

Technical Report

Nr. 3

hochschule 21

Geschraubte Rahmenecken
Bemessung nach dem
EC3-1-8:2010-12

Daniela Holz und Susanne Renken

hochschule 21 - Technical report, Nr. 3

2014

hochschule 21- Technical report

Herausgeber:
hochschule 21 gemeinnützige GmbH
Staatlich anerkannte private Fachhochschule
Harburger Straße 6

21614 Buxtehude

Telefon: +49 4161 648 0
Fax: +49 4161 648 123
E-Mail: info@hs21.de
<http://www.hs21.de>

ISSN 2196-5153

HOCHSCHULE 21 IN BUXTEHUDE



Bachelorarbeit

Geschraubte Rahmenecken Bemessung nach dem EC3-1-8: 2010-12

**ABSCHLUSSARBEIT ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES
BACHELOR OF ENGINEERING (B.ENG.)**

ERSTELLT VON: Daniela Holz (Matrikel Nr. 10951)
Susanne Renken (Matrikel Nr.10956)

ERSTPRÜFER: Prof. Dr.-Ing. Maritta Petersen

ZWEITPRÜFER: Prof. Dr.-Ing. Gerd Bertrand
Dipl.-Ing. Michael Tobschall

ABGABE AM 07.03.2013

Zusammenfassung

Mit der Einführung des Eurocodes 3, DIN EN 1993-1-8:2010-12, sind die Berechnungen für geschraubte Anschlüsse anders auszuführen als in den Normen zuvor.

Der EC3-1-8 hat zum Ziel, Tragwerke wirtschaftlicher bemessen zu können, um die Kosten für Stahlbauwerke zu optimieren. Allerdings sind die Berechnungen sehr umfangreich und es gibt kaum Literatur, in der diese übersichtlich aufgezeigt werden.

In dieser Ausarbeitung wird das Bemessungskonzept geschraubter Stützen-Trägeranschlüsse mit einer Stirnplatte nach dem EC3-1-8 vorgestellt. Bisher wurden Anschlüsse als biegesteif oder gelenkig ausgeführt, dabei wurde die Verformung des Anschlusses nicht berücksichtigt. Diese hat allerdings Auswirkungen auf die Schnittgrößenverteilung eines Rahmentragwerks. Bei der Bemessung werden jetzt die Tragfähigkeit und die Rotationssteifigkeit eines Anschlusses gemeinsam betrachtet, was in Deutschland bisher unüblich war.

In dem EC3-1-8 werden Anschlüsse in Kategorien eingeordnet, was wiederum abhängig von der Klassifizierung der Anschlüsse nach der Tragfähigkeit und der Rotationssteifigkeit ist. Für die Klassifizierung müssen demzufolge sowohl die Tragfähigkeit als auch die Rotationssteifigkeit des Anschlusses bekannt sein.

Die Bemessung der Anschlüsse wird in dem EC3-1-8 nach der Komponentenmethode durchgeführt. Dabei wird der Anschluss in einzelne Bereiche eingeteilt, für die jeweils die Tragfähigkeit und die Rotationssteifigkeit berechnet werden.

Am Ende der Ausarbeitung wird dieses Vorgehen an fünf ausgesuchten Beispielen verdeutlicht. Zudem werden die Beispiele kurz hinsichtlich ihrer Kategorisierung und Rotationssteifigkeit verglichen.

Abstract

With the introduction of the Eurocode 3, DIN EN 1993-1-8:2010-12, the calculation concept for bolted connections has changed compared to the norms/ standards that were valid before.

The aim of EC3-1-8 is to calculate structures in a more realistic and economical way in order to optimise the costs of steel buildings. However, the calculations are very comprehensive and there is hardly any literature demonstrating them clearly.

This thesis aims to present the calculation concept for bolted beam-to-column joint connections with an end-plate based on EC3-1-8. Up to now the joint connections have only been carried out either as rigid or flexible joints neglecting the deformation of the connection that has implications for the distribution of internal forces in a frame structure. For the calculation, both the resistance and the rotation stiffness of a connection will be taken into account. This has been uncommon practice in Germany up to now.

According to EC3-1-8, connections are categorised on the basis of their classification in terms of resistance and rotation stiffness. For the classification of a connection it is necessary to know its resistance and rotation stiffness.

The calculation of connections according to EC3-1-8 is executed on basis of the component-method defined in EC3-1-8. In accordance with the component-method the connection is subdivided into different parts/components. The resistance and rotation stiffness has to be calculated for each component of the connection.

In the final section of this thesis the calculation concept is demonstrated and applied in five selected examples. In addition, the results of all five examples will be compared in terms of their resistance and rotation stiffness.

Inhalt

1	EINLEITUNG	1-1
2	ERLÄUTERUNG FORMELZEICHEN	2-1
3	ALLGEMEINES ZUM ANSCHLUSS	3-1
3.1	ANSCHLUSSARTEN	3-1
3.2	EINFLUSS DER VERFORMBARKEIT DES ANSCHLUSSES AUF DIE SCHNITTGRÖßEN	3-1
4	EINFÜHRUNG IN DIE ANSCHLUSSBERECHNUNG	4-1
4.1	EINFÜHRUNG IN DIE KLASSIFIZIERUNG	4-1
4.2	BEMESSUNGSKONZEPT	4-1
4.3	KOMPONENTENMETHODE	4-2
5	TRAGFÄHIGKEIT	5-1
5.1	ALLGEMEIN	5-1
5.2	ÄQUIVALENTER T-STUMMEL	5-2
5.3	NACHWEIS DER KOMPONENTEN	5-10
5.3.1	KOMPONENTE 1: STÜTZENSTEG MIT SCHUBBEANSPRUCHUNG	5-10
5.3.2	KOMPONENTE 2: STÜTZENSTEG MIT BEANSPRUCHUNG DURCH QUERDRUCK	5-11
5.3.3	KOMPONENTE 3: STÜTZENSTEG MIT BEANSPRUCHUNG DURCH QUERZUG	5-13
5.3.4	KOMPONENTE 4: STÜTZENFLANSCH MIT BIEGEBEANSPRUCHUNG	5-15
5.3.5	KOMPONENTE 5: STIRNPLATTE MIT BIEGEBEANSPRUCHUNG	5-15
5.3.6	KOMPONENTE 6: TRÄGERFLANSCH UND –STEG MIT DRUCKBEANSPRUCHUNG	5-17
5.3.7	KOMPONENTE 7: TRÄGERSTEG MIT ZUGBEANSPRUCHUNG	5-17
5.4	BIEGETRAGFÄHIGKEIT	5-18
6	ROTATION	6-1
6.1	FEDERMODELL	6-1
6.2	MOMENTEN-ROTATIONS-CHARAKTERISTIK	6-2
6.3	STEIFIGKEITSKOEFFIZIENTEN	6-4
6.3.1	ALLGEMEINES	6-4
6.3.2	BERECHNUNG DER STEIFIGKEITSKOEFFIZIENTEN	6-5
6.3.3	HEBELARM z	6-10
6.4	ROTATIONSSTEIFIGKEIT	6-10
6.5	ROTATIONSKAPAZITÄT	6-12

7	KATEGORISIERUNG EINES TRÄGER-STÜTZENANSCHLUSSES	7-1
7.1	KATEGORISIERUNG DES ANSCHLUSSES	7-1
7.2	KLASSIFIZIERUNG NACH DER TRAGFÄHIGKEIT	7-5
7.3	KLASSIFIZIERUNG NACH DER ROTATIONSSTEIFIGKEIT	7-6
8	BEISPIELE	8-1
8.1	ALLGEMEINES	8-1
8.2	BEISPIEL 1: ANSCHLUSS MIT ZWEI SCHRAUBENREIHEN OHNE AUSSTEIFUNGEN	8-2
8.2.1	SYSTEM	8-2
8.2.2	WERTE	8-3
8.2.3	EFFEKTIVE LÄNGE L_{EFF}	8-4
8.2.4	TRAGFÄHIGKEIT	8-8
8.2.5	ROTATIONSSTEIFIGKEIT	8-19
8.2.6	KATEGORISIERUNG	8-24
8.3	BEISPIEL 2: ANSCHLUSS MIT EINER SCHRAUBENREIHE OHNE AUSSTEIFUNGEN	8-25
8.3.1	SYSTEM	8-25
8.3.2	WERTE	8-26
8.3.3	EFFEKTIVE LÄNGE L_{EFF}	8-27
8.3.4	TRAGFÄHIGKEIT	8-28
8.3.5	ROTATIONSSTEIFIGKEIT	8-33
8.3.6	KATEGORISIERUNG	8-36
8.4	BEISPIEL 3: ANSCHLUSS MIT ZWEI SCHRAUBENREIHEN UND STEGSTEIFEN	8-38
8.4.1	SYSTEM	8-38
8.4.2	WERTE	8-39
8.4.3	EFFEKTIVE LÄNGE L_{EFF}	8-40
8.4.4	TRAGFÄHIGKEIT	8-43
8.4.5	ROTATIONSSTEIFIGKEIT	8-54
8.4.6	KATEGORISIERUNG	8-58
8.5	BEISPIEL 4: ANSCHLUSS MIT ÜBERSTEHENDER STIRNPLATTE OHNE AUSSTEIFUNG	8-59
8.5.1	SYSTEM	8-59
8.5.2	WERTE	8-60
8.5.3	EFFEKTIVE LÄNGE L_{EFF}	8-61
8.5.4	TRAGFÄHIGKEIT	8-64
8.5.5	ROTATIONSSTEIFIGKEIT	8-77
8.5.6	KATEGORISIERUNG	8-80

8.6	BEISPIEL 5: ANSCHLUSS MIT FUTTERPLATTEN AM STÜTZENFLANSCH	8-81
8.6.1	SYSTEM	8-81
8.6.2	WERTE	8-82
8.6.3	EFFEKTIVE LÄNGE L_{EFF}	8-83
8.6.4	TRAGFÄHIGKEIT	8-86
8.6.5	ROTATIONSSTEIFIGKEIT	8-97
8.6.6	KATEGORISIERUNG	8-98
9	VERGLEICH DER ANSCHLÜSSE	9-1
9.1	NACH KLASSIFIZIERUNG DER TRAGFÄHIGKEIT	9-1
9.2	NACH KLASSIFIZIERUNG DER ROTATIONSSTEIFIGKEIT	9-3
9.3	NACH KATEGORISIERUNG	9-6
10	AUSWIRKUNGEN AUF DAS TRAGWERK	10-1
11	RESÜMEE	11-1
12	LITERATURVERZEICHNIS	12-1
ANLAGE 1		A1-1

1 Einleitung

Seit Dezember 2010 ist europaweit der Eurocode 3, DIN EN 1993-1-1:2010-12 [1], für den Stahlbau eingeführt worden. Die Bemessung von Anschlüssen wird im Eurocode 3 Teil 8, DIN EN 1993-1-8:2010-12 [2], geregelt. Damit liegt in Deutschland ein anderes Bemessungskonzept für die Berechnung vor.

