = 0,084 \text{ kN/m}^2$
- › Eigengewicht Installationslasten:  $g_{\text{Inst}} = 0,25 \text{ kN/m}^2$

(Anm.: Installationslasten laut vorgegebene Hallenstatik)

### 2.3.2 Veränderliche Lasten

- › Nutzlast:

Bei der Halle muss eine Nutzlast der Kategorie H angesetzt werden. Laut [2] handelt es sich dabei um: „Nicht zugängliche Dächer außer für übliche Unterhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen“

Für Kategorie H empfiehlt [2]:  $q_k=1,0 \text{ kN/m}^2$ ,  $Q_k=1,5 \text{ kN}$

Laut ÖNORM B 1991-1-1 sollte  $q_k$  nur auf eine maximale Fläche  $A = 18 \text{ m}^2$  in ungünstigster Position angesetzt werden. Und laut ÖNORM EN 1991-1-1:2011, Abschnitt 3.3.2(1) müssen auf Dächern Nutzlasten nicht in Kombination mit Schneelasten und/oder Windeinwirkung angesetzt werden. Damit ist die Nutzlast gegenüber eine Lastfallkombination mit Schnee und Wind nicht maßgebend.

- › Schnee:

Ort: Gedersdorf

Schneezone: II.

Charakteristische Schneelast auf den Boden :

$$s_k = 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\begin{aligned} s_1 &= \mu_i * C_e * C_t * s_k = \\ &= 0,8 * 1,0 * 1,0 * 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_2 &= 0,5 * \mu_i * C_e * C_t * s_k = \\ &= 0,5 * 0,8 * 1,0 * 1,0 * 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

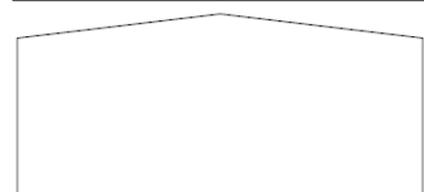
unverweht:



verweht rechst:



verweht links:



## Musterhalle

› Wind:

Ort: Gedersdorf

Spitzengeschwindigkeitsdruck:  $q_p = 0,63 \text{ kN/m}^2$

Geometrie des Daches:

Dachneigung:  $\alpha = 4,76^\circ$

Grundfläche:  $L \times b = 76 \text{ m} \times 25 \text{ m}$

Firsthöhe:  $h = 11,5 \text{ m}$

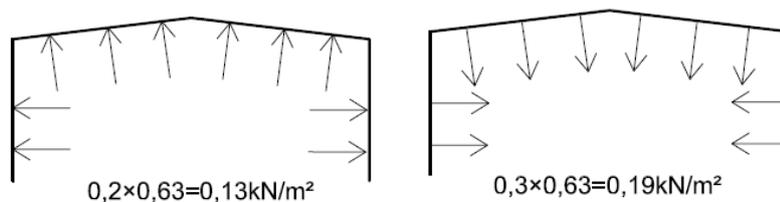
### Wind Innen: Innendruckbeiwerte, und Innenwind:

Positiver Innendruck:

$$C_{pi}^+ = +0,2 \rightarrow W_i^+ = +0,2 * 0,63 \text{ kN/m}^2 = +0,13 \text{ kN/m}^2$$

Negativer Innendruck:

$$C_{pi}^- = +0,3 \rightarrow W_i^- = +0,3 * 0,63 \text{ kN/m}^2 = +0,19 \text{ kN/m}^2$$



### Wind Außen/Wand : Außendruckbeiwerte, und Außenwindwerte an der Wand

Es werden im Rahmen der Diplomarbeit die Wirkung der Belastungen auf die Pfetten, und auf den Stahlrahmen in der Rahmenebene untersucht. Die Belastungen infolge an der Geibelfwand angreifenden Wind werden mithilfe von Druckstäben bis zu den Verbänden weitergeleitet, somit müssen die Kräfte nicht von den Pfetten getragen werden. Die vier Stahlrahmen bei den Dachverbänden erhalten infolgedessen Zusatzbelastungen, die jedoch vernachlässigt werden.

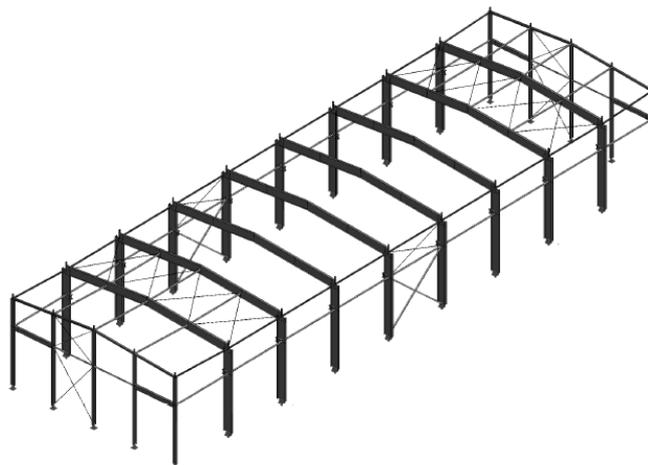
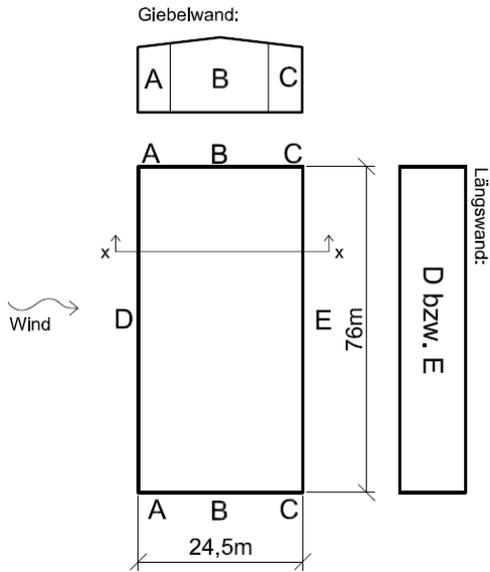


Abb. 2-8 Aussteifungssystem der Halle

Anströmrichtung  $\theta = 0^\circ$



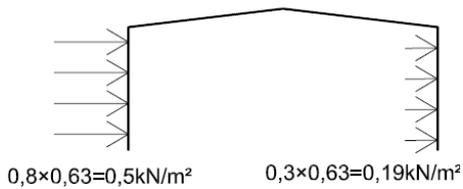
Längswand: Bereich D bzw E  
 $h = 11,5m; b = 76m; d = 24,5m$

$h/b = 11,5m/76m = 0,15$

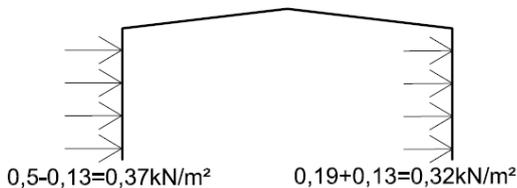
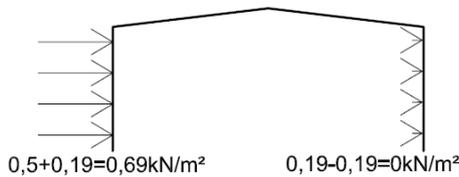
$d/b = 24,5m/76m = 0,32$

Bereich	D	E
$C_{pe,10}$	0,8	-0,3
$W_{au\beta en}$ (kN/m <sup>2</sup> )	0,5	-0,19

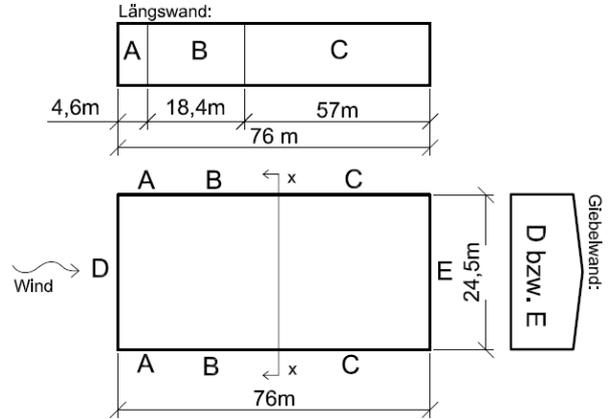
Schnitt x-x:



Wind innen und außen - Summe:



Anströmrichtung  $\theta = 90^\circ$



Längswand: Bereich A, B und C  
 $h = 11,5m; b = 24,5m; d = 76m$

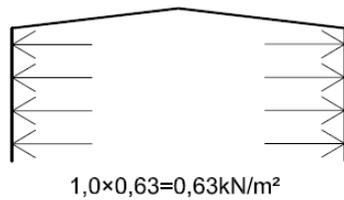
$e = 23m$  ( $e/5 = 4,6m, e * \frac{4}{5} = 18,4m$ )

$h/b = 11,5m/24,5m = 0,47$

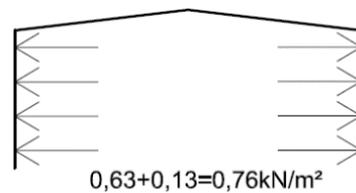
$d/b = 76m/24,5m = 3,1$

Bereich	A	B	C
$C_{pe,10}$	-1	-0,7	-0,4
$W_{au\beta en}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-0,63	-0,44	-0,25

Schnitt x-x:



Wind innen und außen - Summe:

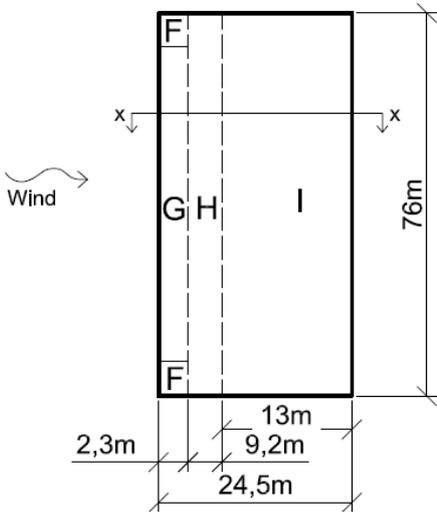


*ANM.: Die Kombination von Außen- und Innenwind nur mit dem Innendruck interessant*

Wind Außen/ Dach: Außendruckbeiwerte, und Außenwindwerte auf dem Dach

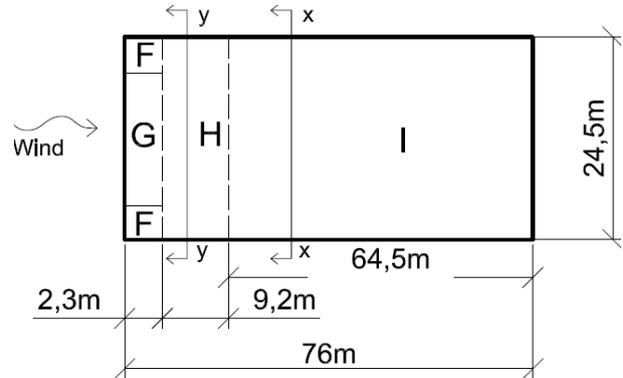
Dachneigung  $\alpha = 4,78^\circ < 5^\circ$ , Folglich wurde die Windlast als für *Flachdach* angenommen.

Anströmrichtung  $\theta = 0^\circ$



$h = 11,5m; b = 76m; d = 24,5m$   
 $e = 23m (e/4 = 5,75m; e/10 = 2,3m)$

Anströmrichtung  $\theta = 90^\circ$



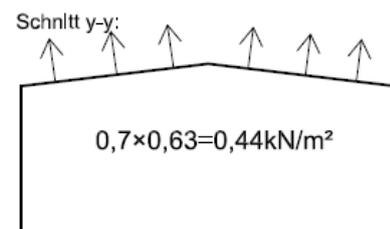
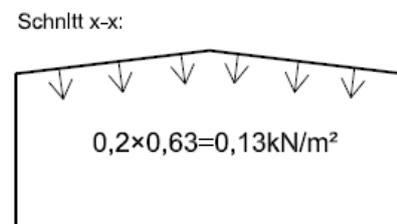
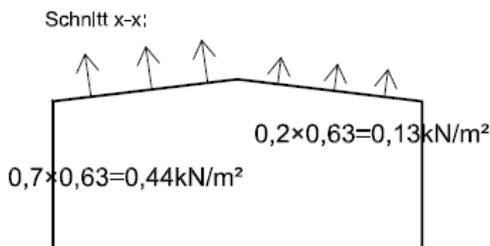
$h = 11,5m; b = 24,5m; d = 76m$   
 $e = 23m (e/4 = 5,75m; e/10 = 2,3m)$

Bei der Ermittlung der Windkraft auf eine Dachfläche müssen die  $c_{pe,10}$ -Werte der Randzonen nicht berücksichtigt werden, falls die Fläche dieser Randzonen kleiner als 20 % der gesamten Dachfläche ist. Die Gesamtwindkraft darf in diesem Fall mit den  $c_{pe,10}$ -Werten für die jeweilige Mittelzone H und I berechnet werden. [3]ÖNORM B Abschnitt 9.2.3.2

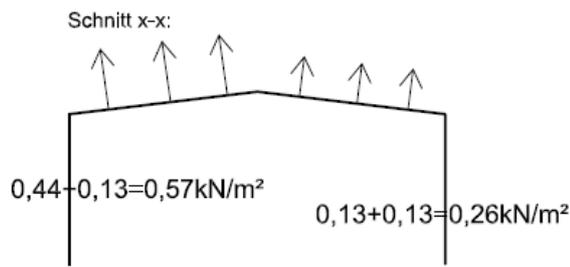
$A = 24,5m * 76m = 1862m^2$   
 $A_{G+F} = 2,3m * 76m = 174,8m^2$   
 $174,8/1862 = 0,09 \rightarrow 9\%$

$A = 24,5m * 76m = 1862m^2$   
 $A_{G+F} = 2,3m * 24,5m = 56,3m^2$   
 $56,3/1862 = 0,03 \rightarrow 3\%$

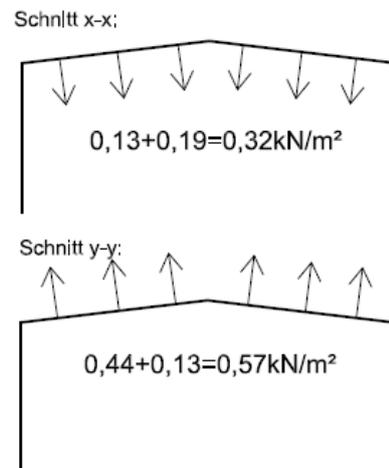
Bereich	H	I
$c_{pe,10}$	-0,7	0,2
$W_{au\beta en} (kN/m^2)$	-0,44	0,13



Wind innen und außen - Summe:



Wind innen und außen - Summe:



## 2.4 Maßgebende Lastfallkombination

Angenommen laut: ÖNORM EN1990(2013-03-15) ÖNORM B 1990 (2003-01-01) [1]

Die maßgebenden Lastfallkombinationen sind für sämtliche Bauteile jene mit leitendem Lastfall Schnee, und abgeminderten Lastfall Winddruck.

Nachweise für Grenzzustände der Tragfähigkeit:

$$q_d = G_{k,j,sup} * \gamma_{G,j,sup} + Q_{k,1} * \gamma_{q,1} + Q_{k,i} * \gamma_{q,i} * \psi_{0,i} =$$

$$= EG * 1,35 + Sch * 1,5 + W_{Druck} * 1,5 * 0,6$$

Nachweise für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit:

$$q_d = G_{k,j,sup} + Q_{k,1} + Q_{k,i} * \psi_{0,i} = EG + Sch + W_{Druck} * 0,6$$

Die maßgebende nach oben wirkende Lastfallkombinationen sind für sämtliche Bauteile mit leitendem Lastfall Windsog (ohne Schneebelastung).

Nachweise für Grenzzustände der Tragfähigkeit:

$$q_d = G_{k,j,inf} * \gamma_{G,j,inf} + Q_{k,1} * \gamma_{q,1} + Q_{k,i} * \gamma_{q,i} * \psi_{0,i} =$$

$$= EG * 1,00 + W_{Druck} * 1,5 + Sch * 1,5 * 0$$

Nachweise für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit:

$$q_d = G_{k,j,sup} + Q_{k,1} + Q_{k,i} * \psi_{0,i} = EG + W_{Druck} + Sch * 0,5$$

## 2.5 Zusammenfassung- Belastung Dach

Charakteristische Belastungen der Pfetten				
	Pfettenabstand:	2,22	m	
Lastart	Bezeichnung	Belastung		Anm.
EG	Eg_Sandwichp.	0,26	kN/m	
	Eg_Pfette	0,11	kN/m	
	Eg_Installation	0,56	kN/m	
	$\Sigma$	<b>0,92</b>	<b>kN/m</b>	
Veränderliche	Schnee_voll	2,46	kN/m	
	Windsog	-1,27	kN/m	Exkl.
	Winddruck	0,71	kN/m	
	$\Sigma$	<b>1,91</b>	<b>kN/m</b>	

Charakteristische Belastungen der Riegeln				
	Rahmenabstand	8,4	m	
Lastart	Bezeichnung	Belastung		Anm.
EG	Eg_Sandwichp.	0,97	kN/m	
	Eg_Pfette	0,43	kN/m	
	Eg_Installation	2,10	kN/m	
	Eg_Riegel	0,71	kN/m	
	$\Sigma$	<b>4,20</b>	<b>kN/m</b>	
Veränderliche	Schnee_voll	9,32	kN/m	
	Windsog	-4,79	kN/m	Exkl.
	Winddruck	2,69	kN/m	
	$\Sigma$	<b>7,22</b>	<b>kN/m</b>	

Lastfallkombinationen der Belastungen der Pfetten	
Hinunter_ULS	q.d= 5,48 kN/m
Hinunter_SLS	q.d= 3,74 kN/m
Hinauf_ULS	q.d= -0,98 kN/m
Hinauf_SLS	q.d= -0,34 kN/m

Lastfallkombinationen der Belastungen der Riegeln	
Hinunter_ULS	q.d= 21,67 kN/m
Hinunter_SLS	q.d= 14,87 kN/m
Hinauf_ULS	q.d= -2,98 kN/m
Hinauf_SLS	q.d= -0,59 kN/m

Horizontale Belastung infolge Wind an der Längswand, die auf die maßgebenden Momentenbelastungen des Riegels führen.

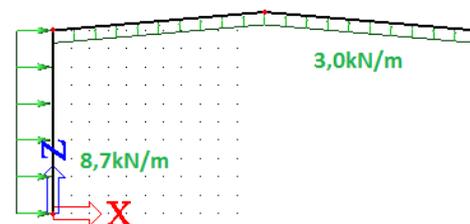
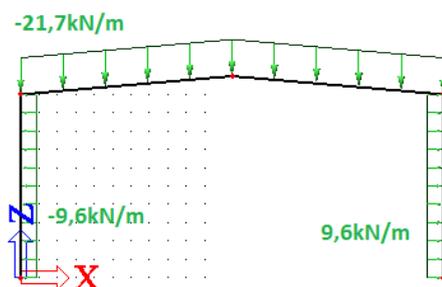
Windlast an der Wand zur maßgebenden Kombination „Auflast auf dem Dach“:

$$w_1 = \left(0,76 \frac{kN}{m^2} * 1,5\right) * 8,4m = 9,6 \frac{kN}{m}$$

Windlast an der Wand zur maßgebenden „auf dem Dach nach oben wirkenden“ Belastungskombination:

$$w_2 = \left(0,69 \frac{kN}{m^2} * 1,5\right) * 8,4m = 8,7 \frac{kN}{m}$$

Somit ergeben sich die zwei maßgebende Belastung des Rahmens für die Biegemomente zu:



### 3 BDK Nachweis - Riegel

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Wirkung von Flanschstreben auf das Stabilitätsverhalten des Riegels, bzw. wie deren Wirkung bei der Bemessung des Riegels berücksichtigt werden kann. Es werden der vorgegebene Berechnungsablauf von der Musterhalle und die bei der Bemessung getroffenen Annahmen fortgeführt. Danach wird davon unabhängig der Riegel laut Regelungen der europäischen Stahlbaunorm untersucht, somit können die Ergebnisse von den beiden Bemessungen verglichen werden.

Die Riegel sowie die Stützen wurden in der Musterhalle als Wellstegträger mit biegesteifem Rahmeneck ausgeführt. Der Wellstegträger weist ein spezielles Tragverhalten auf. Das Tragverhalten entspricht dem eines Fachwerkes, somit tragen die zwei Gurte die Normal- und Biegebelastungen und der Steg die Querkräfte. Daher ist der von der Stahlbaunorm 1993-1-5 [7] vorgeschriebene einzige Stabilitätsnachweis für Wellstegträger ein Knicknachweis des gedrückten Gurtes. Die Ermittlung des Abminderungsbeiwertes  $\chi$  erfolgt nach Regelungen EN 1993-1-1 [5] /Abschnitt 6.3.

Es wird bei der Bemessung im ersten Schritt die Ersatzfedersteifigkeit für die Flanschstreben – Pfetten-Halterung ermittelt. Im zweiten Schritt wird ein einfaches Stabmodell aufgebaut, wo der gedrückte Wellsteggurt mit seinem tatsächlichen Querschnitt modelliert wird, und die abstützenden Flanschstreben durch nachgiebige Auflager mit den davor ermittelten Federsteifigkeiten ersetzt. Die Knicklänge des Untergurtes wird mit einem Statikprogramm ermittelt. Damit ist der Abminderungsbeiwert schon einfach berechenbar, und es kann der Nachweis laut Regelungen 1993-1-5[7] /Annex D geführt werden.

In Kenntnis der realitätsnahen Größe der Ersatzfedersteifigkeiten konnte der Riegeluntergurt als kontinuierlich elastisch gebetteter Druckstab laut Engesser [20],[21] untersucht werden. Nach der Berechnung wurde festgestellt, dass das ermittelte Ergebnis weit auf der sicheren Seite liegt und daher die Bemessung laut dieser Annahme wirtschaftlich ungünstig ist.

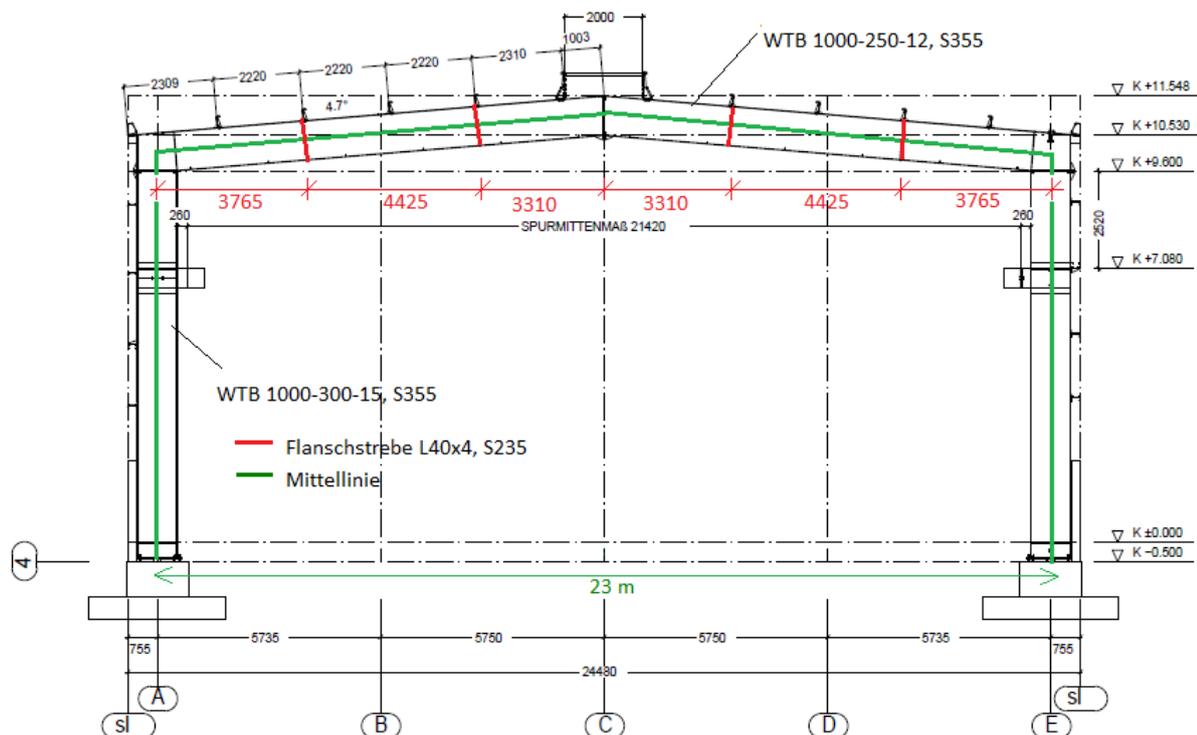


Abb. 3-1 Geometrische Abmessungen des Rahmens, Verteilung der Flanschstreben in der Musterhalle

### 3.1 Querschnitte - Musterhalle

Riegel: Wellstegträger - Zeman & Co - WTB 1000-250-12, S355 J2

- › Steghöhe:  $h_s = 1000\text{mm}$
- › Stegstärke:  $t = 2,5\text{mm}$  (das Zeichen „B“ in der Name steht für die Stegstärke)
- › Gurtbreite:  $b_{go} = b_{gu} = 250\text{mm}$
- › Gurtstärke:  $t_{go} = t_{gu} = 12\text{mm}$
- › Streckgrenze:  $f_y = 355\text{ N/mm}^2$
- › Streckgrenze des Steges  $f_{yw} = 355\text{ N/mm}^2$

Querschnittsdaten:

Abmessungen			lfm Gewicht							Querschnittswerte						
$b_g \times t_g$ mm	H mm	U m <sup>2</sup> /m	WT0 kg/m	WTA kg/m	WTB kg/m	WTC kg/m	WTD kg/m	WTE kg/m	WTF kg/m	2 A <sub>g</sub> cm <sup>2</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> cm	I <sub>z</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>z</sub> cm	I <sub>t</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>w</sub> cm <sup>4</sup>
200 x 12	1024	3,25	51,8	56,5	61,2	65,9	75,4	84,8	94,2	48,0	122.900	50,60	1.600	5,77	23,6	4.097.000
220 x 12	1024	3,33	55,6	60,3	65,0	69,7	79,1	88,5	98,0	52,80	135.200	50,60	2.130	6,35	25,9	5.453.000
250 x 12	1024	3,45	61,2	65,9	70,7	75,4	84,8	94,2	103,6	60,00	153.600	50,60	3.130	7,22	29,3	8.001.000
300 x 12	1024	3,65	70,7	75,4	80,1	84,8	94,2	103,6	113,0	72,00	184.300	50,59	5.400	8,66	35,1	13.826.000

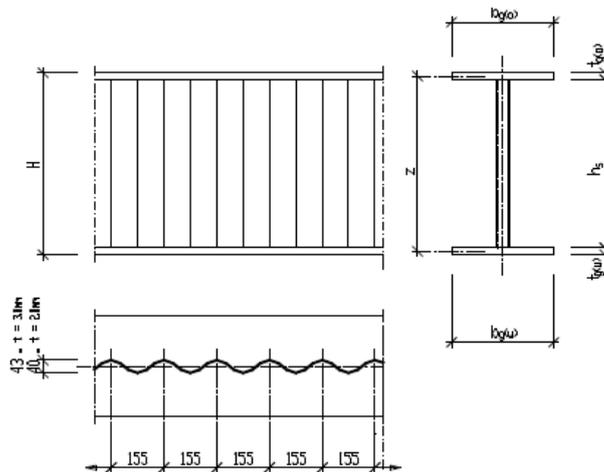


Abb. 3-2 Darstellung Wellstegträger [19]

### 3.2 Bemessung des Riegels in der Musterstatik

Bemessung des Riegels wurde in der damaligen statischen Bemessung unter Annahme der folgenden Vereinfachungen geführt.

#### 3.2.1 Bemessung des Wellstegträgers

Bemessung des Riegels in der vorgegebenen Statik wurde anhand der derzeitigen Version des Berechnungsprogramms von der Firma Zeman & Co Gesellschaft mbH geführt. Die Beschreibung des Programms gibt Auskunft über den angewandten Berechnungsablauf [17]. Die Bemessung mit dem Programm erfolgt grundsätzlich laut EN 1993-1-5 Annex D, allerdings mit kleinen Vereinfachungen. Die Ermittlung der Widerstandsfähigkeit gegen Stabilitätsversagen erfolgt anhand des vereinfachten Bemessungsverfahrens nach EC 1993-1-1 [5], Abschnitt 6.3.2.4, wobei auf der sicheren Seite die Mitwirkung des Steges vernachlässigt wird. Bei der Ermittlung der Schubtragfähigkeit des

Wellstegträger ist ausschließlich das Knicken des Steges berücksichtigt. Das Auftreten lokalen Beulens des Steges ist laut Versuchsergebnissen ausgeschlossen, daher wurde dies von dem Programm nicht berechnet.

### 3.2.2 Berücksichtigung der stabilisierenden Wirkung der Flanschstreben

Die Berücksichtigung der stabilisierenden Wirkung der Flanschstreben bei der Bemessung des Riegels durch die ausführende Firma erfolgte unter der Annahme von Gabellagerungen in den Kipphaltungspunkten. Es wurde in alle 4,4 m eine Gabellagerung angenommen, das stimmt mit der ausgeführten Verteilung der Flanschstreben jedoch nicht überein, im Mittelbereich des Rahmens beträgt der Abstand von 6,6 m.

Die infolge der Untergurtstabilisierung auf den Flanschstreben und somit auf die Pfette weitergegebene Belastung wurde nicht ermittelt, und es wurde kein Tragfähigkeitsnachweis der Flanschstreben geführt. Die Streben wurden ohne weitere Nachweise konstruktiv eingebaut.

### 3.3 Wellstegträger (Bemessung laut EN 1993-1-5/Anhang D)

Die Bemessung des Wellstegträgers ist in EN 1993-1-5/[7] Annex D geregelt. „Aufgrund der Profilierung entzieht sich der Steg der Mitwirkung an der Abtragung von Längsnormalspannungen aus Biegung. Das heißt, statisch gesehen entspricht der Wellstegträger einem Fachwerkträger, bei der Biegemomente und Normalkräfte nur durch die Gurte, die Querkraft nur den Wellstegen abgetragen werden.“ [17]

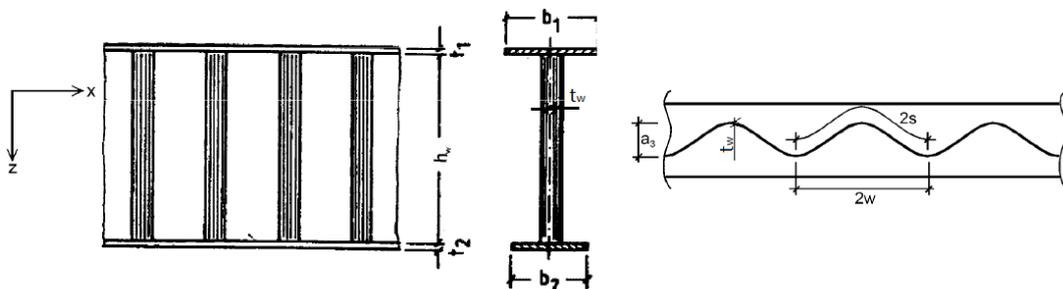


Abb.3-3 Bezeichnungen geometrische Abmessungen des Wellstegträgers laut EC [7]

In [7] werden nur die Regelungen für Wellstegträger angegeben, für Träger mit trapezförmig profilierten Stegblech gelten teilweise andere Regelungen. In den empfohlenen Regelungen der europäischen Stahlbaunorm werden Normalkräfte und Biegemomente den Gurten zugewiesen und Querkräfte von Steg angenommen.

#### 3.3.1.1 Normalkraft- und Momententragfähigkeit

Die Grenznormalkraft bei Normalkraft- bzw. Biegebeanspruchung wird durch Erreichen der Streckgrenze in der Schwerachse des Zuggurtes bzw. des Druckgurtes oder durch Erreichen der Stabtragfähigkeit in der Schwerachse des Druckgurtes bestimmt. „Die Stabtragfähigkeit wird mittels des Abminderungsfaktors  $\chi$  für die Stabilitätsfälle Biegeknicken und Biegedrillknicken beschrieben“ [19].

Somit ist die Momententragfähigkeit:

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_2 * t_2 * f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} * \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); \quad \rightarrow \text{Zuggurt} \\ \frac{b_1 * t_1 * f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} * \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); \quad \rightarrow \text{Druckgurt} \\ \frac{b_1 * t_1 * \chi * f_{yf}}{\gamma_{M1}} * \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \quad \rightarrow \text{Druckgurt} \end{array} \right.$$

Wobei:

$f_{yf}$  – Fließgrenze des Gurtes

$f_{yf,r}$  – die aufgrund der Querbiegemomente in den Gurten abgeminderte Fließgrenze, bei sinusförmig profiliertem Stegblech ergibt sich der Reduktionsbeiwert von 1,0.

$\chi$  – der Abminderungsbeiwert für Biegeknicken senkrecht zur Systemebene nach EN 1993 – 1 – 1 / Abschnitt 6.3

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

Geometrische Abmessungen siehe in der Abb.6-3. dargestellt

### 3.3.1.2 Querkrafttragfähigkeit

Die Grenzquerkraft wurde unter der Annahme einer konstanten Schubspannungsverteilung im Stegquerschnitt ermittelt. Die Einflüsse des lokalen bzw. globalen Stegbeulens wurden durch den Abminderungsfaktor  $\chi_c$  berücksichtigt.

$$V_{bw,Rd} = \chi_c * \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} * \sqrt{3}} * h_w * t_w$$

$$\chi_c = \min(\chi_{cl}, \chi_{cg})$$

Die Grundlagen für die Berechnung der Quertragfähigkeit gehen auf das Modell von Höglund zurück [19]. Somit sind die Abminderungsfaktoren:

$$\text{Für lokales Plattenbeulen: } \chi_{c,l} = \frac{1,15}{0,9 + \bar{\lambda}_{c,l}} \leq 1,0$$

$$\text{Für Knicken: } \chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1,0$$

$$\text{Die bezogene Schlankheit für lokales Plattenbeulen: } \bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,l} * \sqrt{3}}}$$

Bei sinusförmig profilierten Stegblechen ist für die Ermittlung der kritischen Beulspannung die folgende Gleichung empfohlen:

$$\tau_{cr,l} = \left( 5,34 + \frac{a_3 * s}{h_w * t_w} \right) * \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2)} * \left( \frac{t_w}{s} \right)^2$$

$$\text{Bezogene Schlankheit für Knicken: } \bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g} * \sqrt{3}}}$$

Kritische Spannung:

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w * h_w^2} * \sqrt[4]{D_x * D_y^3}$$

Der Wellsteg wird dabei als orthotrope Platte mit den Steifigkeit  $D_x$  und  $D_z$  betrachtet. [17] Damit ergeben sich für den Wellsteg:

$$D_x = \frac{E * t^3}{12 * (1 - \nu^2)} * \frac{w}{s}$$

$$D_y = \frac{E * I_z}{w}$$

Wobei:

Geometrische Abmessungen siehe in der Abb.6-3.

$I_z$  – das Flächenträgheitsmoment eines Stegabschnittes der Länge  $w$

$\nu = 0,3$  Poissonzahl

$\gamma_{M1} = 1,0$

### 3.4 Ersatzfedersteifigkeiten

Die Bestimmung der exakten Knicklänge des Riegeluntergurtes erfolgt anhand eines einfachen Stabmodells mit Hilfe des Statikprogramm SCIA. Bei der Modellierung des ausgesteiften Riegeluntergurtes können die Flanschstreben als Stabelemente mit Anschlusspunkten am Riegeluntergurt und den Pfetten modelliert werden oder sie können durch entsprechend nachgiebige Auflager ersetzt werden.

Die Berechnungsformeln der Ersatzfedersteifigkeiten von Flanschstreben wurden von Hannebauer [18] mithilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte ermittelt. Die Formel berücksichtigt die abstützende Wirkung des Sandwichelementes nicht, die so ermittelten Steifigkeiten liegen auf der sicheren Seite. Für die Betrachtungen wurde ein vereinfachtes System angenommen. Die Verschiebung des Riegeluntergurtes setzt sich aus dem Verschiebungsanteil ( $f_N$ ) infolge der Dehnsteifigkeit der Flanschstrebe und aus dem Verschiebungsanteil ( $f_M$ ) infolge der Biegesteifigkeit der Pfette zusammen.

Mit an dem Riegeluntergurt angreifenden Ersatzkräften wurde das Ausweichen des Riegeluntergurtes von dem benachbarten Rahmen modelliert. Somit wurden die maßgebenden Ersatzkraftangriffsrichtungen bestimmt, welche die größten Riegeluntergurtverschiebungen sowie auch die größten Pfettenverformungen verursachen. (Dies ist in Abb. 3-1 erkennbar.) Mit steigender Riegeluntergurtverschiebung verringert sich die ansetzbare Ersatzfedersteifigkeit.

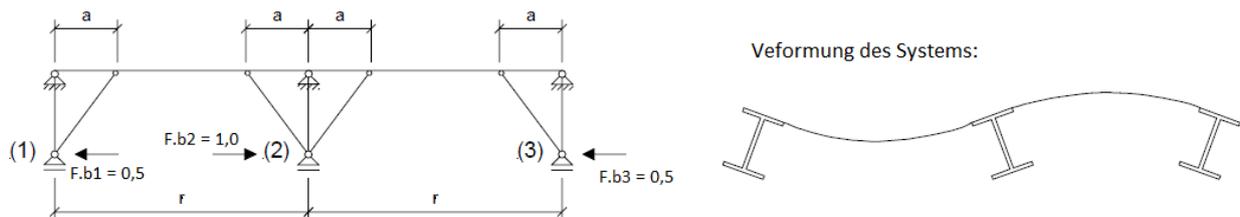


Abb. 3-4 Vereinfachtes System, und Verformungsbild infolge Der Riegelverschiebungen [23]

Die Ersatzfedersteifigkeiten werden mithilfe des Kraftgrößenverfahrens ermittelt, die Ersatzkraft des vereinfachten System ist mit 1kN, bzw. 0,5kN angenommen. „Die virtuellen Kräfte  $F_V$  werden

in Richtung der angenommenen Verschiebung des Riegeluntergurtes angesetzt und nehmen dieselben Werte an, wie die angenommene Ersatzkraft  $F_B$ .“ [23] Demzufolge ergibt sich identischen Momentenflächenbilder  $M_B$  und  $M_V$ , sowie die identische Normalkraftflächen  $N_B$  und  $N_V$  siehe Abb. 3-5.

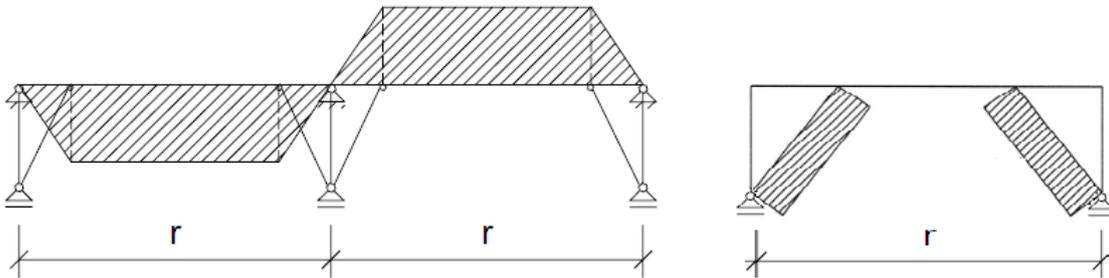


Abb. 3-5 links: Momentenflächenbild  $M_B$ , bzw.  $M_V$ , rechts: Normalkraftflächen  $N_B$ , bzw.  $N_V$ . [18]

Durch die Integration über die Momenten,- und Normalkraftflächen können die Verschiebungen ermittelt werden.

$$f_M = \int \frac{M_B * M_V}{E * I_{Pf}} \quad f_N = \int \frac{N_B * N_V}{E * A_F}$$

Die Gesamtverschiebung des Riegeluntergurtes

$$f = f_M + f_N$$

Somit die Ersatzfedersteifigkeit von der Gesamtverschiebung:

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

Die Auswertung der Integrale erfolgt mit Hilfe der Integraltafel. Somit ergibt sich für die Riegeluntergurtverschiebungen die folgende Berechnungsformel:

Der Verschiebungsanteil der Pfette ergibt sich laut den obigen Betrachtungen, als:

$$f_M = \frac{\left(-\frac{4}{3} * a + r\right) * \frac{e_F^2}{4}}{E * I_{y,pf}}$$

Verschiebungsanteil der Flanschstrebe:

$$f_N = \frac{2 * b * \left(\frac{b}{z} * \frac{e_F}{2 * a}\right)^2}{E * A_F}$$

Wobei:

$r$  – Rahmenabstand

$e_F$  – bei dieser Flanschstreben – Riegeluntergurtausbildung gleich  $z$

$I_{y,pf}$  – Flächenträgheitsmoment der Pfette

$A_F$  – Größe der Querschnittsfläche der Flanschstrebe

siehe auch Abb.3-6.

## BDK Nachweis - Riegel

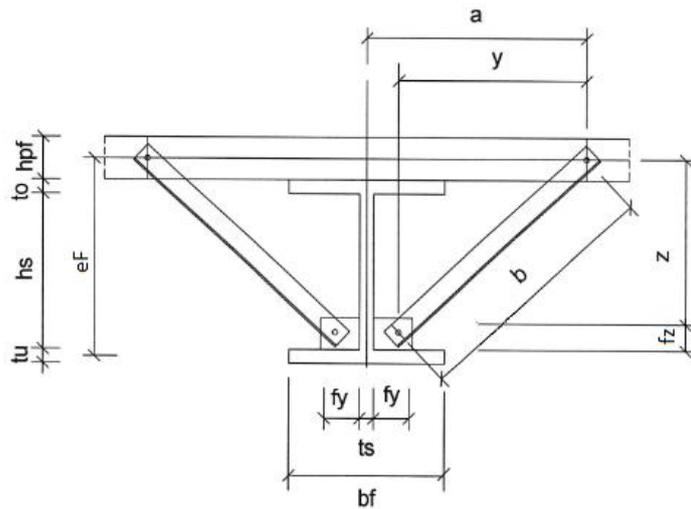


Abb. 3-6 Darstellung der Geometrische Abmessungen von Hannebauer [18]

Bezüglich einer detaillierten Beschreibung des Rechenwegs siehe Hannebauer [18] oder Pasternak/Hannebauer [23].

(ANM. Das Formel  $f_M$  wurde in den erwähnten Arbeiten allerdings vertippt. [23]/Seite 4, [18]/Seite 37)

Der Einfluss der Dehnsteifigkeit der Flanschstrebe ist um eine Größenordnung größer als jener der Biegesteifigkeit der Pfette, demzufolge wird die Drehfedersteifigkeit hauptsächlich von der Biegesteifigkeit der Pfette bestimmt. [18]

### 3.5 Bemessung des Riegels

Nachweise des Wellstegträgers erfolgen laut Regelungen EN 1993-1-5 [7].

#### 3.5.1 Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeiten

Bestimmung der Ersatzfedersteifigkeiten in der Musterhalle.

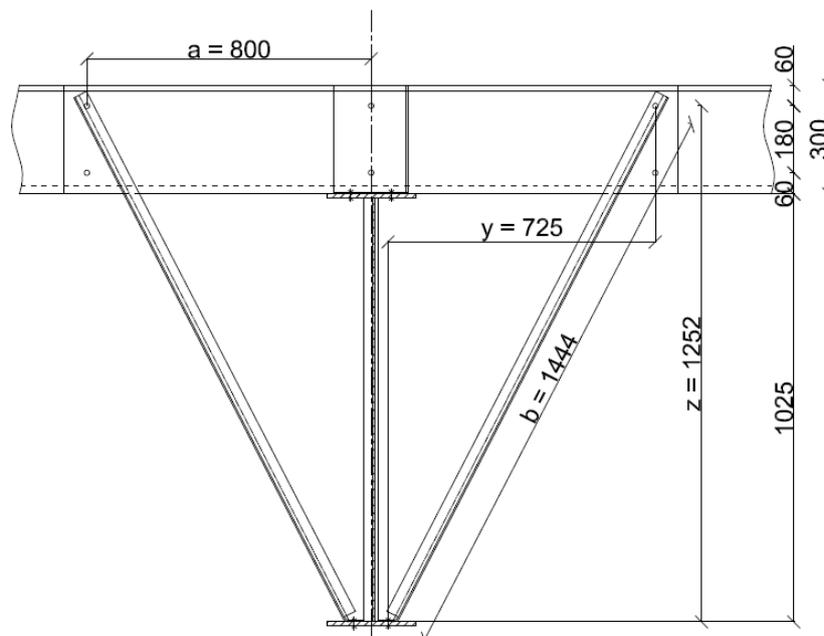


Abb. 3-7 Abmessungen für Ermittlung Ersatzfedersteifigkeit-Musterhalle

Im Fall der Flanschtrefe – Riegeluntergurt – Kontenausbildung von der Musterhalle (Flanschtrefe ist direkt auf dem Riegeluntergurt angeschraubt) ergibt sich auf  $e_F = z$ .

Die weiteren Abmessungen in Millimeter sind in der Abbildung 3-7 erkennbar.

$$f_N = \frac{2 * b * \left(\frac{b}{z} * \frac{e_F}{2 * a}\right)^2}{E * A_F} = \frac{2 * 1453 * \left(\frac{1453}{1252} * \frac{1252}{2 * 800}\right)^2}{210.000 * 308} = 3,705 * 10^{-5} \frac{mm}{N}$$

$$f_M = \frac{\left(-\frac{4}{3} * a + r\right) * \frac{e_F^2}{4}}{E * I_{y,pf}} = \frac{\left(-\frac{4}{3} * 800 + 8400\right) * \frac{1252^2}{4}}{210.000 * 17.524.000} = 7,809 * 10^{-4} \frac{mm}{N}$$

$$C = \frac{1}{f_M + f_N} = \frac{1}{7,809 * 10^{-4} + 3,705 * 10^{-5}} = 1222,56 \frac{N}{mm}$$

### 3.5.2 Ermittlung des Abminderungsbeiwertes - SCIA Modell

Um die Knicklänge des Riegeluntergurtes zu ermitteln, wurde der Untergurt (mit seinem tatsächlichen Querschnitt und Material) als Einfeldträger an den beiden Enden mit starren horizontalen Auflagern angenommen. Die Flanschtrefen wurden dabei mit horizontalen Federauflagern ( $c = 1222\text{kN/m}$ , siehe Abschnitt 3.5.1) ersetzt, somit entsteht ein Fünffeldträger. Belastet wurde ausschließlich mit einer zentrischen Druckkraft. Die Biegeknicklinie und die Knicklängen um die stärkere Achse des Querschnitts wurden vom Statikprogramm ermittelt.

Um die stabilisierende Wirkung der Flanschtrefe mit einer Gabellagerung vergleichen zu können, wird das gleiche Modell mit starren horizontalen Auflagern - sowohl in dem Innenbereich als auch an den Rändern – aufgebaut. Gesucht ist ebenso die Knicklänge. Die zwei Modelle mit ihren Knickformen sind in Abb. 3-8 zu erkennen, untereinander sind die zwei Knickformen dargestellt.

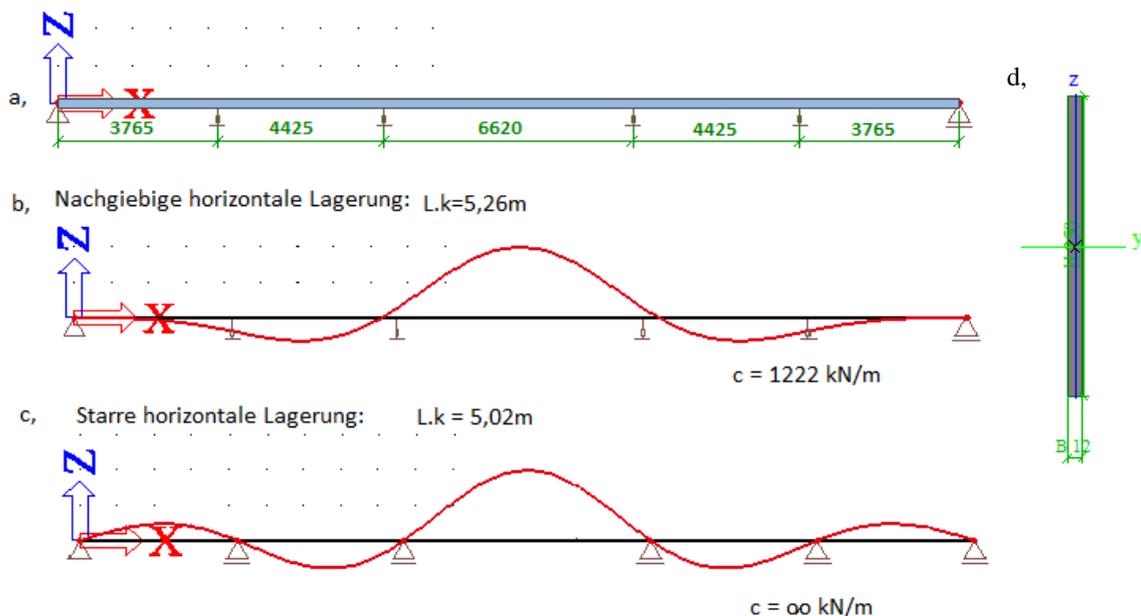


Abb. 3-8 a, Geometrie des Stabmodelles des Riegeluntergurtes  
 b, Knickform mit nachgiebigen vertikale Innenauflagern  
 c, Knickform mit starren vertikale Innenauflagern  
 d, Untergurtquerschnitt, mit globalen Koordinatenachsen

Tab. 3-1 Berechnung des Abminderungsbeiwertes

	Feder Innenaufleger	Starre Innenaufleger
$L_{cr} =$	5.260mm	5.020mm
$i_y =$	72mm	72mm
$\lambda_1 = \sqrt{\frac{235}{355}} * 93,9 =$	76,39	76,39
$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_y} * \frac{1}{\lambda_1} =$	0,954	0,91
<i>Knickfigur: c</i> $\alpha =$	0,49	0,49
$\phi = \frac{1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{2} =$	1,140	1,089
$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} =$	0,566	0,593

Die Tabelle 3-1 zeigt anschaulich den Berechnungsablauf der beiden Modelle. Die Knicklänge des Federmodelles ist 5% größer und der zugehörige Abminderungsbeiwert ist 5% kleiner. Dieser Unterschied ist vernachlässigbar klein, die Annahme der Gabellagerung ist daher auf jeden Fall angemessen.

### 3.5.3 Ermittlung der Tragfähigkeit des Wellstegträgers /laut EC/

#### 3.5.3.1 Momententragfähigkeit

Die geometrischen Abmessungen des Ober- und Untergurtes der von Zeman & Co hergestellten Wellstegträger sind gleich, damit die Querschnittstragfähigkeit von den beiden Gurten übereinstimmt. Die Beanspruchung der Gurte aus Querbiegemoment kann bei Trägern mit wellförmig profilierten Stegblech vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 3.3.1.1). Somit ist die reduzierte Fließgrenze des Gurtes gleich:  $f_{yf,r} = f_{yf} = 355 \text{ N/mm}^2$ . Deswegen wird während der Bemessung zwangsläufig die Tragfähigkeit gegen Stabilitätsversagen des Gurtes maßgebend.

Wirksame Fläche des Druckflansches:

(Sinusprofiliertes Steg,  $k_\sigma = 0,43$  auf der sicheren Seite angenommen.)

$$\bar{b} = c = \frac{b - 0,5 * a_3}{2} = \frac{250 - 0,5 * 40}{2} = 115 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,8136$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{115/12}{28,4 * 0,813 * \sqrt{0,43}} = 0,63 < 0,748$$

$\rho = 1,0 \rightarrow$  Der Gurt ist voll wirksam.

Widerstand des Druckgurtes:  $\chi = 0,566$  /siehe Abschnitt 3.5.2/

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \frac{b_1 * t_1 * f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} * \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); \frac{b_1 * t_1 * \chi * f_{yf}}{\gamma_{M1}} * \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right\}$$

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{250 * 12 * 355}{1,0} * \left( 1000 + \frac{12 + 12}{2} \right); \\ \frac{250 * 12 * 0,566 * 355}{1,0} * \left( 1000 + \frac{12 + 12}{2} \right) \end{array} \right\} =$$

$$= 602800N * 1012mm = 610.000.000Nmm = 610,0kNm$$

### 3.5.3.2 Schubtragfähigkeit

a) Kritische Beulspannung für lokales Plattenbeulen:

$$\tau_{cr,l} = \left( 5,34 + \frac{a_3 * s}{h_w * t_w} \right) * \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2)} * \left( \frac{t_w}{s} \right)^2$$

$$= \left( 5,34 + \frac{40 * 89}{1000 * 2,5} \right) * \frac{\pi^2 * 210.000}{12 * (1 - 0,3^2)} * \left( \frac{2,5}{89} \right)^2 = 1012,4 \frac{N}{mm^2}$$

Bezogene Schlankheit:  $\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,l} * \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{355}{1012,4 * \sqrt{3}}} = 0,45$

Zugehöriger Abminderungsbeiwert:  $\chi_{c,l} = \frac{1,15}{0,9 + \bar{\lambda}_{c,l}} = \frac{1,15}{0,9 + 0,45} = 0,85$

b) Kritische Beulspannung für Knicken:

$$D_x = \frac{E * t^3}{12 * (1 - \nu^2)} * \frac{w}{s} = \frac{210.000 * 2,5^3}{12 * (1 - 0,3^2)} * \frac{155}{178} = 261.700Nmm = 26,17kNcm$$

$$D_y = \frac{E * I_z}{w} = \frac{210.000 * 77.700}{155} = 105.270.000Nmm = 10527kNcm$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w * h_w^2} * \sqrt[4]{D_x * D_y^3} = \frac{32,4}{0,25 * 100^2} * \sqrt[4]{26,17 * 10527,1^3} = 30,46 \frac{kN}{cm^2}$$

Somit die bezogene Schlankheit:  $\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g} * \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{35,5}{30,46 * \sqrt{3}}} = 0,82$

Der zugehörige Abminderungsbeiwert:  $\chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} = \frac{1,5}{0,5 + 0,82^2} = 1,27 \leq 1,0$

$$\chi_{c,g} = 1,0$$

Von den beiden ist der Abminderungsfaktor für lokales Plattenbeulen maßgebend. Somit ist die Schubtragfähigkeit:

$$\chi = \min(\chi_{c,l}, \chi_{c,g}) = 0,85$$

$$V_{bw,Rd} = \chi_c * \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} * \sqrt{3}} * h_w * t_w = 0,85 * \frac{355}{1,0 * \sqrt{3}} * 1000 * 2,5 = 435.500N = 435,5kN$$

### 3.5.4 Maßgebende Schnittgrößen des Rahmens

Die Schnittgrößen wurden anhand der Statiksoftware SCIA ermittelt, Annahme der maßgebenden Belastungskombinationen siehe Kapitel 2.

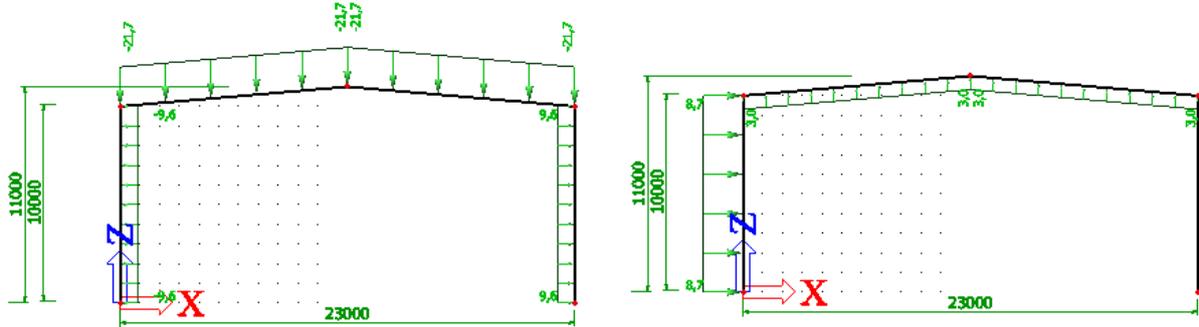


Abb. 3-9 Maßgebende Belastungskombinationen (Designlasten)  
links: Lastfallkombination Auflast; rechts: Lastfallkombination mit abhebenden Last

Infolge der maßgebenden Auflastkombination:

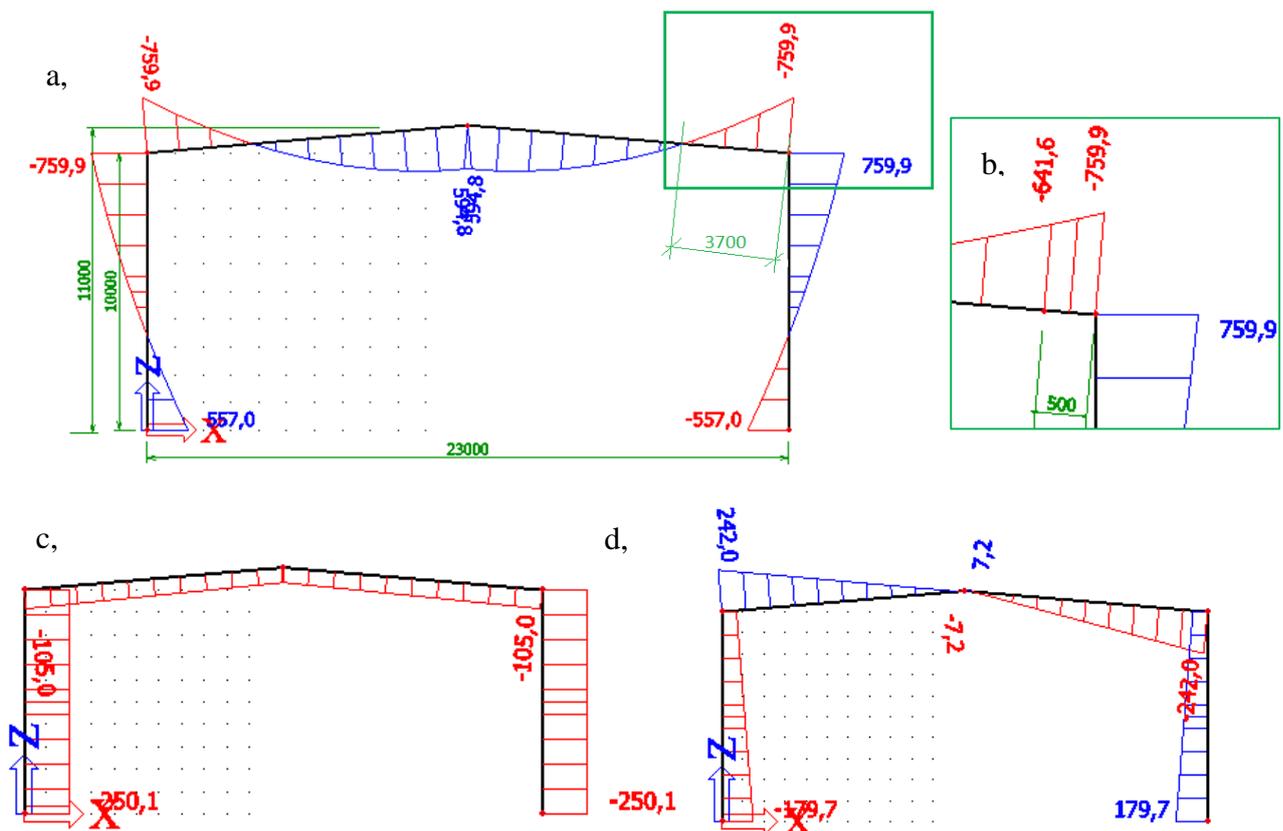


Abb. 3-10 Darstellung der Schnittgrößen infolge Auflast  
a, Biegemomente um die y Achse, b, Biegemomente der Rahmeneck, c, Normalkraft d, Querkräfte  $V_z$

Infolge der maßgebenden abhebenden Kombination:

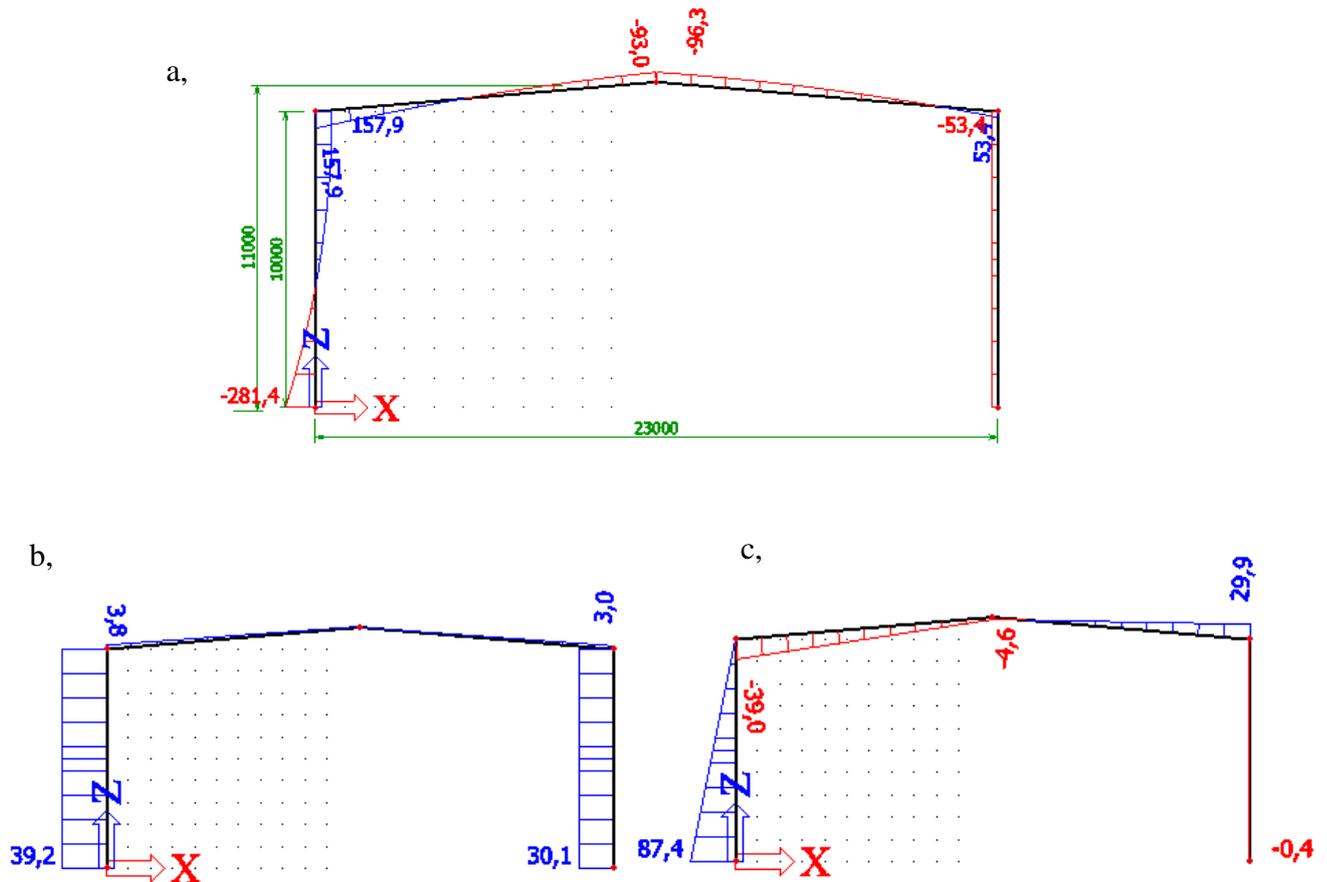


Abb. 3-11 Darstellung den Schnittgrößen infolge die maßgebende Abhebende LFK  
 a, Biegemomenten um die y Achse, b, Normalkraft c, Querkräfte  $V_z$

### 3.5.5 Tragfähigkeitsnachweis - gedrückter Untergurt

Es wird beim Nachweis angenommen, dass der Riegelobergurt von den Pfetten gegen Versagen auf Stabilität ausreichend gehalten ist.

#### 3.5.5.1 Rahmeneckbereich, unter maßgebender Auflast

Das für den Untergurt maßgebende Biegemoment tritt im Rahmeneckbereich infolge der maßgebenden Auflastkombination auf. Im SCIA wurde die Mittelachse der Stütze modelliert. Die Stütze ist zirka 1m breit, somit ist erst der von dem Rand einen halben Meter entfernte Wert ( $M_{Ed} = 641,6kNm$ ) zu berücksichtigen. (siehe Abb.3-10/b.) Der gedrückte Teil des Untergurtes ist 3,2m lang, damit wird die zugehörige Tragfähigkeit ermittelt:

## BDK Nachweis - Riegel

Tab. 3-2 Ermittlung des Abminderungsfaktors

$L_{cr} =$	3.200mm
$i_y =$	72mm
$\lambda_1 = \sqrt{\frac{235}{355}} * 93,9 =$	76,39
$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_y} * \frac{1}{\lambda_1} =$	0,58
Knickfigur: c $\alpha =$	0,49
$\phi = \frac{1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{2} =$	0,76
$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} =$	0,8

$$M_{y,Rd} = \frac{250 * 12 * 0,8 * 355}{1,0} * \left( 1000 + \frac{12 + 12}{2} \right) = 852.000N * 1012mm$$

$$= 862.200.000Nmm = 862,2kNm$$

Momententragfähigkeit:  $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{641,6kNm}{862,2kNm} = 0,74$

Querkrafttragfähigkeit:  $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{242kN}{435,5kN} = 0,56$  Beide Nachweise sind erfüllt

### 3.5.5.2 Riegelfeldbereich –Lastfallkombination mit Windsog

Von EN 1993-1-5 [7] ist nur der Tragfähigkeitsnachweis des Biegemomentes und der Querkraft vorgeschrieben.

Momententragfähigkeit:  $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{96,3kNm}{610,0kNm} = 0,16$

Querkrafttragfähigkeit:  $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{242kN}{435,5kN} = 0,56$  Beide Nachweise sind erfüllt.

Ein Nachweis der zentrischen Druckbeanspruchung des Riegels wird in der erwähnten EN Regelung nicht behandelt. Es muss aber ein Nachweis mit Überlagerung des zentrischen Druckes, und der aus Momentenbeanspruchung stammende Druck erfolgen. Somit ergibt sich in den zwei interessanten Bereichen:

1, Auflast, Rahmeneckbereich:

$$N_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{105kN}{2} + \frac{641,3kNm}{1,012m} = 686,2kN$$

$$N_{b,Rd} = \frac{b_1 * t_1 * \chi * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{250 * 12 * 0,8 * 355}{1,0} = 852.000N = 852kN$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{686,2kN}{852kN} = 0,81 < 1,0 \quad \text{Der Nachweis ist erfüllt.}$$

2, Windsog, Riegelfeldbereich

$$N_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{105kN}{2} + \frac{96,3kNm}{1,012m} = 147,7kN$$

$$N_{b,Rd} = \frac{b_1 * t_1 * \chi * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{250 * 12 * 0,566 * 355}{1,0} = 602.790 = 602,7kN$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{147,7kN}{602,7kN} = 0,25 < 1,0 \quad \text{Der Nachweis ist erfüllt.}$$

### 3.6 Ermittlung der Belastung des aussteifenden Systems

Die Ermittlung der Belastung des aussteifenden Systems erfolgt laut EN 1993-1-1/Abschnitt 5.3.3. Die Untergurte der Riegel sind in der Halle mithilfe der Flanschstreben einzeln ausgesteift. Die von der Aussteifung resultierenden Kräfte können gleich berechnet werden wie im Fall von einem Dachverband.

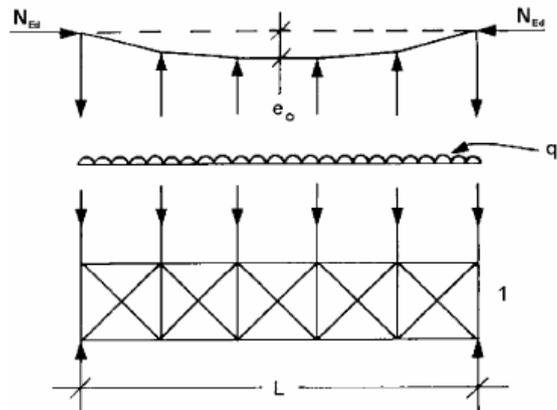


Abb. 3-12 Äquivalente stabilisierende Ersatzkräfte [6]

Äquivalente geometrische Ersatzimperfektionen in Form von Vorkrümmungen:

$$e_0 = \alpha_m * \frac{L}{500} = 1,0 * \frac{23}{500} = 0,046m = 46mm$$

die Spannweite des aussteifenden Systems:  $L = 23m$

Abminderungsfaktor: 
$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{1}\right)} = 1,0$$

Anzahl der aussteifenden Bauteile:  $m = 1$

Die Durchbiegung des aussteifenden Systems in seiner Ebene infolge  $q_d$  ist auf der sicheren Seite vereinfacht aufgenommen:

$$\delta_q = \frac{L}{2500} = \frac{23}{2500} = 0,0092m = 9,2mm$$

Randbereich:

Äquivalente Kraft pro Längeneinheit:

$$q_{ed} = N_{Ed} * 8 * \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} = 686,2 * 8 * \frac{0,0552}{23^2} = 0,58 \frac{kN}{m}$$

Die Flanschstreben befinden sich in dem Randbereich bei jeder zweiter Pfette auf dem Riegel, rechnerisch im Abstand 4,4m (auf der sicheren Seite angenommen). Somit ergibt sich die horizontale Kraft von den beiden symmetrisch angeordneten Streben zu:

$$2 * F_h = 4,4m * 0,58 \frac{kN}{m} = 2,6kN$$

$$F = \frac{F_h}{\sin 30^\circ} = \frac{1,6kN}{\sin 30^\circ} = 3,2kN$$

Mittelbereich:

Äquivalente Kraft pro Längeneinheit:

$$q_{ed} = N_{Ed} * 8 * \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} = 147,7 * 8 * \frac{0,0552}{23^2} = 0,12 \frac{kN}{m}$$

In dem Mittelbereich kommt der größte Abstand zwischen zwei Flanschstreben zu  $(4,4 + 6,62) * \frac{1}{2} = 5,51m$  vor. Somit muss von den Flanschstreben die folgende Kraft aufgenommen werden:

$$2 * F_h = \left( \frac{4,4}{2} + \frac{6,62}{2} \right) * 0,12 = 0,66kN$$

$$F = \frac{F_h}{\sin 30^\circ} = \frac{0,33kN}{\sin 30^\circ} = 0,66kN$$

In der folgenden Analyse wird die infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes aufnehmbare Belastung auf der sicheren Seite mit dem Wert 2,6 kN angenommen.

### 3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mithilfe der Ermittlung der tatsächlichen Ersatzfedersteifigkeit des Pfetten - Flanschstreben - Systems laut Berechnungsformel von Hannebauer wurde ein Stabilitätsnachweis des Riegelgurtes geführt. Sowohl die Knicklänge als auch die Abminderungsbeiwert  $\chi$  des Systems unterscheidet sich mit weniger als 5% von der Werten des Systems mit starren Lagerungen. Nach der Analyse kann festgestellt werden, dass die Annahme die beiderseitig symmetrisch angeordneten Flanschstreben mit festen Gabellagerung zu ersetzen (während der Stabilitätsnachweise der Riegeluntergurt) zwar auf der unsicheren Seite liegt, jedoch akzeptabel ist. Von der Verfasserin ist empfohlen die Bemessung mit der Annahme von maximal 90%-iger Ausnutzung zu führen. Der laut der Regelungen von EN 1993-1-5 [7]/ Anhang D geführte Tragfähigkeitsnachweis des Riegels ist erfüllt.

Mit dem Einsatz der Flanschstrebe bekommt jeder Riegel ein eigenes Stabilisierungssystem für seinen Riegeluntergurt. Somit ist die infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes aufgenommene Belastung der Flanschstrebe gering, sie beträgt 2,6 kN.

## 4 Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

---

### 4.1 Allgemein

Im vorliegenden Kapitel werden die Auswirkungen einerseits von den unterschiedlichen Ausbauevarianten der Flanschstreben und andererseits von der Steifigkeit des Untergrundes auf das statische Verhalten der Pfette untersucht. Dafür wurde das System im Statikprogramm als Stabmodell in zahlreichen Varianten modelliert.

Es wurden in diesem Kapitel zwei Analysen durchgeführt, um das geeignete Flanschstreben - System zu finden, und eine dritte, um ein vereinfachtes Ersatzmodell zu finden.

Die drei Untersuchungen sind die folgenden:

- › Analyse1: Es besteht die Möglichkeit die Flanschstreben doppelt, auf den beiden Seiten des Riegeles einzubauen, oder nur eine Strebe von einer Seite einzufügen. In Analyse1 werden die beiden Systeme mit der Annahme null und unendlich große Steifigkeit des Riegeluntergrundes untersucht. Damit kann festgestellt werden, welches Modell die maßgebende Schnittgrößenverläufe der Bauteile liefert. Weiters ist die am besten geeignete Anordnung der Flanschstreben gesucht.
- › Analyse2: Die zweite Analyse dient ebenso, das am besten passende System zu finden. In diesem Fall wird die Wirkung der mit verschiedenen Neigungen angeordneten Flanschstreben untersucht.
- › Analyse3: Das Ziel ist, eine vereinfachte Modellierungsmöglichkeit für die weiteren Berechnungen zu finden. Die Idee liegt nahe, die Flanschstreben durch steife oder nachgiebige Auflager zu ersetzen. Es werden während der dritten Analyse beide Annahmen untersucht und ausgewertet.

### 4.2 Geometrie, Querschnitte

Sowohl die Geometrie als auch die Querschnitte der Stabelemente sind laut vorgegebener Hallen - Statik angenommen (siehe Kapitel 2).

Geometrie:

- › Spannweite der Riegel:  $e = 8,4\text{m}$
- › Anzahl der Riegel: 8 Stück
- › Pfettenabstand: 2,25m
- › Höhe des Wellstegträgerprofils:  $h = 1024\text{m}$
- › Breite der Aussteifung  $a = 0,8\text{m}$
- › Neigung des Flanschstrebens:  $\alpha = 30^\circ$

Querschnittsprofile:

- › Riegel: Wellstegträger WTB 1000-250-12 S235
- › Pfetten: Sab Z 300/3 (Sabprofil) S355
- › Flanschstreben: L 40/40/4 S235

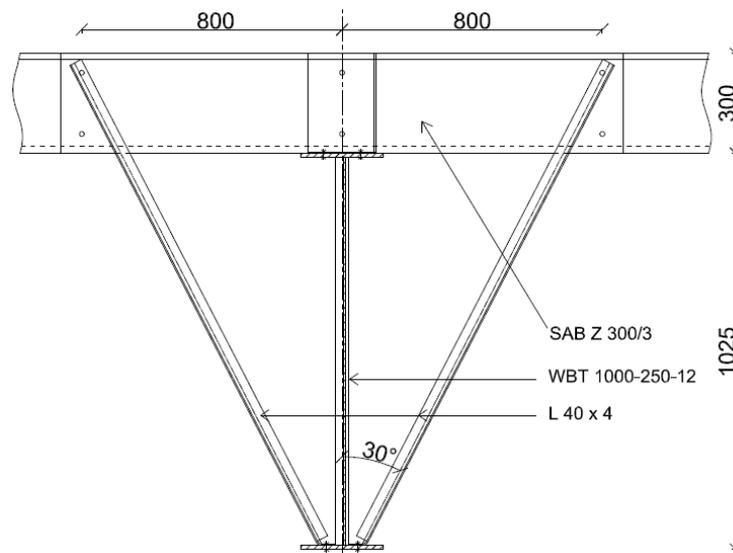


Abb. 4-1 Darstellung eines Flanschstrebe – Pfetten Systems der Musterhalle

### 4.3 Belastungen

Tab. 4-1 Charakteristische Belastungen der Pfetten

Charakteristische Belastung der Pfetten				
Lastart	Bezeichnung	Belastung		Anm.
EG	Pfettenabstand:	2,22	m	
	Eg_Sandwichp.	0,26	kN/m	
	Eg_Pfette	0,11	kN/m	
	Eg_Installation	0,56	kN/m	
	$\Sigma$	0,92	kN/m	
Veränderliche	Schnee_voll	2,46	kN/m	
	Windsog	-1,27	kN/m	Exkl.
	Winddruck	0,71	kN/m	
		$\Sigma$	1,91	kN/m

Die Belastungen der Pfetten wurden in Kapitel 2 ermittelt. Zusätzlich wird die von der Stabilisierung des Riegeluntergurtes stammende Einzellast (ermittelt in Kapitel 3.6) auch berücksichtigt. Grundsätzlich sind drei Belastungssituationen von Bedeutung:

- › **Belastungssituation 1:** „Belastung mit konstanter Auflast“  
Die Belastung ist mit der maßgebenden Auflast laut Kapitel 2 angenommen, dabei sind Installationslasten als Gleichlast angenommen. Schnee und Winddruck sind berücksichtigt, wobei Schnee als führende Last wirkt. Die Stabilisierung des Riegeluntergurtes ist durch eine horizontale Einzelkraft auf die Flanschstrebe berücksichtigt, somit ergibt sich:  
 ULS:  $q_d = 5,6 \text{ kN/m}$      $Q_d = 2,6 \text{ kN}$   
 SLS:  $q_d = 3,8 \text{ kN/m}$      $Q_d = 1,9 \text{ kN}$
- › **Belastungssituation 2:** „Realitätsnahe feldweise Belastung“  
Es ist eine interessante Frage, wie sich das System unter feldweiser Belastung verhält. Bei einer leichten Dachkonstruktion – wie sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird - kann sich infolge der Nutzlast keine wirklich feldweise Belastung entwickeln, denn die Dächer sind nicht begehbar.

Angenommen ist eine realitätsnahe Situation, wo die Schneelast nur auf dem letzten Feld wirkt. Diese Lastanordnung modelliert den Fall, wenn der Schnee im letzten Feld der Pfette noch nicht weggeräumt ist. Horizontale Einzelkraftbelastung auf die Flanschstrebe infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes ist berücksichtigt, somit ergibt sich:

ULS:

$$q_{d,1} = (g_{\text{Sandw.p.}} + g_{\text{Pfette}} + g_{\text{inst.}}) * 1,35 + w * 1,5 * 0,6 =$$

$$= (0,26 + 0,11 + 0,56) * 1,35 + 0,71 * 1,5 * 0,6 = 1,89 \text{ kN/m}$$

$$q_{d,2} = (g_{\text{Sandw.p.}} + g_{\text{Pfette}} + g_{\text{inst.}}) * 1,35 + w * 1,5 * 0,6 + sch * 1,5$$

$$= (0,26 + 0,11 + 0,56) * 1,35 + 0,71 * 1,5 * 0,6 + 2,46 * 1,5 = 5,6 \text{ kN/m}$$

$$Q_d = 2,6 \text{ kN}$$

SLS:

$$q_{d,1} = (g_{\text{Sandw.p.}} + g_{\text{Pfette}} + g_{\text{inst.}}) * 1,0 + w * 0,6 =$$

$$= (0,26 + 0,11 + 0,56) * 1,0 + 0,71 * 0,6 = 1,4 \text{ kN/m}$$

$$q_{d,2} = (g_{\text{Sandw.p.}} + g_{\text{Pfette}} + g_{\text{inst.}}) * 1,0 + w * 0,6 + sch * 1,0 =$$

$$= (0,26 + 0,11 + 0,56) * 1,0 + 0,71 * 0,6 + 2,5 * 1,0 = 3,8 \text{ kN/m}$$

$$Q_d = 1,9 \text{ kN}$$

› Belastungssituation 3: „Abhebende Belastung – Windsog“

Die abhebende Belastung auf die Pfetten infolge Windsog. Die Größe der Belastungen wurden im Kapitel 2 bzw. Kapitel 3 ermittelt. Horizontale Belastung durch eine Einzellast auf die Flanschstrebe infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes ist berücksichtigt, somit ergibt sich:

ULS:  $q_d = 0,98 \text{ kN/m}$   $Q_d = 2,6 \text{ kN}$

SLS:  $q_d = 0,34 \text{ kN/m}$   $Q_d = 1,9 \text{ kN}$

#### 4.4 Beschreibung Modellaufbau

Das Pfetten – Flanschstrebe – Riegeluntergurt System wird als Stabmodell aufgebaut. In jedem Stabmodell sind modelliert:

- › die Pfetten als durchlaufende Mehrfeldträger mit gelenkigen Auflagerungen auf den Riegeln,
- › die Flanschstreben als beideseitig gelenkig gelagerte Stäbe (=Pendelstäbe),
- › der Riegelobergurt mit einer in vertikaler als auch in horizontaler Richtung starren Auflagerung,
- › der Riegeluntergurt als vertikal starrer, in horizontaler Richtung sowohl mit starrer, als auch mit als nachgiebige Auflagerung modelliert.

Die oberen Auflager simulieren den Riegelobergurt im Modell, die darunter liegenden stellen den Riegeluntergurt dar. (Auf den unteren Auflagern sind im Modell ausschließlich die Flanschstreben gelagert.) Solange der Riegeluntergurt nicht ausknickt, ist die Horizontalverschiebung des Riegelobergurtes und des Riegeluntergurtes gleich. Der Schnittgrößenverlauf des Modells wird im ersten Teil mit horizontal starrem, im zweiten Teil mit horizontal verschieblichem Riegeluntergurt modelliert. Somit können die beiden Annahmen verglichen werden, und entschieden werden, welche die maßgebenden Schnittgrößen der einzelnen Bauteile sind.

Die Schnittgrößenverläufe der Träger sind symmetrisch, deswegen sind die Schnittgrößen bei jeder Analyse nur für die halben Träger dargestellt. Die Ergebnisse des Mittelbereiches können als verallgemeinerte Werte eines unendlich langen Trägers gesehen werden.

ANM. Es gibt keine ausgesteifte Pfette in dem Rahmeneckbereich des Riegels, wo der Riegeluntergurt gedrückt ist und somit der Riegeluntergurt stabilitätsgefährdet ist. Es wird aber ein solchen Fall untersucht.

## 4.5 Analyse 1

Ziel der Analyse ist die Auswirkung der verschiedenen Anordnungen der Flanschstreben auf die Pfetten zu untersuchen und somit die optimale Gestaltung zu finden.

Die drei untersuchten Aufbauvarianten (siehe auch Abbildung 4-2):

- Fall A: Keine Flanschstrebe
- Fall B: Flanschstrebe einseitig
- Fall C: Flanschstreben beidseitig (symmetrisch)

	Stematische Darstellung	Modell im SCIA
Modell 1/A: ohne Flanschstreben		
Modell 1/B: mit einer Flanschstrebe		
Modell 1/C: symmetrisch mit zwei Flanschstreben		

Abb. 4-2 Die drei Modelle der Analyse 1, und deren Aufbau als Stabmodell

### Geometrie, Querschnitten

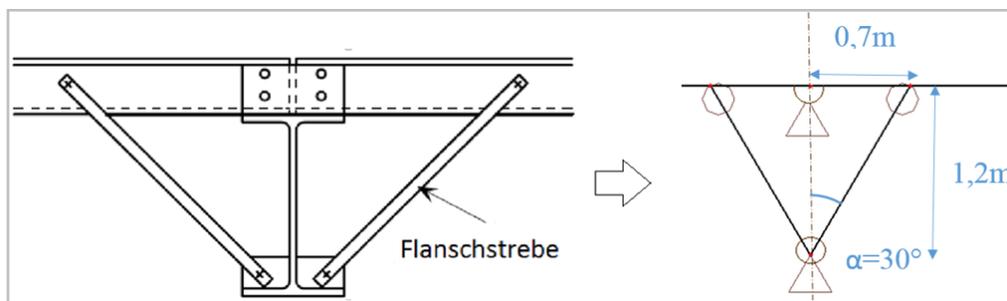
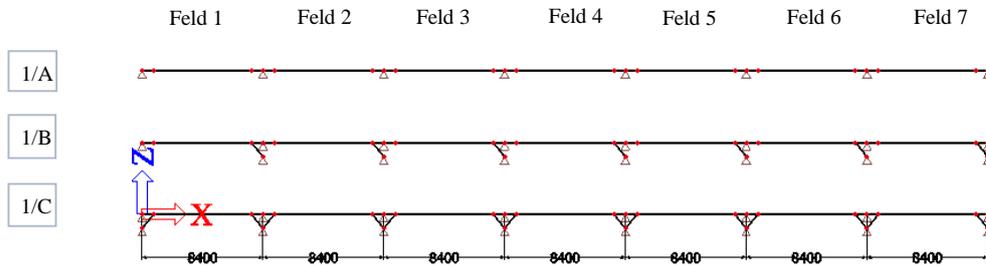


Abb. 4-3 Angenommene Geometrie der Musterhalle im Stabmodell

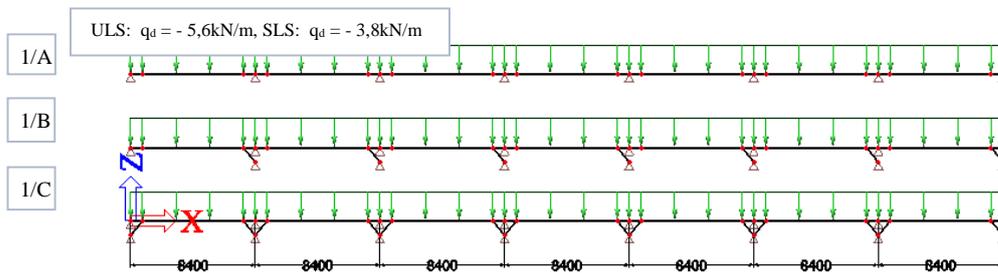
4.5.1 Ermittlung der Schnittgrößen der untersuchten Systeme von Analyse 1

4.5.1.1 Statische System: Riegeuntergurt horizontal starr

Modellierung des Riegeluntergurtes mit horizontal starren Auflagern

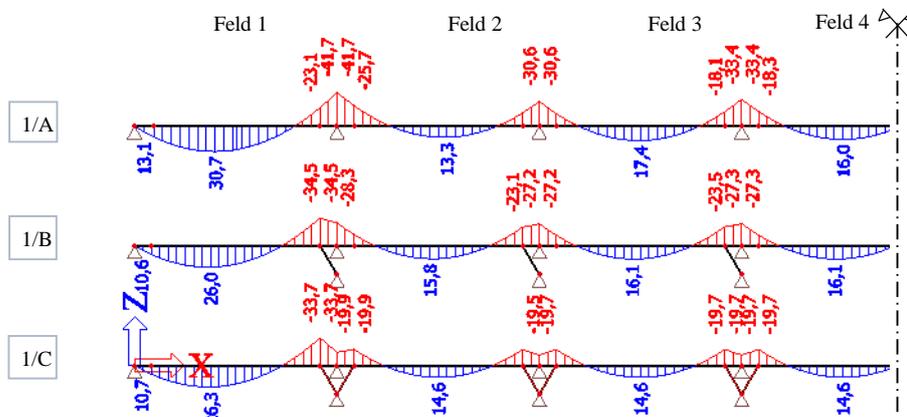


**Belastungen Fall1:** Belasung: Gleichlast- Auflast

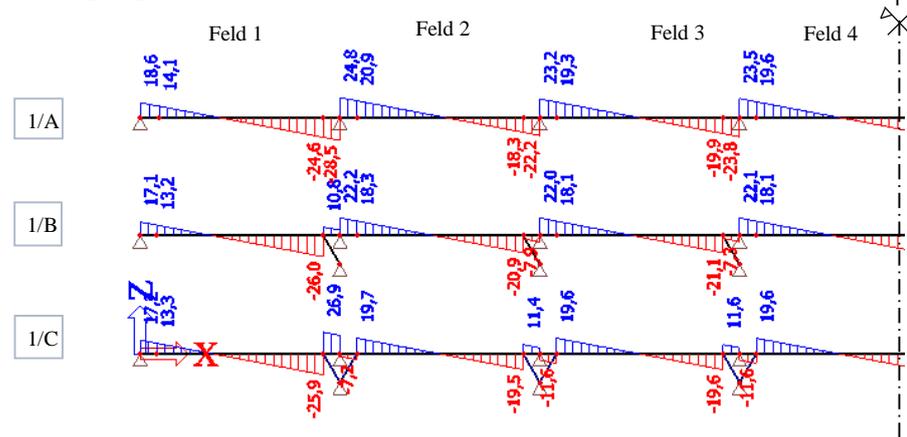


Schnittgrößen für einen Rand (Feld 1, 2) und für den Mittelbereich (Feld 3, 4)

Moment  $M_y$  [kNm]:

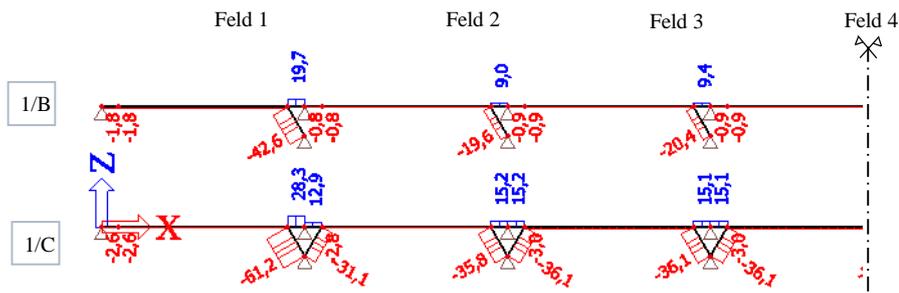


Querkraft  $V_z$  [kN]



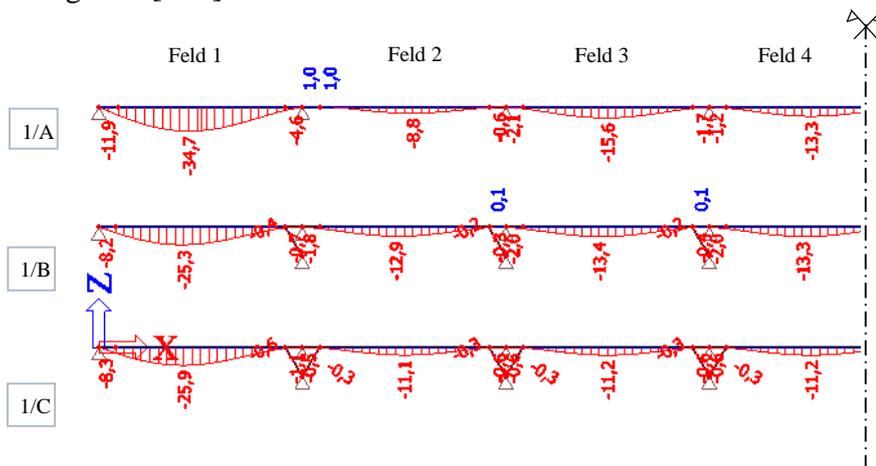
# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

Normalkraft N [kN]:

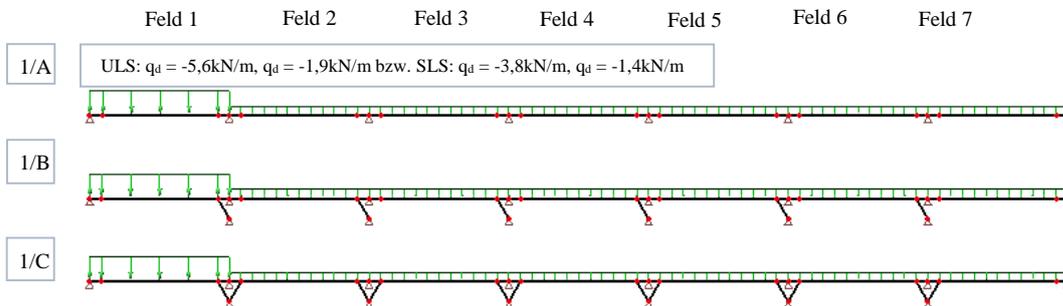


Durchbiegungen- Stabverformungen:

Stabverformungen  $u_z$  [mm]:

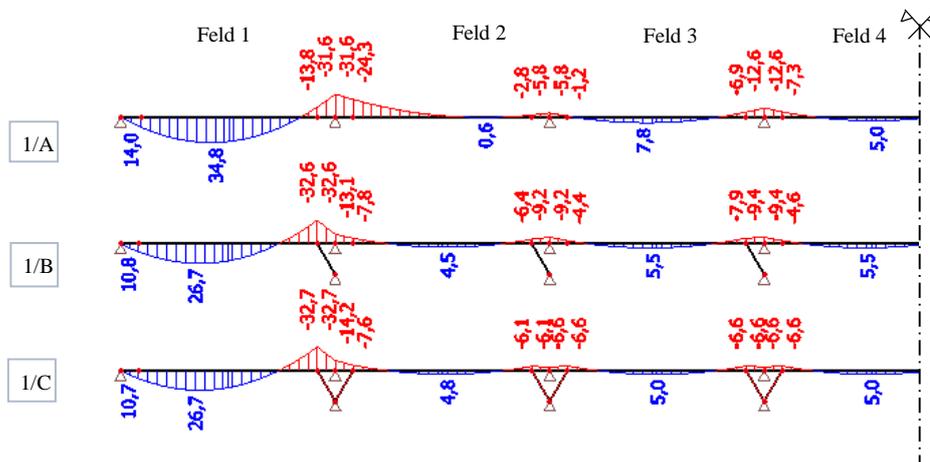


Belastung Fall2: Belastung: Feldweise angeordnete Installationslasten.