Stahlrahmentragwerke haben sich europaweit für Hallenbau und Industriebau durchgesetzt. In Deutschland wurden die Anschlüsse traditionell gelenkig oder biegesteif bemessen und ausgeführt. Dabei wurde ihre Verformbarkeit nicht berücksichtigt. Mit der Einführung des EC3-1-8 [2] müssen bei Anschlüssen auch die Verformungen berücksichtigt werden. Das hat zur Folge, dass Anschlüsse nicht nur gelenkig oder biegesteif kategorisiert werden können, sondern auch nachgiebig. Dadurch können Tragwerksreserven besser ausgenutzt werden, die zu wirtschaftlicheren Anschlüssen führen.

Die Berechnung der Anschlüsse nach dem EC3-1-8 [2] ist im Gegensatz zu der DIN 18800 [3] umfangreicher und aufwendiger geworden. Zudem gibt es kaum Literatur, die die Bemessung übersichtlich darstellt und kommentiert. Die Aufgabe dieser Bachelorarbeit ist es, die Berechnung eines geschraubten Anschlusses zu analysieren. Anhand von ausgewählten Beispielen sollen die Rechnungen verdeutlicht werden. Des Weiteren soll ein Vergleich der Beispiele hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Verformbarkeit stattfinden.

Bei dem ausgewählten Anschluss handelt es sich um einen einseitigen Träger-Stützenanschluss mit geschraubter Stirnplatte. Die Arbeit beschränkt sich auf gewalzte I-Querschnitte. Zudem werden Vouten und Flanschwinkel in dieser Ausarbeitung nicht betrachtet. Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft N_{Ed} im angeschlossenen Bauteil 5% der plastischen Tragfähigkeit des Querschnitts nicht überschreitet [2]. Andernfalls ist das Bemessungskonzept des EC3-1-8 [2] nicht anzuwenden.

Zunächst wird die Funktion eines Anschlusses in einer Tragwerkskonstruktion beschrieben. Dann folgt eine Einführung in die Anschlussbemessung nach dem EC3-1-8 [2]. Hier wird insbesondere beschrieben, warum die Anschlüsse kategorisiert werden müssen und warum sich das Bemessungskonzept verändert hat. Zudem wird das Komponentenmodell, mit dem ein Anschluss bemessen wird, erklärt.

In den nächsten beiden Kapiteln wird erläutert wie die Tragfähigkeit und die Rotation eines Anschlusses nach dem Komponentenmodell berechnet werden. Nachfolgend wird beschrieben wie ein Anschluss zu kategorisieren ist. Die Kategorie hat Auswirkungen auf das Berechnungsverfahren, was auch in diesem Kapitel erläutert wird.

Das Kapitel 8 umfasst fünf ausgewählte Beispiele, anhand derer die Berechnungsschritte verdeutlicht werden. Diese Beispiele werden nachfolgend miteinander verglichen.

Abschließend wird die Auswirkung der Verformbarkeit eines Anschlusses auf die Schnittgrößen beschrieben. Dabei werden die Momentenverläufe von den verschiedenen Anschlusskategorien miteinander verglichen.

Bei dieser Ausarbeitung werden Querschnitts- und Stabilitätsnachweise ausgenommen. Des Weiteren muss der Anschluss z. B. noch auf Lochleibung oder Abscheren bemessen werden. Diese Nachweise sind bei der Bemessung nach dem Komponentenmodell nicht berücksichtigt. Zudem wird auf die Gebrauchstauglichkeit des Tragwerkes nicht weiter eingegangen.

Diese Bachelorarbeit ist von zwei Studenten gemeinsam bearbeitet worden. Beim Verfassen der Ausarbeitung wurden die Kapitel wie folgt aufgeteilt; nicht genannte Abschnitte wurden dabei in Zusammenarbeit erstellt.

Frau Susanne Renken:

Kapitel 4	Einführung in die Anschlussberechnung
Kapitel 5	Tragfähigkeit
Kapitel 7	Kategorisierung eines Träger-Stützenanschlusses
	7.1 Kategorisierung des Anschlusses
	7.2 Klassifizierung nach der Tragfähigkeit
Kapitel 8	Beispiele: Tragfähigkeit
Kapitel 9	Vergleich der Anschlüsse
	9.1 Nach Klassifizierung der Tragfähigkeit
Anlage 1	Vereinfachung zu Komponente 2

Frau Daniela Holz:

Kapitel 3	Allgemeines zum Anschluss
Kapitel 6	Rotation
Kapitel 7	Kategorisierung eines Träger-Stützenanschlusses
	7.3 Klassifizierung nach der Rotationssteifigkeit
Kapitel 8	Beispiele: Rotationssteifigkeit
Kapitel 9	Vergleich der Anschlüsse
	9.2 Nach Klassifizierung der Rotationssteifigkeit
Kapitel 10	Auswirkungen auf das Tragwerk

2 Erläuterung Formelzeichen

$\bar{\lambda}_p$	Plattenschlankheitsgrad
A_b	Querschnittsfläche des Trägers
A_c	Querschnittsfläche der Stütze
a_f	Schweißnahtdicke am Flansch
A_s	Spannungsquerschnittsfläche der Schraube
A_{vc}	wirksame Schubfläche der Stütze nach DIN EN 1993-1-1 [1]
a_w	Schweißnahtdicke am Steg
$b_{eff,c,wc}$	wirksame Breite des Stützensteges für Querdruck
$b_{eff,t,wb}$	wirksame Breite eines Trägersteges mit Zugbeanspruchung
$b_{eff,t,wc}$	wirksame Breite des Stützensteges für Querkzug
b_p	Breite der Stirnplatte
b_{bp}	Breite der Futterplatte
b_s	Breite eines Stegbleches
d_s	Achsabstand zwischen den Stegsteifen
d_{wc}	Höhe des Stützensteges zwischen den Ausrundungen (gerader Stegteil)
e	Maß im T-Stummelmodell von der Schraubenachse zum äußeren Rand, Abbildung 5.1
e_{bp}	Abstand bei der Futterplatte vom äußeren Rand bis zur Schraubenachse
E	Elastizitätsmodul
e_1	Maß im T-Stummelmodell von der Schraubenachse in der Endreihe zum äußeren Rand Richtung Trägerflansch
e_x	Maß im T-Stummelmodell bei überstehenden Stirnplatten von der Schraubenachse bis zum gegenüberliegenden Rand des Trägerflansches, siehe Abbildung 5.2
$F_{c,fb,Rd}$	Beanspruchbarkeit Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung
$F_{c,wc,Rd}$	Beanspruchbarkeit Stützenstege durch Querdruckbeanspruchung
$F_{T,Rd}$	Beanspruchbarkeit des T-Stummelmodells
$F_{t,ep,Rd}$	Beanspruchbarkeit Stirnplatte mit Biegebeanspruchung
$F_{t,fc,Rd}$	Beanspruchbarkeit Stützenflansch mit Biegebeanspruchung
$F_{t,Rd}$	Bemessungswert der Zugtragfähigkeit der Schraube
$F_{tr,Rd}$	Momententragfähigkeit einer Schraubenreihe r

$F_{t,wb,Rd}$	Beanspruchbarkeit Trägersteg mit Zugbeanspruchung
$F_{t,wc,Rd}$	Beanspruchbarkeit Stützenstege durch Querkzugbeanspruchung
$F_{tx,Rd}$	Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe x , die am weitesten Entfernt vom Druckpunkt liegt
f_{ub}	äußerste Bruchfestigkeit des Schraubenwerkstoffes
h_b	Profilhöhe des Trägers
h_{bp}	Höhe der Futterplatte
h_c	Profilhöhe der Stütze
h_p	Höhe der Stirnplatte
h_r	Abstand der Schraubenreihe vom Druckpunkt (Mitte Flansch Träger)
h_x	Abstand der Schraubenreihe x zum Druckpunkt
I_b	Flächenträgheitsmoment zweiter Ordnung des Trägerquerschnitts
I_c	Flächenträgheitsmoment zweiter Ordnung des Stützenquerschnitts
K_b	Mittelwert aller I_b/L_b für alle Deckenträger eines Geschosses
K_c	Mittelwert aller I_c/L_c für alle Stützen eines Geschosses
$k_{eff,r}$	effektiver Steifigkeitskoeffizient für eine Schraubenreihe r
k_{eq}	äquivalenter Steifigkeitskoeffizient, siehe 6.3.2.8
$k_{i,r}$	Steifigkeitskoeffizient der Komponente i der Schraubenreihe r
k_{wc}	Abminderungsbeiwert für Normalkrafteinflüsse
$l_{a,fc}$	Länge der Schweißnaht zwischen Stützenflansch und Stegsteife
L_b	Dehnlänge einer Schraube (halben Mutterhöhe mit Unterlegscheiben plus der Paketdicke und halben Kopfhöhe)
l_{eff}	effektive wirksame Länge
$l_{eff,1}$	wirksame Länge für Versagensmodus 1
$l_{eff,2}$	wirksame Länge für Versagensmodus 2
$l_{eff,cp}$	wirksame Länge für kreisförmige Fließmuster
$l_{eff,nc}$	wirksame Länge für nicht kreisförmige Fließmuster
$M_{bp,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit der Futterplatte
$M_{c,Rd}$	Biegetragfähigkeit des Trägerquerschnitts, soweit erforderlich, unter Berücksichtigung der Abminderung aus Querkraftinteraktion, siehe DIN EN 1993-1-1

$M_{el,Rd}$	Bemessungswert der elastischen Momententragfähigkeit
$M_{j,Ed}$	einwirkendes Bemessungsmoment
$M_{j,Rd}$	Bemessungswert der Momentertragfähigkeit eines Anschlusses
$M_{pl,1,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit der Komponente im Modus 1
$M_{pl,2,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit der Komponente im Modus 2
$M_{pl,Rd}$	Bemessungswert der plastischen Momententragfähigkeit
$M_{pl,fc,Rd}$	plastische Biegetragfähigkeit eines Stützenflansches
$M_{pl,st,Rd}$	plastische Biegetragfähigkeit einer Stegsteife
$M_{y,pl,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit um die y-y Achse
m	Maß im T-Stummelmodell von der Schraubenachse bis Steg abzüglich $0,8 r_c$ bzw. $0,8 a_w * \sqrt{2}$, siehe Abbildung 5.1
m_2	Maß im T-Stummelmodell von der Schraubenachse bis Trägerflansch abzüglich $0,8 a_f \sqrt{2}$, siehe Abbildung 5.11
m_x	Maß im T-Stummelmodell bei überstehenden Stirnplatten von der Schraubenachse bis zum Trägerflansch abzüglich $0,8 a_f \sqrt{2}$, siehe Abbildung 5.2
n	e_{min} jedoch ist $n \leq 1,25 m$
n_b	Anzahl der Schraubenreihen (mit 2 Schrauben je Reihe)
$N_{pl,Rd}$	Bemessungswert der plastischen Normalkrafttragfähigkeit des Bruttoquerschnitts
p	Achsabstand zwischen 2 Schraubenreihen
Q	Abstützkräfte
QK	Querschnittsklasse
r	Nummer der Schraubenreihe
r_b	Ausrundungsradius zwischen Steg und Flansch des Trägers
r_c	Ausrundungsradius zwischen Steg und Flansch der Stütze
S_j	Rotationssteifigkeit eines Anschlusses
S_{jini}	Anfangsrotationssteifigkeit eines Anschlusses
T	Schraubenkraft
t_{bp}	Blechdicke der Futterplatte
t_{fb}	Blechdicke vom Trägerflansch