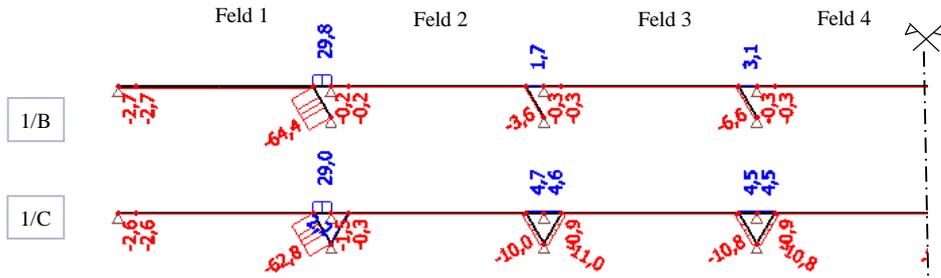
Schnittgrößen für einen Rand (Feld 1,2) und für den Mittelbereich (Feld 3,4)

Moment:  $M_y$  [kNm]:

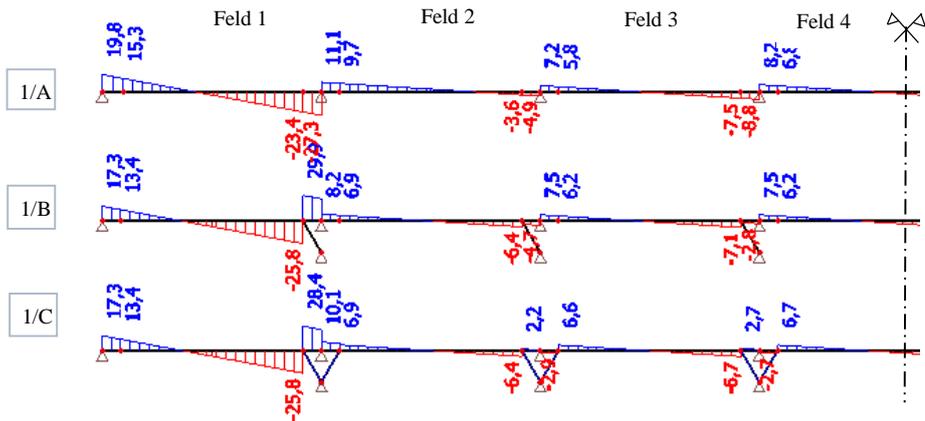


# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

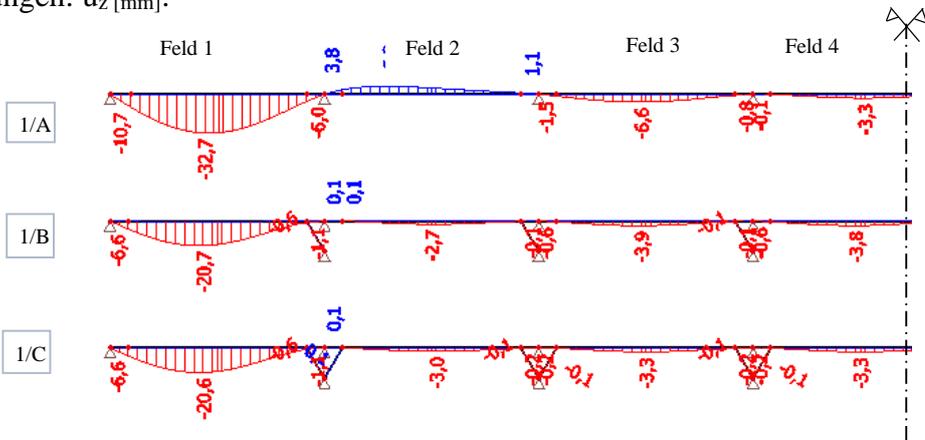
Normalkraft: N [kN]:



Querkraft: Vz [kN]:

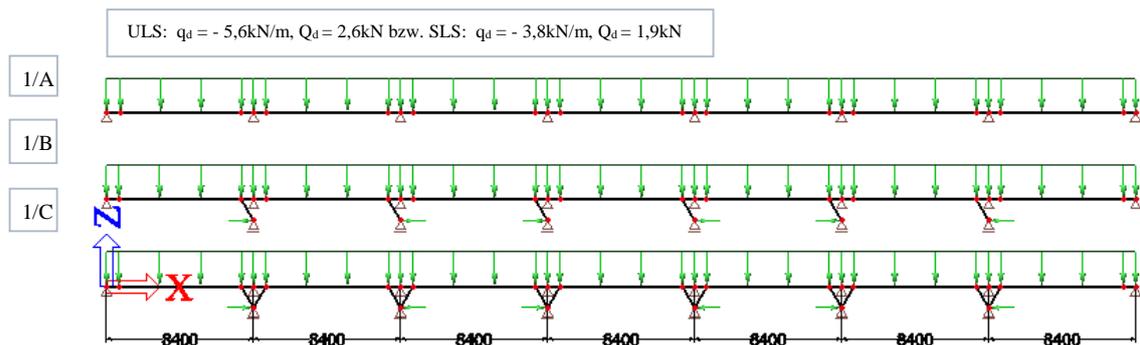


Verformungen:  $u_z$  [mm]:



## 4.5.1.2 Statische System: Riegeluntergurt horizontal verschieblich

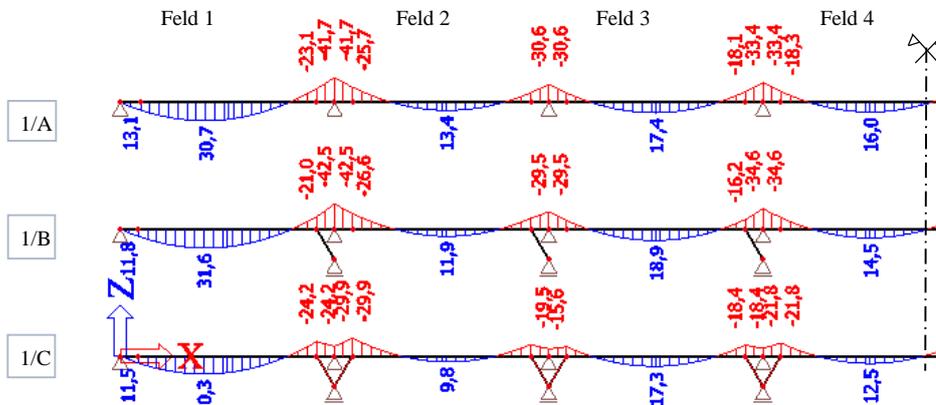
**Belastungen Fall1:** Belasung: Gleichlast- Auflast



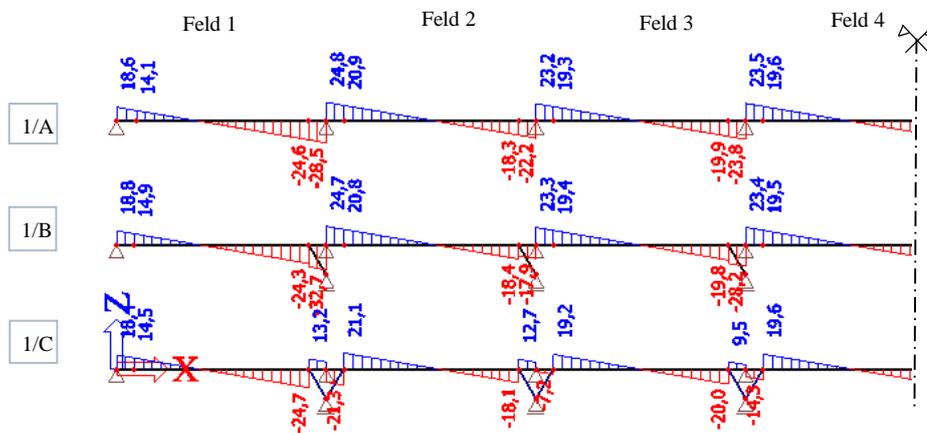
# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

Schnittgrößen für einen Rand (Feld1, 2) und für den Mittelbereich (Feld3, 4) dargestellt

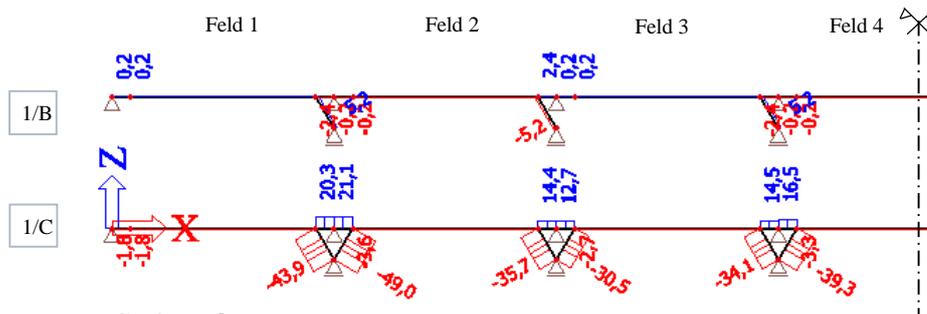
Moment  $M_y$  [kNm]:



Querkraft  $V_z$  [kN]

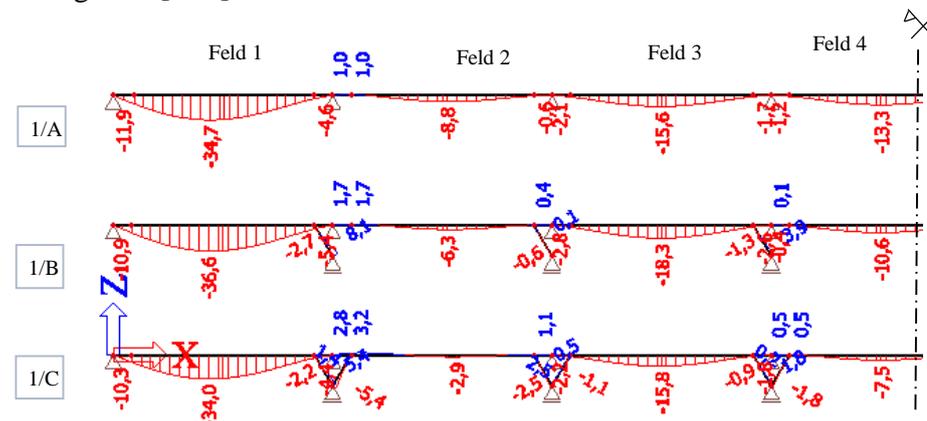


Normalkraft  $N$  [kN]:

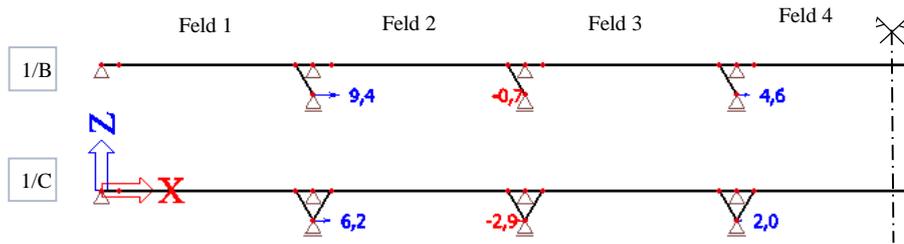


Durchbiegungen- Stabverformungen:

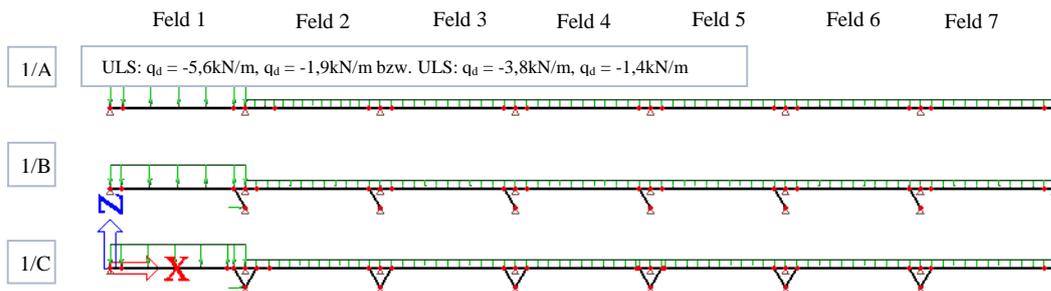
Stabverformungen  $u_z$  [mm]:



Verschiebung Untergurt  $u_x$  [mm]:

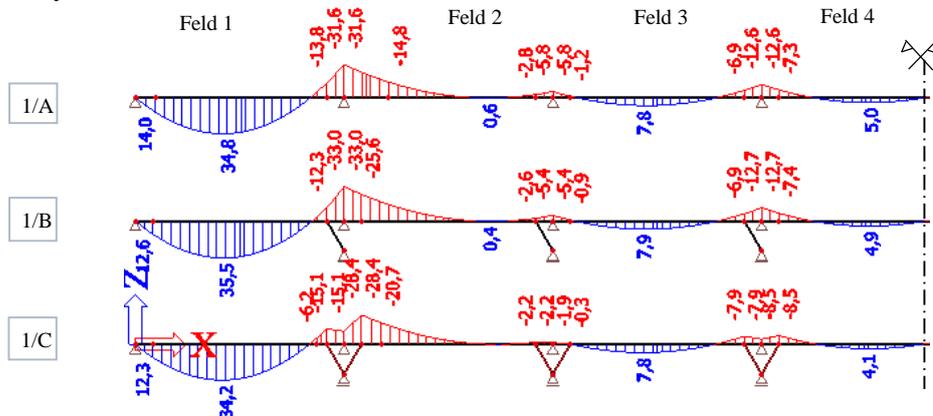


**Belastung Fall2:** Belastung: Feldweise angeordnete Installationslasten.

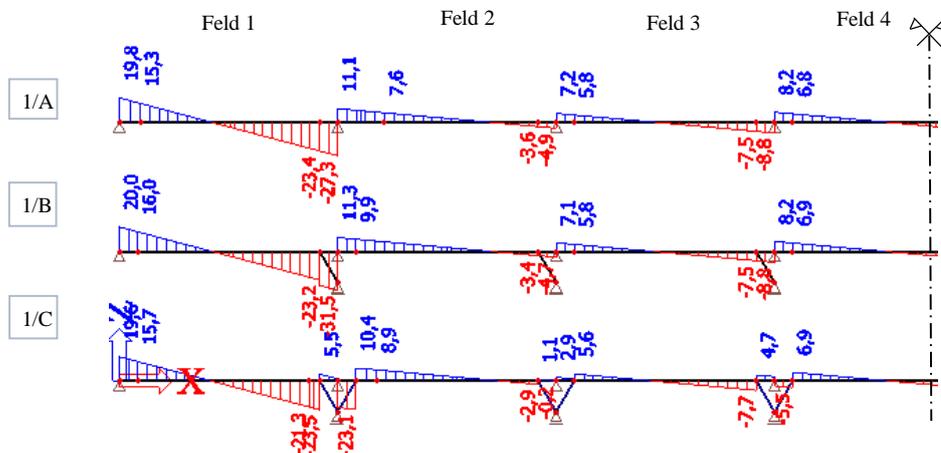


Schnittgrößen für einen Rand (Feld1,2) und für den Mittelbereich (Feld3, 4) dargestellt

Moment  $M_y$  [kNm]:

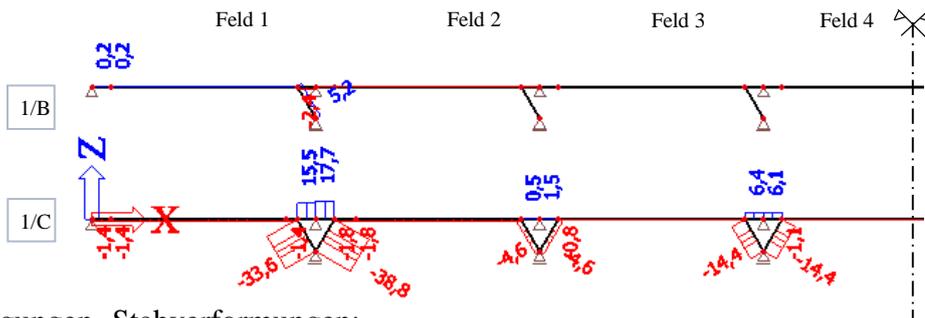


Querkraft  $V_z$  [kN]



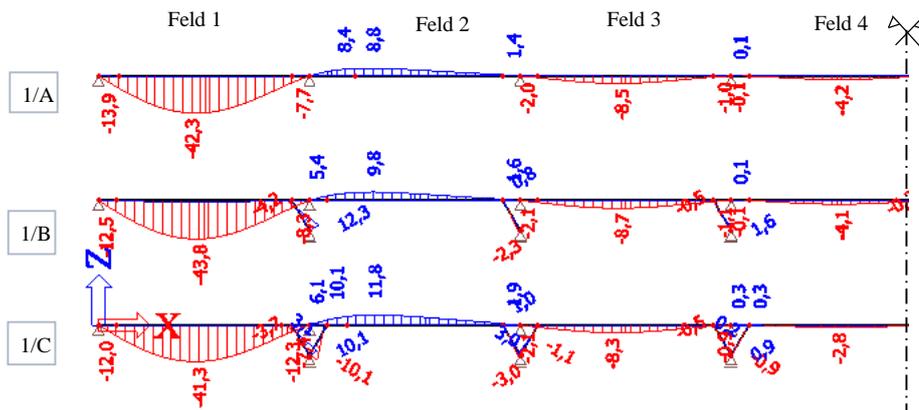
# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

Normalkraft N [kN]:

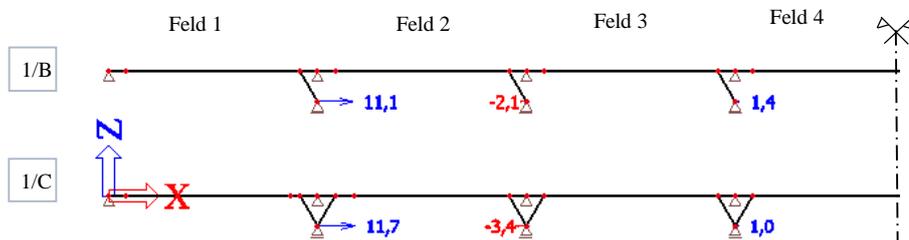


Durchbiegungen- Stabverformungen:

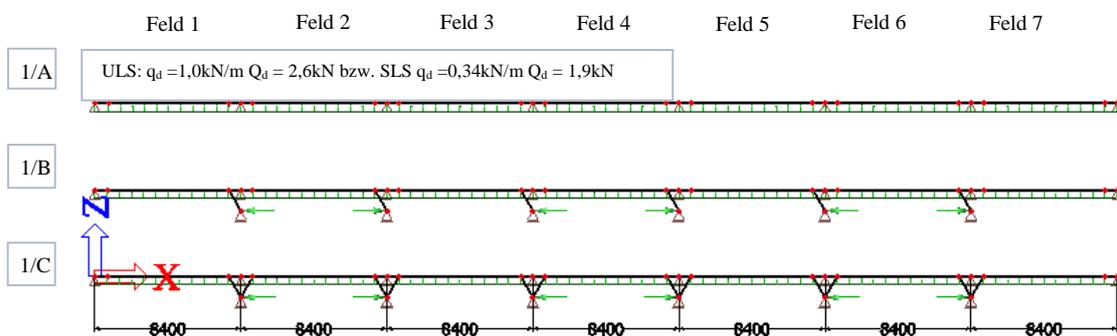
Stabverformungen  $u_z$  [mm]:



Verschiebung Untergurt  $u_x$  [mm]:



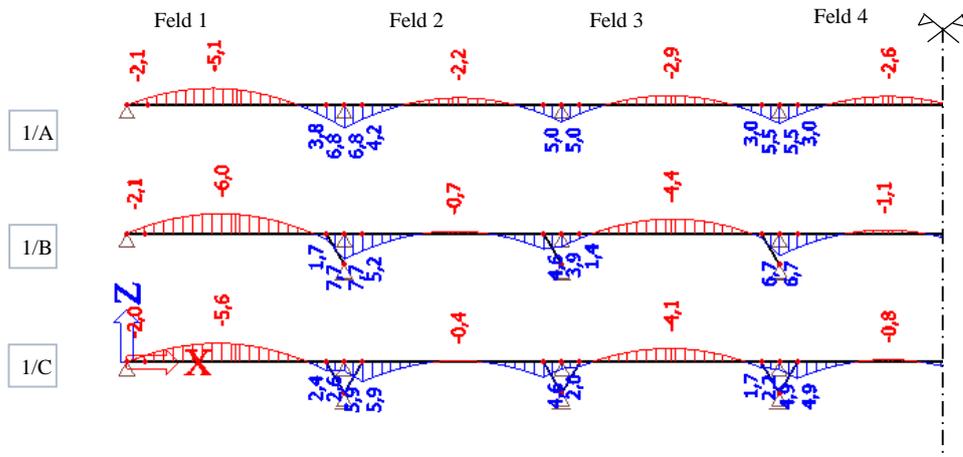
Belastungsfall 3: Windsog



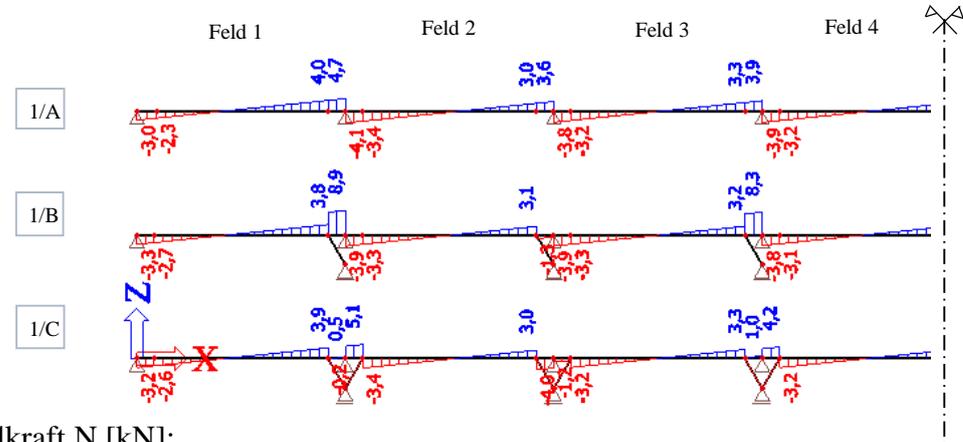
# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

Schnittgrößen für einen Rand (Feld1,2) und für den Mittelbereich (Feld3, 4) dargestellt

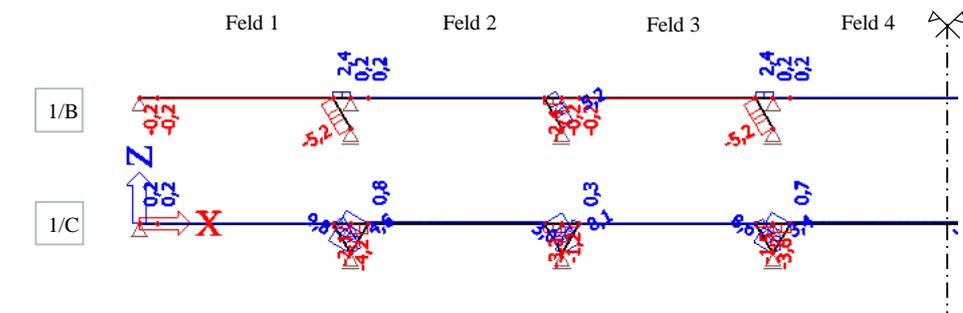
Moment  $M_y$  [kNm]:



Querkraft  $V_z$  [kN]

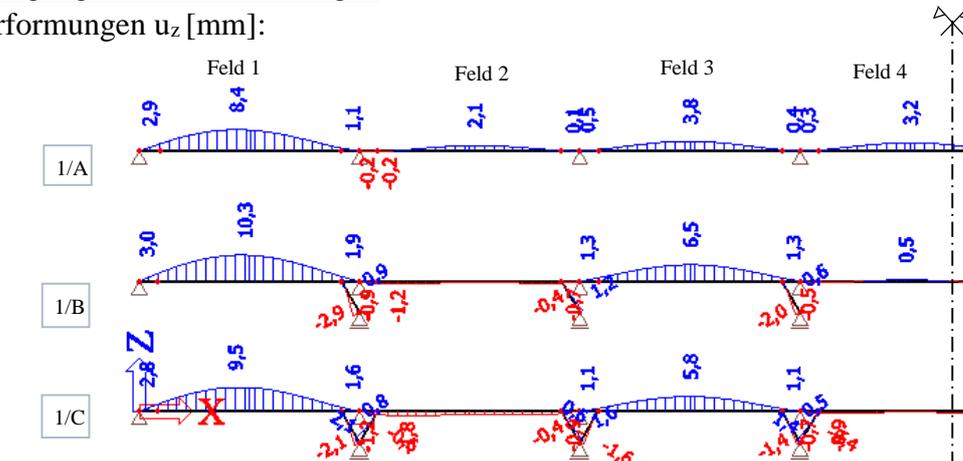


Normalkraft  $N$  [kN]:

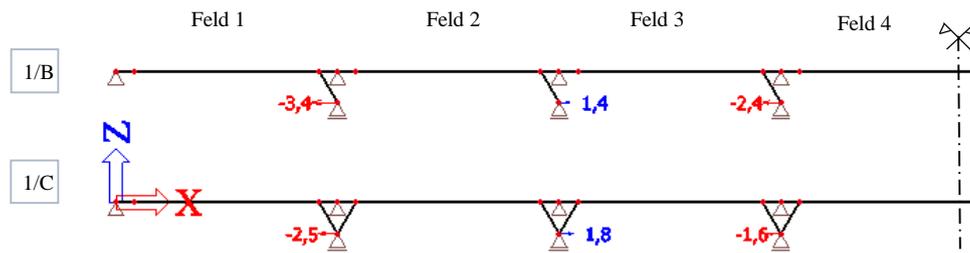


Durchbiegungen- Stabverformungen:

Stabverformungen  $u_z$  [mm]:



Verschiebung Untergurt  $u_x$  [mm]:



#### 4.5.2 Folgerung aus Analyse 1

Um den Schnittgrößenverlauf der Bauelemente darzustellen wurde das Flanschstreben – Auflager sowohl horizontal frei als auch horizontal unverschieblich modelliert angenommen. Nach Vergleich der Ergebnisse der beiden Systeme wurde festgestellt, dass sich die maßgebende Normalkraft Belastung der Flanschstreben mit der starren Lagerung ergibt, wenn der maßgebende Momentenverlauf der Pfette mit der Annahme der nachgiebigen Lagerung des Riegeluntergurtes berechnet wird. Somit werden diese Werte für den prozentuellen Vergleich der Schnittgrößen und Durchbiegungswerte der Pfette (Tab.4-2.) vom verschieblichen Untergurtmodell gewählt.

Tab. 4-2: Vergleich den Querschnittsgrößen bzw. Durchbiegung der Pfette bei den Verschiedenen Anordnungen der Flanschstreben

	Belastungsfall 1: Gleichlast				Belastungsfall 2: Feldweise, am Rand Schnee			
	$M_{St}$	$M_{Feld}$	V	$u_z$	$M_{St}$	$M_{Feld}$	V	$u_z$
1/A:	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1/B:	102%	103%	115%	105%	105%	102%	101%	104%
1/C:	72%	99%	101%	98%	89%	98%	99%	98%

In Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse der Analyse 1 prozentual angezeigt. Als Ausgangswert werden die Werte von Modell 1/A angenommen. Die bei Modell B und C dargestellten Prozentzahlen zeigen, wie sich die Schnittgrößen bzw. Durchbiegungswerte von Modell B und C gegenüber den Werten von Modell A prozentual verändert haben. Die Tabelle ist anhand der Werte von Querkraft, Biegemoment und der Durchbiegungen in globaler Z - Richtung dargestellt, die von der Randbereichen der Pfette entnommen sind, denn diese sind die maßgebenden Schnittgrößenwerte der Pfetten. Laut Tabelle 4-2 kann in diesem Vergleich festgestellt werden, dass die von einer Seite eingebaute Flanschstrebe (System B), wie es erwartet wurde, keine günstige Lösung ist. Sowohl die Schnittgrößen als auch die Durchbiegungen der Pfette unter beiden Belastungsfällen werden größer. Bei Modell „1/C“ vermindern sich die Stützmente um 11%, die weiteren Werte zeigen keine großen Unterschiede.

Die Flanschstreben dienen als zusätzliche Federauflagerungen der Pfette und leiten die Kraft von der Pfette bis zum Riegeluntergurt weiter, und umgekehrt. Die Flanschstreben sind aber schief angeordnet, folglich verursachen sie Normalbelastungen in der Pfette. Im Feldbereich der Pfette entsteht eine Druckbeanspruchung, im Stützenbereich Zug.

Bei einseitig angeordneten Flanschstreben muss die ganze horizontale Komponente der von der Pfette kommenden Kraft in der Flanschstrebe vom Riegeluntergurt aufgenommen werden. Folglich sollte bei solchen Fällen immer nachgewiesen werden, ob der horizontale Anteil der Normalkraft kein Biegedrillknicken des Riegeluntergurt verursacht.

## 4.6 Analyse 2

In der Analyse sind in den drei Modellen die Neigungen der Flanschstreben mit verschiedener Größen angenommen. In diesem Abschnitt wird die Wirkung von unterschiedlichen Stabneigungen auf die Pfette untersucht.

### 4.6.1 Modellbeschreibung

Das Flanschstreben - Pfetten - Riegel - Modell ist gleich wie bei Analyse 1 als Stabmodell aufgebaut. Den Unterschied liegt in der Ausführung der verschiedenen Neigungen der Flanschstreben. In den drei Modellen sind die Flanschstreben mit einem Winkel von  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $60^\circ$  zur Vertikalen angenommen. (Es ist im Folgenden als Neigung der Flanschstrebe bezeichnet.)

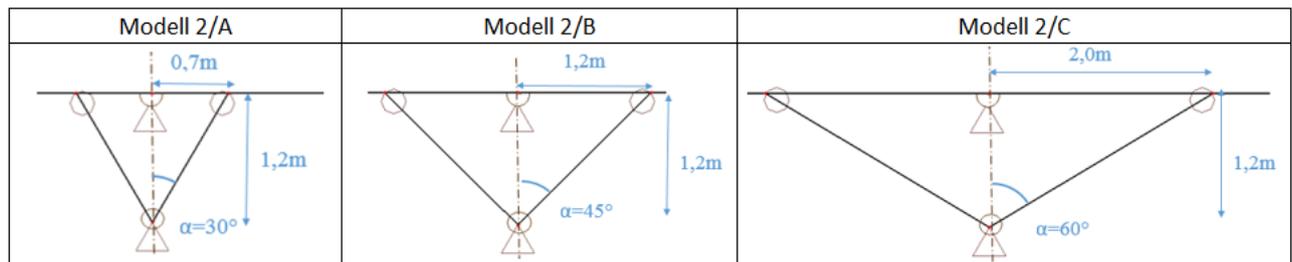
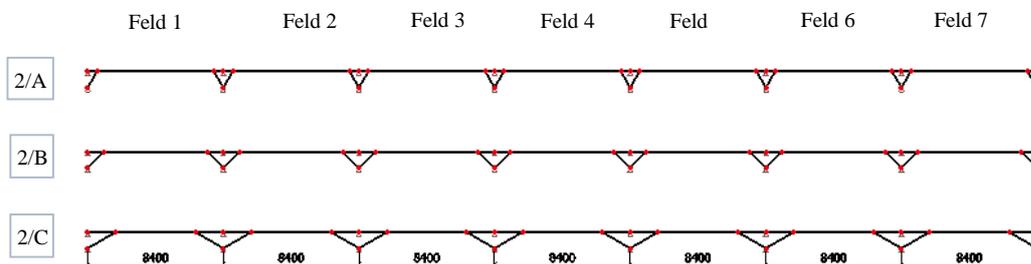


Abb. 4-4 Die drei untersuchte Gestaltungsvarianten in der Analyse 2

### 4.6.2 Ermittlung der Schnittgrößen der untersuchte Systeme von Analyse 2

Die Modelle werden mit einer verschieblichen Untergurtlagerung dargestellt, die wodurch man die maßgebende Schnittgrößen, bzw. Verformungen der Pfette erhält.

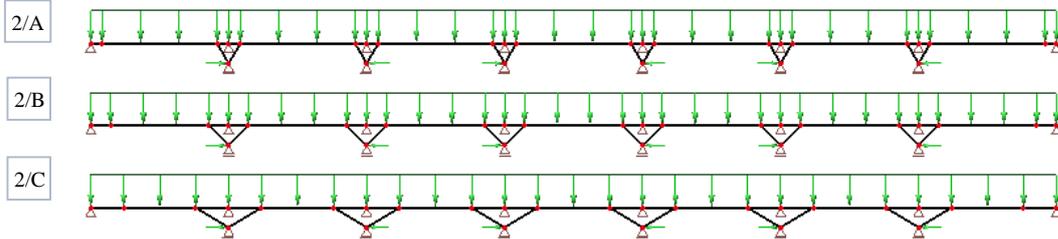
#### Statisches System



# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

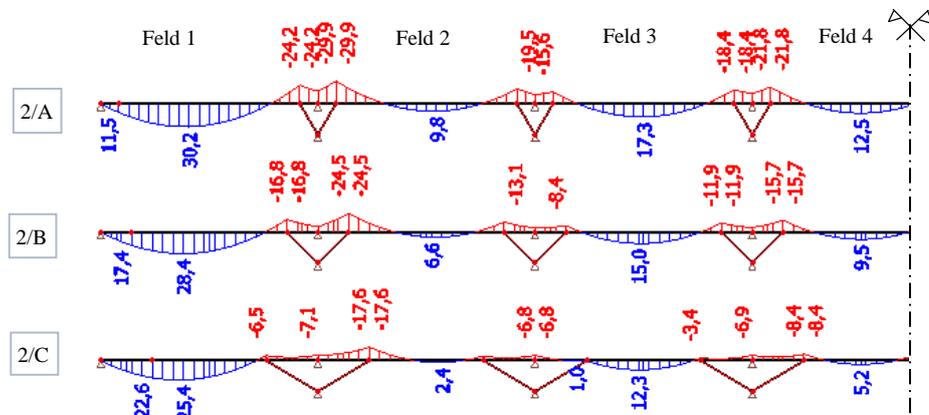
## Belastungen:

ULS:  $q_d = 5,6 \text{ kN/m}$ ,  $Q_d = 2,6 \text{ kN}$  bzw. SLS:  $q_d = 3,8 \text{ kN/m}$ ,  $Q_d = 1,9 \text{ kN}$

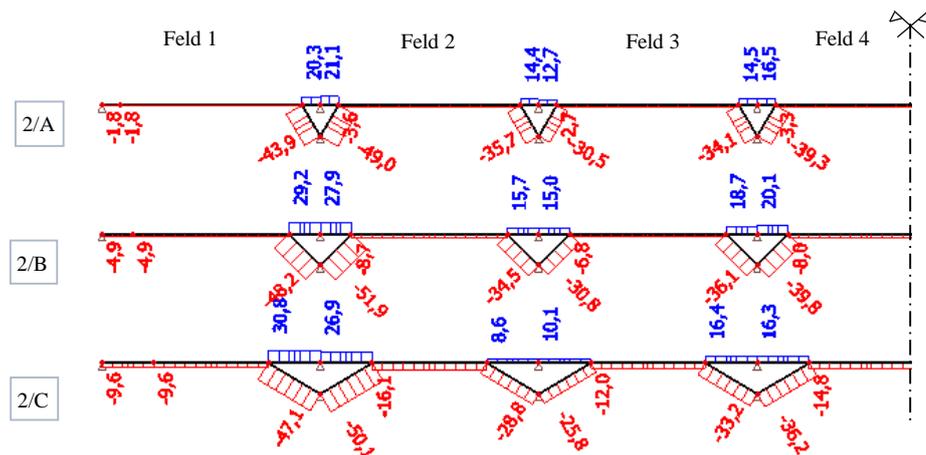


## Schnittgrößen für die mittleren drei Felder (Feld 3, 4, und 5):

Moment  $M_y$  [kNm]:

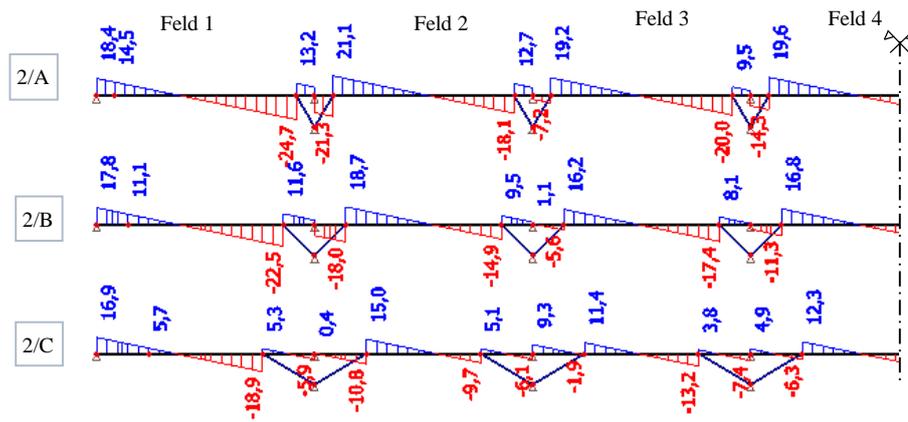


Normalkraft  $N$  [kN]:

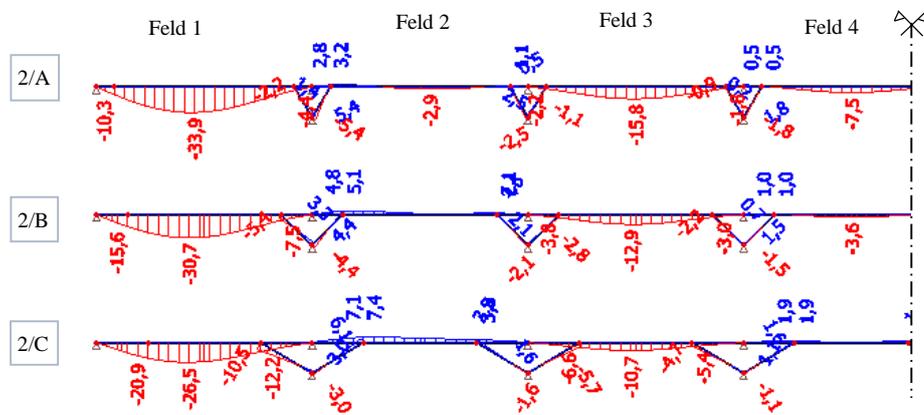


# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

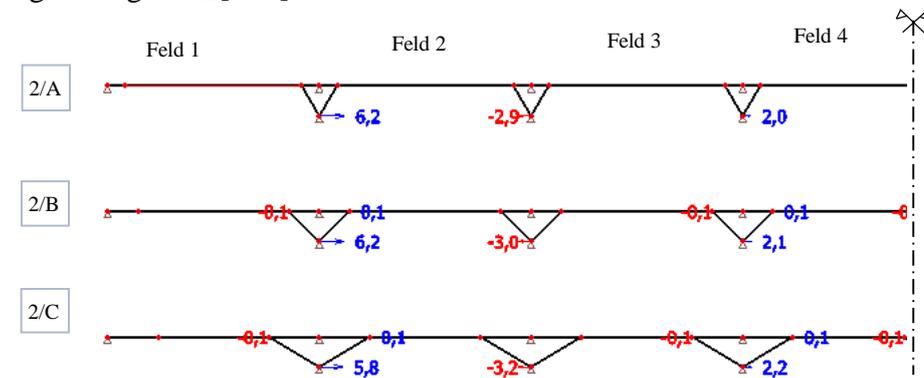
Querkraft Vz [kN]:



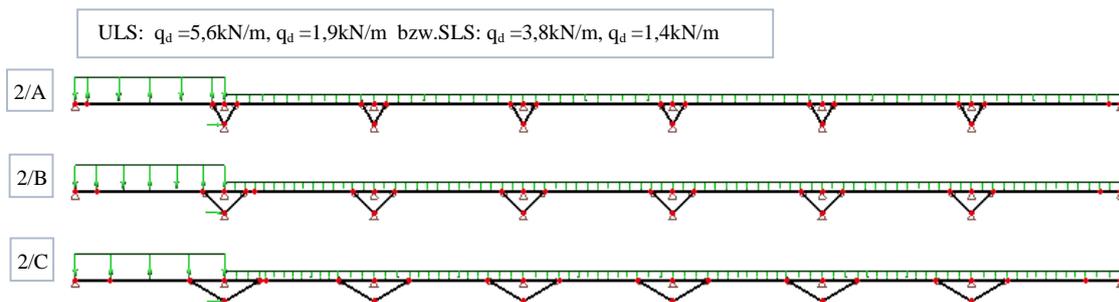
Stabverformungen  $u_z$  [mm]:



Verschiebung Untergurt  $u_x$  [mm]:



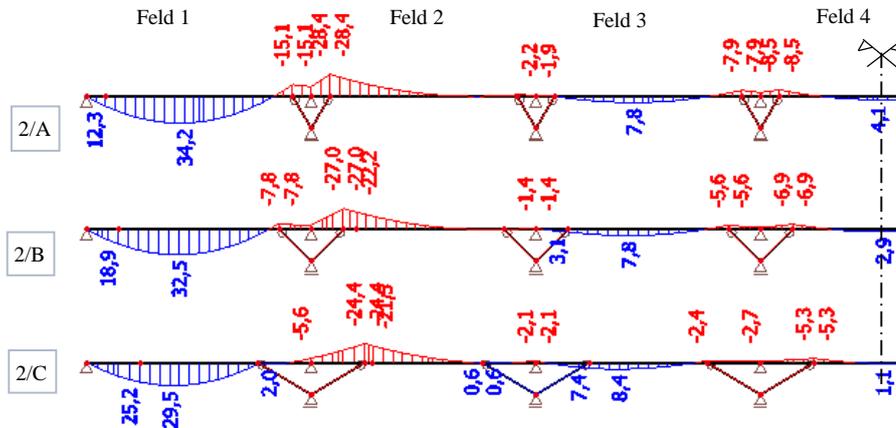
Verschieblich + Feldweise Belastung:



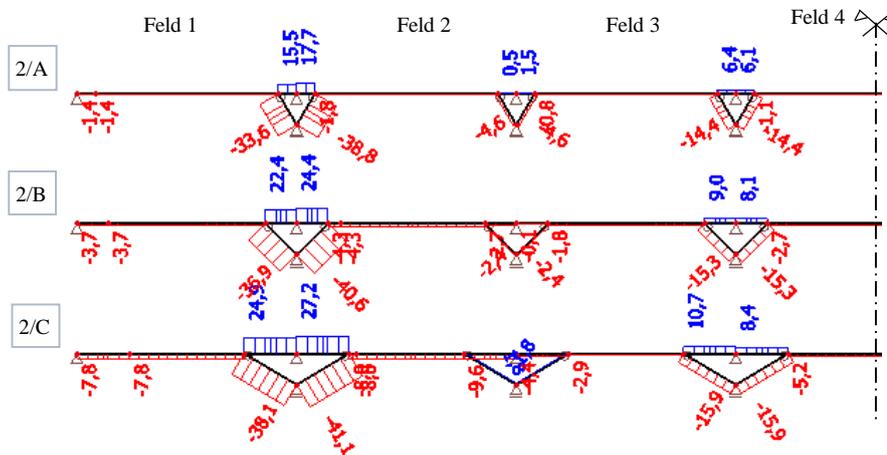
# Analyse Pfetten - Flanschstreben - Riegeluntergurt - Gesamtsystem

Schnittgrößen für die mittleren drei Felder (Feld3 , 4, und 5):

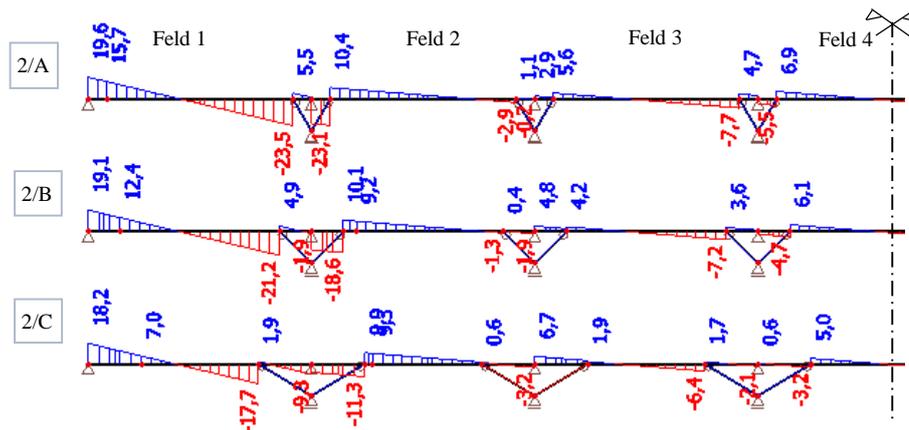
Momenten  $M_y$  [kNm]:



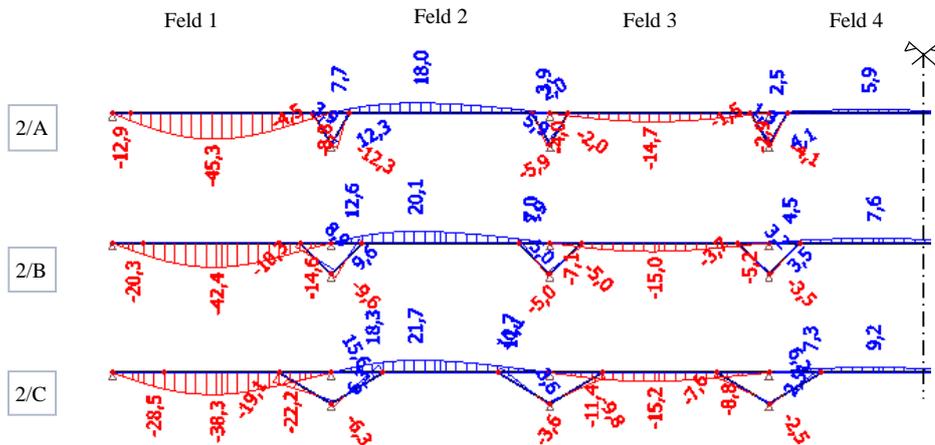
Normalkraft  $N$  [kN]:



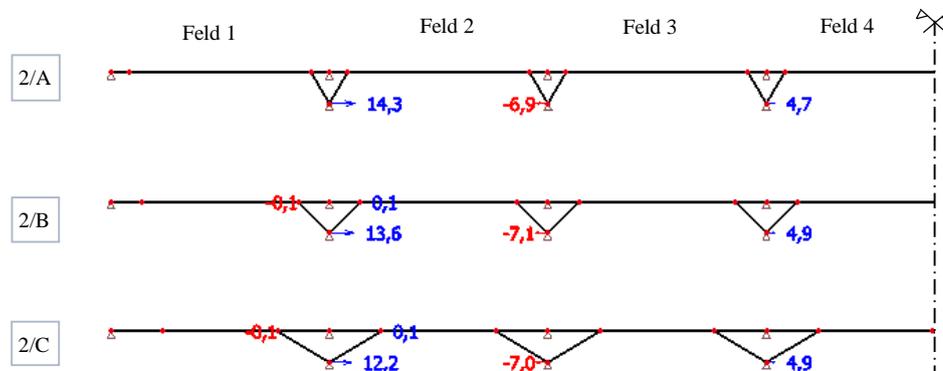
Querkraft  $V_z$  [kN]:



Stabverformungen  $u_z$  [mm]:



Stab Verschiebung Untergurt  $u_x$  [mm]:



### 4.6.3 Folgerungen aus Analyse 2

Die statische Wirkung der Flanschstreben ist jene von Kopfbändern. Sie verursachen die Verschiebung des Momentennullpunktes der Pfette zur Pfettenmitte hin [18]. Je größer die Neigung der Flanschstrebe wird, desto weiter verschiebt sich der Momentennullpunkt. Das Biegemoment sowohl im Feld als auch im Stützenbereich verringert sich, und die Druckbeanspruchungen im Feldbereich werden größer.

Mit Veränderung der Größe der Neigung der Strebe verändert sich nicht nur die Größe der Normalkraft in der Pfette sondern auch deren Verlauf. Je größer die Neigung der Flanschstrebe ist, desto größer wird logischerweise die horizontale Anteil der Stabkraft. Dieser wird von der im Stützenbereich gezogenen, im Feldbereich gedrückte Pfette aufgenommen. Bei einer Neigung von  $30^\circ$  wird nur 8% von der ganzen Normalkraft in der Pfette von den gedrückten Bereich aufgenommen, bei  $45^\circ$  schon 14%, und bei  $60^\circ$  24%. Somit entsteht im Modell C neben den abgeminderten Biegemomenten eine deutlich größere Druckbeanspruchung in der Pfette (4,5-mal so groß wie bei Modell A). Die Länge der Flanschstreben spielt auch eine Rolle, bei  $30^\circ$  Neigung ist sie 1,35m lang, bei  $45^\circ$  1,86m, und bei  $60^\circ$  Neigung 2,66m lang, laut dem Stabmodell. Das macht in der Stabilitätsbemessung der Flanschstrebe einiges aus. Während der Riegeluntergurtstabilisierung werden vertikale Kräfte vom Riegeluntergurt durch die Flanschstrebe bis zu der Pfette weitergeleitet. Je größer die Neigung, desto kleiner wird demzufolge ihre Normalkraft, aber gleichzeitig

wird Klicklänge größer, was zu einer kleineren Tragfähigkeit führt. Um das optimale System unter der maßgebende Auflast zu finden, erfolgt in Kapitel 5.4 der Spannungsnachweis der Pfette die drei Systeme bzw. in Abschnitt 6.4 die Bemessung der Flanschstrebe.

## 4.7 Analyse 3

Während der dritten Analyse ist ein vereinfachtes System gesucht, das eine Modellierung der mit Flanschstreben ausgesteiften Pfetten ohne Stabmodell ermöglicht. Die einfachste Möglichkeit ist die Flanschstreben durch steife Auflager zu ersetzen. Es wird in diesem Abschnitt untersucht, ob es ein realistisches Ergebnis liefert. In dem zweiten Variante - Modell C - sind statt den Flanschstreben Federauflagern eingebaut. Es erfordert etwas größeren Aufwand, da für diese Vereinfachung die Federsteifigkeiten bestimmt werden müssen.

### 4.7.1 Modellbeschreibung

Modell 3/A: Ausgangsmodell mit Flanschstreben	
Modell 3/B: Flanschstreben sind durch starre Auflager ersetzt.	
Modell 3/C: Flanschstreben sind durch nachgiebige Auflager ersetzt	

Abb. 4-5 Darstellung der drei Modellvariante der 3. Analyse

Modell A- mit den als Pendelstäben eingebauten Flanschstreben- ist gleich wie in Analyse1 aufgebaut, genaue Beschreibung siehe oben.

Für Modell C müssen die Ersatzfedersteifigkeiten der Flanschstreben ermittelt werden. Das kann über zwei Varianten erfolgen.

1.: Die zwei Flanschstreben werden gemeinsam mit der Pfette modelliert. Aus der Normalkraft der Flanschstrebe und der Verschiebung am oberen Stabenden kann durch entsprechende Division die Federsteifigkeit ermittelt werden. Die Ermittlung die Federsteifigkeiten für Modell C erfolgt mit Hilfe des Stabmodell aus Analyse1 (Kapitel 4.5)

Schnittgrößen N [kN]	Durchbiegung $z_v$ [mm]	Nachgiebige Auflager

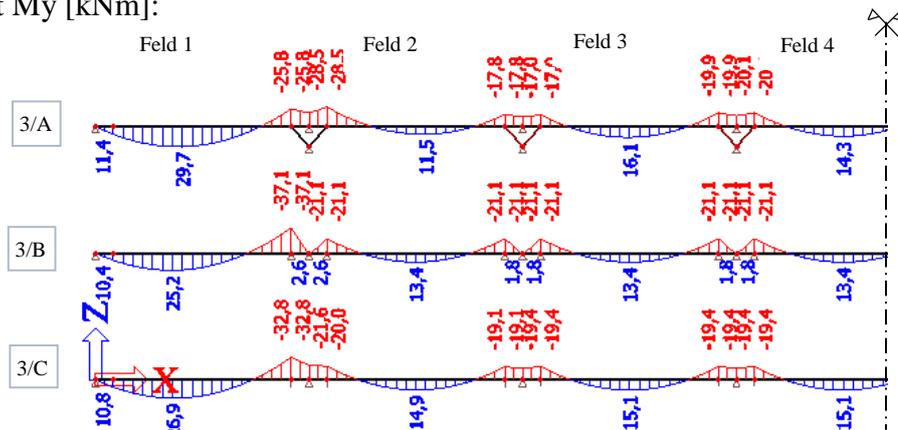
Abb.4-6- Bestimmung den Federsteifigkeit des Auflagers

Die Steifigkeit der Ersatzfeder kann als Quotient des vertikalen Anteils der Längskraft und der vertikalen Verschiebung des oberen Stabendes ermittelt werden.

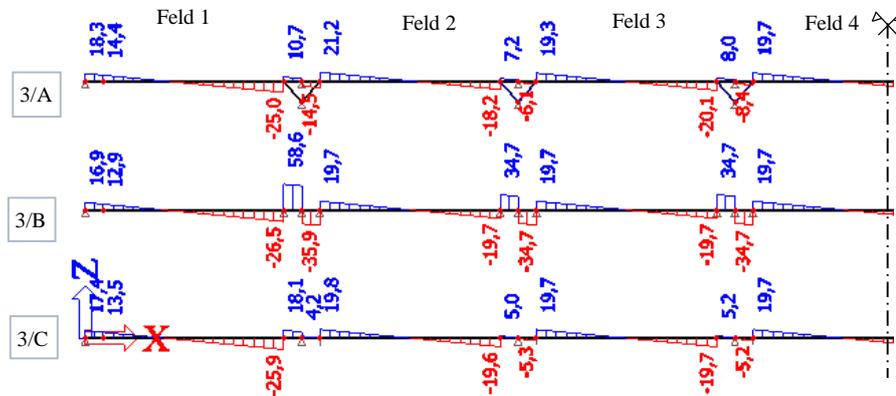


Schnittgrößen für die mittleren drei Felder (Feld3 , 4, und 5) hergestellt.

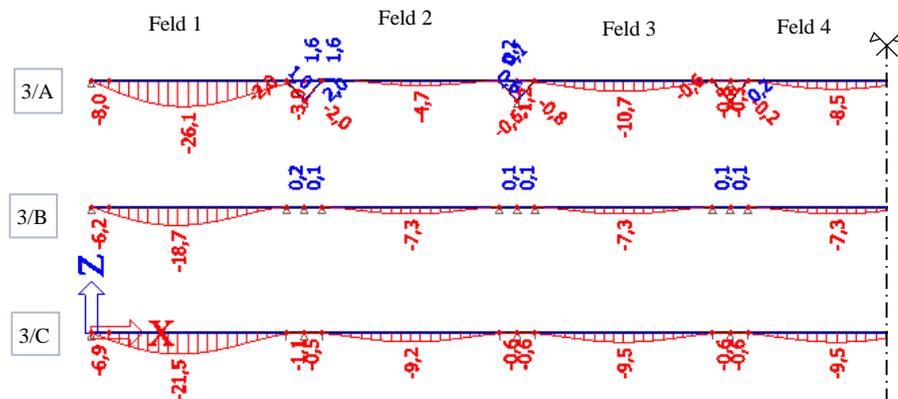
Moment  $M_y$  [kNm]:



Querkraft  $V_z$  [kN]:



Stabverformungen  $u_z$  [mm]:



### 4.7.3 Folgerungen aus Analyse 3

Das Modell mit einer starren Auflagerung ergibt die Extremwerte der Biegemomentwerte des ursprünglichen Systems (3/A) mit plus-minus 10% Unterschied, wobei das Querkraftbild signifikante Unterschiede, teilweise um 60% größere Werte zeigt. Das Modell „B“ spiegelt 90%-ig die gleichen Biegemomente im Rand – Feldbereich, und zeigt um 15 % größere Biegemomente im Rand-Stützenbereich. Das Modell würde im Fall eines unendlich langen Trägers die richtigen Werte liefern, aber bei der Bemessung der Pfetten einer Halle tritt im Randbereich ein deutlicher Unterschied auf.

## 5 Bemessung der dünnwandigen Profile

---

Im vorigen Kapitel wurde analysiert wie sich die Schnittgrößenverlauf der Pfette bei der unterschiedlichen Gestaltungsvarianten der Flanschstreben entwickeln. Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich damit, wie die Pfitten laut der europäischen Stahlbaunorm bemessen werden sollen.

Es wird zuerst ein theoretischer Überblick über die Bemessungsregelungen für kaltgeformte dünnwandige Pfitten des betroffenen Teils der Norm – ÖNORM EN 1993-1-3 - gegeben. Im Anschluss daran erfolgt die detaillierte Darstellung des Berechnungsablaufes, auf dem Beispiel der Nachweis der Pfette von der Musterhalle, dabei werden die genannten Bemessungsregeln beispielhaft erläutert. Schließlich wurde überprüft, ob die vereinfachte Annahme der damaligen Hallenstatik auf der sicheren Seite liegt. Dort wurde zur Vereinfachung die Pfette als Neunfeldträger mit gleichmäßigen 8,4m Spannweiten - ohne Berücksichtigung der Flanschstreben - bemessen. Ein weiteres Ziel ist herauszufinden, ob mit Berücksichtigung des veränderten statischen System und der Schnittgrößen der Pfette ein kleinerer Querschnitt der Pfette anwendbar ist.

### 5.1 Allgemein - Stahlleichtbau

Dünnwandige, kaltgeformte Bauteile und Bleche aus Stahl wurden im Bereich Hallen- und Industriebau in den letzten Jahrzehnten verwendet. Die Dachkonstruktionen werden typisch von Trapezblechen oder Sandwichelementen (als raumabschließendes Bauteil) und von den darunter liegende Pfitten (als Tragkonstruktion) aufgebaut.

Aufgrund der optimierten Gestaltung ihres Profilquerschnitts können die eigengewichtsarmen, dünnwandigen Pfitten große Tragfähigkeit aufweisen. Eine Reihe von Vorteilen machen die kaltgeformten, dünnwandigen Profile darüber hinaus populär, wie etwa die gut automatisierte Herstellung von den vielfältigen Querschnitten. Transport und Montage sind schnell und kostengünstig, die Knotenausbildungen werden mit Schraubenverbindungen gelöst. Mithilfe der Überlappungen ist das optimale statische System der Durchlaufträger durchgesetzt.

Aufgrund dieser vielfältigen Vorteile kommt in den letzten Jahrzehnten der Nutzung von dünnwandigen, kaltgeformten Bauteilen eine Schlüsselrolle zu. Das statische Verhalten von diesen Bauteilen ist aber sehr komplex, daher bemühen sich Ingenieure, genauere Berechnungsregeln zu entwickeln.

### 5.2 Bemessung laut EC

Aufgrund die kleinen Materialstärken weisen kaltgeformte Profile ein komplexes Tragverhalten auf, das durch Gesamtstabilität gekennzeichnet wird. Das Problem von Gesamtstabilität setzt sich aus drei – zwei lokalen und einer globalen – möglichen Stabilitätsversagensformen zusammen. Wegen dieser Komplexität benötigen kaltgeformte, dünnwandige Querschnitte eigene spezielle Regelungen. Die Bemessung von kaltgeformten, dünnwandigen Bauteilen und Blechen aus Stahl ist in EN 1993-1-3 “Allgemeine Regeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche“ festgelegt. Diese Norm bezieht sich in mehreren Punkten auf den Teil 1-1: „Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“, bzw. Teil 1-5: „Plattenförmige Bauteile“. In der Norm gibt es ein eigenes Kapitel (Kapitel 10) für die Handhabung speziell für die Pfittenbemessung. Daneben ist ein Abschnitt (Abschnitt E) über eine eventuelle vereinfachte Bemessungsmöglichkeit für Pfitten vorhanden.

Einen dünnwandigen, kaltgeformten Querschnitt anhand manueller Berechnungen nachzuweisen ist eine äußerst mühsame Aufgabe. Fast jede Hersteller bietet kostenfreie Bemessungsprogramme und

Bemessungstabellen für seine eigenen dünnwandigen Profile an. Diese Programme beschränken sich meistens auf die Bestimmung von Verzweigungslasten. In der Baupraxis sind diese Programme sehr hilfreich und zeitsparend. Das statische Verhalten der Profile bzw. die Regelungen der Norm zu kennen ist trotzdem wichtig, wenn man solche Profile verwendet. Das vorliegende Kapitel gibt dazu einen Überblick über die Richtlinien speziell für Pfettenbemessung nach dem Eurocode Normenpaket.

### 5.2.1 Allgemeines

Kaltgeformte Profile werden gewöhnlich aus ebenen, verzinkten Blechen hergestellt. Die Herstellung kann durch Kaltumformungen wie Kaltwalzen, Abkanten oder Rollprofilieren erfolgen. Ausgangsmaterial können beschichtete oder nicht beschichtete, warm- oder kaltgewalzte, dünnwandige Bleche oder Bänder sein. Wichtig ist, dass die Beschichtung nicht beschädigt ist.

Das Profil ist somit aus ebenen Blechen zusammengesetzt, die nach Anforderung verschiedene Verstärkungselemente wie Sicken, Lippen und Bördel enthalten. Die Verstärkungen sind aufgrund der Dünnwandigkeit des Profils notwendig. [13]

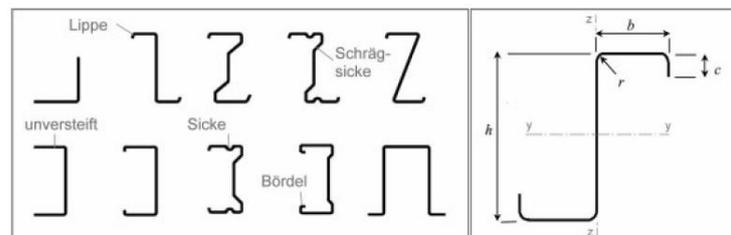


Abb. 5-1 Kaltgeformte, dünnwandige Stahlprofile im EN 1993-1-3 [6]

### 5.2.2 Anwendungsbereich EC 1993-1-3

EN 1993-1-3 definiert in der Einleitung eindeutig ihren Anwendungsbereich: „Sie bezieht sich auf kaltgewalzte Stahlerzeugnisse aus beschichtetem oder nicht beschichtetem warm- oder kaltgewalzten Blech oder Band, das durch Rollprofilierung oder Kantverfahren kaltverformt wurde.“ [6]

Aufgrund der geringen Materialstärken muss man die Stahlkerndicke von der nominellen Dicke unterscheiden. Die nominelle Blechdicke enthält die Beschichtung, die im Fall einer Zinkbeschichtung zirka 0,04mm ausmacht. Die weiteren Berechnungen erfolgen mit den Stahlkerndicken. Die Regelungen der Norm sind für Bleche und Bauteile mit einer Stahlkerndicke zwischen 0,45mm und 15mm gültig.

Weiterhin definiert die Norm Grenzwerte für die Schlankheit der einzelnen Blechelemente des Querschnittes (siehe Abb.4.2). Außerdem sind die Bemessungen der anwendbaren Lippen und Bördeln im Verhältnis zu den Flanschen beschränkt.

$$\text{Lippe:} \quad 0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$\text{Börden:} \quad 0,1 \leq d/b \leq 0,3$$

Wobei: c, bzw. d – sind die Größen einer Lippe bzw. eines Bördels

b – Flanschbreite

/siehe auch Abb. 5.2/

## Bemessung der dünnwandigen Profile

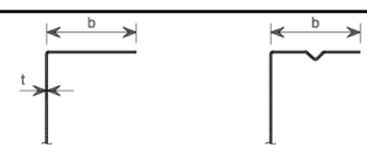
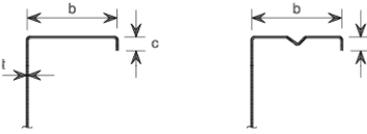
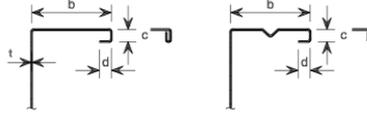
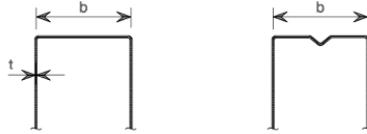
Querschnittsteilfläche	Maximalwert
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Abb. 5-2 Grenzwerte der Schlankheit von kaltgeformten Profilen

Wenn der Innenradius  $r \leq 5 * t$  und  $r \leq 0,1b_p$  beträgt, darf der Einfluss der ausgerundeten Ecken bei der Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit des Kaltprofils laut EC 1993-1-3 vernachlässigt werden. Bei der Ermittlung von Querschnittssteifigkeiten ist dieser Einfluss hingegen immer zu berücksichtigen. [13]

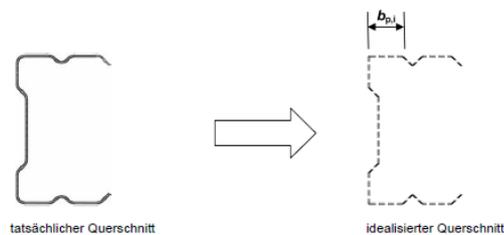


Abb. 5-3 Berücksichtigung ausgerundeten Ecken

### 5.2.3 Versagensformen der dünnwandigen, kaltgeformten Querschnitte

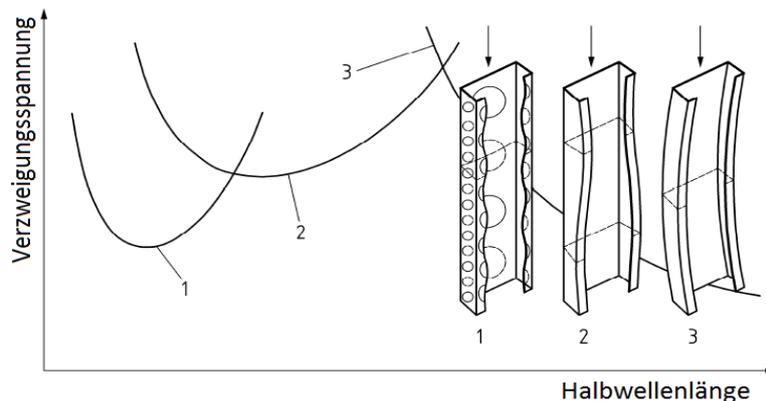
Wie bereits erwähnt weisen kaltgeformte, dünnwandige Querschnitte ein spezielles Tragverhalten auf, das im Abschnitt 5.5 der Norm EN 1993-1-3 detailliert dargestellt wird.

- › Die Dünnwandigkeit ist ein besonders wichtiges Merkmal von kaltgeformten Bauteilen. Die einzelnen Blechelemente der dünnwandigen Profile sind wie bei Platten mit ihrer Schlankheit ( $b/t$  Verhältnis) bezeichnet. Mit steigender Schlankheit sind die Profilelemente immer anfälliger für lokales Plattenbeulen bei Druckbeanspruchung. Örtliche Ausbeulungen treten bei den verschiedenen Blechelementen auf, gleichzeitig sind aber die Ecken des Querschnitts unverschieblich. Als Verstärkung des Querschnitts gegen das Ausbeulen kommen verschiedene Versteifungen wie Lippen, Bördel und Sicken zum Ansatz. [14]

- › Die Steifen haben zwar stabilisierenden Einfluss gegen örtliches Ausbeulen, bei mangelnder Steifigkeit können sie aber selber auch ausknicken. Diese spezielle Versagensform der dünnwandigen Profile wird Forminstabilität genannt.
- › Betrachtet man die dünnwandigen Profile als einen druckbeanspruchten Stab in einer Konstruktion, können globale Stabilitätsformen wie Biegeknicken und Biegedrillknicken auftreten [14].

Die lokalen und globalen Stabilitätsphänomene können gleichzeitig auftreten, dieses komplexe Tragverhalten der dünnwandigen Querschnitte wird als Gesamtstabilitätsproblem bezeichnet.

Zu Abb.5-4 wurde ein kaltgeformtes C - Profil verwendet, um den Zusammenhang von Verzweigungsspannung und Halbwellenlängen der einzelnen Instabilitätsformen darzustellen. Die mit Nummer 1 gekennzeichnete Verzweigungskurve zeigt die zum lokalen Plattenbeulen gehörige kleine Halbwellenlängen. Die Ecken des Querschnitts bleiben unverschieblich. Dies kommt bei kleinen Stablängen vor, wo die globalen Stabilitätsversagensarten sich noch nicht entwickeln konnten. Globales Stabilitätsversagen ist bei sehr großen Stablängen die maßgebende Versagensart, die zugehörige Kurve ist mit Nummer 3 markiert. Der Stab knickt mit großen Halbwellenlängen aus, das Kaltprofil bleibt querschnittstreu. Bei kaltgeformten, rippenversteiften Querschnitten tritt – typisch bei mittleren Halbwellenlänge der Versagensart – Forminstabilität auf. Durch das Ausknicken wird die Randversteifung aufgelöst, der Querschnitt ist nicht mehr querschnittstreu [13].



*Abb. 5-4 Stabilitätsprobleme eines dünnwandigen C Profils [6]*

### 5.2.4 Ermittlung des wirksamen Querschnitts von Kaltprofilen

Die Ermittlung der wirksamen Breite eines dünnwandigen Querschnittes mit und ohne Versteifungen ist in EN 1993-1-3[6] gesondert behandelt, über Forminstabilitätsproblem spricht man nur bei versteiftem Querschnitt.

#### 5.2.4.1 Ebene, nicht ausgesteifte Querschnitte (EN 1993-1-3/Abschnitt 5.5.2 )

Die Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens der einzelnen Bleche des Profils erfolgt laut der Methode der wirksamen Querschnittsbreiten. Die effektiven Breiten der nicht ausgesteiften Querschnittsteile werden nach EN 1993-1-5[7] mithilfe des Abminderungsbeiwertes  $\rho$  aufgrund des Plattenschlankheitsgrades  $\bar{\lambda}_p$  ermittelt. Bei der Methode der wirksamen Breiten ist das ausbeulende Teil des Querschnitts als nicht mehr wirkenden Bereich von dem Gesamtquerschnitt herausgelöst. Die noch wirksamen Teile des Profils bilden den wirksamen Querschnitt, der in der Berechnung als tragfähiges Teil berücksichtigt wird. Um das richtige Modell der einzelnen Querschnittselemente zu finden, bietet EN 1993-1-3 [6] Hilfe in der Tabelle 5.2 [14].

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Beispiel: Ermittlung der effektiven Breite des gedrückten Gurtes eines C- Profils:

Der Gurt einer C- Profil ist als beidseitig gestützte Platte zu berücksichtigen, deswegen wurde die Tabelle 4.1 des EN 1993-1-5 herangezogen. /Siehe Abb. 5-5/

Spannungsverteilung (Druck positiv)			Wirksame Breite $b_{eff}$		
	$\psi = 1:$		$b_{eff} = \rho \bar{b}$	$b_{e1} = 0,5 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,5 b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0:$		$b_{eff} = \rho \bar{b}$	$b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$	$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0:$		$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$	$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert $k_\sigma$	4,0	$8,2(1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	$23,9$ $5,98 (1 - \psi)^2$

Abb. 5-5 Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

$$\psi = \sigma_1 / \sigma_2 = 1,0: \quad k_\sigma = 4,0 \quad \text{und} \quad b_{eff} = \rho * b_p$$

Wobei  $\rho$  Abminderungsbeiwert ist anhand Beulschlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_p$  und Spannungsverteilung  $\psi$  ermittelt:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 * (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

Weiters gilt: 
$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 * \psi} = 0,67$$

Sonst ist: 
$$\rho = 1$$

Somit die effektive Breite des Gurtes: 
$$b_{e1} = b_{e2} = \frac{b_{eff}}{2}$$

/ANM: Siehe auch Abb. 5-6 / Schritt 1!/

### 5.2.4.2 Ebene Querschnittsteile mit Rand – oder Zwischensteifen (EN 1993-1-3/Abschnitt 5.5.3)

Bei einem kaltgeformten Stahlquerschnitt mit Rand- oder Zwischensteifen sind die lokal ausbeulenden Teile durch die Versteifungen gestützt, die Lippen und Bördeln sind aber selber biegeknickgefährdet. Die Versteifungen können sich nicht frei verformen, sowohl ihre Verschiebungen als auch ihre Verdrehungen sind von den angrenzenden Blechelementen anhängig. Dementsprechend erfolgt die Modellierung der Steife mit einem oberhalb des Schwerpunkts angeordneten kontinuierlichen Federlager. Die Federsteifigkeit  $K_1$  kann durch eine statische Analyse ermittelt werden. Währenddessen ist genau oberhalb von dem Federauflager eine Einheitsstreckenlast „u“ aufgesetzt, die dazu gehörige Verschiebung „ $\delta$ “ wurde gemessen. In Abb. 5-6 ist die Analyse für eine Rippe und eine Sicke dargestellt. Somit ist die Federsteifigkeit:  $K_1 = u / \delta$  [13].

## Bemessung der dünnwandigen Profile

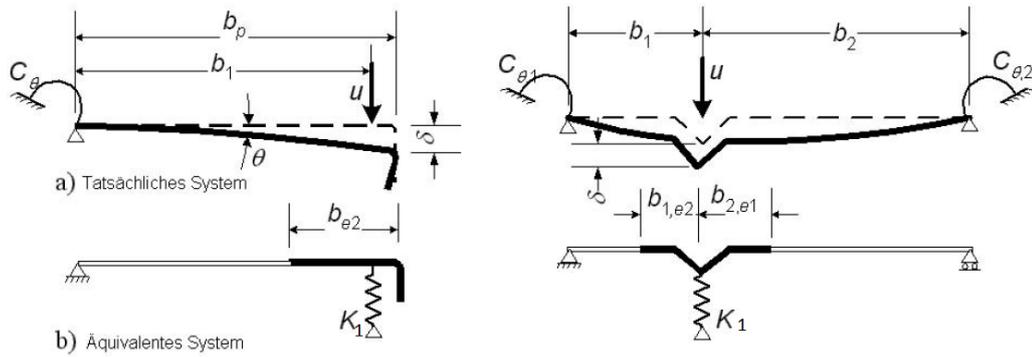


Abb. 5-6 Berechnungsmodell für Randsteife [6]

Für typische Ausbildungen – wie kaltgeformte C, Z oder  $\Sigma$  Querschnitte mit Lippen oder Bördel – empfiehlt die Norm eine Bestimmungsgleichung für die Federsteifigkeit  $K_1$ , damit auf die aufwendige Analyse verzichtet werden kann ( $K_1$  Wert ist durch die Steifigkeit, die Querschnittsgeometrie und die Spannungsverteilung bestimmt). Mit Hilfe der Federsteifigkeit  $K_1$  kann die Verzweigungsspannung  $\sigma_{cr}$  des druckbeanspruchten, elastisch gebetteten Stabs ermittelt werden. Der Nachweis für das Biegeknicken des Aussteifungselements läuft gewöhnlich mit der Ermittlung der bezogenen Schlankheit weiter, zur Feststellung des Abminderungsfaktors bietet EC 1993-1-3 aber eigene Abminderungskurven an (Abschnitt 5.5.3.1/(7)) [14].

*ANM. In der EC 1993-1-3 [5] ist die Verschiebungsfedersteifigkeit je Längeneinheit ein wenig verwirrend dargestellt, im Abschnitt 5.5.3.1/(2) sowie auf jeden Bild ist mit „K“ bezeichnet, solange im 5.5.3.1/(5) zum Beispiel ist schon als „ $K_1$ “ definiert. Es wird in der Arbeit mit „ $K_1$ “ bezeichnet – die von der Norm stammenden Abbildungen wurden auch bearbeitet. Die Federsteifigkeit  $K$  kommt im EC 1993-1-3 im Abschnitt 10 vor – siehe Kapitel 5.2.6.2.*

Die Methode der Ermittlung des wirksamen Querschnittes eines kaltgeformten, randversteiften Profils unter Berücksichtigung des örtlichen Plattenbeulens und der Forminstabilität wird im Abschnitt 5.5.3.2 der Norm stufenweise dargestellt.

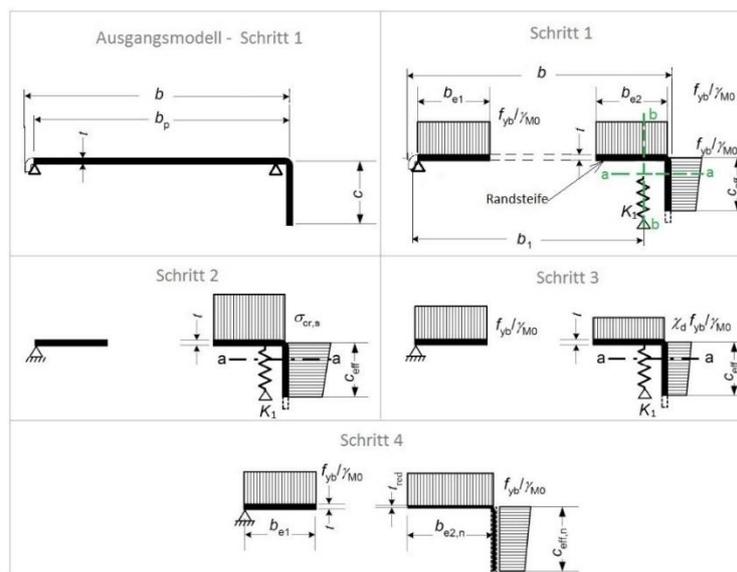


Abb. 5-7 Berechnung der Wirksame Breite ausgesteift Querschnittsteile

- › Berechnungsschritt 1 erfolgt für die Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens. Ermittlung der wirksamen Breiten  $b_{e1}$  und  $b_{e2}$  unter der Annahme, dass die Randsteife als festes Auflager wirkt (und  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$ ). Somit ist der Gurt als beidseitig gelagerte Platte

## Bemessung der dünnwandigen Profile

zu sehen laut EN 1993-1-5 / Tabelle 4.1 [7]. Für die Lippe und Bördel definiert EN 1993-1-3 [6] eigene Bestimmungsgleichungen.

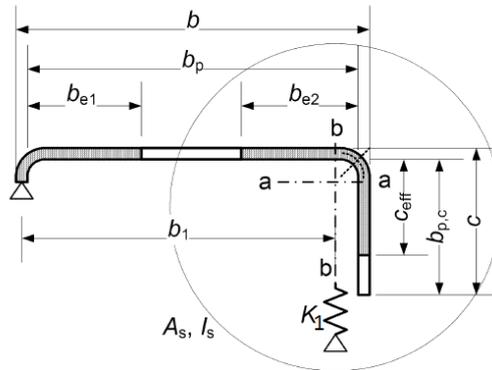


Abb. 5-8 Randsteife [6]

Gurt: siehe Abschnitt 5.2.4.1: (Ebene nicht ausgesteifte Querschnitte)

Lippe: einseitig gestützte Platte, für Ermittlung  $k_\sigma$  gibt EN 1993-1-3 eigene Regelung,

$$\text{bei: } \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,35 \quad k_\sigma = 0,5$$

$$\text{bei: } 0,35 < \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,6 \quad k_\sigma = 0,5 + 0,83 * \sqrt[3]{(b_{p,c}/b_p - 0,35)^2}$$

$\bar{\lambda}_p$  und  $\rho$  gleich wie bei dem Gurt:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_{p,c}/t}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 * \psi} = 0,67$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 * (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$c_{eff} = \rho * c$$

- › Berechnungsschritte 2 und 3: Bestimmung der kritischen Knickspannung der elastisch gebetteten Randsteife. Mithilfe des Schlankheitsgrades kann der Abminderungsfaktor berechnet werden, durch diesen ergibt sich die reduzierte, wirksame Fläche der Randsteife. Die Optimierung des wirksamen Querschnitts ist ein iterativer Prozess.

Kritische Verzeigungsspannung für das Biegeknicken der Randsteife [14]:

$$\sigma_{cr} = \frac{2 * \sqrt{K_1 * E * I_s}}{A_s}$$

Wobei:

$A_s$  Wirksame Querschnittsfläche der Randsteife:

$$A_s = t * (b_{e,2} + c_{eff})$$

## Bemessung der dünnwandigen Profile

$I_S$  wirksames Flächenmoment 2. Grades der wirksamen Fläche  $A_S$  bezogen auf ihre Schwerachse a-a, siehe Abb. 5-8.

$K_1$  Federsteifigkeit je Längeneinheit

$$K_1 = \frac{E * t^3}{4 * (1 - \nu^2)} * \frac{1}{b_1^2 * h_w + b_1^3 + 0,5 * b_1 * b_2 * h_w * k_f}$$

$b_1$  – Abstand von der Steg-Flansch- Verbindung bis zum Schwerpunkt des wirksamen Bereichs der Randsteife von Flansch 1, siehe Abb. 5-6.

$b_2$  – Abstand von der Steg-Flansch- Verbindung bis zum Schwerpunkt des wirksamen Bereichs der Randsteife von Flansch 2, siehe Abb. 5-6.

$k_f$  – berücksichtigt der Art der Belastung.

$k_f = 0$ , wenn Flansch 2 auf Zug beansprucht ist.

$k_f = \frac{A_{S2}}{A_{S1}}$ , wenn Flansch 2 ebenfalls druckbeansprucht ist.

Unter Biegung vereinfacht sich die Gleichung wie folgt:

$$K_1 = \frac{E * t^3}{4 * (1 - \nu^2) * b_1^2 * (b_1 + h_d)}$$

Mittels der kritischen Verzeigungsspannung ergibt sich der bezogene Biegeknickschlankheitsgrad

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$$

Abminderungsfaktor für das Biegeknicken der Randsteife:

$$0,65 < \bar{\lambda}_p < 1,38 \rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723 * \bar{\lambda}_p$$

› Berechnungsschritt 4:

Ermittlung der reduzierten Querschnittsdicke im Bereich der Randsteife → Einfluss der Forminstabilität wird berücksichtigt

$$t_{red} = \chi_d * t * \frac{f_{yb}}{\sigma_{com,Ed} * \gamma_{M0}}$$

### 5.2.5 Grenzzustände für Tragfähigkeit

Die allgemeinen Bemessungsregeln für Querschnittstragfähigkeit und Stabilität für EN 1993-1-3 kaltgeformte Querschnitte befinden sich in der Norm der dünnwandigen, kaltgeformten Bauteilen im Kapitel 6. Daneben liefert die Norm ein eigenes Kapitel speziell für Bemessung des Pfettenquerschnitts sowie einen Anhang mit der vereinfachten Regeln für Pfetten. Daher soll hier nur eine kurze Zusammenfassung von Kapitel 6 gegeben werden.

Die Tragsicherheitsnachweise werden auf der Ebene der Schnittgrößen und der Querschnittswiderstände geführt. Der Querschnittstragfähigkeit im Fall von Druck- und Biegebeanspruchung ist durch den zugehörigen wirksamen Querschnitt definiert (Methode der wirksamen Querschnitte), jedoch erfolgt die Ermittlung der Schubtragfähigkeit nach der alten Methode der reduzierten Spannungen.

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Bei zentrischem Druck und Biegung ist das zusätzliche Biegemoment infolge der Schwerpunktverschiebung zu berücksichtigen. Das Grenzbiegemoment des kaltgeformten Profils ist in Abhängigkeit der Beulschlankheit an der ungünstigsten Stelle bestimmt, somit kann in manchen Fällen das vollplastische Biegemoment angenommen werden [14]. (siehe Abb. 5-9)

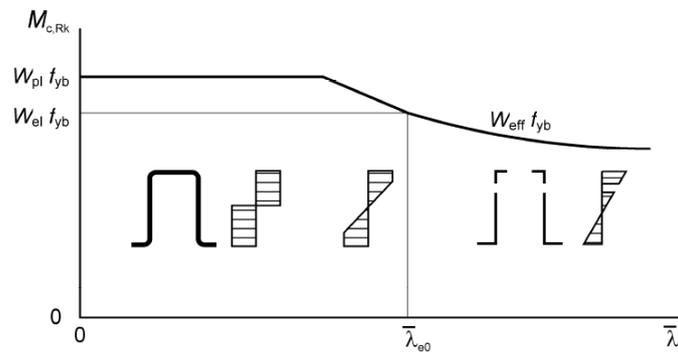


Abb. 5-9 Biegetragfähigkeit als Funktion der Schlankheit [6]

Der Nachweis der Gesamtstabilität der dünnwandigen Profile erfolgt in zwei Stufen. Stufe 1, die Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens bzw. der Forminstabilität, erfolgt durch die im Querschnittsnachweis verwendeten bezogenen wirksamen Profile. In Stufe 2 werden die globalen Stabilitätsprobleme behandelt. Die Berücksichtigung des Biegeknickens und Biegedrillknickens ist in 1993-1-1 geregelt, jedoch mit eigenen, für die kaltgeformten Querschnitte angenommenen Knickspannungslinien von EN 1993-1-3/Abschnitt 6.2.3. Die Interaktion kann entweder laut 1993-1-1, oder laut der in EN 1993 - 1- 3 empfohlener konservativeren Iterationsbedingung erfolgen [13].

### 5.2.6 Spezielle Berechnungsregeln für Pfettenquerschnitt

#### 5.2.6.1 Allgemeine Eigenschaften der Pfetten

Aufgrund ihrer besonderen Profilgeometrie weisen Pfetten ein komplexes Tragverhalten auf. Bei C und  $\Sigma$  Profilen liegt der Schubmittelpunkt außerhalb des Querschnitts, das Z-Profil hat schiefe Hauptachsen. Eine vertikale Belastung ruft Torsionsbeanspruchungen und bei Z-Profilen auch gegebenenfalls schiefe Biegung hervor. Da gleichzeitige Druck-, Biege- und Torsionsbeanspruchungen in der Regelung über Stabilitätsnachweise in EN 1993-1-3 nach Abschnitt 6.2 nicht berücksichtigt sind, ist dieser übliche Biegeknicknachweis bei der Bemessung der Pfettenquerschnitten nicht anwendbar. Für eine genaue Lösung wäre die beste Option, einen Biegedrillknicknachweis nach Theorie II Ordnung unter Berücksichtigung von Ersatzimperfectionen zu führen. Dies ist natürlich sehr komplex und bedeutet einen viel zu großen Aufwand in der alltäglichen Bemessungsarbeit. EN 1993-1-3 hat zwei Bemessungsmodelle für kaltgeformte Pfetten in die Norm aufgenommen.

#### 5.2.6.2 Das Bemessungsmodell: EN 1993-1-3/Kapitel 10 – Ermittlung der Federsteifigkeiten

Für die Bemessungsregeln in EN 1993-1-3/Kapitel 10 ist vorausgesetzt, dass die Pfettenobergurte von der darauf liegenden substeifen Dachdeckung näherungsweise horizontal unverschieblich gelagert sind. Um die Substeifigkeit der Trapezbleche einfach nachzuweisen, ist eine Gleichung angegeben. Die horizontale Lagerung kann auch durch andere Profilbleche wie beispielsweise Sandwichelemente erfolgen, in solchen Fälle ist aber keine einfache Regelung für die Schubsteifigkeit vorhanden. [14]

## Bemessung der dünnwandigen Profile

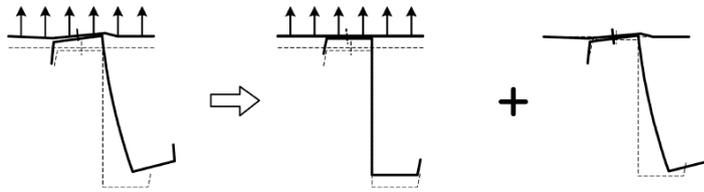


Abb. 5-10 Gesamtverformung bei Abhebbender Last im zwei Anteil aufgeteilt [6]

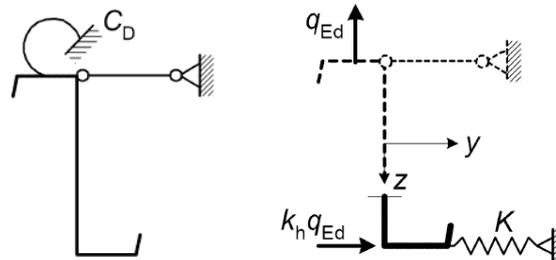


Abb. 5-11 Pfettenmodell mit seitlicher Halterung  $C_D$  und die Vereinfachte Berechnungsmodell [6]

Das Tragverhalten seitlich gehaltener Pfetten ist in Abb. 5-10 dargestellt. An den Verformungsbilder sieht man, dass die seitliche Halterung als teilweise Behinderung der Pfettenverdrehung dient. Die Pfettenverdrehung ist als Drehfeder mit der Drehfedersteifigkeit  $C_D$  gekennzeichnet. Es wird ein ingenieurmäßig angenommen Berechnungsmodell dargestellt (siehe Abb. 5-11), wobei als Vereinfachung die Drehfedersteifigkeit  $C_D$  durch eine äquivalente seitliche Bettung mit der Steifigkeit  $K$  ersetzt ist. Und die Auswirkungen der Querschnittsverformungen berücksichtigen zu können, ist der freie Gurt als ein Druckstab mit veränderlicher Normalkraft und mit einer seitlichen, kontinuierlichen Bettung mit der Steifigkeit  $K$  modelliert [6]. Die Federsteifigkeit  $K$  ist nach EN 1993-1-3, Kapitel 10.1.5, zu ermitteln.

Die Wegfeder  $K$  spielt eine vielfache Rolle bei dem weiteren Berechnungsablauf. Sie hat einen Einfluss bei der Ermittlung des Querbiegemoments sowie bei der Berechnung der Knicklänge des freien Gurtes.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B}}$$

Wobei:

$K_A$ - Anschlusssteifigkeit der Verbindung Pfette- Sandwichpaneel:

$K_B$ - Steifigkeit der Pfette aus elastischer Profilverformung des Steges

$$\frac{1}{K_A} = \frac{h^2}{C_D} \qquad \frac{1}{K_B} = \frac{4 * (1 - \nu^2) * h^2 * (h_d + e)}{E * t^3}$$

- t – Blechdicke der Pfette
- $\nu$  – Poissonzahl  $\nu = 0,3$
- h – Gesamthöhe der Pfette
- $h_d$  – Blechbreite laut Abb. 5 – 12
- E – Elastizitätsmodul

## Bemessung der dünnwandigen Profile

- $e$  – berücksichtigt, ob die äquivalente seitliche Belastung Kontakt des Profilbleches mit dem Pfettensteg oder mit dem Gurtende der Pfette erzeugt.
  - $e = a$ , wenn die äquivalente seitliche Belastung  $qh$ , Ed Kontakt des Profilbleches mit dem Pfettensteg erzeugt
  - $e = 2a + b$  wenn die äquivalente seitliche Belastung  $qh$ , Ed Kontakt des Profilbleches mit dem Gurtende der Pfette erzeugt
- $a$  – Abstand zwischen Verbindungsmittel und Pfettensteg, siehe Bild 5 – 12
- $b$  – Breite des befestigten Pfettengurtes, siehe Bild 5 – 12
- $C_D$  – Drehfedersteifigkeit

$$C_D = \frac{1}{\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}}$$

Wobei:

$C_{D,A}$  – Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung zwischen Profilblech und Pfette

$C_{D,C}$  – Steifigkeit der Drehbettung

$$C_D = \frac{k * E * I_{eff}}{s}$$

$k$  – berücksichtigt den Art der Verformung bzw. Rand – oder Mittelfeld

$I_{eff}$  – effektives Trägheitsmoment des Profilbleches

$E$  – Elastizitätsmodul des Profilbleches

$s$  – Pfettenabstand

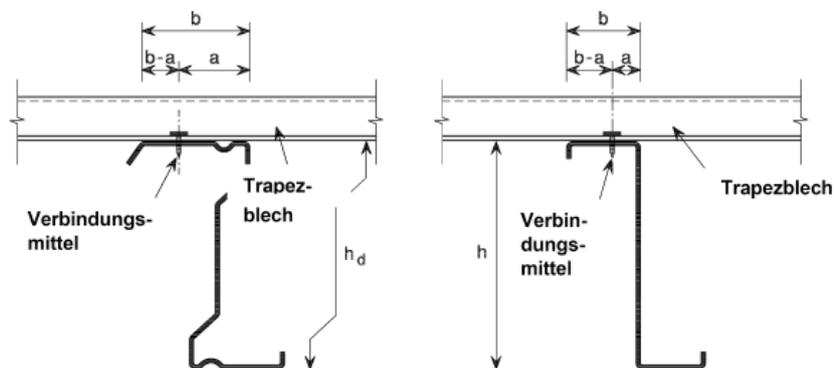


Abb. 5-12 Pfette und befestigtes Blech [6]

Die Steifigkeit der Drehbettung  $C_{D,C}$  ist nach der in der Norm angegebenen Berechnungsformel relativ schnell ermittelbar, allerdings ist die Berechnung für den Wert  $C_{D,A}$  danach besonders mühsam. Diesbezüglich wurden Forschungsarbeiten an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (amtliche Materialprüfungsanstalt) der Universität Karlsruhe geführt. Anhand der Ergebnisse wurde ein einfaches Anwendungsprogramm für die Berechnung der Anschlusssteifigkeiten von Sandwichelementen für die Drehbettung der Unterkonstruktion, entwickelt (das Programm ist unter [www.ifbs.de](http://www.ifbs.de) erhältlich). Auch die Empfehlungen des Deutschen Nationalen Anhangs zu EN1993-1-3 basieren auf diesen Forschungsergebnissen:  $C_{D,A}$  wurde unter der Anwendung eines idealisierten Momenten - Verdrehungsbeziehung des Sandwichelementes ermittelt.

## Bemessung der dünnwandigen Profile

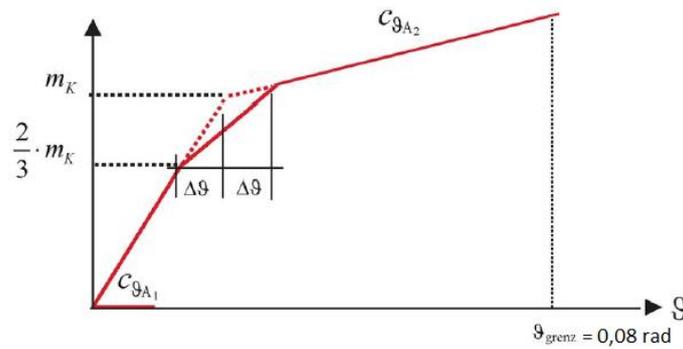


Abb. 5-13 Trilineare Idealisierung der Momenten – Verdrehungsbeziehung [15]

Außerdem wurde die maximal zulässige Grenzverdrehung mit 0,08 rad definiert. Eine Überschreitung der zulässigen Grenzverdrehung kann aufgrund plastischer Deformationen im Anschlussbereich zu Undichtigkeiten führen, siehe Abb.5-14[12].