t_{fc}	Blechdicke vom Stützenflansch
t_p	Blechdicke der Stirnplatte
t_{wb}	Blechdicke vom Trägersteg
t_{wc}	Blechdicke vom Stützensteg
t_{st}	Blechdicke der Stegsteife
$V_{wp,add,Rd}$	Erhöhung der Schubtragfähigkeit bei einem ausgesteiften Stützensteg mit Stegsteifen, siehe Kapitel 5.3.1
$V_{wp,Rd}$	Plastische Schubtragfähigkeit des Stegfeldes einer Stütze
w	Maß im T-Stummelmodell bei überstehenden Stirnplatten zwischen den außenliegenden Schraubenachsen , siehe Abbildung 5.2
W_{el}	Widerstandsmoment elastisch
W_{pl}	Widerstandsmoment plastisch
x	Schraubenreihe, die am weitesten vom Druckpunkt entfernt liegt
z	Hebelarm
z_{eq}	äquivalenter Hebelarm, siehe 6.3.3
α	Beiwert, Ermittlung nach Kapitel 5.2 Seite 5-9
β	Übertragungsparameter nach Kapitel 5.1 Seite 5-1
γ_{M0}	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Querschnitten (bei Anwendung von Querschnittsnachweisen)
γ_{M1}	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung von Bauteilen bei Stabilitätsversagen (bei Anwendung von Bauteilnachweisen)
η	Anpassungsbeiwert für die Rotationssteifigkeit
μ	Beiwert für das Verhältnis von $M_{j,Rd}$ und $M_{j,Ed}$
ρ	Abminderungsbeiwert für Plattenbeulen
ϕ	Rotationswinkel eines Anschlusses
ϕ_{Cd}	maximale Rotationskapazität
ϕ_{Ed}	vorhandener Rotationswinkel des Anschlusses
ϕ_{el}	Rotationswinkel beim Übergang vom elastischen zum plastischen Bereich
ϕ_{Xd}	Rotationswinkel bei maximaler Momententragfähigkeit
ω	Abminderungsbeiwert, der möglichen Interaktionseffekte mit der Schubbeanspruchung im Stützenstegfeld nach Kapitel 5.3.2 Seite 5-13 berücksichtigt

3 Allgemeines zum Anschluss

3.1 Anschlussarten

Rahmentragwerke bestehen in der Regel aus Trägern und Stützen, die bei einem Bauwerk miteinander verbunden werden müssen.

Es gibt fünf verschiedene Verbindungsarten. Zum einen gibt es Anschlüsse, das sind Verbindungen von Stützen und Trägern. Dabei wird zwischen Anschlüssen mit einseitig und mit zweiseitig angeschlossenen Trägern unterschieden. Diese sind in Abbildung 3.1 mit Nummer 1 bzw. Nummer 2 dargestellt.

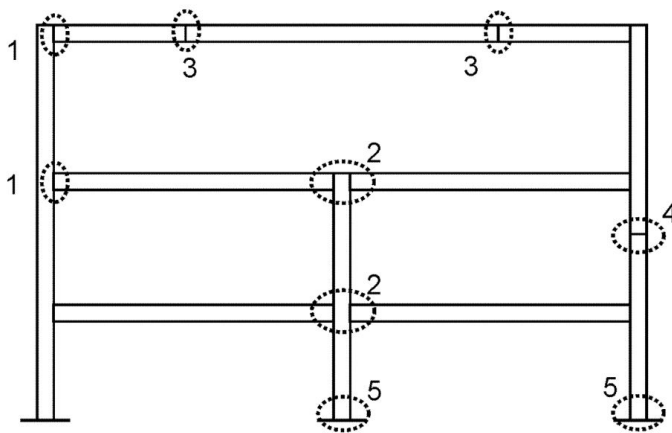


Abbildung 3.1 Anschlusskonfigurationen (starke Achse) [2]

Zum anderen gibt es Stöße. Dabei werden Träger- oder Stützenprofile miteinander verbunden. Das ist notwendig, wenn die gesamte Stützen- bzw. Trägerlänge zu groß für den Transport oder zu lastenintensiv bei der Montage ist. In Abbildung 3.1 wird mit Nummer 3 ein Trägerstoß und mit Nummer 4 ein Stützenstoß dargestellt.

Die fünfte Verbindungsart ist die Fußplatte. Sie verbindet und verankert das gesamte Tragwerk mit dem Fundament.

Alle Verbindungen müssen imstande sein, die einwirkenden Lasten vom anzuschließenden Bauteil durch die Verbindung in das angeschlossene Bauteil zu übertragen.

3.2 Einfluss der Verformbarkeit des Anschlusses auf die Schnittgrößen

Wie bereits erwähnt, wurde in Deutschland bei der Bemessung von Anschlüssen bisher nur in biegesteif oder gelenkig unterschieden.

Unter einem biegesteifen Anschluss wird eine starre Anschlusskonfiguration verstanden, die so geringe Verformungen aufweist, dass sie zu vernachlässigen sind. Der Anschluss besitzt eine hohe Momententragfähigkeit, ist in der Fertigung allerdings mit einem hohen Aufwand verbunden.

Eine gelenkige Anschlusskonfiguration kann rechnerisch keine Momente übertragen, ist aber in der Lage, sich im Anschluss zu verdrehen. Bei einem gelenkigen Anschluss treten höhere Feldmomente auf, daher werden größere Trägerprofile benötigt.

Mit dem EC3-1-8 [2] wurde ein Bemessungskonzept eingeführt, welches nicht nur ein Konzept zur Berechnung von biegesteifen und gelenkigen Anschlüssen liefert, sondern auch von nachgiebigen Anschlusskonfigurationen. Die Abbildung 3.2 zeigt einen Vergleich der Momenten-Rotationskurven für idealisierte biegesteife, nachgiebige und gelenkige Anschlüsse.

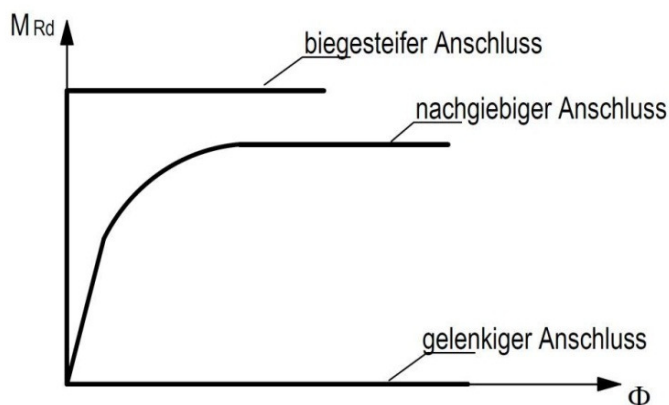


Abbildung 3.2 Momenten-Rotationskurven von idealisierten biegesteifen, nachgiebigen und gelenkigen Anschlüssen [4]

Ein nachgiebiger Anschluss besitzt zwar im Vergleich zu einem biegesteifen Anschluss eine geringere Tragfähigkeit, die aber, wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, ausreichend große Momente innerhalb einer Rahmenecke übertragen kann. Ebenso nehmen die Verformungen bei einem nachgiebigen Anschluss bei steigender Last zu. Diese Verformungen sind bei der Tragwerksberechnung zu berücksichtigen, da sie Auswirkungen auf die Schnittgrößenverteilung haben. Die Verformungen werden über ihre Rotation als Drehfeder ins Rahmensystem im Knotenpunkt eingegeben, wodurch sich die Schnittgrößen verändern. Ein biegesteifer Anschluss weist im Regelfall große Eckmomente und kleine Feldmomente auf. Der Querschnitt des Trägers muss daher für das Bemessungsmoment der Ecke ausgelegt werden, während der Träger im Feld überdimensioniert ist.

Ein nachgiebiger Anschluss hingegen kann wesentlich wirtschaftlicher ausgenutzt werden, weil sich durch das Ansetzen einer Drehfeder im Knotenpunkt das Eckmoment verringert und im gleichen Zug auch das Feldmoment vergrößert wird. Im Kapitel 10 wird darauf noch einmal näher eingegangen. Durch die Veränderung der Schnittgrößen und einer plastisch-plastischen Bemessung können hohe Ausnutzungsgrade der Querschnitte erzielt und die Querschnitte wirtschaftlicher dimensioniert werden [4].

4 Einführung in die Anschlussberechnung

4.1 Einführung in die Klassifizierung

Jeder Anschluss hat individuelle Eigenschaften hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Rotationsfähigkeit, die mit der Momenten-Rotations-Charakteristik dargestellt werden. Die Momenten-Rotations-Charakteristik hat Auswirkungen auf die Verteilung der Schnittkräfte und die Verformung des Tragwerks.

Um zu beurteilen, in wie weit die Momenten-Rotations-Charakteristik eines Anschlusses bei der Ermittlung der Schnittkräfte eines Tragwerks zu berücksichtigen ist, wird der Anschluss kategorisiert (Kapitel 7.1). Für die Einordnung in eine Kategorie ist es erforderlich, zunächst den Anschluss nach der Tragfähigkeit (Kapitel 7.2) und der Rotationssteifigkeit (Kapitel 7.3) zu klassifizieren.

Zudem muss auch das Berechnungsverfahren, nachdem das Tragwerk bemessen werden soll, bekannt sein, weil dieses Auswirkungen auf die Art der Kategorisierung eines Anschlusses hat. Ein Tragwerk kann nach dem elastischen, starr-plastischen oder elastisch-plastischen Berechnungsverfahren bemessen werden.

4.2 Bemessungskonzept

Da die Momenten-Rotations-Charakteristik eines Anschlusses, wie oben beschrieben, Auswirkungen auf die Schnittkräfte hat, muss diese vor der Tragwerksberechnung bekannt sein. Deshalb kann das klassische Bemessungskonzept nicht mehr beibehalten werden, weswegen für die Bemessung ein alternatives Konzept verwendet werden muss.

Bei dem klassischen Bemessungskonzept wird im ersten Schritt festgelegt, ob eine Rahmenecke biegesteif oder gelenkig ist. Dann kommen die Vorbemessung, die Klassifizierung, die Wahl des Berechnungsverfahrens, die Tragwerksanalyse und danach die Nachweise der Bauteile und Querschnitte. Erst wenn diese Nachweise eingehalten sind, werden die Anschlüsse konstruiert und bemessen [5].

Im Gegensatz zu den biegesteifen und gelenkigen Anschlüssen hat der nachgiebige Anschluss Auswirkungen auf das Tragwerk. Durch den Einfluss der Verformungen werden die Schnittkräfte umgelagert, dafür benötigt das Tragwerk eine ausreichend große Rotationskapazität. Daraus folgt, dass das Tragwerk erst analysiert werden kann, wenn der Anschluss bemessen und daraus resultierend die Rotationssteifigkeit bekannt ist. Allerdings ist es für die Konstruktion des Anschlusses notwendig, dass die Profile der Stütze und des Trägers bekannt sind. Hierfür erfolgt eine Vorbemessung des Tragwerks.

Nach der Tragwerksanalyse werden die Querschnitte nachgewiesen. Sollten die Nachweise nicht eingehalten werden, müssen die Profile sowie die Anschlüsse neu berechnet werden [6].

Das neue Bemessungskonzept ist in Abbildung 4.1 veranschaulicht.



Abbildung 4.1 Neues Bemessungskonzept

4.3 Komponentenmethode

Tschemmerneegg legte 1976 den Grundstein für das heutige Komponentenmodell, welches in der DIN EN 1993-1-8 [2] Anwendung findet. Er widmete sich in den 70er Jahren verstärkt der Frage nach dem Trag- und Verformungsverhalten nachgiebiger Knoten [7]. Später entwickelte Tschemmerneegg dann ein mechanisches Modell für die Knoten selbst, welches das elastisch-plastische Verformungsverhalten beschreibt [8]. Dabei zerlegte er den Knoten in drei Teilbereiche:

- Schubbereich
- Krafteinleitungsbereich
- Anschlussbereich

Um die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten zu untersuchen, hat er den einzelnen Bereichen Wegfedern zugeteilt. Diese Wegfedern sollen den Verformungsanteil des Bereichs widerspiegeln.

Eine modifizierte Form des Modells von Tschemmerneegg ist das „Innsbrucker Komponentenmodell“, bei dem der Anschluss in einzelne Komponenten zerlegt wird. Das Modell, welches hinter dem EC3-1-8 [2] steht, wurde kurz darauf im Institut für Stahlbau und Holzbau der Universität Delft entwickelt und ist eine Abwandlung des Innsbrucker Komponentenmodells [7].

Ein Stützen-Trägeranschluss besteht nach diesem Modell aus sieben Komponenten. Für die Berechnung der Tragfähigkeit und der Rotationssteifigkeit eines Anschlusses wird für jede Komponente der jeweilige Bemessungswert errechnet. Diese Berechnungen werden in Kapitel 5 für die Tragfähigkeit und in Kapitel 6 für die Rotation erläutert.

In Abbildung 4.2 sind die folgenden sieben Komponenten dargestellt:

- Komponente 1: Stützensteg mit Schubbeanspruchung
- Komponente 2: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck
- Komponente 3: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querkzug
- Komponente 4: Stützenflansch mit Biegebeanspruchung
- Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung
- Komponente 6: Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung
- Komponente 7: Trägersteg mit Zugbeanspruchung

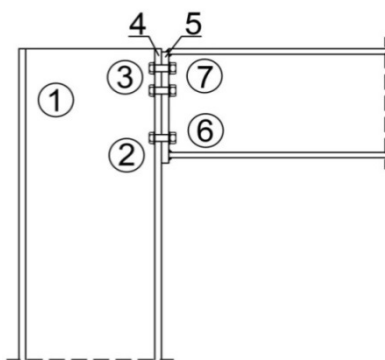


Abbildung 4.2 Beschriftung der Komponenten

Die Nummerierung der Komponenten ist für diese Ausarbeitung eigenständig festgelegt worden. Die Reihenfolge, in der die Komponenten hier vorgestellt werden, entspricht dabei dem EC3-1-8 [2].

Die Biegetragfähigkeit eines Anschlusses wird mit der Komponente begrenzt, die die kleinste Tragfähigkeit aufweist. Für die Berechnung der Komponenten 4 und 5 wird das äquivalente T-Stummelmodell verwendet. Dieses ist im Kapitel 5.2 erläutert.

Bei der Berechnung der Rotation wird jede einzelne Komponente mit einer Wegfeder charakterisiert. Nach der Charakterisierung werden die Federn an den Knoten in Form einer Drehfeder wieder zusammengeschaltet. Damit kann dann das Momenten-Rotationsverhalten des gesamten Knotens [7] beschrieben werden.

5 Tragfähigkeit

5.1 Allgemein

Die Berechnung der Tragfähigkeit der einzelnen Komponenten wird nach dem EC3-1-8 [2] vorgenommen. Im weiteren Verlauf wird nicht wiederholt darauf hingewiesen.

Für die Bemessung eines Tragwerks muss zuerst eine Vorbemessung der Anschlüsse stattfinden. Mit den dabei ermittelten Werten können die Schnittgrößen im Anschlussbereich berechnet werden. Anschließend wird die Biegetragfähigkeit dem vorhandenen Bemessungsmoment gegenübergestellt.

Die Beanspruchung der anschließenden Bauteile hat keinen Einfluss auf die Berechnung der Tragfähigkeit des Anschlusses. Allerdings gibt es zwei Fälle, in denen die Beanspruchung anschließender Bauteile berücksichtigt werden muss.

Im ersten Fall hat die Druckspannung in der Stütze Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Stützensteges auf Querdruck (Komponente 2) (siehe EC3-1-8 6.2.1(2) [2]). Jedoch beträgt der Abminderungsfaktor k_{wc} (siehe EC3-1-8 6.2.6.2(2) [2]) zumeist 1,0, was bedeutet, dass es in der Regel keine Abminderung gibt. Für die Vorbemessung wird generell $k_{wc} = 1,0$ gesetzt, weil die Druckspannung noch nicht bekannt ist und somit k_{wc} nicht ermittelt werden kann.

Des Weiteren hat der Schub im Stützenstegfeld Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Stützensteges, sowohl auf den Querzug (Komponente 3) als auch auf den Querdruck (Komponente 2) (siehe EC3-1-8 6.2.1(3) [2]). Die Interaktion zwischen der Schubbeanspruchung und dem Querdruck/ -zug wird mit einem Abminderungsfaktor ω (siehe EC3-1-8 Tab. 6.3 [2]) berücksichtigt.

Für die Berechnung der Biegetragfähigkeit wird ein Übertragungsfaktor β benötigt. Dieser berücksichtigt die gegenseitige Beeinflussung von mehreren Trägern an einem Stützenanschluss auf die Schnittgrößen. Da bei dem hier behandelten Anschluss nur ein Träger an eine Stütze anschließt, ist $\beta = 1,0$ (siehe EC3-1-8 Tab. 5.4 [2]).

Zusätzlich zu den hier beschriebenen Nachweisen müssen die Schweißnähte auf ihre Tragfähigkeit nachgewiesen werden. Die Biegetragfähigkeit sollte nicht durch die Schweißnähte, sondern durch die Grundkomponenten begrenzt werden (siehe EC3-1-8, 6.2.3 (4) [2]). Für die Übertragung der Querkraft dürfen laut EC3-1-8, 6.2.2 (1) [2] nur die Schweißnähte am Trägersteg herangezogen werden.

Die Schrauben müssen gesondert nachgewiesen werden. Die Nachweise erfolgen nach EC3-1-8, Tabelle 3.4. [2]. Der Nachweis der Zugtragfähigkeit muss nicht geführt werden, wenn die Schrauben, die nicht auf Zug beansprucht werden, die Querkraft über-

nehmen können. Ansonsten muss eine Interaktion zwischen Zug- und Abscherkraft bei den auf Zug beanspruchten Schraubenreihen gerechnet werden.

Bei der Nummerierung der Schraubenreihen wird mit der Reihe begonnen, die am weitesten vom Druckpunkt entfernt ist (siehe EC3-1-8 6.2.7.2 (1) [2]).

Zur Vereinfachung der Berechnung der Biegetragfähigkeit kann auch nur die Schraubenreihe angesetzt werden, die vom Druckpunkt am weitesten entfernt ist (siehe EC3-1-8 6.2.3 (6) [2]). Aus diesem Grund wird bei den hier gerechneten Beispielen die unterste Schraubenreihe vernachlässigt, da ihr Einfluss auf das Moment gering ist.

5.2 Äquivalenter T-Stummel

Für die Berechnung der Tragfähigkeit des Stützenflansches mit Biegung (Komponente 4) und der Stirnplatte mit Biegebeanspruchung (Komponente 5) wird das äquivalente T-Stummel Modell verwendet. Die Formelzeichen eines Träger-Stützenanschlusses sind in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 beschrieben.

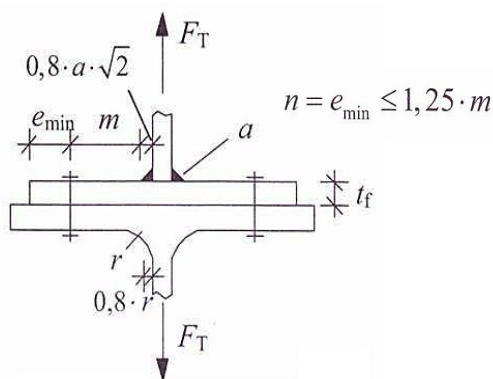


Abbildung 5.1 Formelzeichen eines äquivalenten T-Stummels [9]

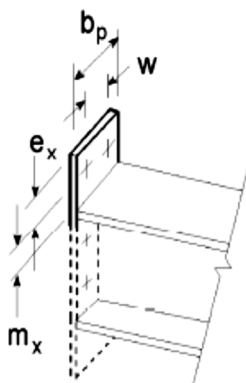


Abbildung 5.2 Formelzeichen für eine überstehende Stirnplatte [2]

Die Zugkraft wird nicht zentrisch in die Platte eingeleitet, sondern je zur Hälfte in einem Abstand von $0,8 \cdot r$ bzw. $0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a$, siehe Abbildung 5.1, vom Profilstege entfernt.

Bei dem T-Stummel kann am Plattenrand eine Abstützkraft Q auftreten, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$L_b \leq L_b^*$$

Die Abstützkraft, die am Rand der Platte des T-Stummels auftritt, ist eine Gegenkraft zu der Zugkraft am T-Stummel, (siehe zur Veranschaulichung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

L_b ist laut dem EC3-1-8 [2] die „Dehnlänge der Schraube, angesetzt mit der Klemmlänge der Platten plus der Höhe der Unterlegscheiben, der halben Kopfhöhe und der halben Mutterhöhe [2]“. In Tabelle 5.1 ist L_b für Schrauben tabelliert.

Tabelle 5.1 Dehnlänge der Schraube

Schraubengröße	x [cm]
M12	1,50
M16	1,95
M20	2,25
M24	2,55
M27	2,95
M30	3,15
M36	3,80
$L_b = x + \text{Stirnplatte} + \text{Stützenflansch} + \text{ggf. Futterplatte}$	

L_b^* wird wie folgt berechnet:

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_f^3}$$

Mit	A_s	Spannungsquerschnittsfläche der Schraube
	$l_{eff,1}$	effektive Länge des T-Stummels für Modus 1
	n_b	Anzahl der Schraubenreihen (mit 2 Schrauben je Reihe)
	m	siehe Abbildung 5.1
	t_f	siehe Abbildung 5.1

Nach dem EC3-1-8 [2] kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Träger-Stützenanschluss Abstützkräfte auftreten, trotzdem muss der Nachweis geführt werden. Abstützkräfte können nur bis zu einem bestimmten Bereich auftreten. Zum einen werden sie durch den Abstand der Schraube zum Plattenrand e_{min} begrenzt, weil die Abstützkraft eine Gegenkraft braucht, zum anderen können Abstützkräfte nicht belie-

big weit von der Schraubenkraft entfernt sein. Deshalb ist der Abstand n (siehe EC3-1-8 Tab. 6.2 [2]) zwischen der Abstützkraft Q und der Schraube begrenzt.

$$n = e_{min} \leq 1,25 * m$$

Bei der Bemessung des T-Stummels werden auch die plastischen Reserven mit Hilfe der Fließgelenktheorie ausgenutzt. Dabei ist zu beachten, dass die Schraubenkraft T nicht größer als die Hälfte der Beanspruchbarkeit aller Schrauben ist (siehe [9]).

$$T \leq 0,5 * \sum F_{t,Rd}$$

Des Weiteren darf das sich einstellende Biegemoment M in der Platte nicht größer als der Bemessungswert der Momententragfähigkeit der Platte $M_{pl,Rd}$ sein.

$$M \leq M_{pl,Rd}$$

Die Berechnung des Bemessungswertes der Momententragfähigkeit der Platte wird wie folgt berechnet (siehe EC3-1-8 Tab. 6.2 [2]):

$$M_{pl,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_f^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist das statische System eines T-Stummels dargestellt. Für dieses System gibt es 3 Versagensarten. Diese werden nach dem EC3-1-8 [2] mit Modus 1 bis 3 bezeichnet. Die maßgebende Tragfähigkeit ermittelt sich aus dem Minimum der Versagensarten.