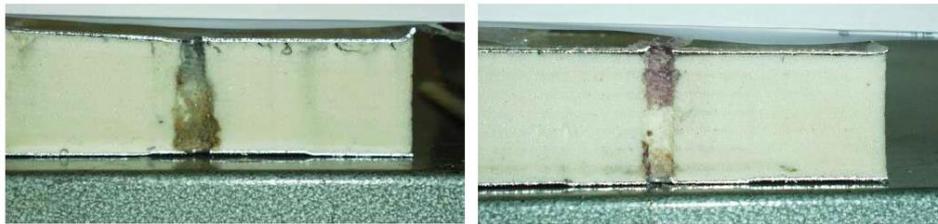


Abb. 5-14 Färbungen der Kernsicht infolge eingedrungenen Wassers [15]

### 5.2.6.3 Die Bemessung

Das in der Norm angenommene Berechnungsmodell setzt voraus, dass die maßgebende äußere Beanspruchung der Pfetten die vertikale Gleichlast ( $q_{ed}$ ) ist. Daneben kann eine Normalkraftbelastung an der Pfette angenommen werden. Die Gleichlast  $q_{ed}$  verursacht eine Biegemomentenbelastung des Querschnittes um die starke Achse. Zusätzlich entwickelt sich eine Torsionsbeanspruchung ggf. mit schiefer Biegung (Z Profil) aufgrund der speziellen Querschnittsgeometrie der Pfetten. Im Berechnungsmodell werden Torsionen und schiefe Biegung durch ein gurtparalleles Kräftepaar in der Ober- und Untergurtebene des Kaltprofiles ( $k_h \cdot q_{ed}$ ) berücksichtigt. Die auf den Obergurt wirkende Kraft ist direkt ins Trapezblech weitergeleitet, dies muss in den weiteren Berechnungen nicht mehr beachtet werden. Die an dem Untergurt angreifende Kraft ruft  $M_{fz,Ed}$  (Biegemoment im freien Gurt um die z- Achse) hervor. Die Querschnittstragfähigkeit erfolgt auf der Ebene der Spannungen des Querschnittes [13]. Das Berechnungsmodell mit den aufnehmbaren Einwirkungen und den Spannungsüberlagerungen sind in Abb. 5-15 dargestellt.

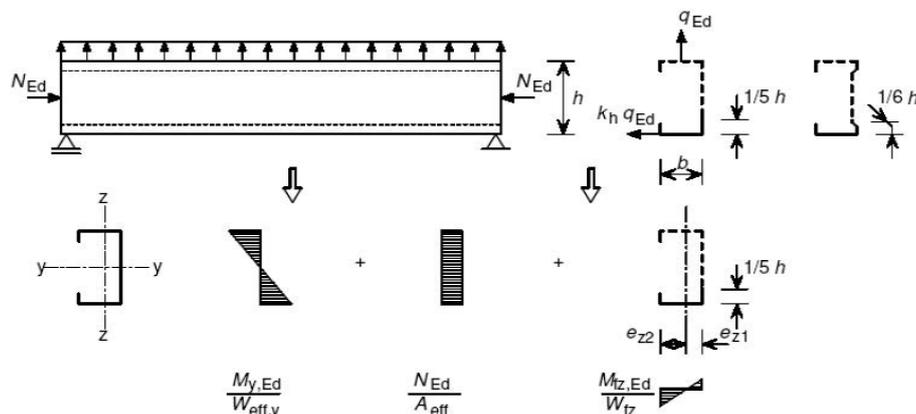


Abb. 5-15. Darstellung der Spannungsüberlagerung [6]

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Maximale Spannungen im seitlich gestützten Gurt:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}}$$

Maximale Spannungen im freien Gurt:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}}$$

Wobei:

- $A_{eff}$  – Effektive Querschnittsfläche bei zentrischer Druckbeanspruchung
- $W_{eff,y}$  – Widerstandsmoment des effektiven Querschnittes um die starke Achse
- $W_{fz}$  – Bruttowiderstandsmoment des freien Gurtes zuzüglich des mittragenden Steganteils für Biegung um die z – z Achse
- $N_{Ed}$  – Zentrische Normalbelastung
- $M_{y,Ed}$  – Biegung im die starke Achse
- $M_{fz,Ed}$  – Biegemoment im freien Gurt unter der Horizontallast  $q_{h,Ed}$

Es besteht die Möglichkeit, das von der am Untergurt angreifenden Kraft ( $k_h \cdot q_{ed}$ ) hervorgerufene Querbiegemoment ( $M_{0,fz,Ed}$ ) mit Korrekturfaktor  $\kappa_R$ , der die Bettung erfasst, abzumindern.

$$M_{fz,Ed} = M_{0,fz,Ed} \cdot \kappa_R$$

Der Korrekturfaktor  $\kappa_R$  ist durch den Federkennwert  $R$  und empirische Formeln ermittelbar, wenn die Bedingung  $R \leq 40$  gilt, ansonsten ist  $\kappa_R = 1,0$  zu setzen.

Federkennwert:

$$R = \frac{K \cdot L_a^4}{\pi^4 \cdot E \cdot I_{fz}}$$

Wobei:

- $K$  – Steifigkeit der Wegfeder je Längeneinheit
- $L_a$  – Spannweite  $L$  der Pfetten oder Abstand den Schlauzern
- $I_{fz}$  – Trägheitsmoment des freien Gurtes zuzüglich des mittragende Steganteils

Der globale Stabilitätsnachweis der kaltgeformten Pfetten wird über das Ersatzmodell „Druckgurt als Druckstab“ erfasst. Der Pfettenobergurt ist mit der Eindeckung drehsteif verbunden, für die globale Stabilität ist die freie Untergurt maßgebend [14].

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left( \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}}$$

Der Abminderungsbeiwert  $\chi_{LT}$  wird laut EC 1993-1-1 [5] mit dem bezogenen Schlankheitsgrad des freien Gurtes ( $\lambda_{fz}$ ) und der Knicklinie „b“ berechnet. Die für den Schlankheitsgrad angenommene Knicklänge ist für abhebende Last und Auflast unterschiedlich geregelt und, in der Berechnungsformel in Abhängigkeit der Pfetten-System definiert. (Er hängt in beiden Fällen von Federkennwert der Pfette, Spannweite und Anzahl den Schlaudern ab.)

### 5.2.7 Vereinfachte Pfettenbemessung – Regelungen nach EN 1993-1-3, Annex E

Die im Anhang E der EN 1993-1-3 vorgeschlagene Bemessungsregelung basiert auf der Forschungsarbeit von Linder [13]. Nachfolgend sind die Anwendungsgrenzen der im Rahmen der Forschungsarbeit untersuchten und verifizierten Profile, Systeme und Parameterbereich definiert [13]. Dieser Anwendungsbereich ist wesentlich enger im Vergleich mit der Beschränkung in EN 1993-1-3/ Kapitel 10. Beispielsweise gilt das vereinfachte Verfahren ausschließlich für C-, Z- und  $\Sigma$ -Profile – für normalkraftbeanspruchte Profile, für Systeme mit Schlaudern, gekoppelten und gestoßenen Durchlaufsystemen ist es nicht anwendbar. Daneben ist die Regelung für die Querschnittsabmessungen strenger, zum Beispiel die größte Schlankheit des Steges  $h/t \leq 160$  statt wie in EN 1993-1-3/Abschnitt 4 definiert  $h/t \leq 500$ .

Die anwendbare Grenzbiegemoment ist ähnlich wie die einachsige Biegung im EC 1993-1-1 Abschnitt 6.3.2.1 definiert, die Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion bzw. der schiefen Biegung erfolgt mit dem Faktor  $k_d$ .  $k_d$  ist mit einer Formel schnell ermittelbar. Er ist von dem Pfettensystem bzw. von der Querschnittsform und der Belastungsrichtung abhängig.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{LT,Rd}} \leq 1,0 \quad \text{dabei ist:} \quad M_{LT,Rd} = \left( \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \right) * W_{eff,y} * \frac{\chi_{LT}}{k_d}$$

$$k_d = \left( a_1 - a_2 * \frac{L}{h} \right) \text{ jedoch } \geq 1,0$$

Der Drehfedersteifigkeit  $C_D$  ist bei der Ermittlung des fiktiven St. Venant'schen Torsionswiderstandes der Pfette berücksichtigt. (Für die Ermittlung Wert  $C_D$  bietet Annex E keine Empfehlung, es ist laut EN 1993-1-3/Kapitel 10 anzunehmen.) Mithilfe dieser Torsionswiderstand kann das ideal - kritische Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken ermittelt werden.

### 5.3 Darstellung des im EC 1993-1-3 geregelten Berechnungsablaufes

Es wird im Folgenden der in der EN 1993-1-3 geregelte Berechnungsablauf für den Nachweis der ausgeführten Pfette der Musterhalle schrittweise als Musterbeispiel dargestellt. In der Musterhalle wurde die Pfette mit 30° geneigten Flanschstreben ausgeführt. In der Stützenbereich der Pfette wurden Überlappungsbereiche mit 2 x 0,8m Länge ausgeführt.

Während der Berechnung ist das statische System der Pfette ohne Berücksichtigung der Flanschstreben als Siebenfeldträger mit 8,4m Spannweite angenommen (siehe Abb.5-17). Der Nachweis wurde in der vorgegebenen Statik mit dieser vereinfachten Annahme geführt.

Laut EN 1993-1-3 werden von einer Pfette vier maßgebende Stellen untersucht. Die sind die Folgenden: Stützenbereich am Rand, Feldbereich am Rand, Stützenbereich mittig und Stützenbereich mittig, siehe Abb. 5-16.

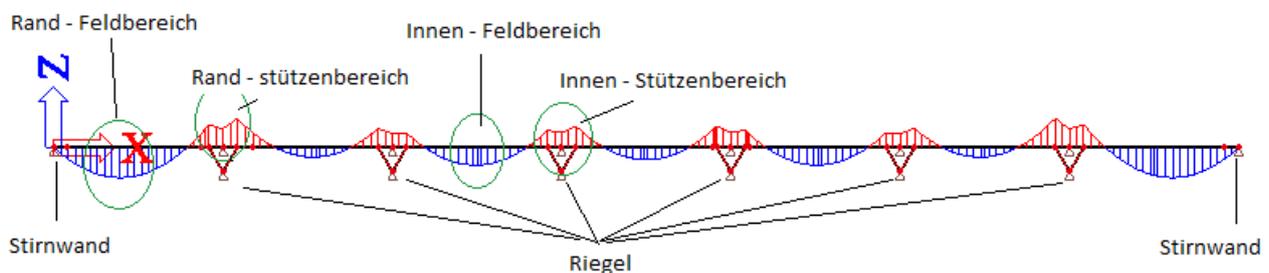


Abb. 5-16 Überprüfende Stellen der Pfetten

## 5.3.1 Allgemeine Vorgaben

### 5.3.1.1 Statisches System

Das statische System der Pfette: 9-feldiger Durchlaufträger mit 8,4m langen Spannweiten - vereinfacht als 7-Feldträger dargestellt.

### 5.3.1.2 Belastung

Die Belastungen sowie die Lastfallkombinationen wurden bereits in Kapitel 3 ermittelt. Für die maßgebenden Biegemomentbelastungen in den Feldbereichen sind die feldweisen Gleichlasten angenommen. Die abhebende Belastung mit Windsog wird nicht nachgewiesen, die Schnittgrößen von dieser Belastung sind im Fall der Musterhalle im Verhältnis sehr klein. (Siehe die ermittelte Schnittgrößen im Abschnitt 4.5.1.2 dargestellt!)

### 5.3.1.3 Schnittgrößen

Maßgebende Auflast:

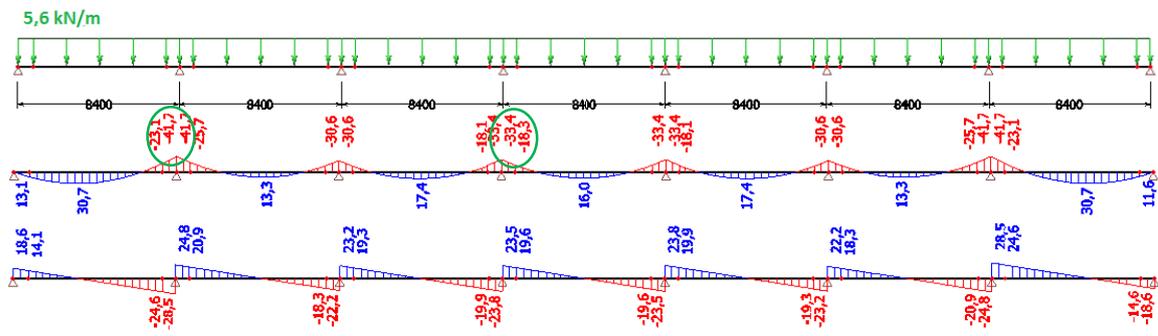


Abb. 5-17 Maßgebende Auflast auf der Pfette und zugehörige Biegemomente um die starke Achse, bzw. Querkräfte

Lastfallkombination – Feldweise Belastung:

a) Schnee im Randfeld:

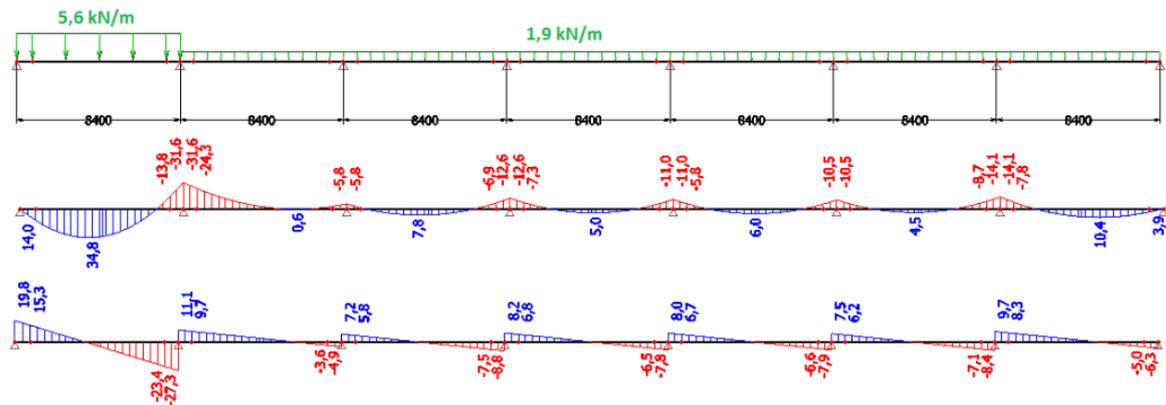


Abb. 5-18 Feldweise Belastung, auf der Pfette und zugehörige Biegemomente um die starke Achse, bzw. Querkräfte

## Bemessung der dünnwandigen Profile

b) Schnee im Innenbereich:

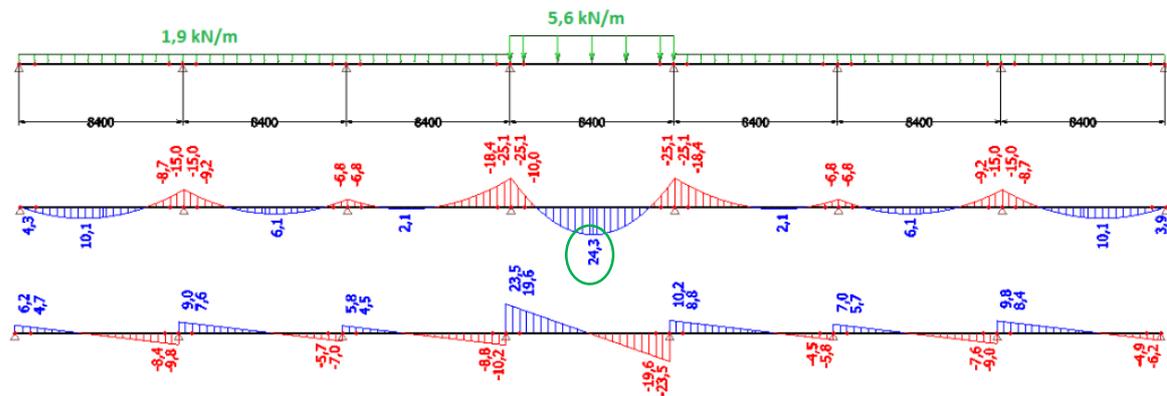


Abb. 5-19 Feldweise Belastung auf der Pfette, und zugehörige Biegemomente um die starke Achse, bzw. Querkräfte

### 5.3.1.4 Durchbiegung $-u_z$

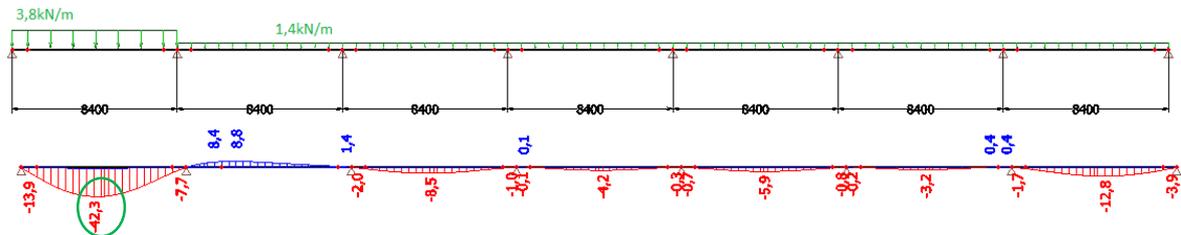


Abb. 5-20 Maßgebende Durchbiegung ( $u_z$ ) der Pfette unter feldweisen Belastung

### 5.3.1.5 Querschnitt

#### Dachpaneel:

d – core thickness (mm)	25	40	50	60	70	80	100	120	
D – overall dimension (mm)	60	75	85	95	105	115	135	155	
Weight (kg/m <sup>2</sup> )	sheet 0.5/0.4 mm		9.34	9.94	10.34	10.74	11.54	12.34	13.14

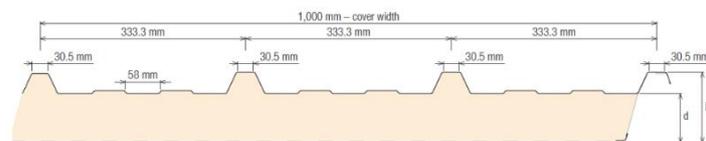


Abb. 5-21 Geometrie des Sandwichelementes

Stärke:  $t = 80\text{ mm}$

Deckschichtdicken: Standardblechdicke außen 0,50 mm.

Standardblechdicke innen 0,40 mm.

Dämmkern: Polyurethan Hartschaum.

Elastizitätsmodul (für 80mm dicke Element): 3,8MPa

## Bemessung der dünnwandigen Profile

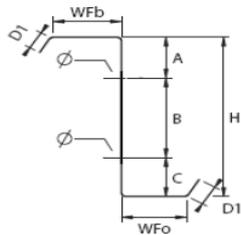
### 2. Kernwerkstoff

Elementdicke D	25 mm	40 mm	50 bis 60 mm	80 mm	120 mm	200 mm
Rohdichte der Kernschicht [kg/m <sup>3</sup> ]	40	40	40	40	40	40
Schubmodul: $G_c$ [MPa]	5,6	4,0	4,0	4,0	3,3	3,1
Schubfestigkeit: $f_{c_v}$ [MPa]						
(kurzzeit)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,12	0,12
(langzeit)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	
Druckfestigkeit $f_{c_c}$ [MPa]	0,17	0,12	0,12	0,12	0,08	0,11
Zugfestigkeit $f_{c_t}$ [MPa]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
Kriechfaktoren						
$\varphi_{2.000}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
$\varphi_{100.000}$	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	
Elastizitätsmodul $E_c$ [MPa]	3,8	2,8	3,8	3,8	2,8	3,3

Abb. 5-22 Kerschäum des Hartschaumpanels KS1000RW - Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung DIBt [11]

### Pfette:

Die Firma „Sab-profile“ bietet in ihrem Katalog die Nenngrößen für die Querschnitte. Daneben findet man hier auch Informationen über das Montagesystem sowie Belastungstabellen. Nenngrößen aus dem Katalog:



#### Z-Pfetten

Typ	Aufmaß Profil (mm)				Aufmaß Steg (mm)			Löcher
	H	WFb	WFO	D1	A	B	C	
SAB Z-300	300	75	70	20	61	180	59	18

Abb. 5-23 Querschnittsgeometrie im Katalog von Sab-Profile

Daneben sind die Darstellungen der Profile von Firma „Sab-profile“ im dwg Format auch auf ihrer Homepage erhältlich. Die Tabellenwerte unterschieden sich geringfügig von den Abmessungen in den Zeichnungen.

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Laut den Geometriebezeichnungen im EC gilt folgende Geometrie:

$$a = w_{Fa} = 76,46\text{mm}$$

$$b = w_{Fb} = 71,46\text{mm}$$

$$c = D_1 = 21,48\text{mm}$$

$$h = 300\text{mm}$$

$$t_n = 3\text{mm}$$

$$r = 3\text{mm}$$

$$\alpha_1 = 120^\circ$$

$$\alpha_2 = 90^\circ$$

Nominelle Blechdicke:

$$t = t_n - 0,04 = 2,96\text{mm}$$

Material:

$$f_y = 350\text{N/mm}^2$$

$$f_u = 420\text{N/mm}^2$$

$$E = 210.000\text{N/mm}^2$$

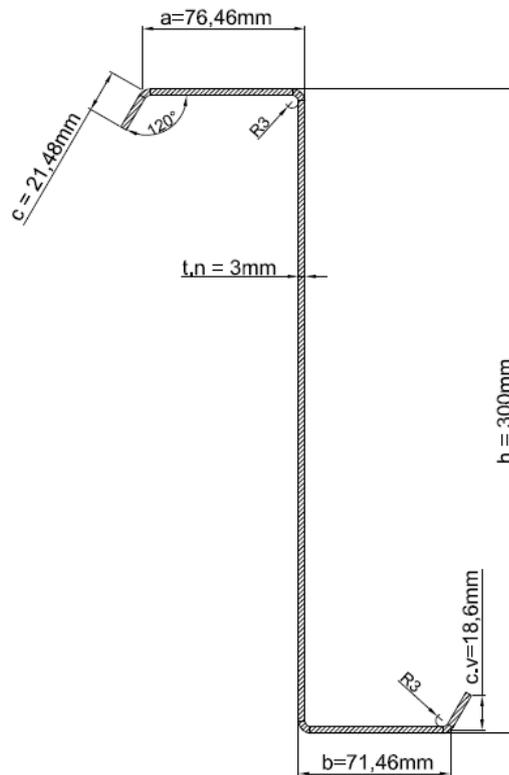


Abb. 5-24 Querschnittsgeometrie SAB Z 300/3

### 5.3.2 Ermittlung der Querschnittswerte des Bruttoquerschnittes (= Idealisierter Querschnitt)

#### Überprüfung der allgemeinen Vorgabe

*Geometrische Bedingungen*

$$0,2 < \frac{c}{a} = \frac{21,48}{76,46} = 0,27 < 0,6$$

$$\frac{h_c}{t} = \frac{299,96}{2,96} = 101,3 < 500$$

→ Die Bedingungen sind erfüllt, somit sind die Lippen in der Berechnung als Randsteifen berücksichtigt.

*Eckausrundungen:*

$$r = 3\text{mm} < 5 * t = 5 * 2,96 = 14,8\text{mm}$$

$$r = 3\text{mm} < 0,1 * b_p = 0,1 * 71,46\text{mm} = 7,15\text{mm}$$

→ Bedingungen sind erfüllt, ausgerundete Ecken bei Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit dürfen vernachlässigt werden. Bei der Ermittlung von Querschnittssteifigkeiten sind sie dagegen immer zu berücksichtigen.





## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.3.3.1 Ermittlung der Steifigkeit $K_A$

Die Ermittlung von  $K_A$  erfolgt anhand der Berechnungsformel

$$\frac{1}{K_A} = \frac{h^2}{C_D}$$

$C_D$  – Drehfedersteifigkeit kann mithilfe von  $C_{D,A}$  (der Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung zwischen Profilblech und Pfette) und  $C_{D,C}$  (der Biegesteifigkeit des Profilbleches) berechnet werden.

$$C_D = \frac{1}{\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}}$$

Die Ermittlung von  $C_{D,A}$  (Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung zwischen Profilblech und Pfette) erfolgt mithilfe des Anwendungsprogramms der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe (HT).

Mit den getroffenen Angaben ergibt sich laut Berechnung eine zu große Verdrehung, was aufgrund plastischer Deformationen im Anschlussbereich zu Undichtigkeiten führt. Es wäre entweder ein größerer Elastizitätsmodul nötig (etwa  $E=4,7\text{MPa}$ ) oder eine durch Verminderung des Pfettenabstandes geringere Belastung (beispielweise  $4,5\text{kN/m}$ ).

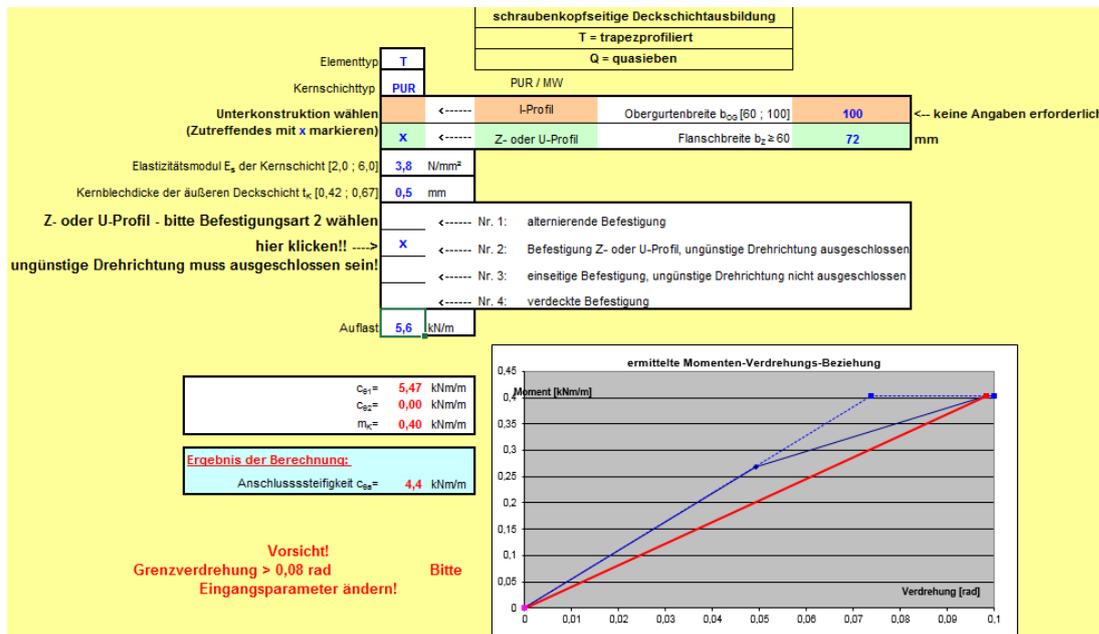


Abb. 5-28 Berechnung der Anschlusssteifigkeit anhand Berechnungsprogramm

$$C_{D,A} = 4,4 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} = 4400 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}}$$

Bestimmung  $C_{D,C}$ : Biegesteifigkeit des Profilbleches laut EN 1993-1-3 [6]:

$$C_{D,C} = \frac{k * E * I_{eff}}{s}$$

Für Sandwichelemente bietet die Norm keine weitere Formel.

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Bei Sandwichelementen setzt sich die Biegesteifigkeit aus der Biegesteifigkeit der Decksichten und der Biegesteifigkeit des Hartschaums zusammen, der Querschnitt eines Sandwichelements ist voll wirksam.

Koeffizient k: berücksichtigt Endfeld + Verdrehungsform

$$k = 3$$

Pfettenabstand:  $s = 2,2m$

Hartschaumkernstoff:

$$E = 3,8Mpa = 3,8 \frac{N}{mm^2}$$

Die Querschnittsdaten werden für 1m Breite berechnet:

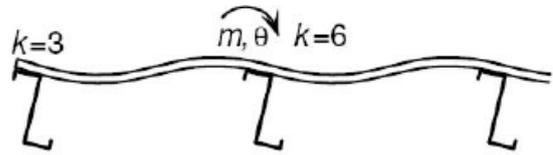


Abb. 5-29 Koeffizient „k“ [6]

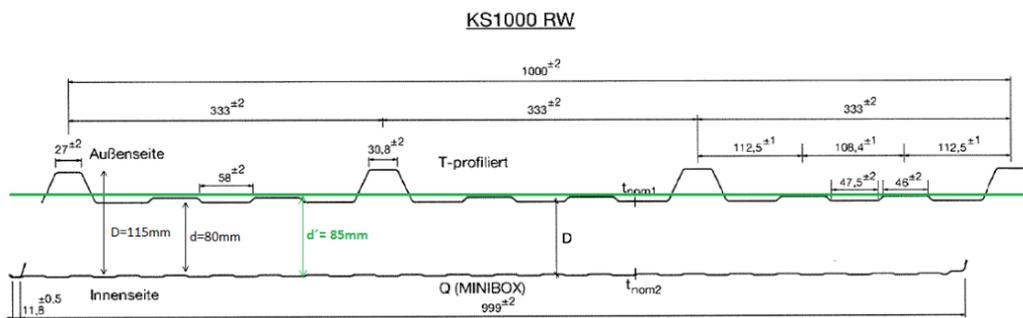


Abb. 5-30 Geometrische Größen der Sandwichelement

Flächenträgheitsmoment des Kerns (vereinfachte Berechnung):

Fläche einer Sicke:

$$A = \frac{(30,8 + 63)}{2} * 35 = 1641,5mm^2$$

Innerhalb eines Meter befinden sich drei Sicken; damit ist die vergrößerte Stärke für die vereinfachte Berechnung :

$$t = 80mm + \frac{3 * 1641,5mm^2}{1000mm} = 84,93mm$$

$$I_{eff} = \frac{84,9^3 * 1000}{12} = 51.180.000mm^4/m$$

$$C_{D,c}^{Kern} = \frac{3 * 3,8 * 51.180}{2200} = 265 \frac{Nmm}{mm} = 0,265 \frac{kNm}{m}$$

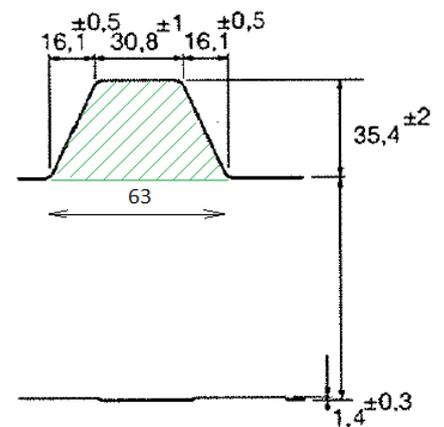


Abb. 5-31 Fläche einer Sicke

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Stahldeckbleche:

Obere Decksicht: Querschnittswerte für 1m Breite (mithilfe der Software SCIA berechnet):

$$t = 0,5\text{mm}$$

$$I_y = 8.045\text{mm}^4$$

$$A = 568\text{mm}^2$$

$$E = 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

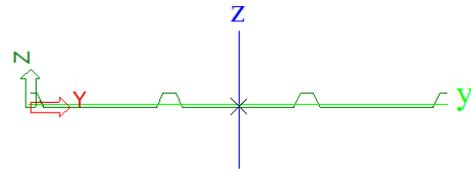


Abb. 5-32 Obere Decksicht

Untere Decksicht: Querschnittsdaten für 1m Breite:

$$t = 0,4\text{mm}$$

$$I_y = \frac{0,4^3 * 1000}{12} = 5,33\text{mm}^4$$

$$A = 0,4 * 1000 = 400\text{mm}^2$$

Somit: Flächenträgheitsmoment der Deckblechen:

$$I_{eff} = 8.045 + 568 * 43^2 + 5.330 + 400 * 43^2 = 1.870.000\text{mm}^4/1000\text{mm}$$

$$C_{D,C}^{Decksichten} = \frac{3 * 210\ 000 * 1.870}{2200} = 535.500 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}} = 535,5 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$C_{D,C} = 0,265 + 535,5 = 353,7 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$C_D = \frac{1}{\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}} = \frac{1}{\frac{1}{4,4} + \frac{1}{353,7}} = 4,34 \frac{\text{kNm}}{\text{m}} = 4340 \frac{\text{Nmm}}{\text{mm}}$$

Somit ergibt sich der Wert der Anschlusssteifigkeit zu:

$$\frac{1}{K_A} = \frac{h^2}{C_D} = \frac{300^2}{4340} = 20,73\text{mm} * \frac{\text{mm}}{\text{N}}$$

### 5.3.3.2 Ermittlung $K_B$ - Steifigkeit der Pfette aus elastischer Profilverformung des Steges

$$\frac{1}{K_B} = \frac{4 * (1 - \nu^2) * h^2 * (h_d + e)}{E * t^3}$$

Im Fall von Auflast:

$$e = \frac{1}{2} * b = \frac{1}{2} * 76,46\text{mm} = 38,23\text{mm}$$

$$\frac{1}{K_B} = \frac{4 * (1 - 0,3^2) * 300^2 * (300 + 38,23)}{210000 * 2,96^3} = 24,57\text{mm} * \frac{\text{mm}}{\text{N}}$$

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.3.3.3 Steifigkeit der horizontalen Wegfeder am freien Gurtrand:

$$K = \frac{1}{24,57 + 20,73} = 0,022 \frac{N}{mm^2}$$

### 5.3.4 Ermittlung des effektiven Querschnittes – Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens und der Forminstabilität

#### 5.3.4.1 Effektiver Querschnitt unter Biegebeanspruchung

Maximales Biegemoment des Randfeldes:  $M_y = 34,8kNm$

$$W_{gr} = \frac{I_y}{(152 - 1,5)} = \frac{17.522.000}{150,5} = 116.400mm^3$$

Maßgebende Druckspannung am Gurt:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_y}{W_{gr}} = \frac{34.800.000Nmm}{116.400mm^3} = 298,9 \frac{N}{mm^2}$$

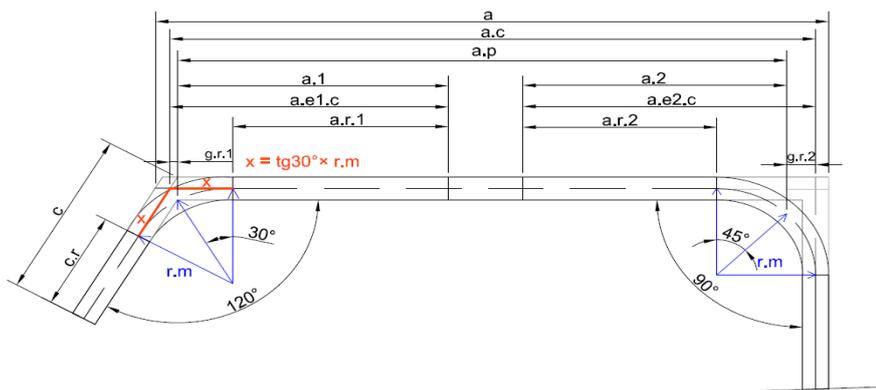


Abb. 5-33 Berechnung der Effektiven Breiten den Querschnittsteilen

ANM. In Abb. 5-33 wurde nicht das Ergebnis der Berechnung dargestellt. Es ist eine schematische Darstellung eines nicht vollwirksamen Gurts, zum besseren Verständnis des Berechnungsablaufs. In diesem Fall fällt der mittlere Teil des Gurtes bei der Ermittlung des effektiven Querschnittes aus.

a) Berücksichtigung lokalen Beulens des Druckgurtes „A“:

$$a_p = a_c - g_{r1} - g_{r2} = 73,27 - 0,35 - 1,3 = 71,62mm$$

Beidseitig gestützte Platte. EN 1993-1-5 Tab. 4.1

$$\psi=1,0; k_\sigma=4,0,$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{a_c/t}{28,4 * \epsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{73,27/2,96}{28,4 * 0,819 * \sqrt{4}} = 0,53$$

$$\bar{\lambda}_{p,rep} = \bar{\lambda}_p * \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y}} = 0,53 * \sqrt{\frac{263,7}{350}} = 0,46 < 0,673$$

→  $\rho = 1$  Der Gurt ist voll wirksam

## Bemessung der dünnwandigen Profile

$$a_{eff} = \rho * a_p = 1,0 * 71,62 = 71,62mm$$

$$a_{e,1} = a_{e,2} = \frac{a_{eff}}{2} = \frac{71,62}{2} = 35,81mm$$

Die Teilflächen des Gurtes ergeben sich damit zu:

$$a_{e1,c} = a_{e,1} + g_{r,1} = 35,81 + 0,35 = 36,16mm$$

$$a_{e2,c} = a_{e,2} + g_{r,2} = 35,81 + 1,3 = 37,11mm$$

$$a_{r,1} = a_{e1,c} - \tan \frac{\phi}{2} * r_m = 36,16 - \tan \frac{60^\circ}{2} * 4,48 = 33,57mm$$

$$a_{r,2} = a_{e2,c} - r_m = 37,11 - 4,48 = 32,62mm$$

$$a_p = a_c - g_{r,1} - g_{r,2} = 68,27 - 0,35 - 1,3 = 66,62mm$$

ANM. Der effektive Querschnitt des Gurtes B wird nicht ermittelt. Gurt A ist bei größerer Schlankheit unter der gleichen Druckbeanspruchung voll wirksam, somit ist Gurt B zwangsläufig auch voll wirksam.

b) Berücksichtigung lokalen Beulens des Stegbleches

$$h_w = h_c - 2 * g_{r,2} = 297,04 - 2 * 1,3 = 294,44mm$$

Beidseitig gestützte Platte. EN 1993-1-5/Tab. 4.1

$$\psi = \frac{-148}{152} = -0,97$$

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29 * \psi + 9,78 * \psi^2 = 7,81 - 6,29 * (-0,97) + 9,78 * (-0,97)^2 = 23,11$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{h_w/t}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{294,44/2,96}{28,4 * 0,819 * \sqrt{23,11}} = 0,88$$

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_{p,rep} &= \bar{\lambda}_p * \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y}} = 0,88 * \sqrt{\frac{263,7}{350}} = 0,76 < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 * (-0,97)} \\ &= 0,87 \end{aligned}$$

$\rho = 1,0$ , Steg ist somit voll wirksam.

$$h_{eff} = 294,44mm$$

$$h_e = h_{eff} + 2 * g_r = 294,44 + 2 * 1,3 = 297,04mm$$

$$h_{er} = h_e - 2 * r_m = 297,04 - 2 * 4,48 = 288,1mm$$

c) Berücksichtigung lokalen Beulens der Lippe

$$c_p = c_c - g_{r,1} = 19,77 - 0,35 = 19,42mm$$

Lokales Ausbeulen der Lippe (einseitig gestützte Platte):

$$\frac{c_c}{b_c} = \frac{19,77}{68,27} = 0,289 \leq 0,35 \quad \rightarrow k_\sigma = 0,5$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{19,75}{2,96}}{28,4 * 0,819 * \sqrt{0,5}} = 0,4 \leq 0,748$$

## Bemessung der dünnwandigen Profile

→  $\rho = 1$  Lippe ist voll wirksam

$$c_{eff} = c_e = c_p * \rho = 19,42 * 1,0 = 19,42 \text{ mm}$$

$$c_{e,c} = c_e + g_r = 19,42 + 0,35 = 19,77 \text{ mm}$$

$$c_r = c_{e,c} - \tan \frac{\phi}{2} * r_m = 19,77 - \tan \frac{60^\circ}{2} * 4,48 = 17,2 \text{ mm}$$

d) Biegeknicken der Randsteife; Berücksichtigung Forminstabilität:

Geometrie und Querschnittsdaten der Randsteife:

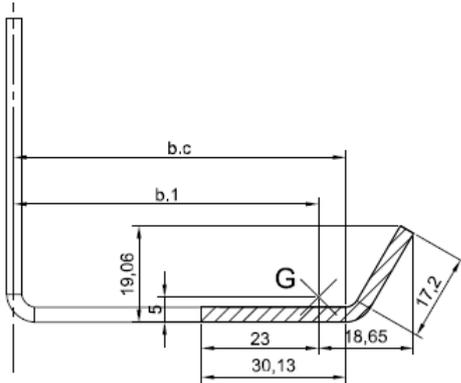


Abb. 5-34 Randsteife – Gurt B

Schwerpunktabstände:  $z_G = 5 \text{ mm}$ ,  $y_G = 23 \text{ mm}$

Fläche:  $A_S = 146,8 \text{ mm}^2$

Trägheitsmoment:  $I_S = 3916 \text{ mm}^4$

Wirksamer Querschnitt der Randsteife

Federsteifigkeit für die Randsteife (unter Berücksichtigung des biegebeanspruchten Gesamtquerschnitts):

$$b_1 = b - y_G = b_c - (30,13 - 23) = 68,27 - (30,13 - 23) = 60,28 \text{ mm}$$

$$K_1 = \frac{E * t^3}{4 * (1 - \nu^2) * b_1^2 * (b_1 + h_d)} = \frac{210000 * 2,96^3}{4 * (1 - 0,4^2) * 60,28^2 * (60,28 + 300)} = 1,24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Kritische Verzweigungsspannung für das Biegeknicken der Randversteifung:

$$\sigma_{cr} = \frac{2 * \sqrt{K_1 * E * I_S}}{A_S} = \frac{2 * \sqrt{1,24 * 210000 * 3916}}{146,8} = 435,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bezogener Biegeknickschlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{350}{435,1}} = 0,9$$

Abminderungsfaktor für das Biegeknicken der Randsteife:

$$0,65 < \bar{\lambda}_p < 1,38 \rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723 * \bar{\lambda}_p = 1,47 - 0,723 * 0,9 = 0,82$$

Wirksame Dicke der Randsteife:

$$t_{red} = \chi_d * t * \frac{f_{yb}}{\sigma_{com,Ed} * \gamma_{M0}} = 0,82 * 2,96 * \frac{350}{268,8 * 1,0} = 3,16 \text{ mm}$$

→ Die Steife ist voll wirksam.

## Bemessung der dünnwandigen Profile

*Wirksamer Querschnitt für die Pfette unter Biegebeanspruchung:*

Der gesamte Pfettenquerschnitt ist voll wirksam unter Biegebeanspruchung.

e) Effektiver Querschnitt der Pfette unter Biegung:

in diesem Fall gleich wie Bruttoquerschnitt

Fläche:  $A = 1390\text{mm}^2$

Schwerpunktstand:  $z_{s,z} = 148\text{mm}$

Trägheitsmoment:  $I_y = 1752,4\text{cm}^4$

Deviationsmoment:  $I_{yz} = 332,4\text{cm}^4$

Widerstandsmoment:  $W_y = 115,58\text{cm}^3$

Schubmittelpunkt:  $e_{s,z} = 13\text{mm}$

$e_{s,y} = 1,2\text{mm}$

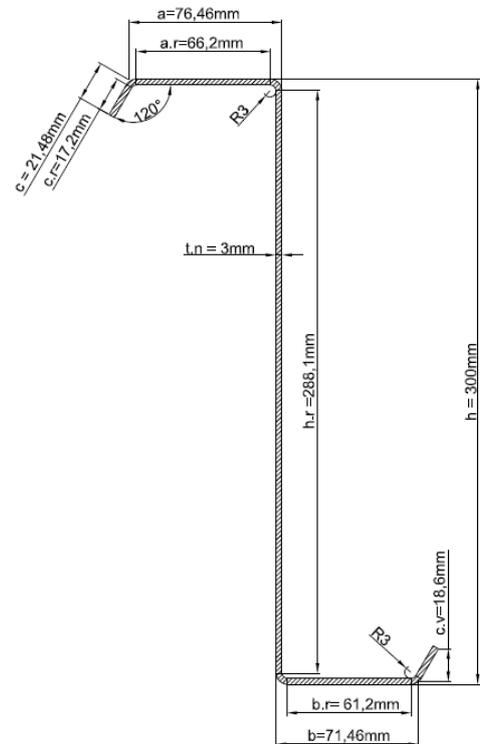


Abb. 5-35 Effektive Querschnitt der Pfette unter Biegung

### 5.3.4.2 Effektiver Querschnitt unter Normalbeanspruchung

Im aktuellen Belastungsfall und statischem System ist es keine Normalbelastung der Pfette vorhanden.

### 5.3.5 GZT- Grenztragfähigkeit der Pfette unter Biegebeanspruchung im Randbereich

#### 5.3.5.1 Ermittlung des Querbiegemomentes aus der seitlichen Beanspruchung des freien Gurtes

Äquivalente Horizontalbelastung zur Berücksichtigung der Torsionsbeanspruchung

$$q_{h,Ed} = k_h * q_{Ed}$$

Äquivalenzfaktor- laut Bild 10.3 in [6]:

Belastung durch den Schubmittelpunkt	Belastung: Auflast
$k_{h0} = \frac{I_{yz}}{I_y} \frac{g_s}{h}$	$e/h$

Abb. 5-36 Bestimmung des Faktors  $k_h$  [6]

## Bemessung der dünnwandigen Profile

$$k_{h0} = \frac{I_{yz}}{I_y} * \frac{g_s}{h} = \frac{332,4}{1752,2} * \frac{13,5}{30} = 0,085$$

$$k_h = k_{h0} + \frac{e}{h} = 0,085 + \frac{0,15}{30} = 0,09$$

Äquivalente seitliche Belastung:  $q_{h,Ed} = k_h * q_{Ed} = 0,09 * 5,7 = 0,513 \text{ kN/m}$

Federkennwert:

$$R = \frac{K * L_a^4}{\pi^4 * E * I_{fg,z}} = \frac{0,022 * 8.400^4}{\pi^4 * 210.000 * 32.1600} = 16,64 < 40$$

Korrekturbeiwert der Querbiegemoment:

$K_R$  wird berechnet laut EN 1993-1-3/Tabelle 10.1, Biegemoment in der Feldmitte im Endfeld des Durchlaufträgers [6].