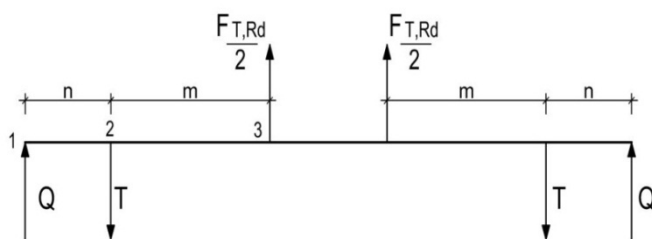


Abbildung 5.3 Statisches System des T-Stummels

Für die Berechnung der Beanspruchbarkeit bei den jeweiligen Versagensarten kann, weil das System symmetrisch ist, der halbe T-Stummel betrachtet werden. Deshalb ist auch die Querkraft in der Mitte des Systems gleich null.

Modus 1 (mit Abstützkraft Q)

Bei Modus 1 wird davon ausgegangen, dass der Flansch vollständig fließt. Diese Versagensart tritt bei relativ dünnen Platten auf, da die Beanspruchbarkeit der Platte we-

sentlich geringer ist als die Beanspruchbarkeit der Schraube und diese deshalb nicht versagt. In Abbildung 5.4 ist das statische System des Modus 1 dargestellt.

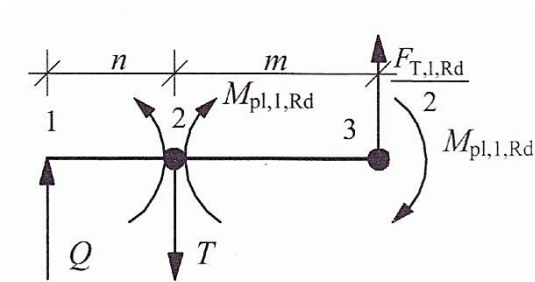


Abbildung 5.4 Statisches System von Modus 1 [9]

Dabei treten sowohl am Angriffspunkt der Schraubenkraft (Punkt 2) als auch am Angriffspunkt der Zugkraft (Punkt 3) Fließgelenke auf. Um die Beanspruchbarkeit des T-Stummels im Modus 1 zu berechnen, wird die Summe der Momente um den Angriffspunkt der Schraubenkraft auf der rechten Seite berechnet.

$$\sum M = 0 = M_{pl,1,Rd} + M_{pl,1,Rd} - \frac{F_{T,1,Rd}}{2} * m$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m}$$

Modus 2 (mit Abstützkraft Q)

Bei Modus 2 versagt, wie in Abbildung 5.5 gezeigt, die Schraube und es entsteht ein Fließgelenk an Punkt 3. Dieses Versagen ist eine Mischung der Versagensarten aus Modus 1 und Modus 3. Für die Berechnung wird die Summe um Punkt 1 gebildet.

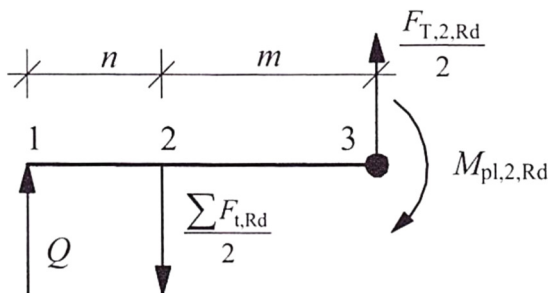


Abbildung 5.5 Statisches System von Modus 2 [9]

$$\sum M = 0 = M_{pl,2,Rd} + \frac{n}{2} * \sum F_{t,Rd} - \frac{F_{T,2,Rd}}{2} * (m + n)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n}$$

Modus 1 und Modus 2 (ohne Abstützkraft Q)

Wenn nach Formel (5.1) keine Abstützkräfte auftreten, verändert sich das statische System wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen ist.

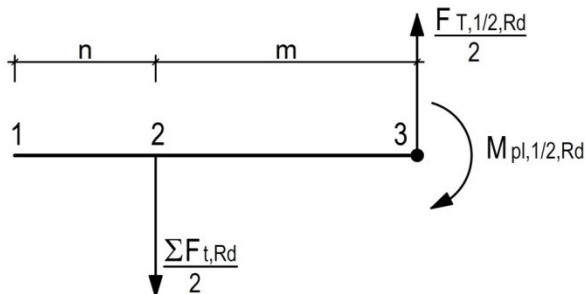


Abbildung 5.6 Statisches System Modus 1 und Modus 2 ohne Querkraft

Bei der Berechnung der Tragfähigkeit wird die Summe der Momente um Punkt 2 gebildet.

$$\sum M = 0 = M_{pl,1/2,Rd} - \frac{\sum F_{T,1/2,Rd}}{2} * m$$

$$F_{T,1/2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,1/2,Rd}}{m}$$

Modus 3

Bei dem Modus 3 versagen nur die Schrauben (s. Abbildung 5.7). Es treten in der Platte keine Fließgelenke auf, was bedeutet, dass diese Versagensart bei relativ dicken Platten auftritt. Des Weiteren gibt es auch keine Abstützkkräfte, weil sich die Platte nicht entsprechend verformt.

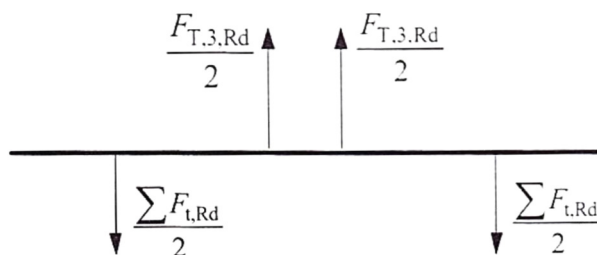


Abbildung 5.7 Statisches System von Modus 3 [9]

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$$

Futterplatten

Futterplatten können eingesetzt werden, wenn die Flansche so dünn sind, dass der T-Stummel im Modus 1 versagt. Mit der Futterplatte beginnt die Platte nicht mehr vollständig zu fließen. Die Tragfähigkeit im Modus 1 ist dann nach Formel (5.14) zu berechnen.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd} + 2 * M_{bp,Rd}}{m}$$

Mit $M_{bp,Rd}$ plastische Biegetragfähigkeit einer Futterplatte

$$M_{bp,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{bp}^2 * \frac{f_{y,bp}}{\gamma_{M0}}$$

Die Abmessungen der Futterplatte sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

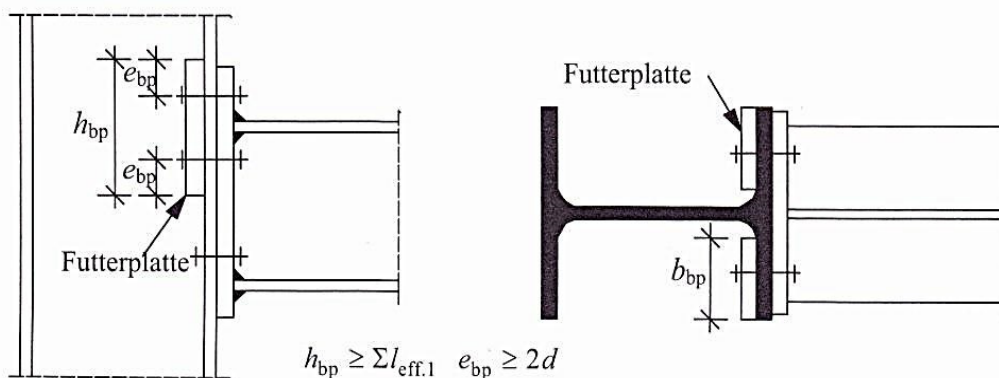


Abbildung 5.8 Stützenflansch mit Futterplatte [9]

Es ist zu beachten, dass die Breite b_{bp} , wie in der Norm vorgegeben, „mindestens den Abstand zwischen dem Rand des Stützenflansches und dem Beginn der Eckausrundung oder der Naht abzüglich 3 mm [2]“ hat. Im EC3-1-8, 6.2.4.3 (2) [2] ist nicht eindeutig geregelt, ob die Futterplatte auch 3 mm Abstand zur Eckausrundung eines Profils haben soll oder nicht. Allgemein werden die Futterplatten zurzeit bis an die Ausrundung geführt. Dieses Vorgehen wird im Folgenden übernommen.

Wirksame Längen l_{eff}

Für die Berechnung der Tragfähigkeit werden die wirksamen Längen der Schraubenreihen im Anschluss benötigt. Schrauben können unterschiedlich versagen. Entweder es versagt jede Schraubenreihe einzeln oder mehrere Schrauben versagen als Gruppe. Die verschiedenen Fließmuster sind in Abbildung 5.9 [10] veranschaulicht.

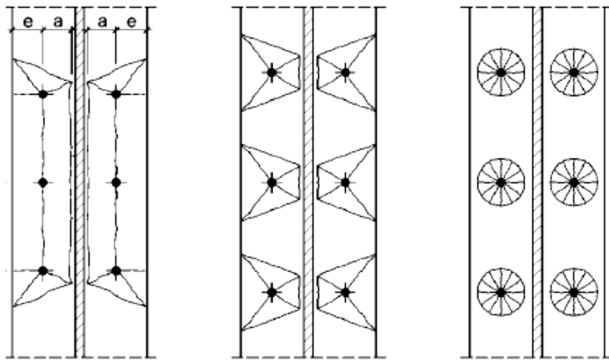


Abbildung 5.9 Fließmuster für einen unausgesteiften T-Stummel [10]

Schrauben können nur als Gruppe wirken, wenn keine Aussteifungen zwischen den einzelnen Schraubenreihen vorhanden sind.

Für die Berechnung der wirksamen Länge l_{eff} einer Schraube bei einer Aussteifung wird der α -Wert benötigt. Dieser kann in Abbildung 5.10 abgelesen werden. Dafür müssen noch folgende Formeln berechnet werden, wobei m_2 in Abbildung 5.11 dargestellt ist.

$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e}$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m + e}$$

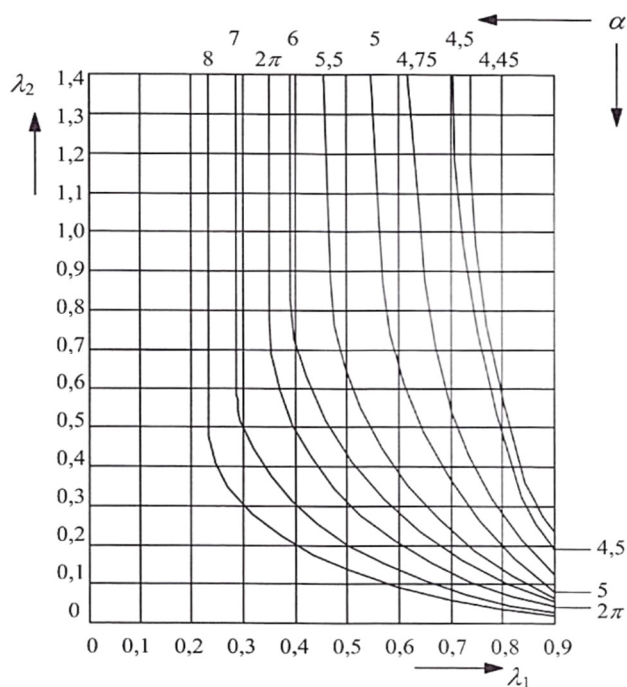
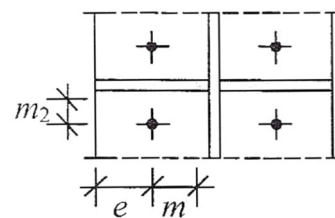
Abbildung 5.10 α -Wert für ausgesteifte T-Stümmel [9]

Abbildung 5.11 Abmessungen für einen ausgesteiften T-Stümmel [9]

Die Berechnung der wirksamen Längen l_{eff} für einzelne Schraubenreihen und Schraubengruppen ist in Tabelle 5.2 dargestellt und die Anordnung der Schraubenreihen ist in Abbildung 5.12 veranschaulicht.

Tabelle 5.2 Wirksame Längen beim äquivalenten T-Stummel (in Anlehnung an [9])

Nr.	Lage der Schraubenreihe	Schraubenreihe einzeln betrachtet		Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen	
		Kreisförmiges Muster $l_{eff,cp}$	nicht Kreisförmiges Muster $l_{eff,nc}$	Kreisförmiges Muster $l_{eff,cp}$	nicht Kreisförmiges Muster $l_{eff,nc}$
1	Innere Schraubenreihe	$2\pi m$	$4m+1,25e$	$2p$	p
2	Schraubenreihe am Ende	$2\pi m$	$4m+1,25e$	$\pi m+p$	$2m+0,625e+0,5p$
3	Schraubenreihe am Ende mit Rand	<i>kleinster Wert:</i> $2\pi m$ $\pi m+2e_1$	<i>kleinster Wert:</i> $4m+1,25e$ $2m+0,625e+e_1$	<i>kleinster Wert:</i> $\pi m+p$ $2e_1+p$	<i>kleinster Wert:</i> $2m+0,625e+0,5p$ $e_1+0,5p$
4	Schraubenreihe neben einer Steife	$2\pi m$	αm	$\pi m+p$	$0,5p+\alpha m$ $-(2m+0,625e)$
5	Schraubenreihe am Rand neben einer Steife	<i>kleinster Wert:</i> $2\pi m$ $\pi m+2e_1$	$e_1+\alpha m$ $-(2m+0,625e)$	nicht relevant	nicht relevant
6	Schraubenreihe oberhalb des Trägerzugflansches	<i>kleinster Wert:</i> $2\pi m_x$ πm_x+w πm_x+2e	<i>kleinster Wert:</i> $4m_x+1,25e_x$ $e+2m_x+0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w+2m_x+0,625e_x$	–	–
Modus 1		$l_{eff,1} = \min (l_{eff,cp} ; l_{eff,nc})$		$l_{eff,1} = \min (\sum l_{eff,cp} ; \sum l_{eff,nc})$	
Modus 2		$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	
α-Werte nach Abbildung 5.10					

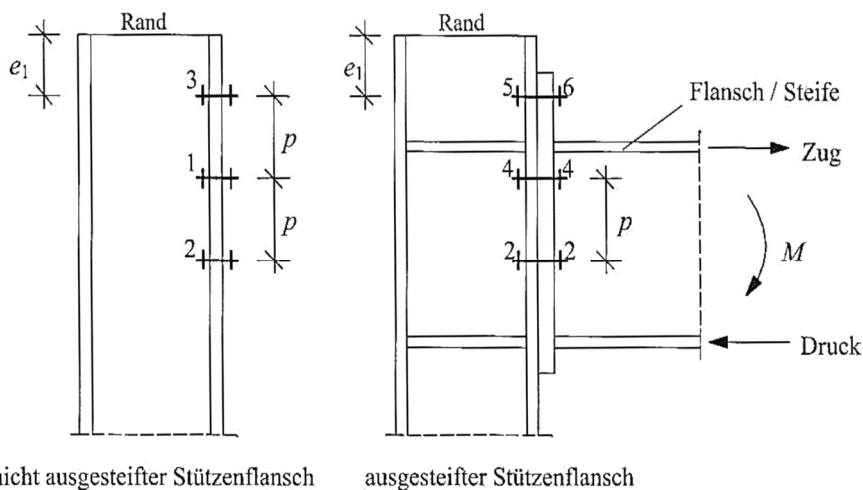


Abbildung 5.12 Anordnung von Schraubenreihen [9]

5.3 Nachweis der Komponenten

5.3.1 Komponente 1: Stützensteg mit Schubbeanspruchung

Die plastische Schubtragfähigkeit des Stützensteges kann nach dem EC3-1-8 6.2.6.1 (1) [2] nur dann berechnet werden, wenn die Schlankheit des Stützensteges auf $\frac{d_{wc}}{t_w} \leq 69 * \epsilon$ begrenzt ist.

Wenn das der Fall ist, wird die plastische Schubtragfähigkeit $V_{wp,Rd}$ einer unausgesteiften Rahmenecke mit folgender Formel ermittelt:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 * f_{y,wc} * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}$$

Mit A_{vc} Schubfläche der Stütze, siehe EC3-1-1 6.2.6 [1]

Stegsteife

Wird ein Stützensteg mit Stegsteifen ausgesteift, erhöht sich die Schubtragfähigkeit im Steg. Bei der Berechnung wird $V_{wp,Rd}$ um $V_{wp,add,Rd}$ erhöht (siehe EC3-1-8 6.2.6.1 (4) [2]).

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4 * M_{pl,fc,Rd}}{d_s}$$

$$\text{jedoch } V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2 * M_{pl,fc,Rd} + 2 * M_{pl,st,Rd}}{d_s}$$

Mit d_s Achsabstand zwischen den Stegsteifen

$M_{pl,fc,Rd}$ plastische Biegetragfähigkeit eines Stützenflansches

$$M_{pl,fc,Rd} = 0,25 * t_{fc}^2 * b_c * f_{y,c}$$

$M_{pl,st,Rd}$ plastische Biegetragfähigkeit einer Stegsteife

$$M_{pl,st,Rd} = 0,25 * t_{st}^2 * 2 * l_{a,fc} * f_{y,c}$$

Mit $l_{a,fc}$ Länge der Schweißnaht zwischen Stützenflansch und Stegsteife

Diese Formel gilt nur für vollausgesteifte Rahmenecken. Bei einer teilweisen Aussteifung können die Kräfte nicht an die Trägerflansche weitergeleitet werden, weshalb keine Erhöhung angesetzt werden kann.

Stegblech

Folgende Punkte sind beim Aussteifen zu beachten (siehe EC3-1-8 6.2.6.1 (6)-(11) [2]):

- Gleiche Stahlgüte wie die Stütze
- Die Breite b_s sollte so breit sein, dass die Ausrundung mit der Schweißnaht ausgefüllt wird. (Dieser Punkt ist in der Norm anders geregelt. Dort reicht es aus, wenn die Schweißnaht bis zur Ausrundung geht (siehe EC3-1-8, 6.2.6.1.(9) [2]). Allerdings entsteht so an dem Schweißnahtende ein Schwachpunkt.)
Des Weiteren sollte die Breite $b_s \leq 40 * \varepsilon * t_s$ sein.
- Die Länge l_s sollte größer sein als die effektive Breite der Querkzug- und Querkdruckbeanspruchung.
- Die Dicke t_s sollte so breit sein wie der Stützensteg t_{wc} .

Die Tragfähigkeit des Stützensteges wird durch das Stegblech vergrößert. Für die Berechnung wird A_{vc} um $b_s * t_{wc}$ vergrößert. Es darf nur ein Stegblech angesetzt werden.

5.3.2 Komponente 2: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querkdruck

Bei der Berechnung der Tragfähigkeit des unausgesteiften Stützensteges auf Querkdruck nach EC3-1-8 6.2.6.2 [2] ist in dem folgende Formel gegeben:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega * k_{wc} * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$$

Allerdings gibt es für $F_{c,wc,Rd}$ folgende Beschränkung:

$$F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega * k_{wc} * \rho * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

Berechnung $b_{eff,c,wc}$:

Die wirksame Breite $b_{eff,c,wc}$ des Stützensteges auf Querkdruck für eine geschraubte Stirnplattenverbindung wird folgendermaßen berechnet:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2 * \sqrt{2} * a_f + 5 * (t_{fc} + r_c) + s_p$$

Die Länge s_p wird gleichgesetzt mit der Ausbreitung der Druckkraft von 45° in der Stirnplatte. Dabei ist zu beachten, dass der Überstand unter dem Trägerflansch so groß sein muss, dass die Ausbreitung der Kraft nicht über das Stirnblech hinaus geht, ansonsten muss s_p entsprechend abgemindert werden. s_p ist mit folgender Formel zu ermitteln:

$$s_p = \min\{2 * t_p; t_p + u - \sqrt{2} * a_f\}$$

Die Zusammensetzung der Formel (5.25) wird in Abbildung 5.13 veranschaulicht.

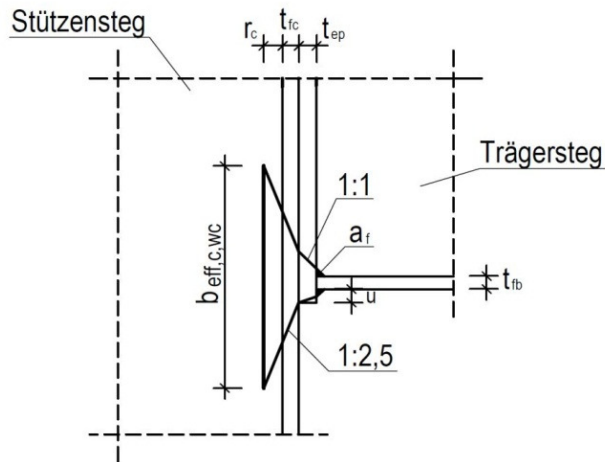


Abbildung 5.13 Wirksame Breite $b_{eff,c,wc}$ des Stützensteges im Lastausbreitungsbereich

Berechnung ω :

ω ist ein Abminderungsbeiwert und berücksichtigt die Interaktion mit der Druckkraft der Schubbeanspruchung. Dieser Beiwert ist von dem Übertragungsparameter β abhängig. Bei dem Stützen-Trägeranschluss ist nur ein Träger an der Stütze, deshalb ist $\beta=1,0$ (siehe EC3-1-8, Tab. 5.4 [2]). Für ω bedeutet dies, dass $\omega = \omega_1$ ist (siehe EC3-1-8, Tab. 6.3 [2]). ω_1 wird wie folgt berechnet:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,c,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}}$$

Berechnung k_{wc} :

Dieser Abminderungsfaktor berücksichtigt die Auswirkung der Längsdruckspannung infolge Druckkraft und Biegemoment in der Stütze auf die Tragfähigkeit. Für die Berechnung muss die einwirkende Längsdruckspannung bekannt sein. Für eine Vorbeurteilung des Anschlusses wird $k_{wc} = 1,0$ gesetzt (siehe Kapitel 5.1).