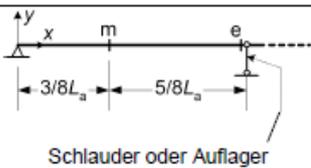
System	Schnittstelle	$M_{0,fz,Ed}$	$K_R$
 <p style="text-align: center;">Schlauder oder Auflager</p>	m	$\frac{9}{128} q_{h,Ed} L_a^2$	$K_R = \frac{1 - 0,0141R}{1 + 0,416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$K_R = \frac{1 + 0,0314R}{1 + 0,396R}$

Abb. 5-37 Ermittlung der Ausgangswerte des Querbiegemoments und Korrekturbeiwert  $K_R$  in einem Randfeld [6]

$$K_R = \frac{1 - 0,0141 * R}{1 + 0,416 * R} = \frac{1 - 0,0141 * 16,64}{1 + 0,416 * 16,64} = 0,097$$

Ausgangswert für das Querbiegemoment:

$$M_{0,fz,Ed} = \frac{9}{128} * q_{h,Ed} * L_a^2 = \frac{9}{128} * 0,513 * 8.400^2 = 2.545.000 \text{ Nmm} = 2,545 \text{ kNm}$$

Querbiegemoment:

$$M_{fz,Ed} = K_R * M_{0,fz,Ed} = 0,097 * 2.545.000 \text{ Nmm} = 247.000 \text{ Nmm} = 0,247 \text{ kNm}$$

### 5.3.5.2 Knickbeanspruchbarkeit des freien Gurtes

Knicklänge des Druckstabs: (bei Auflast)

$$L_{fz} = \eta_1 * L_a * (1 + \eta_2 * R^{\eta_3})^{\eta_4} = 0,414 * 8.400 * (1 + 1,72 * 16,64^{1,11})^{-0,178} = 1803,5 \text{ mm}$$

Koeffizienten  $\eta_1$  bis  $\eta_4$  laut [6]/Tab. 10.2a:

Situation	Anzahl Schlaudern	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$
Endfeld	0	0.414	1.72	1.11	-0.178
Innenfeld		0.657	8.17	2.22	-0.107

Abb. 5-38- Beiwerten  $\eta$  bei Auflast in [6]

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Bezugsschlankheit:

$$\lambda_1 = \pi * \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,5} = \pi * \left(\frac{210.000}{350}\right)^{0,5} = 76,95$$

Bezogener Knickschlankheitsgrad des Druckstabes:

$$\bar{\lambda}_{fz} = \frac{L_{fz}}{i_{fz}} * \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1803,5}{28} * \frac{1}{76,95} = 0,84$$

Knickspannungslinie „b“ ( $\alpha_{LT} = 0,34$ )

$$\lambda_{LT,0} = 0,4$$

$$\beta = 0,75$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_{fz} = 0,84$$

$$\begin{aligned} \phi_{LT} &= 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \\ &= 0,5 * [1 + 0,34 * (0,84 - 0,4) + 0,75 * 0,84^2] = 0,84 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,84 + \sqrt{0,84^2 - 0,75 * 0,84^2}} = 0,79$$

Nachweis der Grenztragfähigkeit der Pfette unter Biegebeanspruchung:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} * \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = \frac{1}{0,79} * \frac{34.800.000}{115.580,0} + \frac{245.131}{6065,8} = 422 \frac{N}{mm^2} > \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}} = 350 \frac{N}{mm^2}$$

Nachweis nicht erfüllt, 20 % Überschreitung, auf die Berechnung für die weiteren Stellen der Pfette wird daher verzichtet. (Siehe Abb. 5.16)

### 5.3.6 GZT- Grenztragfähigkeit der Pfette unter Schubbeanspruchung

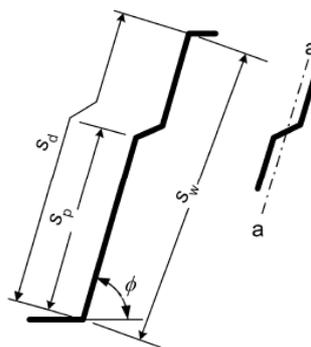


Abb. 5-39 Geometrische Größen des Stegs [6]

Der Steg hat keine Aussteifung, somit ist der bezogene Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 * \frac{s_w}{t} * \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} = 0,346 * \frac{294,4}{2,96} * \sqrt{\frac{350}{210000}} = 1,4$$

Wobei:

$s_w$  – Steglänge, wie in der Abb. 5 – 39 dargestellt

Der Steg ist am Auflager nicht ausgesteift, so ergibt sich die Schubbeulfestigkeit:

$$f_{bv} = \frac{0,67 * f_{yb}}{\bar{\lambda}_w^2} = \frac{0,67 * 350}{1,4^2} = 118,8$$

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} * t * f_{bv}}{\gamma_{M0}} = \frac{294,4}{\sin 90^\circ} * 2,96 * 118,8}{1,1} = 94.113,8N = 94,13kN \gg V_{b,Ed} = 28,5kN$$

Nachweis ist erfüllt.

### 5.3.7 GZG – Durchbiegung der Pfette

Die Regelungen zu den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit nach EN 1993-1-1, Abschnitt 7, gelten auch für kaltgeformte, dünnwandige Bauteile und Bleche. Bei Berechnungen zur Gebrauchstauglichkeit kaltgeformter, dünnwandiger Bauteile sollen bei allen Blechen die wirksame Querschnittswerte angewendet werden. Die wirksamen Querschnittswerte sind im Abschnitt 5.3.4 ermittelt, der Querschnitt ist voll wirksam.

$$u_z = 42,3mm \approx \frac{L}{200} = \frac{8400}{200} = 42mm \quad \text{Nachweis ist erfüllt.}$$

Siehe auch Abb. 5-20!

## 5.4 Ermittlung des optimalen Querschnitts der Pfette

In der originalen Hallenstatik wurde die Bemessung der Pfette ohne Berücksichtigung der Flanschstreben durchgeführt. In dem vorliegenden Abschnitt werden zwei Fragestellungen behandelt. Einerseits soll herausgefunden werden, ob die in der Musterstatik angenommene Vereinfachung auf der sicheren Seite liegt, andererseits ob die Pfette, mit tatsächlichen statischen System bemessen, die Nachweise auch mit einem kleinerem Querschnitt erfüllen kann. Dabei wird die Pfette mit allen drei Gestaltungsvarianten des Flanschstreben – Neigungswinkels von 30°, 45° und 60° - bemessen. Die Nachweise werden hier nur schematisch dargestellt, die Berechnung erfolgt wie im Abschnitt 5.3.

*ANM. An der Halle ist in den Eckbereichen keine mit Flanschstreben ausgesteifte Pfette vorhanden. Die Annahme wurde hier getroffen, um einen solchen Belastungsfall nachzuweisen.*

### 5.4.1 Ermittlung des optimalen Querschnitts des Ausgangssystems - ohne Flanschstreben: Schrag Z 300/3,5:

#### 5.4.1.1 Allgemeine Vorgaben

##### 5.4.1.1.1 Statisches System

Siehe Abschnitt 5.3.1.1

##### 5.4.1.1.2 Belastung

Siehe Abschnitt 5.3.1.2

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.1.1.3 Schnittgrößen

Siehe Abschnitt 5.3.1.3

### 5.4.1.1.4 Durchbiegungen $u_z$

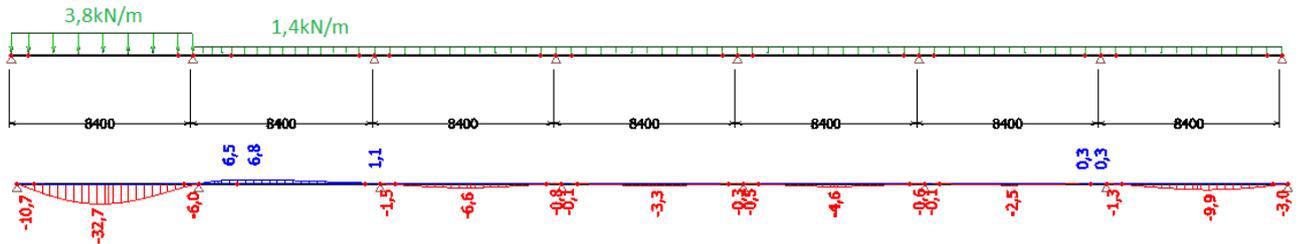


Abb. 5-40 Maßgebende Durchbiegung ( $u_z$ ) der Pfette unter feldweiser Belastung

### 5.4.1.1.5 Querschnitte

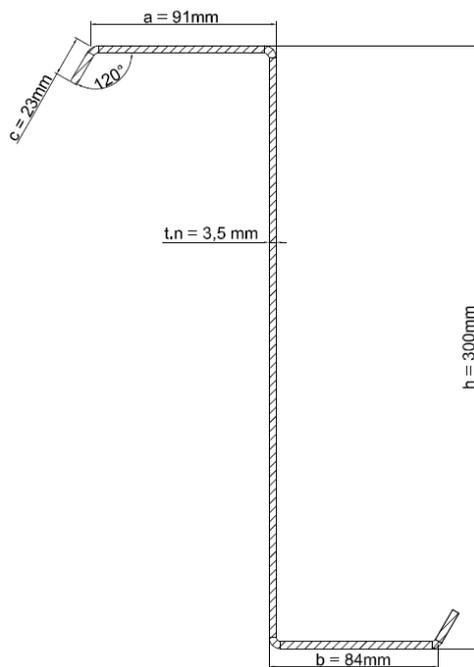
Pfette:

Firma „Schrag“ bietet in ihrem Katalog die Nenngrößen für die Querschnitte. Daneben findet man hier auch Informationen über das Montagesystem sowie Belastungstabellen.

Nenngrößen aus dem Katalog

Tab. 5-1 Querschnittsgeometrie aus dem Katalog - Schrag-Profile

Profil	Steg h [mm]	Gurt		Lippe c [mm]	Dicke t [mm]	Zuschnitt Z [mm]	Fläche A [cm <sup>2</sup> ]	Gewicht g [kg/m]	Maß		
		b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]						w <sub>1</sub> [mm]	w <sub>3</sub> [mm]	w <sub>2</sub> [mm]
Z300-35	300	91	84	23,00	3,50	500	17,50	14,00	56	190	54



Geometrische Abmessungen	
a =	91 mm
b =	84 mm
c =	23 mm
h =	300 mm
r =	3,5 mm
$\alpha_1$ =	120° mm
$\alpha_2$ =	90° mm
Nominelle Blechdicke:	
t =	3,46 mm
Material:	
$f_y$ =	350 N/mm <sup>2</sup>
$f_u$ =	420 N/mm <sup>2</sup>
E =	210.000 N/mm <sup>2</sup>

Abb. 5-41 Geometrie Pfettenprofil Schrag Z 300/3,5

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.1.2 Ermittlung der Querschnittswerte des Bruttoquerschnittes (= Idealisierter Querschnitt)

Querschnittswerte Bruttoquerschnitt:	
Fläche:	$A = 1725 \text{ mm}^2$
Schwerpunktstand:	$z_{s,z} = 146 \text{ mm}$
Trägheitsmoment:	$I_y = 2306,3 \text{ cm}^4$
Deviationsmoment:	$I_{yz} = 540 \text{ cm}^4$
Widerstandsmoment:	$W_y = 151,53 \text{ cm}^3$
Schubmittelpunkt, z:	$e_{s,z} = 15 \text{ mm}$
Schubmittelpunkt, y:	$e_{s,y} = 3 \text{ mm}$

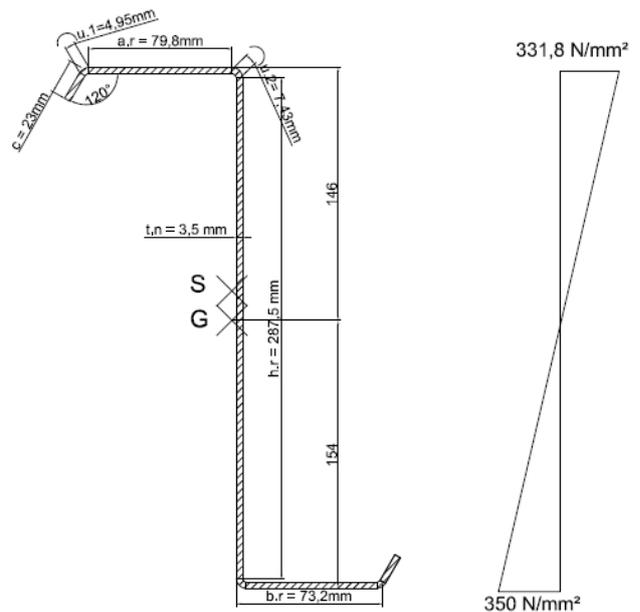
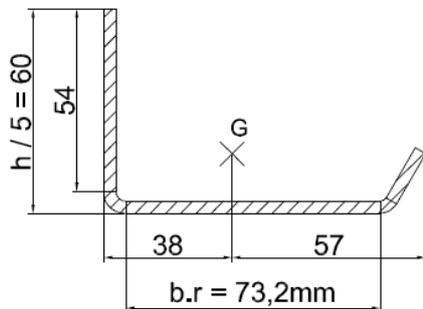


Abb. 5-42 Bruttoquerschnitt Schrag Z 300/3,5

### 5.4.1.3 Ermittlung der Federsteifigkeit der seitlichen Wegfeder



Querschnittswerte des freien Gurtes	
Fläche:	$A_{fg} = 542,4 \text{ mm}^2$
Schwerpunktstand:	$y_{G,fg} = 57 \text{ mm}$
Trägheitsmoment:	$I_{fgz} = 501720 \text{ mm}^4$
Widerstandsmoment:	$W_{fg,z} = 8802,1 \text{ mm}^3$
Trägheitsradius:	$I_{fgz} = 30 \text{ mm}$

Abb. 5-43 Querschnitt des freien Gurtes

Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung:	$C_{D,A} = 4.700,00 \text{ Nmm/mm}$
Biegesteifigkeit des Profilbleches:	$C_{D,C} = 535.500,00 \text{ Nmm/mm}$
Drehfedersteifigkeit:	$C_D = 4.640,00 \text{ Nmm/mm}$
Anschlusssteifigkeit der Verbindung Pfette- Sandwichpaneel	$1 / K_A = 19,39 \text{ mm*mm/N}$
Steifigkeit der Pfette aus elastischer Profilverformung des Steges	$1 / K_B = 20,57 \text{ mm*mm/N}$
Steifigkeit der seitlichen Wegfeder	$K = 0,03 \text{ N / mm}^2$

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.1.4 Ermittlung des effektiven Querschnittes – Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens und der Forminstabilität

- › Unter dem maximalen Feldmoment: der Querschnitt der Pfette ist voll wirksam.
- › Unter dem maximalen Stützmoment: Um die Forminstabilität korrekt zu berücksichtigen, müsste die Dicke der Randsteife rechnerisch von 3,46mm auf 3,38mm verringert werden. Die Veränderung mit 0,08mm ist sehr klein, wird vernachlässigt und es wird mit dem vollen Querschnitt weitergerechnet.

### 5.4.1.5 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Biegebeanspruchung im Randbereich

Ermittlung Äquivalenzfaktor:	
g <sub>s</sub> =	130,00 mm
e =	3,00 mm
k <sub>h0</sub> =	0,10
k <sub>h</sub> =	0,11
Äquivalente seitliche Belastung:	
q <sub>h,Ed</sub> =	0,62 kN/m

Belastung durch den Schubmittelpunkt	Belastung: Auflast
$k_{h0} = \frac{I_{yz}}{I_y} \frac{g_s}{h}$	$e/h$

System	Schnittstelle	M <sub>0,zz,Ed</sub>	κ <sub>R</sub>
<p style="text-align: center;">Schlauder oder Auflager</p>	m	$\frac{9}{128} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0141R}{1 + 0,416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0314R}{1 + 0,396R}$
<p style="text-align: center;">Schlauder oder Auflager</p>	m	$\frac{1}{24} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0125R}{1 + 0,198R}$
	e	$-\frac{1}{12} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0178R}{1 + 0,191R}$

Abb. 5-44 Ermittlung der Ausgangswerte der Querbiegemoment und Korrekturbeiwert κ<sub>R</sub> [6]

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Tab. 5-2 Ermittlung  $\sigma$  Spannungsgrößen der Pfette- ohne Flanschstreben - unter der maßgebenden Balestungen

Schrag 300/3,5	Randfeld		Innenbereich	
	Feldmoment	Stützmoment	Feldmoment	Stützmoment
$L_a$ [mm]	8.400	8.400	8.400	8.400
R	12,15	12,15	12,15	12,15
$K_R$	0,14	0,24	0,25	0,37
$M_{0,fz,Ed}$ [Nmm]	3.056.000	5.433.000	1.811.000	3.622.000
$M_{fz,Ed}$ [Nmm]	418.000	1.291.000	450.000	1.326.00
$\eta_1$	0,41	0,41	0,66	0,66
$\eta_2$	1,72	1,72	8,17	8,17
$\eta_3$	1,11	1,11	2,22	2,22
$\eta_4$	-0,18	-0,18	-0,11	-0,11
$L_{fz}$ [mm]	1.915	1.915	2.435	2.435
$\lambda_{fz}$	0,83	0,83	1,05	1,05
$\phi$	0,83	0,83	1,03	1,03
$\chi_{LT}$	0,80	0,80	0,67	0,67
$M_{y,Ed}$ [Nmm]	34.800.000	41.700.000	24.300.000	33.400.000
$N_{Ed}$ [N]	0	0	0	0
$W_{eff,y}$ [mm <sup>3</sup> ]	151.530	151.530	151.530	151.530
$A_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	1.754	1.754	1.754	1.754
$W_{fz}$ [mm <sup>3</sup> ]	8.802	8.802	8.802	8.802
$\sigma =$ [N/mm <sup>2</sup> ]	334	490	292	482

Feldbereich max Spannung:  $\sigma_{Ed}^{max} = 334 \frac{N}{mm^2} < f_y = 350 \frac{N}{mm^2}$

Stützbereich max Spannung:  $\sigma_{Ed}^{max} = 490 \frac{N}{mm^2} < 2 * f_y = 700 \frac{N}{mm^2}$

Nachweise sind erfüllt.

### 5.4.1.6 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Schubbeanspruchung

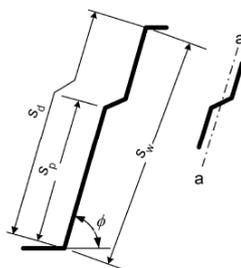


Abb. 5-45 Geometrische Größen der Steg [6]

Der Steg hat keine Aussteifung, somit ist der bezogene Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 * \frac{s_w}{t} * \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} = 0,346 * \frac{294,4}{3,46} * \sqrt{\frac{350}{210000}} = 1,2$$

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Wobei:

$s_w$  – Steglänge, wie in Abb. 5 – 45 dargestellt

Der Steg ist am Auflager nicht ausgesteift, so ergibt sich die Schubbeulfestigkeit:

$$f_{bv} = \frac{0,67 * f_{yb}}{\bar{\lambda}_w^2} = \frac{0,67 * 350}{1,2^2} = 162,8 \frac{N}{mm^2}$$

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} * t * f_{bv}}{\gamma_{M0}} = \frac{294,4}{\sin 90^\circ} * 3,46 * 162,8}{1,1} = 151.012,3N = 151kN \gg V_{b,Ed} = 28,5kN$$

Nachweis ist erfüllt.

### 5.4.1.7 GZG – Durchbiegung der Pfette

$$u_z = 32,7mm < \frac{L}{200} = \frac{8400}{200} = 42mm. \quad \text{Nachweis ist erfüllt.}$$

Siehe auch Abb. 5-40, und Abschnitt 5.3.7!

## 5.4.2 Nachweis des Bestandssystems – Flanschstrebe mit einer der Neigung von 30°

### 5.4.2.1 Allgemeine Vorgaben

#### 5.4.2.1.1 Statisches System

Ausgangssystem ist der 9- Feldträger mit 8,4m Spannweiten. In diesem System sind als zusätzliche Lagerungen die Flanschstreben mit 30° großen Neigungen auf den inneren Riegeln eingebaut, der Riegeluntergurt ist mithilfe horizontaler freier Auflager modelliert. Siehe auch Abbildungen 5-46 und 5-47.

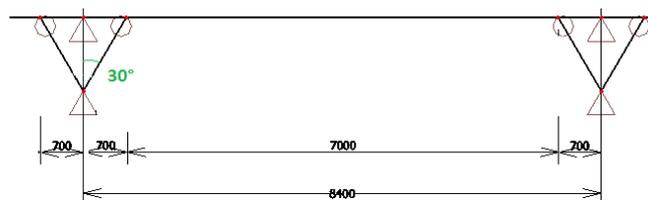


Abb. 5-46 Geometrische Größen des Systems mit 30° geneigt eingebauten Flanschstreben

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.2.1.2 Maßgebende Belastung und daraus resultierende Schnittgrößen:

Statisches System, Belastung, maßgebende Schnittgrößen:

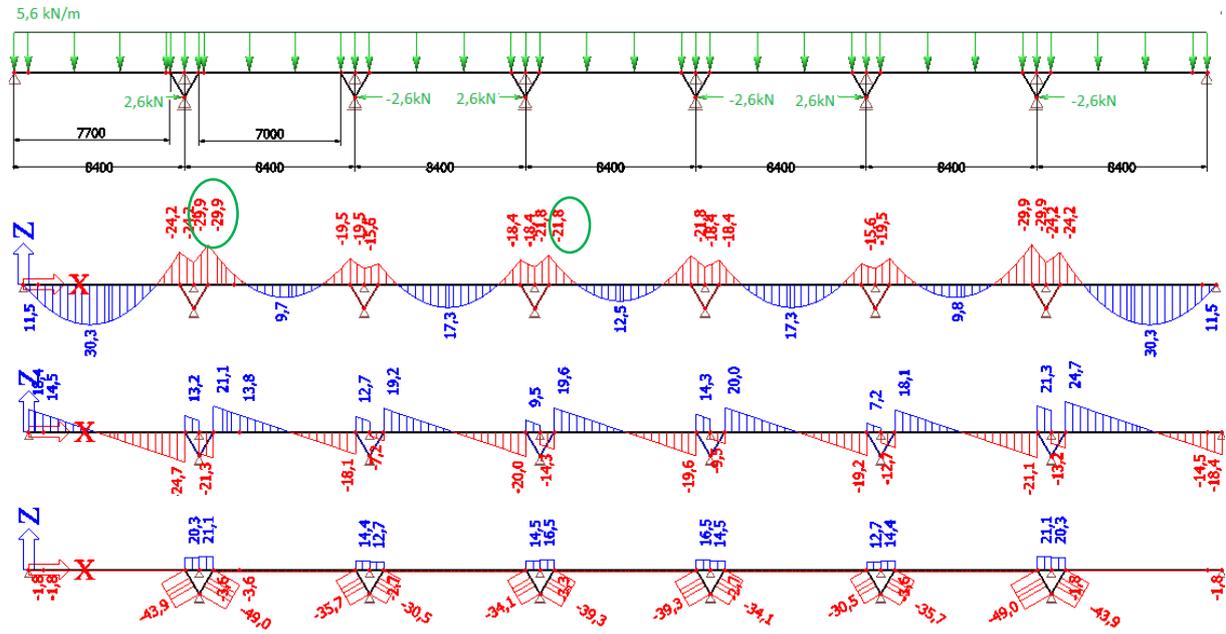


Abb. 5-47 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter 30° eingebauten Flanschstreben

Lastfallkombination – Feldweise Belastung:

a) Schnee im Randfeld:

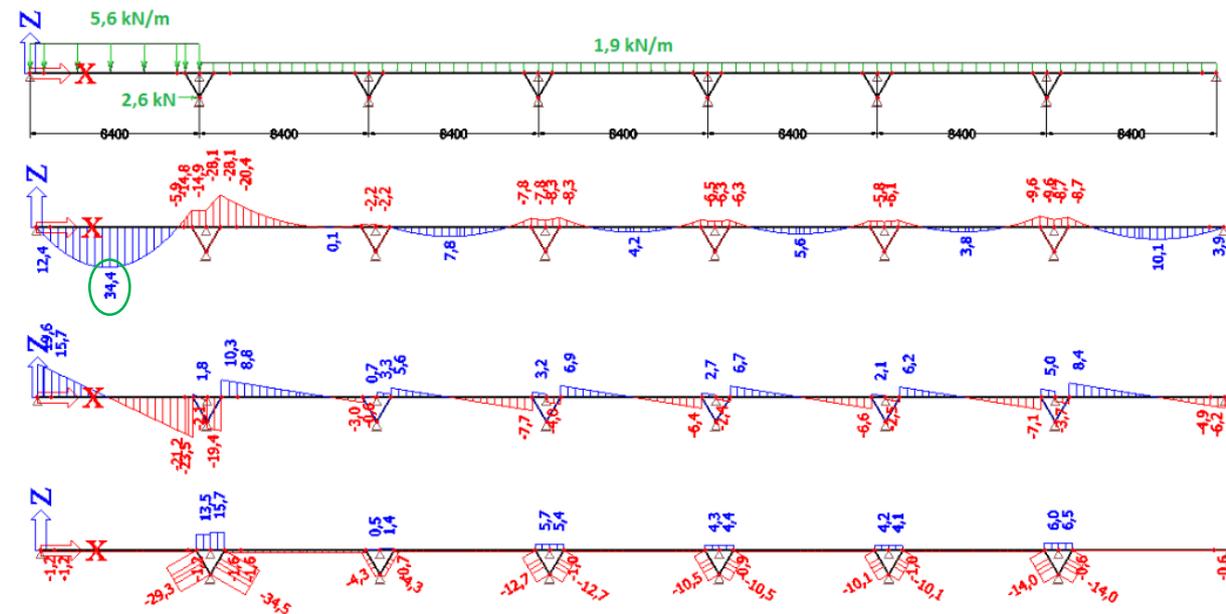


Abb. 5-48 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter 30° eingebauten Flanschstreben

## Bemessung der dünnwandigen Profile

b) Schnee im Innenbereich:

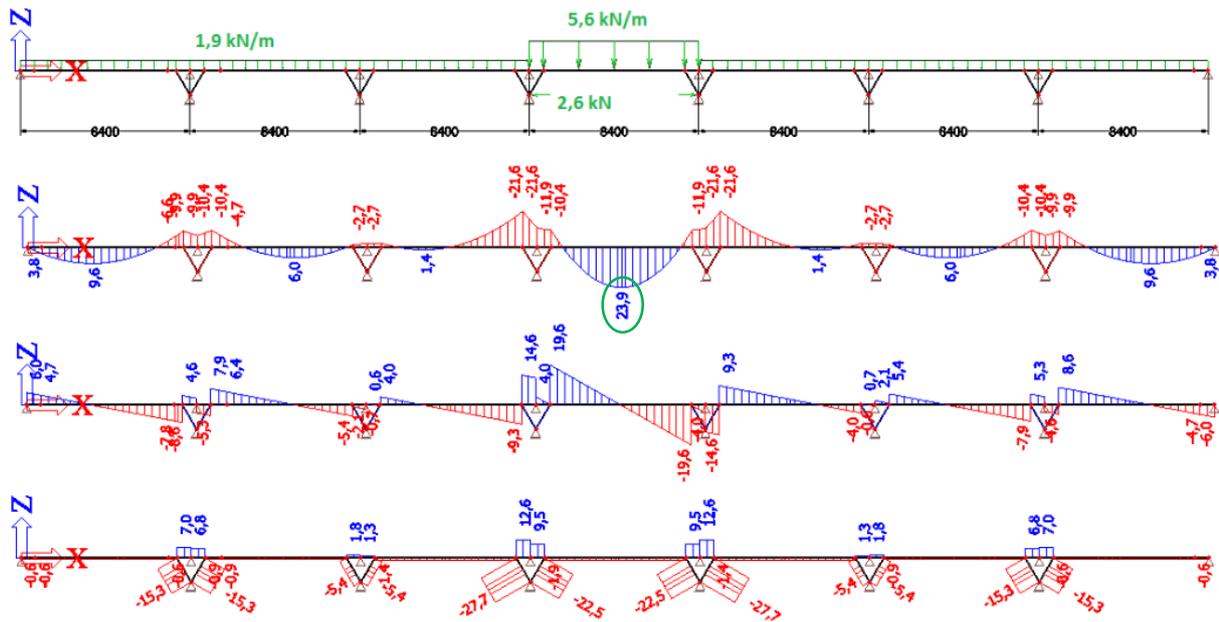


Abb. 5-49 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter  $30^\circ$  eingebauten Flanschstreben

### 5.4.2.1.3 Durchbiegung $u_z$

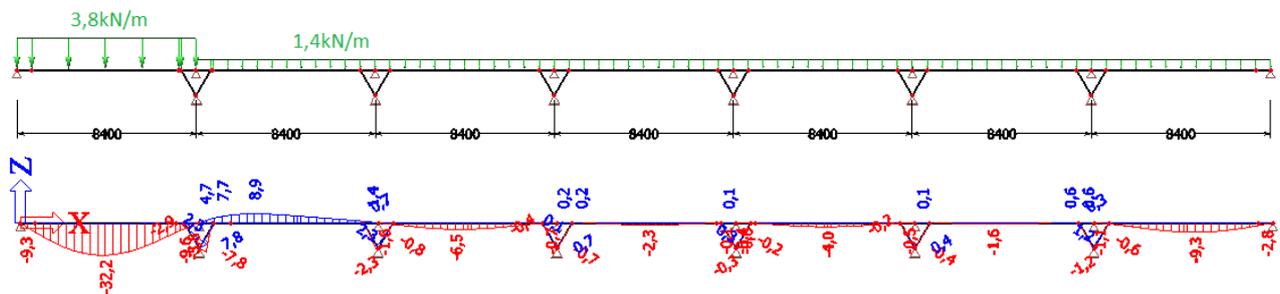


Abb. 5-50 Maßgebende Durchbiegung ( $u_z$ ) der Pfette

### 5.4.2.1.4 Querschnitte

Querschnitt der Pfette: Schrag Z 300/3,5, siehe Abschnitt 5.4.1.1.4

Weiter Querschnitte: siehe Abschnitt 5.3.1.4

### 5.4.2.2 Ermittlung der Querschnittswerte des Bruttoquerschnittes (= Idealisierter Querschnitt)

Siehe Abschnitt 5.4.1.2

### 5.4.2.3 Ermittlung der Federsteifigkeit der seitlichen Wegfeder

Siehe Abschnitt 5.4.1.3

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.2.4 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Biegebeanspruchung im Randbereich

*Tab. 5-3 Ermittlung  $\sigma$  Spannungsgrößen der Pfette- Gestaltung mit 30° geneigt eingebauten Flanschstreben - unter der maßgebenden Balastunge*

Schrag 300/3,5	Endfeld		Innenbereich	
	Feldmoment	Stützmoment	Feldmoment	Stützmoment
$L_a$ [mm]	7.700	7.000	7.000	7.000
R	8,58	5,86	5,86	5,86
$K_R$	0,19	0,36	0,43	0,52
$M_{0,fz,Ed}$ [Nmm]	2.567.000	3.773.000	1.257.000	2.515.000
$M_{fz,Ed}$ [Nmm]	494.000	1.345.000	539.000	1.310.000
$\eta_1$	0,41	0,41	0,66	0,66
$\eta_2$	1,72	1,72	8,17	8,17
$\eta_3$	1,11	1,11	2,22	2,22
$\eta_4$	-0,18	-0,18	-0,11	-0,11
$L_{fz}$ [mm]	1.875	1.829	2.412	2.412
$\lambda_{fz}$	0,81	0,79	1,05	1,05
$\varphi$	0,82	0,80	1,02	1,02
$\chi_{LT}$	0,81	0,82	0,67	0,67
$M_{y,Ed}$ [Nmm]	34.400.000	29.900.000	23.900.000	21.800.000
N [N]	1.600	3.200	3.200	3.200
$W_{eff,y}$ [mm <sup>3</sup> ]	151.530	151.530	151.530	151.530
$A_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	1.725	1.725	1.725	1.725
$W_{fz}$ [mm <sup>3</sup> ]	8.802	8.802	8.802	8.802
$\sigma =$ [N/mm <sup>2</sup> ]	337	395	299	366

Feldbereich max Spannung:  $\sigma_{Ed}^{max} = 337 \frac{N}{mm^2} < f_y = 350 \frac{N}{mm^2}$

Stützbereich max Spannung:  $\sigma_{Ed}^{max} = 395 \frac{N}{mm^2} < 2 * f_y = 700 \frac{N}{mm^2}$

Nachweise sind erfüllt.

Bei einem mit Flanschstreben ausgebildeten System müssen einige Punkte beachtet werden:

- a) Durch den Einbau der Flanschstreben verändert sich das statische System der Pfette, somit entwickelt sich ein längerer Bereich des Stützmomentes. Die Maximalwerte der Stützmomente sind zwar abgemindert im Vergleich mit der Werten des Ausgangssystems, sind aber immer noch viel zu groß um von der Pfette ohne Überlappung getragen werden zu können. (Im Überlappungsbereich befinden sich zwei Pfetten aufeinander, somit ist der doppelte Querschnitt der Pfette vorhanden). Daher muss für diese Stützmomente ein ausreichend langer Überlappungsbereich der Pfette ausgebildet werden. Über dieser Länge können die Stützmomente abgetragen werden.

Laut der Ergebnisse des Stabmodells baut sich der Momentenverlauf im Rand - Stützenbereich innerhalb einer Länge von 80 cm auf 20,4kNm ab. Somit ist  $\sigma = 320N/mm^2$  und

## Bemessung der dünnwandigen Profile

kann von dem simplen Querschnitt der Pfette auch getragen werden. Im Innen - stützenbereich erfolgt der Abbau des Biegemomentes bereits einer Überlappungslänge von 20 cm, siehe Abb. 5-51.

Somit benötigen die Pfetten eine Überlappung im Stützenbereich:

$$\text{Randbereich: } 2 * 70\text{cm} + 2 * 10\text{cm} + 80\text{cm} = 240\text{cm}$$

$$\text{Innenbereich: } 2 * 70\text{cm} + 2 * 10\text{cm} + 2 * 20\text{cm} = 200\text{cm}$$

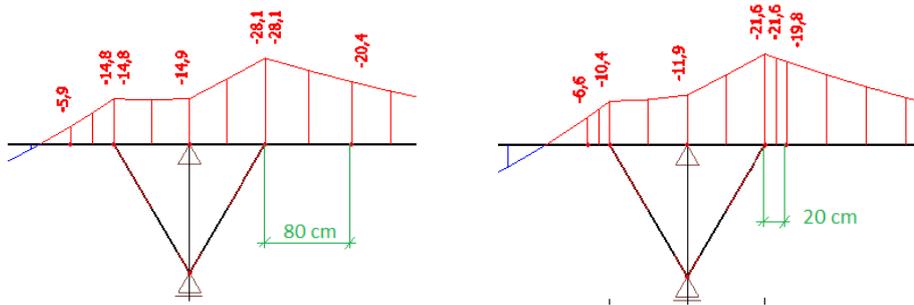


Abb. 5-51 Momentenverlauf der Pfette - Flanschstrebe mit 30° Neigung - in Stützenbereichen unter Feldweise Belastungen, bzw. die erforderlichen Überlappungsbereiche.  
links: Bereich der ersten Riegel, rechts: Bereich der inneren Riegel

- b) Bei Berücksichtigung der Normalkräfte ist bei der Bemessung Vorsicht geboten. Im Stützenbereich entwickelt sich typischerweise Zug, aber das Stützmoment wirkt auch mit der Druckbeanspruchung des Feldbereiches zusammen, somit ist bei der Berechnung die Druckbeanspruchung immer zu berücksichtigen.

### 5.4.2.5 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Schubbeanspruchung

Siehe Abschnitt 5.4.1.6:

$$V_{b,Rd} = 151\text{kN} \gg V_{b,Ed} = 28,5\text{kN} \quad \text{Nachweis ist erfüllt.}$$

### 5.4.2.6 GZG – Durchbiegung der Pfette

$$u_z = 32,2\text{mm} < \frac{L}{200} = \frac{8400}{200} = 42\text{mm} \quad \text{Nachweis ist erfüllt.}$$

Siehe auch Abb. 5.50, und Abschnitt 5.3.7!

### 5.4.3 Nachweis des Systems mit 45° - Neigungen der Flanschstreben

#### 5.4.3.1 Allgemeine Vorgaben

##### 5.4.3.1.1 Statisches System

Ausgangssystem ist der 9 - Feldträger mit 8,4m Spannweiten. In diesem System sind als zusätzliche Federlagerungen die Flanschstreben mit 45° Neigung auf den inneren Riegeln eingebaut. Der Riegeluntergurt ist mithilfe horizontaler freier Auflager modelliert. Siehe auch Abbildungen 5-52 und 5-53.

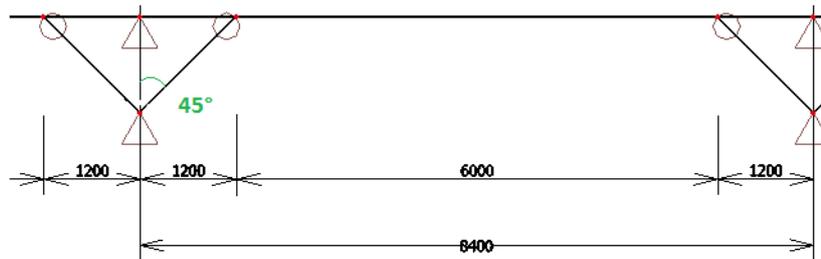


Abb. 5-52 Geometrische Größen des Systems mit 45° geneigt eingebauten Flanschstreben

##### 5.4.3.1.2 Maßgebende Belastung und daraus resultierende Querschnittsgrößen:

Statisches System, Belastung, maßgebende Schnittgrößen:

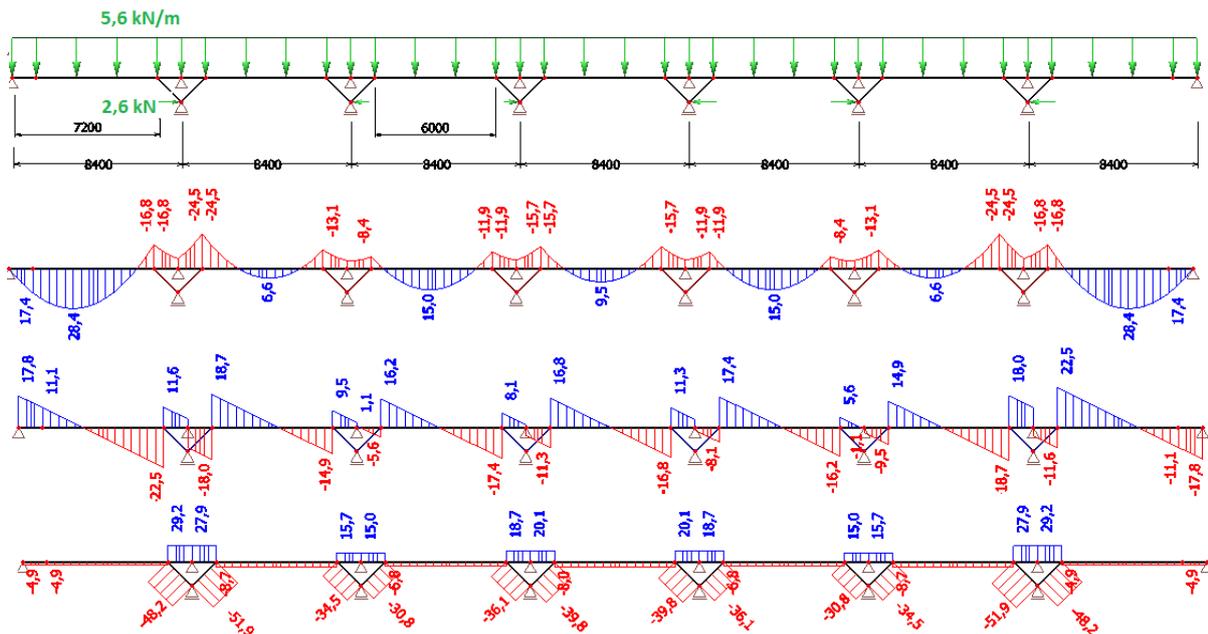


Abb. 5-53 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter 45° eingebaute Flanschstreben



## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.3.1.3 Durchbiegung $u_z$

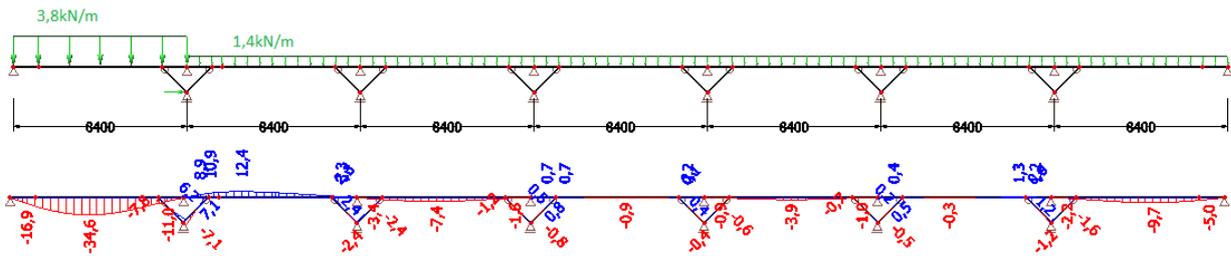


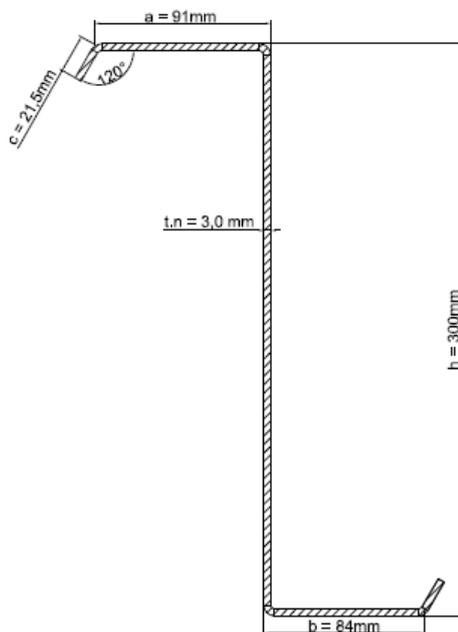
Abb. 5-56 Maßgebende Durchbiegung ( $u_z$ ) der Pfette

### 5.4.3.1.4 Querschnitten:

Pfette: Schrag Z 300/3

Tab. 5-4 Querschnittsgeometrie von Katalog von Schrag-Profilen

Profil	Steg h [mm]	Gurt		Lippe c [mm]	Dicke t [mm]	Zuschnitt Z [mm]	Fläche A [cm <sup>2</sup> ]	Gewicht g [kg/m]	Maß		
		b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]						w <sub>1</sub> [mm]	w <sub>3</sub> [mm]	w <sub>2</sub> [mm]
Z300-30	300	91	84	21,50	3,00	500	15,00	12,00	56	190	54



Geometrische Abmessungen	
a =	91 mm
b =	84 mm
c =	21,5 mm
h =	300 mm
r =	3 mm
$\alpha_1$ =	120° mm
$\alpha_2$ =	90° mm
Nominelle Blechdicke:	
t =	2,96 mm
Material:	
$f_y$ =	350 N/mm <sup>2</sup>
$f_u$ =	420 N/mm <sup>2</sup>
E =	210.000 N/mm <sup>2</sup>

Abb. 5-57 Geometrie Pfettenprofil Schrag Z 300/3,0

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.3.2 Ermittlung Querschnittswerte des Bruttoquerschnittes (= Idealisierter Querschnitt)

Querschnittswerte Bruttoquerschnitt:	
Fläche:	$A = 1.482,00 \text{ mm}^2$
Schwerpunktstand:	$z_{s,z} = 148,00 \text{ mm}$
Trägheitsmoment:	$I_y = 1.946,80 \text{ cm}^4$
Deviationsmoment:	$I_{yz} = 456,90 \text{ cm}^4$
Widerstandsmoment:	$W_y = 132,89 \text{ cm}^3$
Schubmittelpunkt:	$e_{s,z} = 15,00 \text{ mm}$
	$e_{s,y} = 1,00 \text{ mm}$

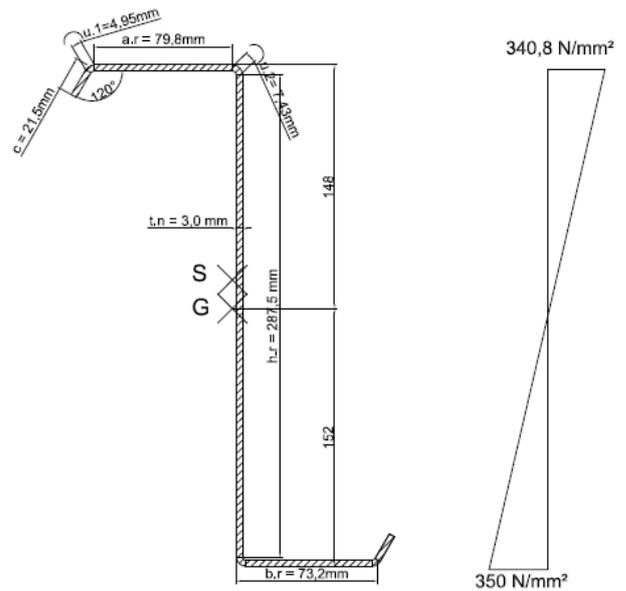


Abb. 5-58 Bruttoquerschnitt Schrag Z 300/3,0

### 5.4.3.3 Ermittlung den Federsteifigkeit der seitlichen Wegfeder

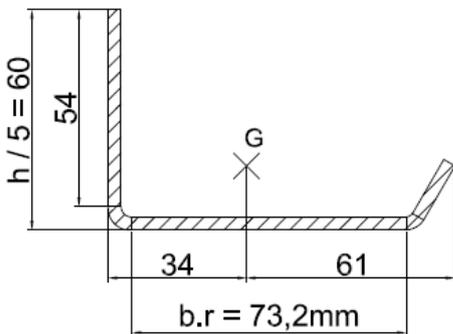


Abb. 5-59 Querschnitt des freien Gurtes

Querschnittswerte des freien Gurtes	
Fläche:	$A_{fg} = 464,0 \text{ mm}^2$
Schwerpunktstand:	$z_{G,fg} = 61,0 \text{ mm}$
Trägheitsmoment:	$I_{f,gz} = 487.000,0 \text{ mm}^4$
Widerstandsmoment:	$W_{f,gz} = 7.983,6 \text{ mm}^3$
Trägheitsradius:	$i_{f,gz} = 32,4 \text{ mm}$

Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung:	$C_{D,A} = 4.700,00 \text{ Nmm/mm}$
Biegesteifigkeit des Profilbleches:	$C_{D,C} = 535.500,00 \text{ Nmm/mm}$
Drehfedersteifigkeit:	$C_D = 4.640,00 \text{ Nmm/mm}$
Anschlusssteifigkeit der Verbindung Pfette- Sandwichpaneel	$1 / K_A = 19,39 \text{ mm}^* \text{mm/N}$
Steifigkeit der Pfette aus elastischer Profilverformung des Steges	$1 / K_B = 20,57 \text{ mm}^* \text{mm/N}$
Steifigkeit der seitlichen Wegfeder	$K = 0,025 \text{ N / mm}^2$

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.3.4 Ermittlung des effektiven Querschnittes – Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens und der Forminstabilität

Wurde nachgewiesen, Querschnitt ist unter jeder Biegemomentbelastung vollwirksam, Abmindern der Blechdicke nicht nötig.