Berechnung ρ :

Mit dem Abminderungsfaktor ρ wird das Plattenbeulen mit berücksichtigt. Für die Berechnung von ρ wird der Plattenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ benötigt, der wie folgt berechnet wird:

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 * \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} * d_{wc} * f_{y,wc}}{E * t_{wc}^2}}$$

$$\text{Für } \bar{\lambda}_p \leq 0,72: \rho = 1,0 \quad (5.29)$$

$$\text{Für } \bar{\lambda}_p > 0,72: \rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2) / \bar{\lambda}_p^2 \quad (5.30)$$

Wie in Anlage 1 bewiesen, wird die Formel (5.23) maßgebend, wenn folgendes gilt:

$$0,297 < \bar{\lambda}_p < 0,612$$

Stegsteifen

Laut dem EC3-1-8, 6.2.6.4 (4) [2] kann die Tragfähigkeit vergrößert werden, wenn Stegsteifen vorhanden sind. Allerdings sind hierfür keine weiteren Angaben gemacht worden. Aus Erfahrung lässt sich sagen, dass die Druckkraft aus dem Trägerflansch von der Stütze aufgenommen werden kann, wenn die Dicke der Stegsteife der des Trägerflansches entspricht. Deshalb wird die gleiche Tragfähigkeit aus der Komponente 6 genommen.

Stegblech

Bei einer Verstärkung mit Stegblechen kann die Tragfähigkeit erhöht werden (siehe EC3-1-8 6.2.6.2 (6) [2]). Bei der Berechnung darf die effektive Dicke des Stegblechs mit $1,5 * t_{wc}$ angenommen werden. Wenn beidseitig Stegbleche angebracht sind, wird die effektive Dicke mit $2,0 * t_{wc}$ angenommen. Die Schubfläche A_{vc} darf nur wie bei Komponente 1 angesetzt werden.

5.3.3 Komponente 3: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

Für die Berechnung der Tragfähigkeit des Stützensteges auf Querzug (siehe EC3-1-8 6.2.6.3 [2]) wird folgende Formel verwendet:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$$

Der Faktor ω wird wie bei Komponente 2 mit Formel (5.27) ermittelt.

Für die Breite $b_{eff,t,wc}$ soll die wirksame Länge l_{eff} des wirksamen T-Stummels für den Stützenflansch eingesetzt werden. Das ist im EC3-1-8 [2] nicht eindeutig geregelt, weil es zwei verschiedenen wirksame Längen l_{eff} bei der Berechnung gibt.

Möglichkeit 1: Es wird auf der sicheren Seite die kleinste wirksame Länge $l_{eff,min}$ der jeweiligen Schraubenreihe oder -gruppe angesetzt.

Möglichkeit 2: Es wird die wirksame Länge l_{eff} genommen, die bei der Berechnung des Stützenflansches die kleinste Tragfähigkeit ergibt. Da in Modus 1 die kleinste Länge und in Modus 2 die Länge für nicht kreisförmige Muster verwendet wird, kann es vorkommen, dass nicht die kleinste Länge maßgebend ist.

In den folgenden Berechnungsbeispielen wird die wirksame Länge l_{eff} nach Möglichkeit 2 gewählt. Es ist realistischer, diese Länge zu nehmen, weil die Komponente 4 bei dieser Länge versagt. Dazu ist es allerdings erforderlich, zuerst Komponente 4 zu berechnen, um die maßgebende Länge ermitteln zu können.

Stegsteifen:

Bei einer Aussteifung mit Stegsteifen kann die Tragfähigkeit des Stützensteges nach dem EC3-1-8 [2] erhöht werden. Jedoch sind hierfür keine Formeln oder Anweisungen vorgegeben. Möglichkeiten dafür sind in der Fachliteratur zu finden.

Stegbleche:

Die Erhöhung der Tragfähigkeit hängt „von der Dicke der Längsnähte entlang der zusätzlichen Stegbleche ab [2]“. Für die Berechnung der wirksamen Dicke werden die Schweißnähte nach ihrer Art unterschieden:

- Stumpfnähte ($a \geq t_s$):
 - Stegblech einseitig:

$$t_{w,eff} = 1,5 * t_{wc}$$

- Stegblech beidseitig:

$$t_{w,eff} = 2,0 * t_{wc}$$

- Kehlnaht ($a \geq t_s / \sqrt{2}$):
 - Stahlgüten S 235, S275 oder S355:

$$t_{w,eff} = 1,4 * t_{wc}$$

- Stahlgüten S 420 oder S 460:

$$t_{w,eff} = 1,3 * t_{wc}$$

Bei der Ermittlung des Abminderungsfaktors ω kann A_{vc} wie bei Komponente 1 erhöht werden.

Die Tragfähigkeit der Komponente 3 ist sowohl für jede einzelne Schraubenreihe als auch für die Schraubengruppen zu ermitteln.

5.3.4 Komponente 4: Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

Die Berechnung der Biegebeanspruchung des Stützenflansches $F_{t,fc,Rd}$ (siehe EC3-1-8 6.2.6.4 [2]) wird nach dem äquivalenten T-Stummelmodell durchgeführt, das unter 5.2 ab Seite 5-2 erläutert wird.

Die Tragfähigkeit ist sowohl für jede Schraubenreihe einzeln als auch für die Schraubenreihen als Gruppe zu ermitteln, falls es mehr als eine Schraubenreihe gibt. Die maßgebende Tragfähigkeit ist jeweils der kleinste Wert aus Modus 1 bis Modus 3.

Wenn Schraubenreihen durch eine Aussteifung getrennt sind, können diese nicht als Gruppe wirken.

5.3.5 Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

Die Tragfähigkeit der Stirnplatte mit Biegebeanspruchung $F_{t,ep,Rd}$ (siehe EC3-1-8 6.2.6.5 [2]) wird entsprechend der Komponente 4 berechnet.

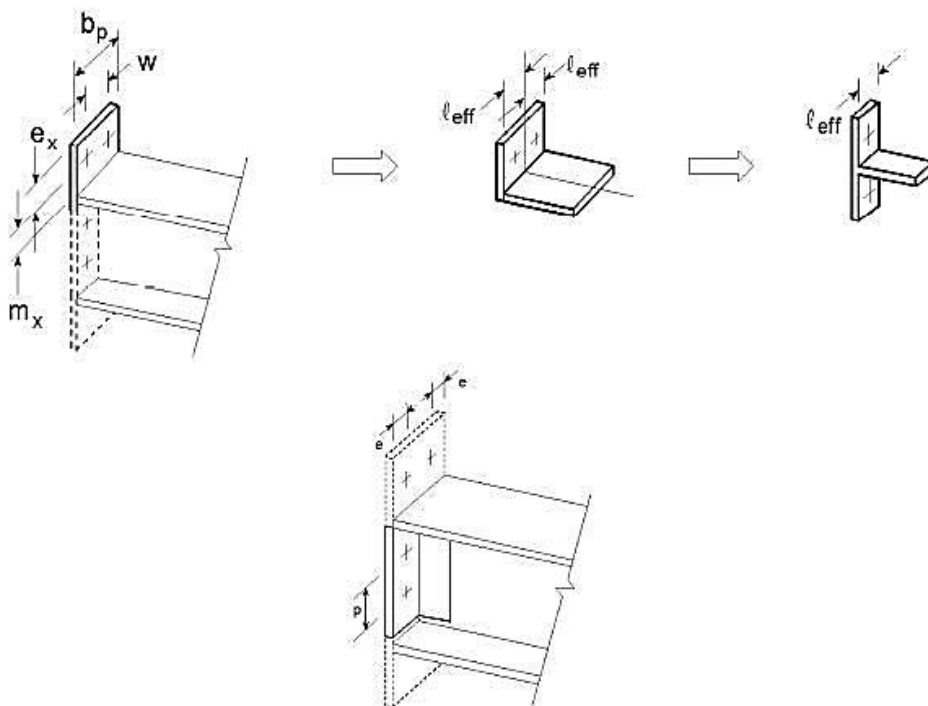


Abbildung 5.14 Behandlung von überstehenden Stirnplatten als separate T-Stummelflansche [2]

Bei einer überstehenden Stirnplatte sind Schrauben, wie in Abbildung 5.14 zu sehen, oberhalb des Flansches angeordnet. In dem Fall muss die Tragfähigkeit mit zwei verschiedenen äquivalenten T-Stummeln berechnet werden.

Schrauben oberhalb des Trägerflansches werden, wie in Abbildung 5.12 und Abbildung 5.16 dargestellt, mit der Schraubenreihe Nummer 6 berechnet.

Zudem gibt es die Möglichkeit, nach dem EC3-1-8 [2] eine überstehende Stirnplatte mit einem vereinfachten Verfahren zu berechnen. Dabei wird angenommen, dass es nur einen T-Stummel gibt. Der Trägersteg wirkt dabei, wie in Abbildung 5.15 zu sehen, nicht mit.

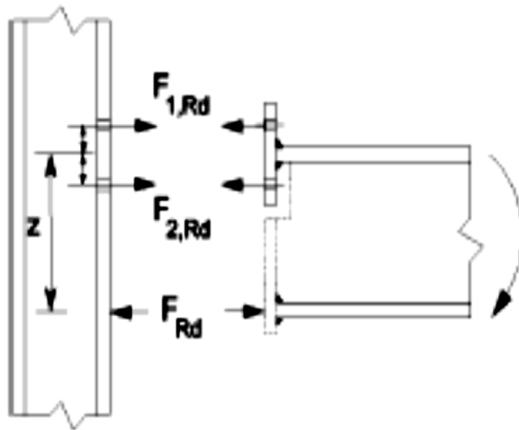


Abbildung 5.15 Vereinfachte Berechnung von geschraubten Anschlüssen mit überstehenden Stirnplatten [2]

Das vereinfachte Verfahren kann nur angewendet werden, wenn „die beiden Schraubenreihen etwa im gleichen Abstand zum Trägerflansch [2]“ liegen. Berechnet wird das vereinfachte Verfahren, indem die Tragfähigkeit, wie in Abbildung 5.16 zu sehen, für die obere Schraubenreihe nach Nr. 6 berechnet wird und diese dann auch auf die untere Schraubenreihe angesetzt wird.