### 5.4.3.5 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Biegebeanspruchung der Randbereich

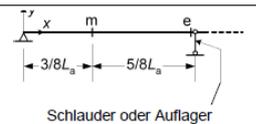
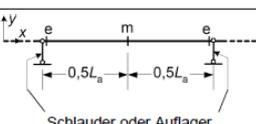
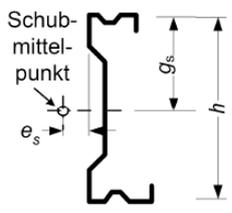
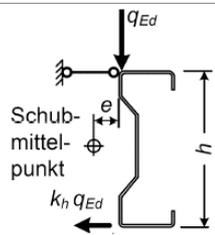
System	Schnittstelle	$M_{0,tz,Ed}$	$\kappa_R$
 Schlauder oder Auflager	m	$\frac{9}{128} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0141R}{1 + 0,416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0314R}{1 + 0,396R}$
 Schlauder oder Auflager	m	$\frac{1}{24} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0125R}{1 + 0,198R}$
	e	$-\frac{1}{12} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0178R}{1 + 0,191R}$

Abb. 5-60 Ermittlung der Ausgangswerte der Querbiegemoment und Korrekturbeiwert  $\kappa_R$  [6]

Ermittlung Äquivalenzfaktor:	
$g_s =$	133,00 mm
$e =$	1,00 mm
$k_{h0} =$	0,10
$k_h =$	0,11
Äquivalente seitliche Belastung:	
$q_{h,Ed} =$	0,60 kN/m

Belastung durch den Schubmittelpunkt	Belastung: Auflast
	
$k_{h0} = \frac{I_{yz}}{I_y} \frac{g_s}{h}$	$e/h$

## Bemessung der dünnwandigen Profile

*Tab. 5-5 Ermittlung  $\sigma$ , von Spannungsgrößen der Pfette- mit 45° geneigt eingebauten Flanschstreben - unter der maßgebenden Bauleistung*

Schrag Z 300/3 F.strebe: $\alpha = 45^\circ$	Endfeld		Innenbereich	
	Feldmo- ment	Stützmo- ment	Feldmo- ment	Stützmo- ment
$L_a$ [mm]	7.200	6.000	6.000	6.000
R	7,66	3,69	3,69	3,69
$K_R$	0,21	0,45	0,55	0,62
$M_{0,fz,Ed}$ [Nmm]	2.245.000	2.772.000	924.000	1.848.000
$M_{fz,Ed}$ [Nmm]	478.000	1.256.000	509.000	1.154.000
$\eta_1$	0,41	0,41	0,66	0,66
$\eta_2$	1,72	1,72	8,17	8,17
$\eta_3$	1,11	1,11	2,22	2,22
$\eta_4$	-0,18	-0,18	-0,11	-0,11
$L_{fz}$ [mm]	1.791	1.703	2.307	2.307
$\lambda_{fz}$	0,72	0,68	0,93	0,93
$\phi$	0,75	0,72	0,91	0,91
$\chi_{LT}$	0,86	0,88	0,74	0,74
$M_{y,Ed}$ [Nmm]	32.300.000	27.200.000	20.900.000	19.600.000
$N_{Ed}$ [N]	3.900	3.900	3.900	3.900
$W_{eff,y}$ [mm <sup>3</sup> ]	132.887	132.887	132.887	132.887
$A_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	1.482	1.482	1.482	1.482
$W_{fz}$ [mm <sup>3</sup> ]	7.984	7.984	7.984	7.984
$\sigma =$ [N/mm <sup>2</sup> ]	346	394	278	346

Feldbereich max Spannung:  $\sigma_{Ed}^{max} = 346 \frac{N}{mm^2} < f_y = 350 \frac{N}{mm^2}$

Stützbereich max Spannung:  $\sigma_{Ed}^{max} = 394 \frac{N}{mm^2} < 2 * f_y = 700 \frac{N}{mm^2}$  Nachweise sind erfüllt.

Die Spannung infolge des im Innenbereich auftretenden Stützmoment es ist nur  $\sigma = 278 \frac{N}{mm^2}$  groß. Somit ist bei der Konstruktion im Innenbereich keine Überlappung erforderlich um die Stützmomenten übertragen zu können. Es reicht die konstruktiv nötige Länge der Überlappung. Alleine im zweiten Feldbereich ist ein verlängerter Überlappungsbereich der Pfette erforderlich mit etwa 50 cm Länge von der Flanschstrebe, siehe Abb. 5-61.

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Um die Schnittgrößen der Pfette zu übertragen erforderliche Überlappung:

Am Rand, im Bereich der wandnahen Riegel :  $120\text{cm} + 10\text{cm} + 50\text{cm} = 180\text{cm}$

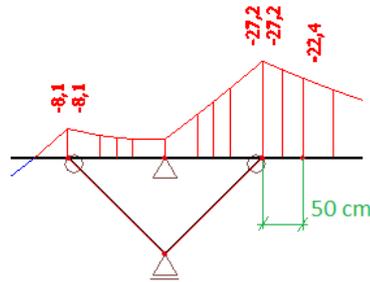


Abb. 5-61 Momentenverlauf der Pfette - Flanschstrebe mit  $45^\circ$  Neigung - in Stützenbereichen unter Feldweise Belastungen, bzw. die verlängerten Überlappungsbereiche.

### 5.4.3.6 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Schubbeanspruchung

Der Steg hat keine Aussteifung, somit ist der bezogene Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 * \frac{s_w}{t} * \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} = 0,346 * \frac{294,4}{2,96} * \sqrt{\frac{350}{210.000}} = 1,4$$

Wobei:  $s_w$  – Steglänge, wie in der Abb. 5 – 45 dargestellt

Der Steg ist am Auflager nicht aussteift, so ergibt sich die Schubbeulfestigkeit:

$$f_{bv} = \frac{0,67 * f_{yb}}{\bar{\lambda}_w^2} = \frac{0,67 * 350}{1,4^2} = 119,6 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} * t * f_{bv}}{\gamma_{M0}} = \frac{\frac{294,4}{\sin 90^\circ} * 2,96 * 119,6}{1,1} = 94.747,5\text{N} = 94,7\text{kN} \gg V_{b,Ed} = 28,5\text{kN}$$

Nachweis ist erfüllt.

### 5.4.3.7 GZG – Durchbiegung der Pfette

$$u_z = 34,6\text{mm} < \frac{L}{200} = \frac{8400}{200} = 42\text{mm} \quad \text{Nachweis ist erfüllt.}$$

Siehe auch Abb.5-56!

### 5.4.4 Nachweis des Systems mit 60° - Neigungen der Flanschstreben

#### 5.4.4.1 Allgemeine Vorgaben

##### 5.4.4.1.1 Statisches System

Ausgangssystem ist der 9- Feldträger mit 8,4m Spannweiten. In diesem System sind als zusätzliche Federlagerungen die Flanschstreben mit 60° große Neigung auf den inneren Riegel eingebaut. Der Riegeluntergurt ist mithilfe horizontaler freier Auflager modelliert. Siehe auch Abbildungen 5-62 und 5-63.

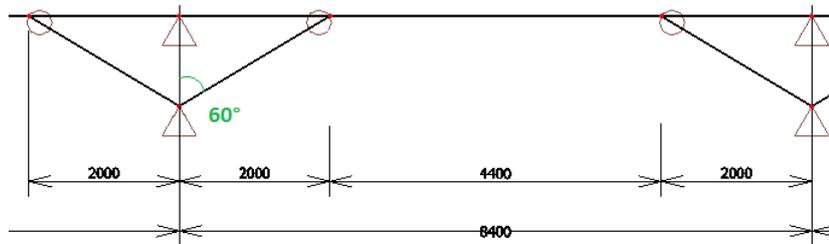


Abb. 5-62 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter 60° eingebauten Flanschstreben

##### 5.4.4.1.2 Maßgebende Belastung und daraus resultierende Querschnittsgrößen:

Statisches System, Belastung, maßgebende Schnittgrößen:

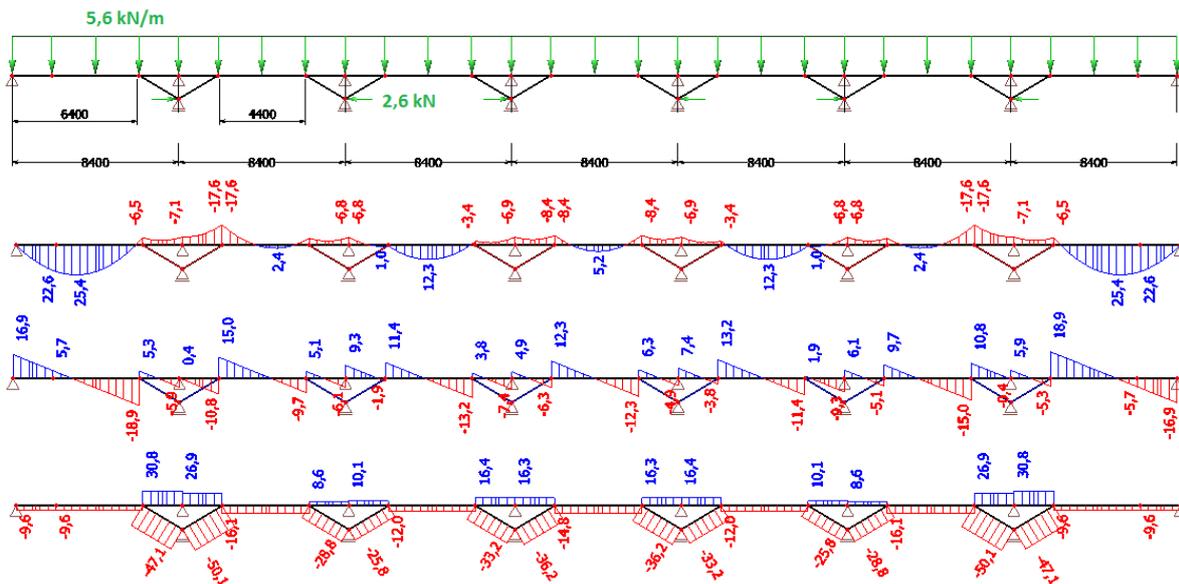


Abb. 5-63 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter 60° eingebauten Flanschstreben

## Bemessung der dünnwandigen Profile

Lastfallkombination – Feldweise Belastung:

a) Schnee im Randfeld:

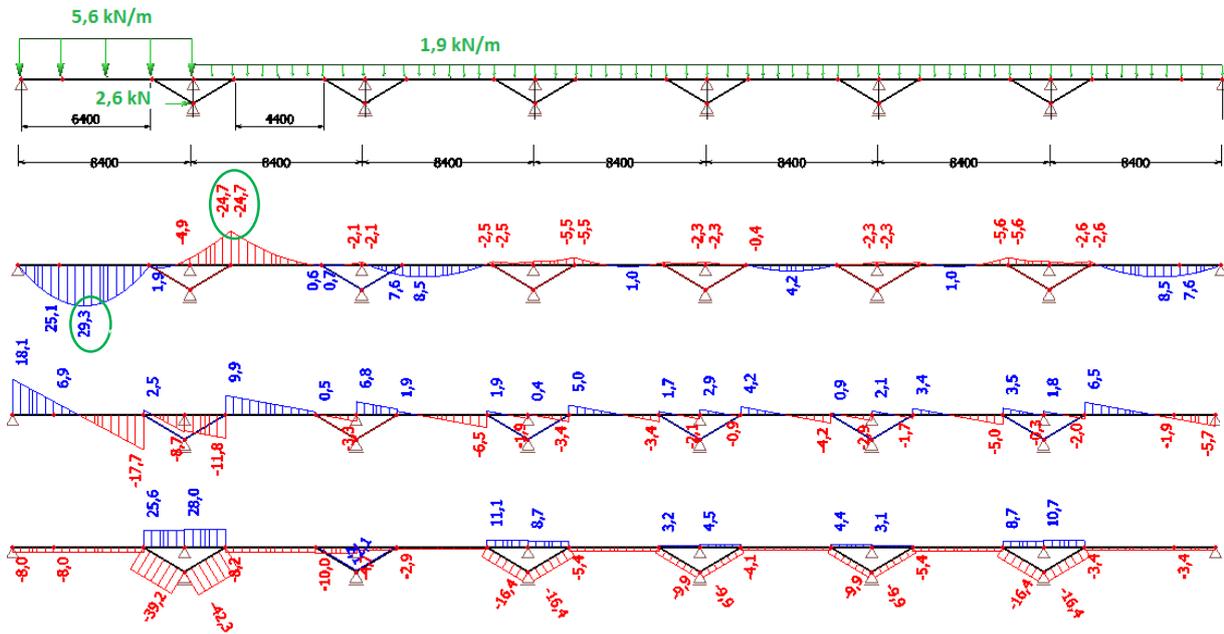


Abb. 5-64 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter 60° eingebauten Flanschstreben

b) Schnee im Innenbereich:

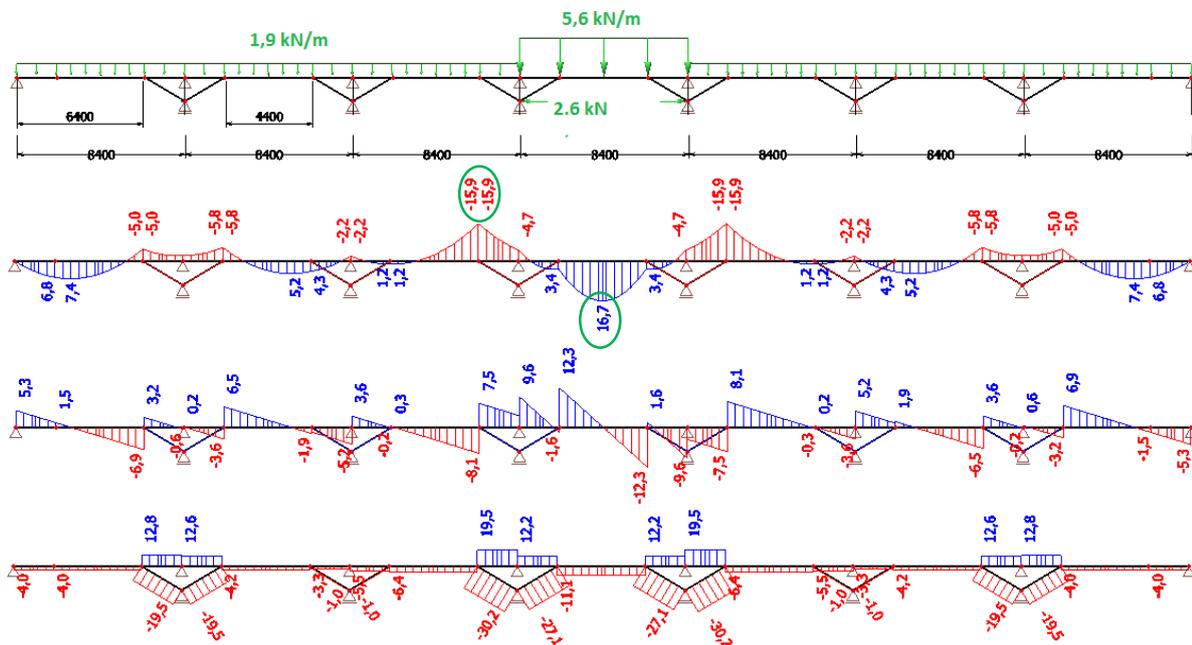


Abb. 5-65 Belastung und Schnittgrößenverläufe für unter 60° eingebauten Flanschstreben

## Bemessung der dünnwandigen Profile

### 5.4.4.1.3 Durchbiegung $u_z$

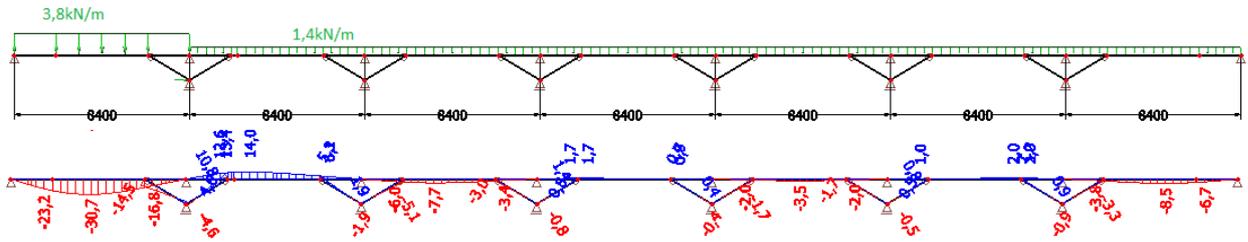


Abb. 5-66 Maßgebende Durchbiegung ( $u_z$ ) der Pfette

### 5.4.4.1.4 Querschnitte

Siehe Abschnitt 5.4.3.1.3.

### 5.4.4.2 Ermittlung Querschnittswerte des Bruttoquerschnittes (= Idealisierter Querschnitt)

Siehe Abschnitt 5.4.3.2.

### 5.4.4.3 Ermittlung der Federsteifigkeit der seitlichen Wegfeder - Siehe Abschnitt 5.4.3.3.

### 5.4.4.4 Ermittlung des effektiven Querschnitts - Siehe Abschnitt 5.4.3.4

### 5.4.4.5 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Biegebeanspruchung der Randbereiche

Tab. 5-6 Ermittlung  $\sigma$ , von Spannungsgrößen der Pfette - mit  $45^\circ$  geneigt eingebauten Flanschstreben - unter der maßgebenden Belastung

Schrag Z 300/3 F.strebe: $\alpha = 60^\circ$	Endfeld		Innenbereich	
	Feldmoment	Stützmoment	Feldmoment	Stützmoment
$L_a$ [mm]	7.200	6.000	6.000	6.000
R	7,66	3,69	3,69	3,69
$K_R$	0,21	0,45	0,55	0,62
$M_{0,fz,Ed}$ [Nmm]	2.245.000	2.772.000	924.000	1.848.000
$M_{fz,Ed}$ [Nmm]	478.000	1.256.000	509.000	1.154.000
$\eta_1$	0,41	0,41	0,66	0,66
$\eta_2$	1,72	1,72	8,17	8,17
$\eta_3$	1,11	1,11	2,22	2,22
$\eta_4$	-0,18	-0,18	-0,11	-0,11
$L_{fz}$ [mm]	1.791	1.703	2.307	2.307
$\lambda_{fz}$	0,72	0,68	0,93	0,93
$\phi$	0,75	0,72	0,91	0,91
$\chi_{LT}$	0,86	0,88	0,74	0,74
$M_{y,Ed}$ [Nmm]	29.300.000	24.700.000	16.700.000	15.900.000
N [N]	1.600	3.200	3.200	3.200
$W_{eff,y}$ [mm <sup>3</sup> ]	132.887	132.887	132.887	132.887
$A_{eff}$ [mm <sup>2</sup> ]	1.482	1.482	1.482	1.482
$W_{fz}$ [mm <sup>3</sup> ]	7.984	7.984	7.984	7.984
$\sigma =$ [N/mm <sup>2</sup> ]	317	372	235	308

## Bemessung der dünnwandigen Profile

$$\text{Feldbereich max Spannung: } \sigma_{Ed}^{max} = 317 \frac{N}{mm^2} < f_y = 350 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Stützbereich max Spannung: } \sigma_{Ed}^{max} = 372 \frac{N}{mm^2} < 2 * f_y = 700 \frac{N}{mm^2}$$

Nachweise sind erfüllt.

Im Innenbereich ergibt sich infolge des Stützmomentes eine Spannung nur  $\sigma = 308 \frac{N}{mm^2}$ , somit ist bei der Konstruktion im Innenbereich keine Überlappung erforderlich um die Stützmente übertragen zu können. Es reicht die konstruktiv nötige Länge der Überlappung. Allein im zweiten Feldbereich ist ein verlängerter Überlappungsbereich der Pfette erforderlich mit etwa 30 cm Länge von der Flanschstrebe gemessen, siehe Abb. 5-67.

Um die Schnittgrößen der Pfette zu übertragen erforderliche Überlappung:

Am Rand, Bereich der ersten und letzten Riegel :  $200cm + 10cm + 30cm = 240cm$

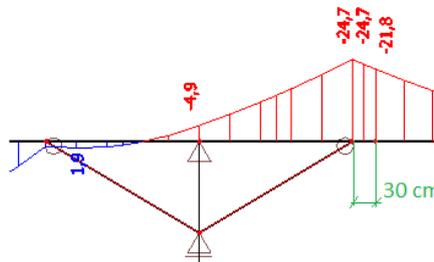


Abb. 5-67 Momentenverlauf der Pfette - Flanschstrebe mit 60° geneigt - in Stützbereichen unter Feldweise Belastungen, bzw. die verlängerten Überlappungsbereiche.

### 5.4.4.6 GZT - Grenztragfähigkeit der Pfette unter Schubbeanspruchung

$V_{b,Rd}$  siehe im Abschnitt 5.4.3.6 ermittelt.

$$V_{b,Rd} = 94,7kN \gg V_{b,Ed} = 28,5kN \quad \text{Nachweis ist erfüllt.}$$

### 5.4.4.7 GZG – Durchbiegung der Pfette

$$u_z = 30,7mm < \frac{L}{200} = \frac{8400}{200} = 42mm \quad \text{Nachweis ist erfüllt.}$$

Siehe auch Abb.5-66 und Abschnitt 5.3.7!

## 5.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vereinfachte Annahme der Musterstatik ist laut Meinung der Verfasserin nicht annehmbar. Mit dem Einsatz der Flanschstreben wurde die Länge des Stützmomentbereichs verbreitert, somit muss, um die Stützmente aufnehmen zu können, die Überlappung der Pfette vergrößert werden. Die erforderlichen Längen der Überlappungen sind ohne die exakten Modelle nicht ermittelbar.

Der Pfettenquerschnitt kann erst im Fall der mit 45° oder 60° geneigt eingebauten Flanschstreben vermindert werden. Im Fall der Gestaltung mit 30° großer Neigung ist der gleiche Querschnitt der Pfette wie bei Nichtberücksichtigung der Flanschstreben mit zusätzlicher Überlappung der Pfette erforderlich.

## 6 Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

Die Flanschstreben der bestehenden Musterhalle wurden ohne Bemessung konstruktiv eingebaut. Die Flanschstreben werden klassisch mit Winkelquerschnitt ausgeführt, somit muss die Bemessung erfolgt mit großer Vorsicht. Das vorliegende Kapitel befasst sich - laut den Regelungen der europäischen Stahlbaunorm - mit einer Empfehlung für die Bemessung der Widerstandsfähigkeit der Flanschstreben bei verschiedenen Knotenausbildungen. Gleichzeitig ist das Ziel, anhand mehrerer Gesichtspunkte die am besten geeignete konstruktive Ausbildung der Flanschstreben sowie der Details zu finden.

Die Darstellung des Berechnungsablaufes erfolgt anhand der vorgegebenen Querschnitte und Geometrie der Musterhalle. (Abb.6-1 stellt die Ausbildung von der Musterhalle dar.) Somit wird gleichzeitig das bestehende System nachgewiesen. Zuerst erfolgt die Berechnung des Stabwiderstandes der Flanschstreben, allerdings mit zwei unterschiedlichen Ausbildungsvarianten des Knotens B. Danach folgt die Ermittlung der Tragfähigkeit der Knoten. Die Tragwiderstand der Flanschstreben wird sowohl für Druck- als auch für Zugbeanspruchung ermittelt.

Am Ende des Kapitels folgt nach einem Vergleich die Ermittlung der optimalen Gestaltung des Flanschstreben –Pfeften Systems - sowohl der optimale Neigungsgröße als auch der Knotenausbildung.

### 6.1 Ausgeführtes System der Musterhalle

Das in der Musterhalle ausgeführte System ist in der Abb.6-1 zu erkennen.

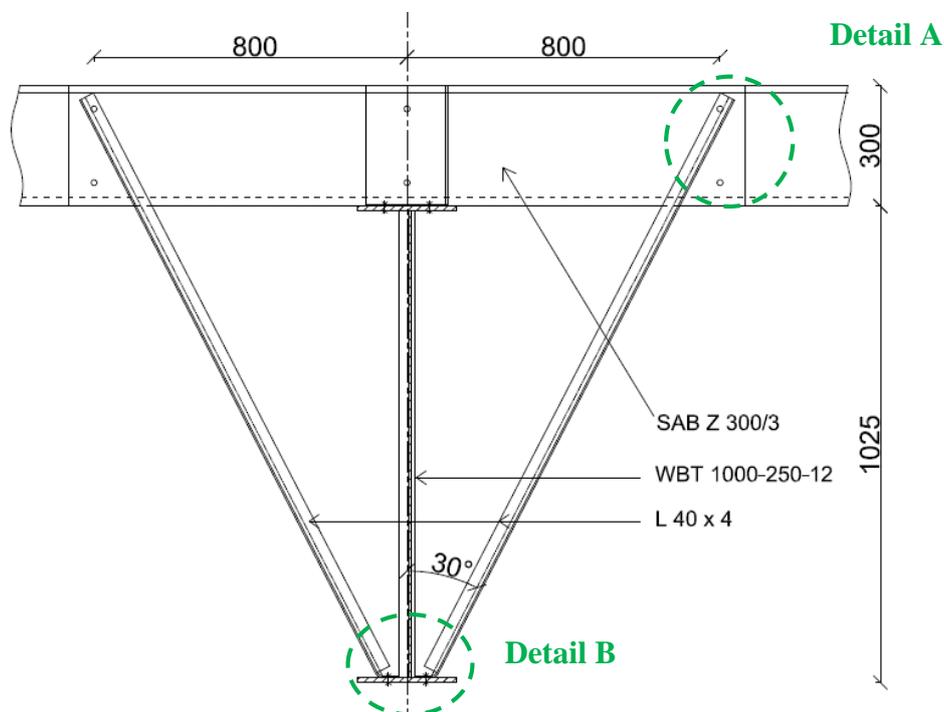


Abb. 6-1- Ausbildung des Systems in der Musterhalle –das Geometrie des Pfeften Systems

### 6.1.1 Ausbildung der Details

#### Detail A: Knoten Pfette - Flanschstrebe

Die Flanschstrebe ist mit einer Schraube mit der Pfette verbunden. Die Verbindung ist innerhalb des Überlappungsbereichs der Pfette ausgeführt.

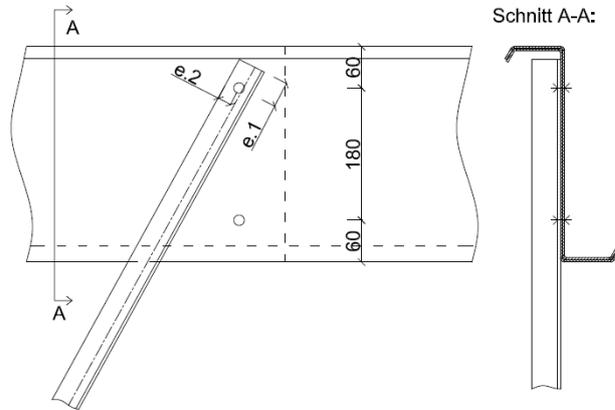


Abb. 6-2 Knotenausbildung Detail A „Pfette – Flanschstrebe“

#### Detail B: Knoten Flanschstrebe - Riegeluntergurt

Ein Gurt des Winkelquerschnittes wurde ausgeschnitten. Der andere Gurt des Winkels wurde zurückgebogen, und durch diesen wurde die Strebe mit einer Schraube auf dem Riegeluntergurt befestigt (siehe auch Abschnitt 6.2.4).

Bei der Ermittlung der Stabtragfähigkeiten eines Winkelquerschnittes haben die Knotenausbildungen einen Einfluss auf das Ergebnis. Deswegen wird das System von Anfang an mit zwei verschiedenen Knotenausbildungsvarianten des Details „B“ untersucht. Die erste Variante entspricht der Knotenausbildung der bestehenden Musterhalle, in der zweiten Variante ist die Flanschstrebe mithilfe eines an den Riegeluntergurt bzw. Riegelsteg angeschweißten Knotenblechs und einer Schraube mit dem Riegeluntergurt verbunden.

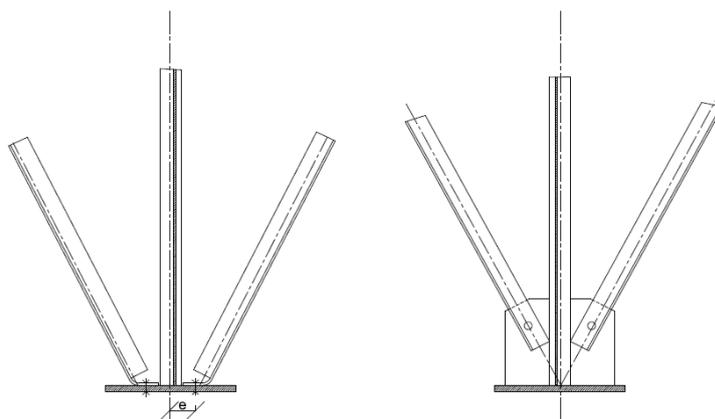


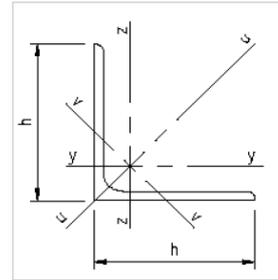
Abb. 6-3 Zwei Knotenausbildungsvarianten Detail „B“: V1 mit „ausgeschnittenen Flansch“ V2 mit Knotenblech.

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

### 6.1.2 Querschnitte

#### Flanschstrebe:

- › Profil: Gleichschenkliger rundkantiger Winkel 40 x 40 x 4
- › Materialgüte: S235
- › Streckgrenze:  $f_{yd} = 235 \text{ N/mm}^2$
- › Zugfestigkeit:  $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$
- › Länge:  $L = 1,41 \text{ m}$
- › Querschnittswerte:



*Tab. 6-1 Querschnittswerte gleichschenkliges Winkelprofil L 40 x 4*

Profil	Abmessungen		Fläche	Biegung um y Achse			Biegung um v Achse		
	$r_1$	$r_2$		$I_y$	$W_y$	$i_y$	$I_v$	$W_v$	$i_v$
mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
40 x 4	6	3	3,08	4,47	2,85	1,2	1,858	1,174	0,777

#### Pfette: SAB Z 300 x 3,

- › Blechstärke:  $t = 3 \text{ mm}$
- › Materialgüte: S350GD
- › Streckgrenze:  $f_{yd} = 350 \text{ N/mm}^2$
- › Zugfestigkeit:  $f_u = 490 \text{ N/mm}^2$

#### Schraube: M 14, 8.8

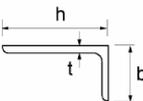
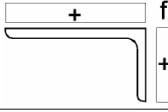
- › Nennwerte des Schraubendurchmessers:  $d = 14 \text{ mm}$ ,
- › Lochdurchmesser:  $d_0 = 15 \text{ mm}$ ,
- › Spannungsquerschnittsfläche der Schraube:  $A_s = 120,6 \text{ mm}^2$
  
- › Materialgüte: 8.8
- › Streckgrenze:  $f_{yd} = 800 \cdot 0,8 = 640 \text{ N/mm}^2$
- › Zugfestigkeit:  $f_u = 800 \text{ N/mm}^2$

## 6.2 Ermittlung der Tragfähigkeit der ausgeführten Flanschstreben der Musterhalle

### 6.2.1 Querschnittsklassifizierung

Erfolgt laut EN 1993-1-1 [5]

Tab. 6-2 Maximale  $c/t$  Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile [5]

<p>Siehe auch „einseitig gestützte Flansche“ in Tabelle 5.2, oben</p> <p style="text-align: center;">Winkel</p>  <p style="text-align: right;">gilt nicht für Winkel mit durchgehender Verbindung zu anderen Bauteilen</p>	
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile
<p>Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)</p> 	
3	$\text{EN } h/t \leq 15\epsilon \text{ und } \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon \text{ (AE)}$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{t} = \frac{40}{4} = 10 &< 15 * \epsilon = 15 \\ \frac{b+h}{2 * t} = \frac{40+40}{2 * 4} = 10 &< 11,5 * \epsilon = 11,5 \end{aligned} \right\} \text{Querschnittsklasse 3}$$

Das Winkelprofil ist in Querschnittsklasse 3 eingestuft, infolgedessen muss die Querschnittsfläche bei der weiteren Berechnung nicht abgemindert werden.

### 6.2.2 Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstrebe auf Zug

Um die Exzentrizität der Anschlüsse des einseitig angeschlossenen Winkels zu berücksichtigen wird die Querschnittsbemessung der Flanschstrebe laut EN 1993-1-8, 3.10.3 /(2)[8] durchgeführt. Laut der einsprechenden Regelung dürfen einseitig mit einer Schraubenreihe angeschlossene Winkel wie zentrisch belastete Winkel bemessen werden, wenn die Tragfähigkeit nach EN 1993-1-8/Abschnitt 3.10.3 ermittelt wird..

Sowohl Detail „A“ als auch Detail „B“ sind gelenkig, mithilfe einer Schraube ausgebildet; für die Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit gegen Zugbeanspruchung ist für Verbindungen mit einer Schraube, lt EN 1993-1-8/Gleichung 3.11 zu verwenden.

Schraubenabstand von Rand quer zum Krafrichtung:  $e_2 = 20\text{mm}$  (siehe Abb. 6-2,bzw. Abb. 6-3)

Querschnittswiderstand des Stabes, mit L - Querschnitt:

$$N_{u,Rd} = \frac{2 * (e_2 - 0,5 * d_0) * t * f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2 * (20 - 0,5 * 15) * 4 * 360}{1,25} = 28,8\text{kN}$$

### 6.2.3 Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstrebe auf Druck

#### 6.2.3.1 Allgemein - Regelung EC

Ermittlung der Beanspruchbarkeit von Druckstäben gegen Biegeknicken erfolgt laut EN 1993-3-1, Anhang G und F [9]. Die Stabilitätstragfähigkeit des Pendelstabes wird auch für Varianten mit Ein- und Zweischraubenverbindung definiert.

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit eines Druckstabes ist ähnlich wie in EN 1993-1-1[5] geregelt.

$$N_{b,Rd} = \frac{\eta * \chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

Den Unterschied macht im Fall von Winkelprofilen der Abminderungsbeiwert  $\eta$ . Der Wert  $\eta$  hat eine wichtige Rolle in den Fällen, wo das Profil nicht an beiden Enden biegesteif angeschlossen ist. Der Anschluss gilt laut Regelung EN 1993-3-1/G.1/(3) [9] als biegesteif, wenn mindestens zwei Schrauben vorhanden sind. Für Stäbe mit beidseitig Ein- Schrauben-Anschlüssen ist der Beiwert mit 0,8 anzunehmen, wenn eine Seite biegesteif befestigt ist, beträgt der Abminderungsbeiwert  $\eta = 0,9$ .

Die Bestimmung des Abminderungsbeiwert  $\chi$  erfolgt laut EN 1993-1-1[5] mit dem effektiven Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_{eff}$ . Die wurde im [9]/G.1/(2) in folgender Weise geregelt:

$$\bar{\lambda}_{eff} = k * \bar{\lambda}$$

Dabei ist:

- ›  $k$  der Beiwert für den effektiven Schlankheitsgrad nach 1993-3-1 /Tab.G.2 [9], Tabelle 4.3, 4.4 bzw. 4.5 (abhängig von der Befestigung an den Stabenden).
- › Schlankheitsgrad:  $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$ 
  - $\lambda_1$  wird nach EN 1993-1-1 [5] ermittelt
  - für den Schlankheitsgrad  $\lambda$  gilt in unserem Fall die Regelung nach 1993-3-1/ H.3.3/ (H.3a) [9]:

$$\lambda = \frac{L_d}{i_{yy}} \quad \text{oder} \quad \lambda = \frac{L_d}{i_{vv}}$$

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

### 6.2.3.2 Berechnungsablauf

Im Folgenden wird der Berechnungsablauf mit der Annahme der Knotenausbildung V1 - der in der Musterhalle ausgeführten Knotenausbildung - für die Flanschstreben- Riegeluntergurt - Verbindung dargestellt.

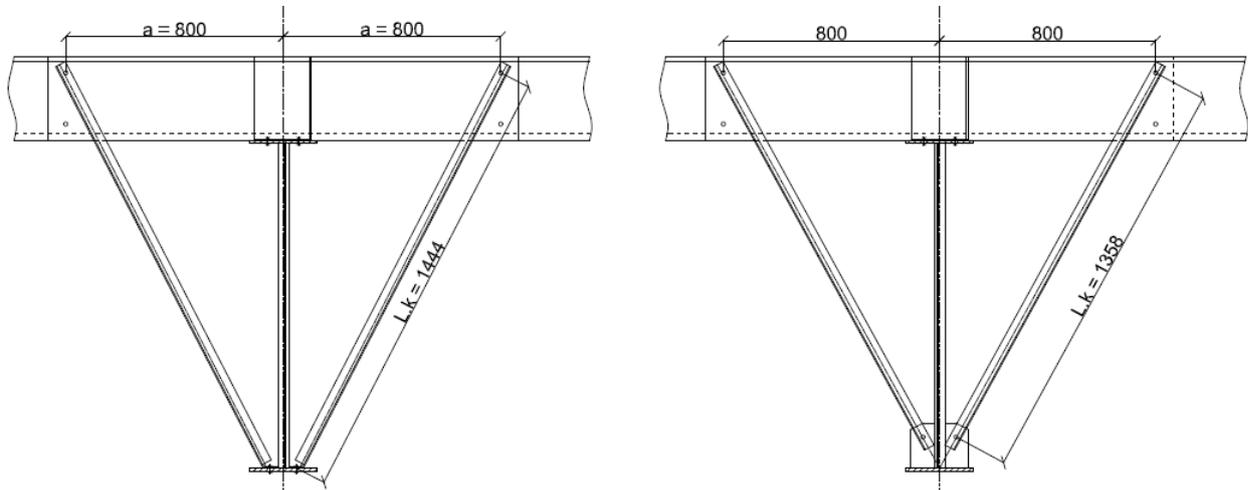


Abb. 6-4 Knicklängen der Flanschstrebe

Querschnittsfläche der Winkel:

$$A = 3,08 \text{ cm}^2$$

Schlankheit zur Bestimmung des Schlankheitsgrads:  $\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,91$

Trägheitsradius der Winkel

um Achse y – y:  $i_y = i_z = 1,2 \text{ cm}$

um Achse v – v:  $i_v = 0,8 \text{ cm}$

die Knicklänge :

$$L_d = L_{cr} = 144,4 \text{ cm}$$

Berechnung der Widerstandskräfte:

Ausbildungsvariante 1: Oben eine Schraube unten zwei Schrauben:

Art der Einspannung	Beispiele	Achse	k
nicht durchlaufend an beiden Enden (d. h. Einschraubenverbindungen an beiden Bauteilenden)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_v}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,58}{\lambda_y}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,58}{\lambda_z}$

Abb. 6-5 „k“ Beiwerte für den effektiven Schlankheitsgrad/2 [9]

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

a) Achse y-y bzw z-z

Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y} * \frac{1}{\lambda_1} = \frac{144,4}{1,2} * \frac{1}{93,9} = 1,28$$

Beiwert für den effektiven Schlankheitsgrad:

$$k_y = 0,7 + \frac{0,58}{\bar{\lambda}_y} = 0,7 + \frac{0,58}{1,28} = 1,15$$

Effektiver Schlankheitsgrad:  $\lambda_{eff,y} = k_y * \bar{\lambda}_y = 1,15 * 1,28 = 1,48$

$\alpha_y$ -Imperfektionsbeiwert: 0,34 (Knicklinie b)

$$\begin{aligned} \phi_y &= 0,5 * [1 + \alpha_y * (\lambda_{eff,y} - 0,2) + \lambda_{eff,y}^2] \\ &= 0,5 * [1 + 0,34 * (1,48 - 0,2) + 1,48^2] = 1,81 \end{aligned}$$

Abminderungsfaktor:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_{eff,y}^2}} = \frac{1}{1,81 + \sqrt{1,81^2 - 1,48^2}} = 0,35$$

Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit:

$$\eta = 0,8$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\eta * (\chi_y * A * f_y)}{\gamma_{M1}} = \frac{0,8 * (0,35 * 3,08 * 23,5)}{1,0} = 20,32 \text{ kN}$$

b) Achse v-v

Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_v = \frac{L_{cr}}{i_v} * \frac{1}{\lambda_1} = \frac{144,4}{0,78} * \frac{1}{93,9} = 1,97$$

Beiwert für den Effektiven Schlankheitsgrad:

$$k_v = 0,7 + \frac{0,35}{\bar{\lambda}_v} = 0,7 + \frac{0,35}{1,97} = 0,88$$

Effektiver Schlankheitsgrad:

$$\lambda_{eff,v} = k_v * \bar{\lambda}_v = 0,88 * 1,97 = 1,73$$

$\alpha_y$ -Imperfektionsbeiwert: 0,34 (Knicklinie b)

$$\begin{aligned} \phi_v &= 0,5 * [1 + \alpha_v * (\lambda_{eff,v} - 0,2) + \lambda_{eff,v}^2] \\ &= 0,5 * [1 + 0,34 * (1,73 - 0,2) + 1,73^2] = 2,26 \end{aligned}$$

Abminderungsfaktor:

$$\chi_v = \frac{1}{\phi_v + \sqrt{\phi_v^2 - \lambda_{eff,v}^2}} = \frac{1}{2,26 + \sqrt{2,26^2 - 1,73^2}} = 0,27$$

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

Bemessungswert der Biegeknickbeanspruchbarkeit:

$$\eta = 0,8$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\eta * (\chi_v * A * f_y)}{\gamma_{M1}} = \frac{0,8 * (0,27 * 3,08 * 23,5)}{1,0} = 15,63kN$$

Die Berechnung läuft für die „Variante 2“ ähnlich ab. Da beide Varianten Einschraubenverbindungen sind, machen dabei die leicht unterschiedlichen Knicklängen den einzigen Unterschied.  $L_{cr} = 135,8cm$

Somit ergeben sich folgende Werte für die zwei Varianten der Berechnung des Tragwiderstandes gegen Stabilitätsversagen. Die größeren Widerstände treten bei Variante V2 auf, da diese eine kleinere Knicklänge gegenüber Variante V1 besitzt.

*Tab. 6-3 Tragwiderstand gegen Stabilitätsversagen*

F.strebe S 235  L 40 x 4	Variante 1		Variante 2	
	Achse	Achse	Achse	Achse
	y-y, z-z	v-v	y-y, z-z	v-v
$f_y$ [kN/cm <sup>2</sup> ] =	23,50	23,50	23,50	23,50
$A$ [cm <sup>2</sup> ] =	3,08	3,08	3,08	3,08
$i$ [cm] =	1,20	0,78	1,20	0,78
$L_{cr}$ [cm] =	144,4	144,4	135,8	135,8
$\lambda_1$ =	93,91	93,91	93,91	93,91
$\lambda$ =	1,28	1,97	1,21	1,85
$k_y$ =	1,15	0,88	1,18	0,89
$\lambda_{eff}$ =	1,48	1,73	1,42	1,65
$\alpha_y$ =	0,34	0,34	0,34	0,34
$\phi_y$ =	1,81	2,26	1,72	2,10
$\chi_y$ =	0,35	0,27	0,37	0,29
$\eta$ =	0,80	0,80	0,80	0,80
$N_{b,Rd}$ [kN] =	20,32	15,63	21,54	16,97

### 6.2.4 Ermittlung der Tragfähigkeit der Anschlüsse

Für die Ausbildung des Knotens ist die Regelung von [8] wichtig: „Bei Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 in einschnittigen Anschlüssen mit nur einer Schraube oder nur einer Schraubenreihe sind in der Regel gehärtete Unterlegscheiben zu verwenden.“

Es wird für jede Knotenausbildungsvariante die maximale annehmbare Kraft sowohl für Druck als auch für Zug ermittelt. Ein Unterschied besteht nur in wenigen Fällen.

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

Pfette: 300 x 3, S350GD

- › Blechstärke:  $t = 3\text{mm}$
- › Streckgrenze:  $f_{yd} = 350\text{N/mm}^2$ ,
- › Zugfestigkeit:  $f_{ud} = 420\text{N/mm}^2$

Flanschstrebe: L 40 x 4, S235

- › Blechstärke:  $t = 4\text{mm}$
- › Streckgrenze:  $f_{yd} = 235\text{N/mm}^2$ ,
- › Zugfestigkeit:  $f_{ud} = 360\text{N/mm}^2$

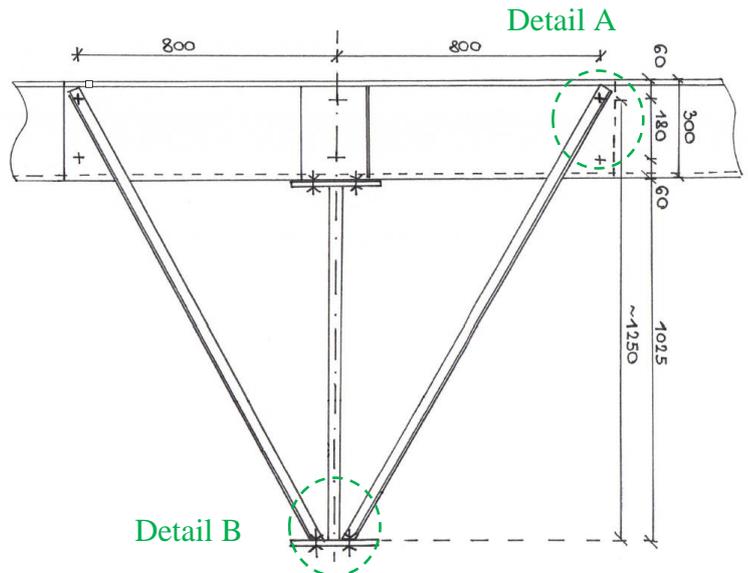


Abb. 6-6 Darstellung Geometrie der Musterhalle

Schraube: M 14, 8.8

- › Nennwerte des Schraubendurchmessers:  $d = 14\text{mm}$ ,
- › Lochdurchmesser:  $d_0 = 15\text{mm}$ ,
- › Mittelwert aus Eckmaß und Schlüsselweite des Schraubenkopfes oder der Schraubenmutter:  $d_m = 23,7\text{mm}$ ,
- › Spannungsquerschnittsfläche der Schraube:  $A_s = 120,6\text{mm}^2$   
(Das Gewinde der Schraub liegt in der Scherfuge.)
- › Materialgüte: 8.8
- › Streckgrenze:  $f_{yd} = 800 * 0,8 = 640\text{N/mm}^2$
- › Zugfestigkeit:  $f_u = 800\text{N/mm}^2$

### 6.2.4.1 Detail A: Pfette – Flanschstrebe

Das Detail wurde gelenkig ausgebildet, die Flanschstrebe ist mit einer Schraube an der Pfette, innerhalb des Koppelbereichs befestigt.

Der Widerstand des Knotens ist gegenüber Druck und Zug gleich.

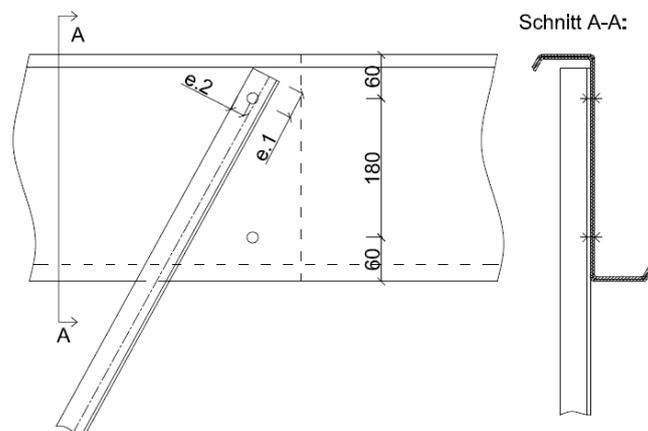


Abb. 6-7 Kontenausbildung-Detail A " Pfette – Flanschstrebe "

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

### Lochleibung:

- a) Randabstände und Blechdicke sind in Bezug auf den Gurt des Winkels angenommen.

Blechstärke:  $t = 4\text{mm}$   
 Schraubenbild:  $e_1 = 45\text{mm} > 1,2 * d_0 = 18\text{mm}$   
 $e_2 = 20\text{mm} > 1,2 * d_0 = 18\text{mm}$   
 $p_1 = -$   
 $p_2 = -$

*ANM. Die Stöße sind der Witterung oder andere korrosiven Einflüssen nicht ausgesetzt, somit ist Keine Beschränkung der Maximalwerte für Rand- und Lochabstände erforderlich.*

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{20}{15} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,03$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3 * d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{45}{3 * 15}, \frac{800}{360}, 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,03 * 1,0 * 360 * 14 * 4}{1,25} = 32.740\text{N} = 32,7\text{kN}$$

Laut EN 1993-1-8 /3.6.1 Abschnitt (10): Bei einschnittigen Anschlüssen mit nur einer Schraubenreihe, muss die Lochleibungstragfähigkeit der Schraube begrenzt werden auf:

$$F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{1,5 * 360 * 14 * 4}{1,25} = 24,2\text{kN}$$

Somit:  $F_{b,Rd} = 24,2\text{kN}$

- b) Randabstände und Blechdicke sind in Bezug auf der Pfette angenommen. Die Verbindung ist in dem Bereich der Koppelpfette ausgebildet. Somit wird in der Berechnung der Widerstandsfähigkeit gegen Lochleibung die doppelte Blechstärke der Pfette angenommen.

Blechstärke:  $t = 3\text{mm}$   
 Schraubenbild: ingenieurmäßig sinnvolle Annahmen getroffen  
 $e_1 = 60\text{mm} > 1,2 * d_0 = 18\text{mm}$   
 $e_2 = 60\text{mm} > 1,2 * d_0 = 18\text{mm}$   
 $p_1 = -$   
 $p_2 = -$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{100}{15} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3 * d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{45}{3 * 15}, \frac{800}{360}, 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * (2 * t)}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 1,0 * 420 * 14 * (2 * 3)}{1,25} = 70.560\text{N} = 70,6\text{kN}$$

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

Laut EN 1993-1-8 /3.6.1 Abschnitt (10): Bei einschnittigen Anschlüssen mit nur einer Schraubenreihe, muss die Lochleibungstragfähigkeit der Schraube begrenzt werden auf:

$$F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 * f_u * d * (t * 2)}{\gamma_{M2}} = \frac{1,5 * 420 * 14 * (3 * 2)}{1,25} = 42,3kN$$

Somit:  $F_{b,Rd} = 42,3kN$

### Abscheren:

Festigkeitsklasse Schraube: 8.8  $\rightarrow \alpha_v = 0,6$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800 * 120}{1,25} = 46.080N = 46,0kN$$

Maßgebende Versagensform des Knotens ist das Versagen der Winkelgurte gegen Lochleibung.

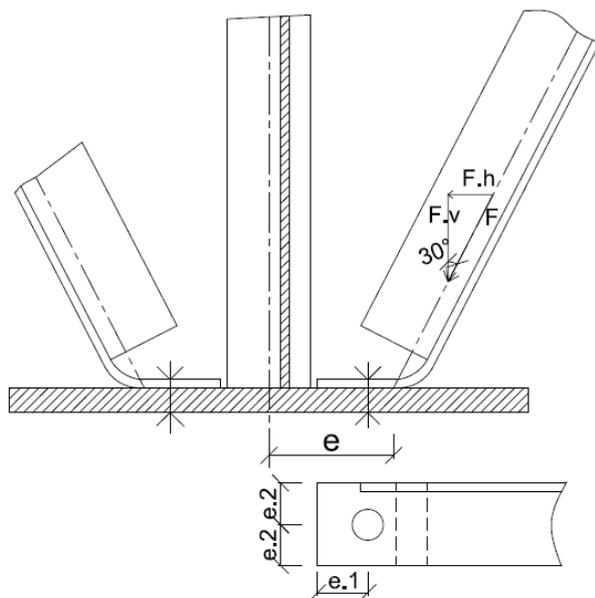
Widerstand des Knotens :  $F_{v,Rd} = 24,2kN$

### 6.2.4.2 Detail B: Flanschstrebe- Riegeluntergurt

Es wurden zwei Knotenausbildungsvarianten des Knotens B nachgewiesen. Bei der Musterhalle wurden die Anschlüsse laut Variante 1 ausgeführt (siehe Abb.6-8).

#### 6.2.4.2.1 Detail B- Variante 1: Gestaltung der Verbindung mit ausgeschnittenem Flansch

Ein Gurt der Winkel wurde ausgeschnitten, damit die andere zurückgebogen werden konnte. Somit wurden die Flanschstreben direkt an den Riegeluntergurt mit einer Schraube angeschraubt. (Siehe Abb. 6 - 8 ). Aufgrund der begrenzten geometrischen Abmessungen kann nur eine Schraube angeordnet werden.



Geometrie:

$$a = 6cm$$

Scharaubenbild:

$$e_1 = 45 mm$$

$$e_2 = \frac{40}{2} = 20mm$$

Abb. 6-8 Detail B - Variante 1 - mit ausgeschnittenem Gurt

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

Das Detail ist nicht optimal konstruiert.

Die Verbindung weist eine große Exzentrizität zwischen Schwerlinie Flanschstrebe und dem Schnittpunkt Steg (des Wellstegträgers) und Riegeluntergurt auf. Das ruft Zwischenbiegungen des Gurtes im Wellstegträger hervor. Die Biegung muss durch den Steg bis zu der Pfette weitergeleitet und von der Pfette aufgenommen werden. Das wurde in der originalen Hallenstatik weder bei der Bemessung des Wellstegträgers noch bei der Bemessung der Pfette berücksichtigt.

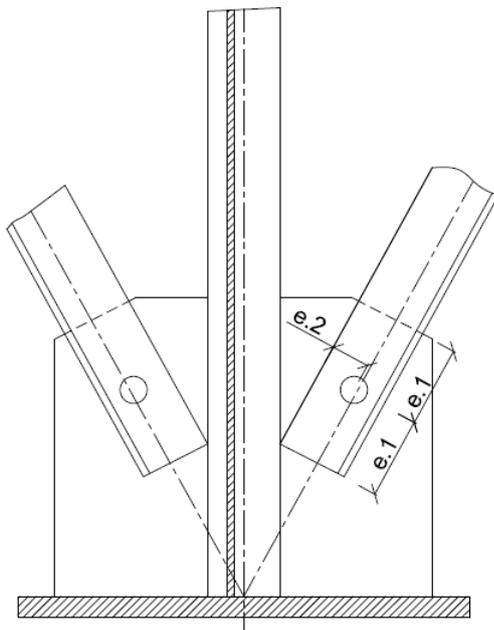
### 6.2.4.2.2 Detail B-Variante2: Verbindung mittels Knotenblech mit einer Schraube

Im Fall der Knotenausbildung gemäß Variante 2 werden die Flanschstreben an einem Knotenblech mit einer Schraube befestigt. Das Knotenblech ist an den Riegeluntergurt und Riegelsteg angeschweißt. Mit der angenommen Konstruktion sind die Schwerlinien der Flanschstreben zentrisch zum Schnittpunkt der Schwerlinie des Steges und des Riegeluntergurtes angeordnet.

Der Widerstand des Knotens ist gegenüber Zug und Druck gleich.

#### Lochleibung:

Die Stärke des Knotenbleches ist je nach Bedarf bestimmbar, die zugelassene Abstände im Schraubenbild sind auch gegeben. Daher erfolgt die Bemessung der Beanspruchbarkeit gegen Lochleibung nur im Bezug auf den Winkeluntergurt.



Knotenblech:

Materialgüte: S235 JR

Streckgrenze:  $f_{yd} = 235 \text{ N/mm}^2$

Zugfestigkeit:  $f_{ud} = 360 \text{ N/mm}^2$

Blechstärke  $t = 4 \text{ mm}$ ,

Schraubenbild:

$$e_1 = 45 \text{ mm} > 1,2 * d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_2 = 20 \text{ mm} > 1,2 * d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$p_1 = -$$

$$p_2 = -$$

*ANM. Die Stöße sind der Witterung oder andere korrosiven Einflüssen nicht ausgesetzt, somit ist Keine Beschränkung der Maximalwerte für Rand- und Lochabstände erforderlich.*

Abb. 6-9 DetailB-Variante 2- mit Knotenblech

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{20}{15} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,03$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3 * d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{45}{3 * 15}, \frac{800}{360}, 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,03 * 1,0 * 360 * 14 * 4}{1,25} = 32.739,8 \text{ N} = 32,7 \text{ kN}$$

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

Laut EN 1993-1-8 /3.6.1 Abschnitt (10): Bei einschnittigen Anschlüssen mit nur einer Schraubenreihe, muss die Lochleibungstragfähigkeit der Schraube begrenzt werden auf:

$$F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{1,5 * 360 * 14 * 4}{1,25} = 24.192N = 24,2kN$$

Somit maßgebend:  $F_{b,Rd} = 24,1kN$

### Abscheren:

Festigkeitsklasse Schraube: 8.8  $\rightarrow \alpha_v = 0,6$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800 * 120}{1,25} = 46.080N = 46,0kN$$

Maßgebende Versagensform des Knotens ist Versagen der Winkelgurte auf Lochleibung.

Widerstand des Knotens:  $F_{v,Rd} = 24,1kN$

### 6.2.5 Zusammenfassung - Tragfähigkeit der Flanschstreben

Tab.4-5 fasst die Stab- und Knotenwiderstandskräfte jeder Ausbildungsvariante unter einer Zug- und Druckkraft zusammen. Die maßgebenden Widerstandskräfte der Strebe unter Zugbeanspruchung sind mit gelb, unter Druckbeanspruchung mit grün markiert.

*Tab. 6 -4 Zusammenfassung die Widerstandskräfte der beiden Varianten*

F. strebe S 235 L 40 x 4		Tragfähigkeit Knoten		Stabtragfähigkeit
		Pfette- Flanschstrebe	Flanschstrebe- Riegeluntergurt	
V1	Zug	24,5kN	/	28,8kN
	Druck			15,6kN
V2	Zug	24,5kN	24,1kN	28,8kN
	Druck			16,9kN

Die Tabelle zeigt dass, bei den angenommenen Flanschstrebenquerschnitt - gleichschenklige L 40 x 4 – und die bei der Bestandkonstruktion vorhandene Knicklängen, die maßgebende Versagensform der Flanschstrebe, das Versagen auf Stabilität ist. So wie die Stabtragfähigkeiten, so sind die Tragfähigkeiten der Knoten auch nicht ausreichend groß um die ermittelten Normalkräfte (siehe Kapitel 4, oder Tab. 6-9) der Flanschstreben weiterleiten zu können. Zwischen den beiden Ausbildungsvarianten gibt es bei der Stabtragfähigkeit keinen Unterschied.

### 6.3 Optimierung des Querschnittes der Flanschstrebe

Während der damaligen Bemessung der Musterhalle wurde keine statische Berechnung der Flanschstreben geführt. Die Streben wurden nach konstruktiver Erfahrung eingebaut. Laut dem oben geführten statischen Nachweis ist die Tragfähigkeit der Strebe nicht ausreichend groß, um die unter der maßgebenden Auflast sich entwickelnden Normalkräfte bis zum Riegeluntergurt weiterleiten zu können.

Deswegen erfolgt hier die Bemessung der Flanschstrebe für die drei gewählten Neigungsvarianten. Somit können die drei Konstruktionsvarianten verglichen werden und die optimale Gestaltung ausgewählt werden.

### 6.3.1 Flanschstrebenquerschnitt

Der vorige vollständige Nachweis (Abschnitt 6.2) der Flanschstrebe deutet eindeutig darauf hin, dass sowohl die Stabtragfähigkeit als auch die Widerstandsfähigkeit der Details viel zu klein ist, somit ist es erforderlich einen größeren Winkelquerschnitt zu wählen.

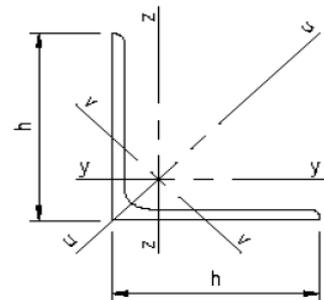
Die maßgebende Versagensform der Details ist Versagen auf Lochleibung. Beide Knoten sind nur mit einer Schraube ausgebildet, somit sind laut der geltenden Berechnungsformel der En 1993-1-8/ Gleichung 3.2 [8] (siehe auch Abschnitt 6.2.4.1) nur die Blechstärken und der Durchmesser der Schraube entscheidend.

Die üblichen Pfettenquerschnitte sind maximal mit 4mm Stärke hergestellt. Die in dem fünften Kapitel angenommenen Querschnitte besitzen Blechstärken von 3mm bzw. 3,5mm. Der Widerstand des Details gegen Lochleibung ist laut der Abschnitt 6.2.1 geführten Berechnung mit 4mm viel zu niedrig. Das bedeutet, dass Detail A in dem Überlappungsbereich der Pfette ausgeführt werden muss. Damit ist gegen Lochleibung der doppelte Querschnitt der Pfette, in diesem Fall 6 bzw. 7mm, vorhanden.

Nach den diesen Überlegungen sind Winkelquerschnitte mit Blechstärke 6 -7mm ideal. Für die Optimierung wurden die folgenden gleichschenkligen Winkelquerschnitte ausgesucht.

Profil: Gleichschenkelig, rundkantig

- › Materialgüte: S355
- › Streckgrenze:  $f_{yd} = 355\text{N/mm}^2$
- › Zugfestigkeit:  $f_u = 490\text{N/mm}^2$
- › Querschnittswerte:



Optimierung untersuchte gleichschenklige Winkelprofile:

Tab. 6-5 Querschnittsdaten der für die Flanschstrebe untersuchten Winkelprofile

Profil	Abmessungen		Fläche	Biegung um y Achse			Biegung um v Achse			
	a x t	r <sub>1</sub>		r <sub>2</sub>	A	I <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	i <sub>y</sub>	I <sub>v</sub>	W <sub>v</sub>
	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
40 x 4	6	3	3,08	4,47	1,55	1,21	1,86	1,17	0,77	
50 x 6	7	3,5	5,7	12,8	3,61	1,5	5,34	2,61	0,97	
60 x 6	8	4	6,91	22,8	5,29	1,82	9,44	3,96	1,17	
70 x 6	9	4,5	8,13	36,9	7,27	2,13	15,3	5,6	1,37	

### 6.3.2 Tragwiderstand der Winkelquerschnitte

Die Tragwiderstände der untersuchten Winkelprofile wurden - für die drei Gestaltungsvarianten - in Tabellen zusammengefasst. Somit können die Widerstandswerte der Profile einfach verglichen und damit der ideale Querschnitt gefunden werden. Die unterschiedliche Neigung der Flanschstreben macht aufgrund der verschiedenen Knicklängen nur einen Unterschied beim Widerstand gegen Stabilitätsversagen.

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

### 6.3.2.1 Widerstandsfähigkeit des Querschnittes auf Zug

Der Ablauf der Ermittlung des Querschnittswiderstandes eines Winkelprofil gegen Zug wurde wie im Kapitel 6.2.2, laut EN1993-1-8 dargestellt. Laut EN 1993-1-8/ Formel 3.2 sind für die Querschnittstragfähigkeit neben der Stahlgüte die Lochdurchmesser, Stärke des Bleches und der vorhandene  $e_2$  Abstand (siehe Abb. 6-8, bzw- Abb. 6-10) entscheidend. Die Widerstandskräfte der unterschiedlichen Winkelprofile mit Stahlgüte S355 sind in der Tab. 6-4 zusammengefasst. In der Tabelle sind einige Felder durchstrichen. In diesen Fällen kann die Schraube mit dem Winkelprofil aufgrund der geometrischen Randbedingungen nicht verwendet werden.

*Tab. 6-6 Querschnittswiderstand der Winkelprofile mit den verschiedenen Schraubengrößen*

QS- Widerstand der Flanschstrebe (in Abhängigkeit der Schraube) [kN]							
Flanschstrebe (S355)		Schrauben (8.8)					
QS der F.strebe	Vorh. $e_2$ [mm]	M14	M16	M18	M20	M22	M24
		$d_0 = 15$ mm	$d_0 = 18$ mm	$d_0 = 20$ mm	$d_0 = 22$ mm	$d_0 = 24$ mm	$d_0 = 26$ mm
L 40 x 4	18	41,2	/	/	/	/	/
L 50 x 6	20	73,5	64,7	/	/	/	/
L 60 x 6	25	102,9	94,1	88,2	82,3	76,4	/
L 70 x 6	30	132,3	123,5	117,6	111,7	105,8	100,0

### 6.3.2.2 Widerstandsfähigkeit gegen Versagen auf Stabilität

Der Ablauf der Ermittlung der Tragfähigkeit gegen Stabilitätsversagen der Flanschstrebe erfolgt wie im Abschnitt 6.2.3. Die Knicklänge der Flanschstrebe ist bei der mit verschiedenen Neigungen eingebauten Flanschstreben deutlich unterschiedlich, somit weist die Größe ihrer Widerstandskräfte gegen Stabilität auch deutliche Unterschiede auf. Der maßgebende Wert ist natürlich das Stabilitätsversagen um die v-v Achse, dieses ist in der Tab. 6-7 Zusammengefasst.

*Tab. 6-7 Tragfähigkeit der Winkelquerschnitte bei der unterschiedlichen Gestaltungen*

QS der F.strebe (S355)	Widerstand der Flanschstrebe gegen Stabilitätsverlust [kN]		
	Neigung $\alpha = 30^\circ$	Neigung $\alpha = 45^\circ$	Neigung $\alpha = 60^\circ$
	$L_k = 135,8$ cm	$L_k = 185,5$ cm	$L_k = 126,6$ cm
L 40 x 4	25,6	16,5	9,3
L 50 x 6	62,1	41,7	24,4
L 60 x 6	92,2	64,9	39,5
L 70 x 6	125,1	92,2	58,4

### 6.3.2.3 Lochleibung und Abscheren

Sowohl Detail „A“ als auch Detail „B“ sind typische einschnittige, nur mit einer Schraube verbundene Anschlüsse. Somit sind bei der Ermittlung des Widerstands gegen Lochleibung die Schraubendurchmesser und die Blechdicke entscheidend. Der Berechnungsablauf erfolgt wie im Abschnitt 6.2.4. In Tab 6-8 wurde die Tragfähigkeit der möglichen Versagensformen des Details mit unterschiedlichen Schraubendurchmessern und der Blechdicke  $t = 6$  mm (mit der Annahme, dass Detail A sich in der Überlappungsbereich der Pfette befindet) zusammengefasst. In Tabelle 6-9 sind nur die Widerstandskräfte gegen Lochleibung des Details übersichtlich mit den möglichen Schrauben – Winkelquerschnitt-Varianten dargestellt.

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

Tab. 6-8 Widerstand der Schrauben neben den angenommenen Blechstärken

Widerstand des Knotens gegen Lochleibung bzw. Abscheren [kN] (S 355)							
Schrauben	Flansch- stärket [mm]	d [mm]	d <sub>0</sub> [mm]	erford. e <sub>2</sub> <sup>min</sup> [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	Lochleibung F <sub>Rd</sub> [kN]	Abscheren F <sub>Rd</sub> [kN]
M 14	4	14	15	18	115	32,9	44,2
M 14	6	14	15	18	115	49,4	44,2
M 16	6	16	18	21,6	157	56,4	60,3
M 18	6	18	20	24	193	63,5	74,1
M 20	6	20	22	26,4	245	70,6	94,1
M 22	6	22	24	28,8	303	77,6	116,4

Tab. 6-9 Widerstand gegen Lochleibung der verschiedenen Schraube - Flanschstreben Kombinationen

Widerstand des Knotens gegen Lochleibung [kN]							
Flanschstrebe (S355)		Schrauben (8.8)					
QS der F.strebe	t [mm]	M14	M16	M18	M20	M22	M24
		d = 14 mm	d = 16 mm	d = 18 mm	d = 20 mm	d = 22 mm	d = 24 mm
L 40 x 4	4	32,9	/	/	/	/	/
L 50 x 6	6	49,4	56,4	/	/	/	/
L 60 x 6	6	49,4	56,4	63,5	70,6	77,6	/
L 70 x 6	6	49,4	56,4	63,5	70,6	77,6	84,7

Beim Vergleich der Widerstandskräfte gegen Stabilitätsversagen bzw. gegen Lochleibung kann festgestellt werden, dass bei größeren Knicklängen immer mehr die Widerstand gegen Stabilitätsversagen maßgebend wird. Im Fall der Gestaltung mit 30° großer Neigung ist die Tragfähigkeit gegen Lochleibung entscheidend.

Hiermit möchte ich darauf hinweisen, dass die Knotenausbildung außerhalb des Überlappungsbereich der Pfette - und somit nur mehr der einfach vorhandenen Blechstärke des Pfettenprofils - die Tragfähigkeit des Knotens stark reduzieren würde. Mit 3mm Blechstärke ist die Widerstandsfähigkeit des Details und somit der Flanschstrebe nur 21,2kN, das ist deutlich weniger als die Kraft, die von dem Knoten weitergeleitet werden muss.

### 6.3.3 Aufzunehmende Normalkraft der Flanschstrebe und minimal erforderliche Querschnitte der Bauelemente

Die Normalkräfte in den Flanschstreben wurden mithilfe des Statikprogramms SCIA bestimmt. Bei der Ermittlung wurde im Modell der Riegeluntergurt mit horizontal steifem Auflager modelliert. Die Werte der Belastung liegen somit auf der sicheren Seite. (Siehe auch Abschnitt 4.5.2.)

#### 6.3.3.1 Gestaltung mit 30° großer Neigung der Flanschstrebe

Der erforderliche Querschnitt der Pfette des Bestandsystems wurde in Abschnitt 5.4.2 ermittelt (Profil Z 300/3,5 von der Firma Schrag). Die Belastungen der Flanschstreben wurden im Modell mit dem genannten Pfettenquerschnitt bestimmt, die Werte sind im Tab. 6-10 zusammengestellt.

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

*Tab. 6-10 Aufnehmende Normalkraftbelastungen der Flanschstreben, Neigung 30°*

Flansch-streben QS  Neigung $\alpha = 30^\circ$	neben Pfettenprofil: Schrag Z 300 / 3,5	
	Max Normalbelastung der Flanschstrebe [kN]	
	Randbereich	Innenbereich
L 40 x 4	62,8	39,6
L 50 x 6	73,5	46,5
L 60 x 6	76,4	48,4
L 70 x 6	78,7	49,9

Mithilfe der weiter oben ermittelten Tragfähigkeiten der unterschiedlichen Winkelquerschnitte, bzw. Schraubenverbindungen kann die optimale Flanschstrebenquerschnitt - Schrauben - Kombination schnell ausgewählt werden. Bei der verwendeten Gestaltungsvariante (30°) ist die Widerstandsfähigkeit des Knotens auf Lochleibung maßgebend, das wurde bei der Bemessung berücksichtigt.

Randbereich  $N_{Ed} = 76,4\text{kN} < 77,6\text{kN} \rightarrow$  Schraube M22  $\rightarrow$  L60 x6

Innenbereich:  $N_{Ed} = 46,5\text{kN} < 49,4\text{kN} \rightarrow$  Schraube M14 + t = 6  $\rightarrow$  L50 x6

Die optimale Querschnitt – Schrauben Kombination der Flanschstrebe mit 30° großen Neigung:

Randbereich ( 4 Stück): L60 x 6 + M22

Innenbereich ( 12 Stück): L50 x 6 + M14

Der unterschiedliche Flanschstrebenquerschnitt am Rand wurde im Statikprogramm eingegeben. Somit ergibt sich in dem Flanschstreben am Rand eine Normalkraftbelastung mit 80,3kN, solange im Innenbereich die Streben maximal mit 48kN belastet werden. Die Nachweise sind wiederum geführt, die Querschnitte bzw. Schrauben sind ausreichend bemessen.

### 6.3.3.2 Gestaltung mit 45° großer Neigung der Flanschstrebe

Der erforderliche Querschnitt der Pfette des System mit 45° geneigt eingebauten Flanschstreben wurde in Abschnitt 5.4.3 ermittelt (Profil Z 300/3,0 von der Firma Schrag). Die Belastungen der Flanschstreben wurden im Modell mit dem genannten Pfettenquerschnitt bestimmt, die Werte sind im Tab. 6-11 zusammengefügt.

*Tab. 6-11 Aufzunehmende Normalkraftbelastungen der Flanschstreben, Neigung 45°*

Flansch-streben QS  Neigung $\alpha = 45^\circ$	neben Pfettenprofil: Schrag Z 300 / 3,0	
	Max Normalbelastung der Flanschstrebe [kN]	
	Randbereich	Innenbereich
L 40 x 4	63,5	38,5
L 50 x 6	70,1	42,4
L 60 x 6	71,8	43,3
L 70 x 6	73,0	44,4

Laut der in obigen ermittelten Tragfähigkeiten der unterschiedlichen Winkelquerschnitte ist die optimale Querschnitt – Schrauben Kombination der Flanschstrebe mit der 45° großen Neigungswinkel:

Randbereich (4 Stück): L70 x 6 + M22

Innenbereich (10 Stück): L70 x 6 + M14

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

### 6.3.3.3 Gestaltung mit 60° großer Neigung der Flanschstrebe

Der erforderliche Querschnitt der Pfette des Systems mit 60° geneigt der eingebauten Flanschstrebe wurde in Abschnitt 5.4.4 ermittelt (Profil Z 300/3,0 von der Firma Schrag). Die Belastungen der Flanschstreben wurden im Modell mit den genannten Pfettenquerschnitt bestimmt, die Werte sind im Tab. 6-12 zusammengefügt.

*Tab. 6-12 Aufzunehmende Normalkraftbelastungen der Flanschstreben, Neigung 60°*

Flansch-streben QS  Neigung $\alpha = 60^\circ$	neben Pfettenprofil: Schrag Z 300 / 3,0	
	Max Normalbelastung der Flanschstrebe [kN]	
	Randbereich	Innenbereich
L 40 x 4	62,3	35,0
L 50 x 6	67,9	37,8
L 60 x 6	69,2	38,4
L 70 x 6	70,2	39,2

Aufgrund der Größe der Knicklänge ist die vorhandene Widerstandsfähigkeit gegen Stabilitätsversagen der Flanschstrebe nicht ausreichend.

### 6.3.4 Gewichtsvergleich - Optimale Gestaltung

Der Gewichtsvergleich für zwei Gestaltungsvarianten - Neigung der Flanschstrebe 30° und 45° gegen die Vertikale - wird dargelegt. Von den insgesamt 12 Stück Pfetten der Halle sind 4 mit Flanschstreben ausgesteift. Die weiteren, nicht ausgesteiften Pfetten werden mit dem in Kapitel 5 ermittelten Querschnitt (Z 300/3,5 Schrag) ausgeführt. Eine andere mögliche Lösung ist, alle 12 Pfetten mit Flanschstreben auszuführen. Das erfordert aber einen deutlichen Arbeitszusatz Aufwand und wird hier nicht untersucht.

Die zwei Gestaltungsvarianten setzen sich somit aus 4 Stück ausgesteiften Pfetten, mit den zugehörigen Flanschstreben und aus 8 Stück Pfetten ohne Aussteifung zusammen. Es wurde hier im ersten Schritt das Eigengewicht der Pfette und der Flanschstrebe einzeln bestimmt. Im nächsten Schritt wurde das Eigengewicht der Gestaltungsvarianten kombiniert und berechnet.

#### 6.3.4.1 Eigengewicht der einzelnen Elementen

a) Eigengewicht der Pfetten:

- a1) Eigengewicht einer Pfette, ohne Aussteifung durch Flanschstreben (siehe Kapitel 5.4.1). Die erforderlichen Überlappungen sind wie in der damaligen Statik der Musterhalle 2 x 0,8m je Stützenbereich angenommen.

*Tab. 6-13 Eigengewicht einer Pfette*

Pfette ohne Flanschstrebe				
Profil:	Schrag Z 300/3,5			
Eg:	14 kg/m			
	Stück	Länge [m]	Sum. Länge [m]	Eg [kg]
Einer Pfette (ohne Überlappung)			75,60	1.058
Überlappung Stütze Rand	2	1,6	3,20	45
Überlappung Stütze mittig	6	1,6	9,60	134
Summ. einer Pfette			$\Sigma$ 88,40	1.238

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

- a2) Eigengewicht einer Pfette, im System mit 30° geneigten Flanschstreben. Die Länge der Überlappungen ist laut Bemessung Kapitel 5.4.2. angenommen.

*Tab. 6-14 Eigengewicht eines Stücks Pfette im System mit 30° geneigten Flanschstreben*

Pfette im System mit Flanschstrebe 30° geneigt				
Profil:	Schrag Z 300/3,5			
Eg:	14 kg/m			
	Stück	Länge [m]	Sum. Länge [m]	Eg [kg]
Einer Pfette (ohne Überlappung)			75,60	1.058
Überlappung Stütze Rand	2	2,2	4,40	62
Überlappung Stütze mittig	6	1,8	10,80	151
Summ. Länge einer Pfette			Σ 90,80	1.271

- a3) Eigengewicht von einer Pfette, im System mit 45° geneigten Flanschstreben. Die Länge der Überlappungen ist laut Bemessung Kapitel 5.4.3. angenommen.

*Tab. 6-15 Eigengewicht eines Stücks Pfette im System mit 45° geneigten Flanschstreben*

Pfette im System mit Flanschstrebe 45° geneigt				
Profil:	Schrag Z 300/3,5			
Eg:	12 kg/m			
	Stück	Länge [m]	Sum. Länge [m]	Eg [kg]
Einer Pfette (ohne Überlappung)			75,60	907
Überlappung Stütze Rand	2	2,45	4,90	59
Überlappung Stütze mittig	6	2,4	14,40	173
Summ. Länge einer Pfette			Σ 94,90	1.139

- b) Eigengewicht der zu einer Pfette gehörigen Flanschstrebe im System mit 30° und 45° geneigten Flanschstreben:

Die erforderlichen Profile siehe im Abschnitt 6.3.3 ermittelt.

- b1) Flanschstrebe des System mit 30° geneigten Flanschstreben

*Tab. 6-16 Eigengewicht der zu einer Pfette gehörigen Flanschstreben im System mit 30° geneigten Flanschstreben*

Flanschstreben einer Pfette im System 30°				
Profil	Stück	Länge [m]	Eg [kg/m]	Eg [kg]
L50 x6	12	1,55	4,47	83
L60 x6	4	1,55	5,42	34
Summ.				117

- b2) Flanschstrebe des System mit 30° geneigten Flanschstreben

*Tab. 6-17 Eigengewicht der zu einer Pfette gehörigen Flanschstreben im System mit 30° geneigten Flanschstreben*

Flanschstreben einer Pfette im System 45°				
Profil	Stück	Länge [m]	Eg [kg/m]	Eg [kg]
L70 x6	16	1,96	6,38	200

## Ermittlung der Tragfähigkeit der Flanschstreben

### 6.3.4.2 Eigengewicht der zwei Gestaltungsvarianten

#### Gestaltungsvariante 1: Neigung 30°

Tab. 6-18 Eigengewicht des gesamten Pfetten – Flanschstreben Systems mit 30° geneigte Flanschstreben

System 1: Flanschstreben 30° geneigt			
	Stück	Eg [kg / Stück]	Eg summ. [kg]
Pfetten ohne Flanschstreben	8	1.237,6	9.901
Pfetten mit Flanschstreben ausgesteift	4	1.271,2	5.085
Flanschstrebe L 50 x 6	12	6,9	83
Flanschstrebe L 60 x 6	4	8,4	34
Summ. System			15.102

#### Gestaltungsvariante 2: Neigung: 45°

Tab. 6-19 Eigengewicht des gesamten Pfetten – Flanschstreben Systems mit 30° geneigte Flanschstreben

System 2: Flanschstreben 45° geneigt			
	Stück	Eg [kg / Stück]	Eg summ. [kg]
Pfetten ohne Flanschstreben	8	1.237,6	9.901
Pfetten mit Flanschstreben ausgesteift	4	1.138,8	4.555
Flanschstrebe L 70 x 6	16	12,5	200
Summ. System			14.656

Der Unterschied zwischen den zwei Gestaltungen ist bezüglich des Eigengewichtes des gesamten Pfetten – Flanschstreben – Systems der Halle vernachlässigbar klein. Das mit 45° Neigung geschaltete System weist ein um 3,0 % niedrigeres Eigengewicht auf, was bezogen auf des Gesamtgewicht der Halle vernachlässigbar klein ist.

Es ist theoretisch möglich in die Halle zwei unterschiedliche Pfettenprofile einzubauen, denn die angenommenen Pfettenprofile sind gleich groß und unterscheiden sich nur in der Blechstärke. Ausführungstechnisch ist das aber nicht realistisch. Die beiden Profile sehen beinahe gleich aus und könnten bei der Montage leicht verwechselt werden.

Somit wird die folgende Gestaltung für die am besten geeignete gehalten:

Das System nach der Optimierung setzt sich aus Pfettenquerschnitten mit Schrag - Profil 300/3,5, S350 zusammen. Die Flanschstreben sind doppelseitig, symmetrisch mit 30° großer Neigung angeordnet. Am Rand (an beiden Enden 2 Stück, insgesamt 4) werden Flanschstreben mit L 70 x 6 Querschnitt, S355 mit Schrauben M22, 8.8, im Innenbereich (12 Stück) mit L 50 x 6 Querschnitt, S355 mit Schrauben M14, 8.8 (Schrauben sowohl bei Detail A als auch bei Detail B) eingebaut.

## 7 Zusammenfassung

---

In letzter Zeit bekommen wirtschaftliche Aspekte im Baubereich immer größere Bedeutung. Daher werden bei leichten Stahlhallen mit schlanken Konstruktionselementen Stabilisierungselemente immer wesentlicher. Der Obergurt des Riegels ist üblicherweise von den Pfetten gehalten, im Fall einer abhebenden Belastung ist aber auch die Stabilisierung des Untergurtes nötig.

Die vorliegende Arbeit untersucht die mithilfe von Flanschstreben ausgebildete Aussteifung der Riegeluntergurte am Beispiel einer bestehenden leichten Stahlhalle. In diesem System wirken die kaltgeformten Pfetten, die winkelförmig profilierten Flanschstreben und der als Wellstegträger ausgeführte Riegel zusammen. Somit stellt sich die Frage, wie diese Profile unter Berücksichtigung der Wirkung der Flanschstreben bemessen werden können. Gleichzeitig wurde die optimale Gestaltung der Flanschstreben gesucht und es wurde die Querschnitte der betroffenen Bauelemente des Stabilisierungssystems bemessen.

Zunächst wurde der als Wellstegträger ausgeführte Riegel untersucht. Es war dabei die Frage zu beantworten, wie die stabilisierende Wirkung der Flanschstreben für die Bemessung des Riegels berücksichtigt werden darf und ob die vereinfachten Annahmen der ausgeführte Hallenstatik richtig sind. Weiter war es ein Ziel, die infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes aufzunehmenden Belastungen des aussteifenden Systems zu bestimmen. Die Flanschstreben wurden im Stabilitätsnachweis des Riegels - in der originalen Hallenstatik - als Gabellagerungen angenommen. Um diese Annahme zu überprüfen, wurde die realitätsnahe Ersatzfedersteifigkeit des Flanschstreben - Pfetten - Systems ermittelt. Nachfolgend wurden der Riegeluntergurt mit dieser Federsteifigkeit bemessen und die Knicklänge des Riegeluntergurtes ermittelt.

Die ermittelte Knicklänge des Riegeluntergurtes unterscheidet sich um weniger als 5% von der Knicklänge des Modelles mit steifen Horizontallagerungen, nach Meinung der Verfasserin ist eine entsprechende Vereinfachung akzeptabel, gleichzeitig ist aber zu empfehlen, mit diesen Annahmen auf maximal 90 % Ausnutzung des Riegels gegen Stabilitätsversagen zu bemessen. Ergänzend wurden in dieser Arbeit noch die Bemessungsregelungen des Wellstegträgers der europäischen Stahlbaunorm gezeigt. Dann wurde die Bemessung der Wellstegträger - Riegel nach diesen Regelungen - allerdings mit dem davor ermittelte realen Abminderungsbeiwert  $\chi$  des Systems - geführt.

Weiters wurde die Belastung der Flanschstreben infolge der Stabilisierung des Riegeluntergurtes gegen Ausknicken ermittelt. Die von den Flanschstreben aufzunehmende Kraft aus der Aussteifung des Riegeluntergurtes ist sehr gering (ca. 3kN).

Weiters wurden die Pfetten, die Flanschstreben und die Steifigkeit des Riegeluntergurtes analysiert. Diese beeinflussen sich gegenseitig intensiv, ihre Analyse ist nur in einem gemeinsamen Modell möglich. Dafür wurde im Statikprogramm SCIA ein einfaches Stabmodell in zahlreichen Varianten aufgebaut. Es wurden folgende Untersuchungen geführt:

- › Die Steifigkeit des Riegeluntergurtes wurde mit Steifigkeit = 0 beziehungsweise mit unendlicher Steifigkeit untersucht. Es wurde die Auswirkung der Steifigkeit auf den Schnittgrößenverlauf der Pfette bzw. der Flanschstreben untersucht. Damit konnte festgestellt werden, welches Modell zu den maßgebenden Schnittgrößen dieser Bauteile führt.
- › Es wurde die optimale Ausbildung der Flanschstreben bzw. ihr erforderliches Querschnittsprofil und die ideale Knotenausbildung gesucht. Um die optimale Ausbildung zu finden, wurde das gesamte System mit Flanschstreben einseitig bzw. doppelseitig (symmetrisch) mit unterschiedlichen Neigungen (30°, 45°, 60° gegen die Vertikale) analysiert.

## Zusammenfassung

- › Die Flanschstreben wurden bei der bestehenden Musterhalle ohne statischen Nachweis, nur nach konstruktiver Erfahrung eingebaut. Daher wurde von der Verfasserin sowohl die Stab- als auch die Knotenbemessung der Flanschstreben für die unterschiedlichen Ausbildungsvarianten der Flanschstreben geführt.
- › Mit Untersuchung der Pfette wurde versucht herauszufinden, ob die in der damaligen Hallenstatik angenommene Vereinfachung auf der sicheren Seite ist. Dort wurde die Pfette als Neunfeldträger analysiert, diese spannt zu Riegel bis Riegel. Für die Durchlaufwirkung wurde in Stützenbereich eine Überlappung mit 2 x 0,8m Länge ausgeführt. Daher wurde durch die Verfasserin überprüft, ob unter Berücksichtigung der abstützenden Wirkung der Flanschstreben kleinere Pfettenprofile möglich sind. Dafür wurde nach der eingehenden Beschäftigung mit den Regelungen für die Bemessung von dünnwandigen, kaltgeformten Pfetten laut EN 1993-1-3 die einschlägige EN Regelung vorgestellt. Die Bemessung des Pfettenquerschnitts wurde für die unterschiedlichen Ausbildungsvarianten der Flanschstreben geführt.
- › Schlussendlich wurde nach der Bemessung der Bauteile für die möglichen Ausbildungsvarianten eine Gewichtsanalyse durchgeführt.

Nach den oben beschriebenen Untersuchungen können folgende Feststellungen getroffen werden:

- › Die maßgebenden Schnittgrößen der Pfette ergeben sich für den Riegeluntergurt mit Steifigkeit = 0. Die größten Normalkräfte der Flanschstreben werden im Modell mit unendlich starr modelliertem Riegeluntergurt erhalten.
- › In der Bemessung der Flanschstreben für ihre unterschiedlichen Ausbildungsvarianten sind verschiedene Versagensformen maßgebend. Bei der mit 30° Neigung gegen die Vertikale ausgebildete Flanschstrebe ist die Widerstandsfähigkeit gegen Lochleibung entscheidend. Je größer die Neigung der Flanschstrebe gegen die Vertikale ist, desto größeren Einfluss bekommt aufgrund der großen Knicklänge die Widerstandsfähigkeit gegen Stabilitätsversagen der Flanschstrebe.
- › In der Bemessung des Pfetten – Flanschstreben - Knotens kommt der Überlappung der Pfette eine entscheidende Rolle zu. Die Pfetten sind in der vorliegende Arbeit mit 3,0 bzw. 3,5 mm Stärke angeordnet. Um eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Lochleibung zu erreichen, ist die einzige Möglichkeit, die Verbindung innerhalb des Überlappungsbereiches der Pfette auszubilden. Damit kann in der Berechnung der Pfettenquerschnitt mit der doppelten Stärke berücksichtigt werden. Dies gilt für jede Ausbildungsvariante der Flanschstreben.
- › Dem Flanschstreben - Riegeluntergurt - Knoten kommt eine besondere Bedeutung zu. Die in der Musterhalle ausgeführte Variante zeigt ungewollte Exzentrizitäten in dem statisch unbestimmten System.
- › Nach der Analyse der Pfetten mit den unterschiedlichen Flanschstreben - Ausbildungen konnte festgestellt werden, dass die in der damaligen Hallenstatik angenommene Vereinfachung auf der unsicheren Seite liegt. Beim exakten System - mit Berücksichtigung der Flanschstreben - verbreitert sich der Bereich des Stützmomentes. Um diese Stützmomente aufzunehmen, ist eine längere Überlappung der Pfettenteile erforderlich. Mit dem vereinfachten Nachweis der Musterhalle kann die erforderliche Überlappungslänge nicht bestimmt werden.
- › Ein kleineres Pfettenprofil zu verwenden ist erst bei größeren Neigungen (ab 45° gegen die Vertikale) möglich. Bei dieser Ausbildung der Flanschstrebe sind auch die Durchbiegungen der Pfette kleiner.

Mit den obigen Ergebnissen und Überlegungen wurde festgestellt, dass für eine optimale Ausbildung der Flanschstreben diese mit 30° Neigungen konstruiert werden sollten. Im Fall der mit 45° gestalteten Variante ist das Eigengewicht aufgrund des kleineren Pfettenquerschnitts niedriger. Dieser Unterschied ist aber unbedeutend. Beim System mit 45° geneigten Flanschstreben können die 4

## Zusammenfassung

ausgesteiften Pfetten mit kleineren Querschnitten ausgeführt werden. Das Profil der nicht aussteiften Pfettenstränge muss aber unverändert bleiben. Diese Ausbildung ist zwar theoretisch möglich, aber baupraktisch ist es nicht optimal, eine Halle unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Pfettenquerschnitten auszuführen.

# Literatur

---

- [1] ÖNORM EN 1990 , Eurocode — Grundlagen der Tragwerksplanung ausgaben 2013-03-15  
Sowie die zugehörige Nationale Festlegung, ÖNORM B EN 1990-1, Teil1: Hochbau, Ausgabe:  
2003- 01-01
- [2] ÖNORM EN 1991-1-1; Eurocode 1- Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-1: Wichte,  
Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, Ausgabe 2011-09-01  
Sowie die zugehörige Nationale Festlegung, ÖNORM B EN 1991-1-1, Ausgabe: 2003- 12-01
- [3] ÖNORM EN 1991-1-3; Eurocode 1- Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-3: Allgemeine  
Enwirkungen- Schneelasten, Ausgabe: 2012-3-1  
ÖNORM B EN 1991-1-3, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN, Ausgabe:2013-09-1
- [4] ÖNORM EN 1991-1-4; Eurocode 1- Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-4: Allgemeine  
Enwirkungen- Windlasten, Ausgabe: 2011- 5-15  
ÖNORM B EN 1991-1-4, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN, Ausgabe: 2013-5-1
- [5] ÖNORM EN 1993-1-1; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-1:  
Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Ausgabe: 2014-10-25  
ÖNORM B EN 1993-1-1, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN, Ausgabe: 2007-2-1
- [6] ÖNORM EN 1993-1-3; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-  
3:Allgemeine Regeln- Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche,  
Ausgabe 2010-09-01  
ÖNORM B EN 1993-1-3, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN, Ausgabe: 2007-10-1
- [7] ÖNORM EN 1993-1-5; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-5:  
Plattenförmige Bauteile; Ausgabe 2012-06-15  
ÖNORM B EN 1993-1-5, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN, Ausgabe: 2008-5-1
- [8] ÖNORM EN 1993-1-8; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-8:  
Bemessung von Anschlüssen ; Ausgabe 2012-03-01  
ÖNORM B EN 1993-1-8, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN, Ausgabe: 2006-10-1
- [9] ÖNORM EN 1993-3-1; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 3-1:  
Türme, Maste und Schornsteine- Türme und Maste; Ausgabe: 2010-08-15  
ÖNORM B EN 1993-3-1, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN, Ausgabe: 2009-3-15
- [10] DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12
- [11] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Zulassungsnummer: Z-10.4-609, Geltungsdaten:  
von 9.10.2013 bis 9.10.2018. Antraghersteller: Kingspan GmbH,  
Zulassungsgegenstand: Tragende Sandwichelemente mit Stahldecksichten und einem  
Kernwerkstoff aus Polyurethan-Hartschaum; Typ „KS1000 RW“, „KS AWP“, „KS TF“ und „KS  
TL“
- [12] Blaß, H. J., Saal,H.: Anwendungshinweise zum Programm „Berechnung der  
Anschlusssteifigkeit von Sandwichelementen für die Drehbetung der Unterkonstruktion“,  
Versuchsanalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe (TH)

## Literatur

- [13] Burne, B., Kalameya, J., Kaltgeformte, dünnwandige Bauteile und Bleche aus Stahl nach DIN EN 1993-1-3, Hintergründe, Bemessung und Beispiele.- Stahlbau-Kalender 2009. Ernst & Sohn, Berlin, 2009
- [14] Burne, B., Kommentare zu DIN EN 1993-1-3:Allgemeine Bemessungsregeln- Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche.- Stahlbau-Kalender 2013. Ernst & Sohn, Berlin, 2013
- [15] Dürr, M.: Die Stabilisierung biegedrillknickgefährdeter Träger durch Sandwichelemente und Trapezbleche, Dissertation. Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2008, Januar
- [16] Dürr, M., Podleschny, R., Saal, H.: Untersuchungen zur Drehbettung von biegedrillknickgefährdeten Trägern durch Sandwichelemente, Stahlbau, 76. (2007), Heft 6/Seite 401-406
- [17] Gärtner, E.: Sinträger (Wellstegträger)- Technische Dokumentation, Zeman & Co Gesellschaft mbH
- [18] Hannebauer, D.: Diplomarbeit-„Stabilitätsuntersuchungen eines leichten Hallenrahmens mit unterschiedlichen diskreten Stützungen“, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät 2 Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, Lehrstuhl für Stahlbau, 2000
- [19] Hannebauer, D.: Zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen. Brandenburgische –Dissertation, Technische Universität Cottbus, Fakultät 2 Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, Lehrstuhl für Stahlbau, Cottbus 2008, April
- [20] Iványi, Miklós: Hídépítéstan, Acélszerkezetek, Műegyetemi kiadó, Budapest, 1988
- [21] Kindmann, R. : Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung, 4. Auflage, Berlin 2008
- [22] Marosi, A.: Tragverhalten von Hallen mit Flanschstreben- Zusammenfassung, Brandenburgische Technische Universität, Lehrstuhl für Stahlbau, Cottbus, 2008
- [23] Pasternak, H.; Hannebauer, D.: Wie wirkungsvoll sind Flanschstreben bei der Stabilisierung von Riegeln?; Brandenburgische Technische Universität, Lehrstuhl für Stahlbau, Cottbus, 2001
- [24] Strohmann, Isabel: Zum Biegedrillknicken von biegebeanspruchten I- Profilen mit und ohne Voute, Dissertation, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dortmund, 2010 November