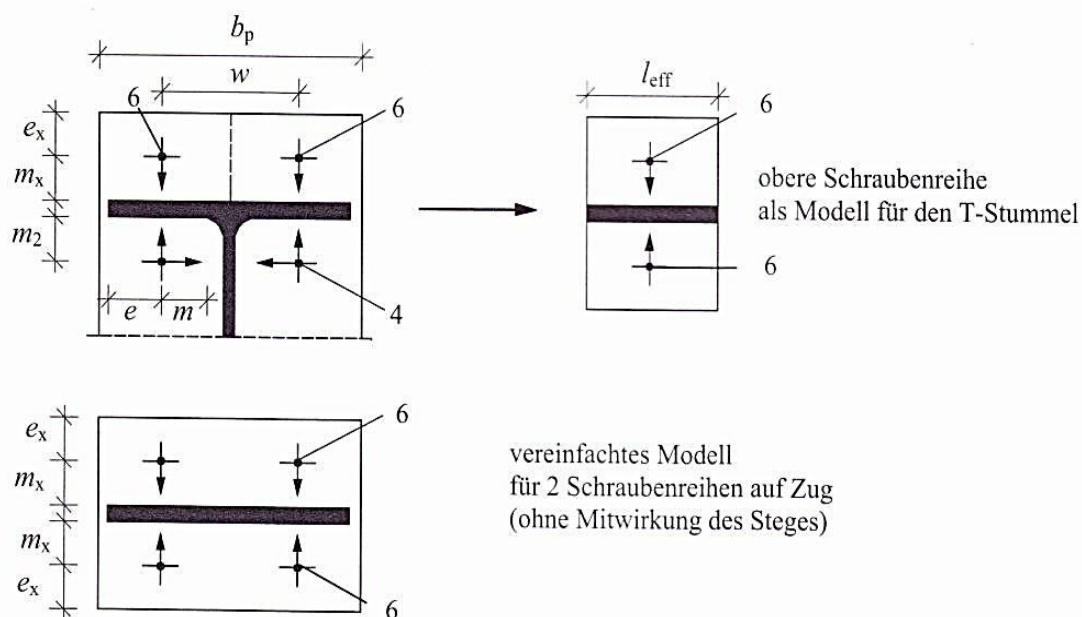


Abbildung 5.16 Unausgesteifter T-Stummel oberhalb des Trägerzugflansches [9]

5.3.6 Komponente 6: Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung

Die resultierende Druckkraft wird auf halber Flanschdicke im Träger angenommen. Sie setzt sich zusammen aus dem Druckwiderstand des Trägerflansches und der angrenzenden Druckzone des Trägersteges. Die resultierende Druckkraft wird wie folgt berechnet (siehe EC3-1-8 6.2.6.7 [2]):

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}}$$

$M_{c,Rd}$ ist die Biegetragfähigkeit des Trägerquerschnitts. Für die Ermittlung muss die Querschnittsklasse des Trägers nach dem EC3-1-1 6.2.4 (2) [1] berechnet werden. Für $M_{c,Rd}$ gilt dann:

Für Querschnittsklasse 1 und 2:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

Für Querschnittsklasse 3:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

Ebenfalls soll eine Abminderung durch Querkraftinteraktion mit der Normalkraft nach EC3-1-1 [1] beachtet werden. Da zunächst nur eine Vorbemessung des Anschlusses stattfindet, wird die Abminderung vernachlässigt. Nach der Ermittlung der Schnittgrößen muss geprüft werden, ob eine Abminderung der Biegetragfähigkeit erforderlich ist.

5.3.7 Komponente 7: Trägersteg mit Zugbeanspruchung

Die Tragfähigkeit des zugbeanspruchten Trägersteges ist mit folgender Formel zu ermitteln (siehe EC3-1-8 6.2.6.8 [2]):

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}}$$

Für die effektive Breite wird wie bei Komponente 3 die wirksame Länge des äquivalenten T-Stummels l_{eff} verwendet. In den Beispielen wird wieder die wirksame Länge l_{eff} nach Möglichkeit 2 gewählt.

Die Tragfähigkeit muss für jede Schraubenreihe einzeln und auch für die Schraubengruppe ermittelt werden.

5.4 Biegetragfähigkeit

Für die Berechnung der Biegetragfähigkeit eines Stützen-Trägeranschlusses muss die Tragfähigkeit $F_{tr,Rd}$ jeder einzelnen Schraubenreihe r bestimmt werden (siehe EC3-1-8 6.2.7.2 [2]).

Der Druckpunkt wird „in der Mittelachse des Druckflansches des angeschlossenen [2]“ Trägers angenommen (siehe EC3-1-8 6.2.7.2 (2) [2]).

Im ersten Schritt werden die Grundkomponenten verglichen, bei denen für jede einzelne Schraubenreihe r eine Tragfähigkeit ermittelt wurde. Das sind die Komponenten 3-5 und 7. Aus diesen Komponenten wird für jede Schraubenreihe r das Minimum ermittelt.

$$F_{tr,Rd} = \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

Die Summe der Tragfähigkeit der Schraubenreihen $\sum F_{tr,Rd}$ wird im nächsten Schritt mit den auf Druck und Schub belasteten Komponenten verglichen. Das sind die Komponenten 1, 2 und 6. Die Summe der Tragfähigkeit der Schraubenreihen muss kleiner sein als die kleinste Tragfähigkeit dieser drei Komponenten.

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,wc,Rd} ; F_{c,fb,Rd}\}$$

Wenn die Formel (5.41) nicht erfüllt ist, muss die Tragfähigkeit der Schraubenreihe, die dem Druckpunkt am nächsten ist, derart abgemindert werden, dass die Formel (5.41) eingehalten wird.

Die Tragfähigkeit der Schraubenreihen $F_{tr,Rd}$ muss weiter abgemindert werden, wenn die Summe der Tragfähigkeit der einzelnen Schraubenreihen $\sum F_{tr,Rd}$ größer ist als die Tragfähigkeit der Schraubengruppe der jeweiligen Komponenten. Deshalb gilt außerdem:

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

Um ein Spröbruchversagen zu verhindern, müssen Tragfähigkeiten von Schraubenreihen abgemindert werden, wenn folgende Bedingung nicht erfüllt ist:

$$F_{tx,Rd} \leq 1,9 * F_{t,Rd}$$

$F_{tx,Rd}$ ist die Tragfähigkeit die der vom Druckpunkt am weitesten entfernte Schraubenreihe x .

Die Abminderung der Tragfähigkeit der anderen Schraubenreihen $F_{tr,Rd}$ wird wie folgt berechnet:

$$F_{tr,Rd} \leq F_{tx,Rd} * \frac{h_r}{h_x}$$

Mit h_x „Abstand der Schraubenreihe x zum Druckpunkt [2]“
 x „die Schraubenreihe, die am weitesten vom Druckpunkt entfernt liegt [2]“

Bei einem Anschluss mit nur einer Schraubenreihe auf Zug ist die wirksame Tragfähigkeit der Schraubenreihe die minimale Tragfähigkeit aller Komponenten.

$$F_{t1,Rd} = \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,wc,Rd} ; F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{c,fb,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

Die Biegetragfähigkeit des Anschlusses wird nun mit folgender Formel berechnet:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd}$$

Mit h_r „Abstand der Schraubenreihe r vom Druckpunkt [2]“
 r „Nummer der Schraubenreihe [2]“

Mit dieser Biegetragfähigkeit kann der Anschluss in Kapitel 7.2 nach der Tragfähigkeit klassifiziert werden.

6 Rotation

6.1 Federmodell

In der Literatur sind unterschiedliche Modelle zur Berechnung der Rotationssteifigkeit mittels der Komponentenmethode zu finden. Frank Kühnemund gibt in seiner Dissertation [7] einen kurzen Überblick über die Historie der Komponentenmethode und somit auch über die unterschiedlichen Federmodelle. Sie gleichen sich alle in dem Punkt, dass für jede einzelne Komponente eine Wegfeder angesetzt wird. Dem EC3-1-8 [2] ist das Modell in Abbildung 6.1 zu Grunde gelegt. Jeder Steifigkeitskoeffizient k_i steht dabei für eine einzelne Komponente und wird an dem Punkt angesetzt, wo er wirkt. In diesem Beispiel ist ein Anschluss mit 2 Schraubenreihen dargestellt, somit sind die Wegfedern auch in der Schraubenachse anzusetzen.

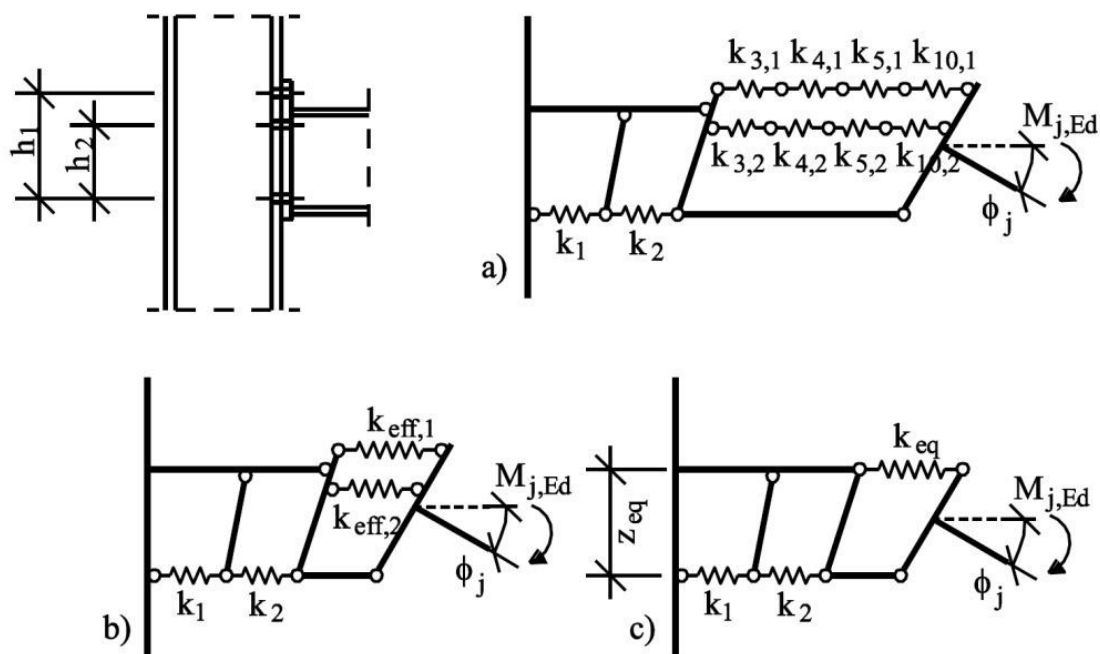


Abbildung 6.1 Darstellung des Federmodells am Beispiel eines Stützen-Riegel Anschlusses [5]

Grundlage dieses Modells sind die Federgesetze der Mechanik. Werden Federn in Reihe geschaltet, so versagt der Anschluss bei der Komponente mit dem geringsten Tragwiderstand. Die sich einstellenden Wege addieren sich. Bei parallel geschalteten Federn, wie in der Abbildung 6.1 durch die 2 Schraubenreihen zu sehen, addieren sich die Kräfte und Steifigkeiten bei gleicher Verformung der Einzelfedern auf. Jede einzelne Reihenschaltung charakterisiert somit die Nachgiebigkeiten der einzelnen Bereiche. Die gesamte Rotationssteifigkeit wird durch eine anschließende Zusammenführung der Wegfedern im Schnittpunkt der Träger- und Stützenachse beschrieben [7].

Wie in der Abbildung 6.1 b) zu sehen, werden die einzelnen Komponenten im Zugbereich in Form von einer Parallelschaltung auf die vorhandenen Schraubenreihen aufgeteilt. Versagt, wie in Abbildung 6.2 verdeutlicht, eine Schraubenreihe, dann versagt auch der ganze Anschluss.

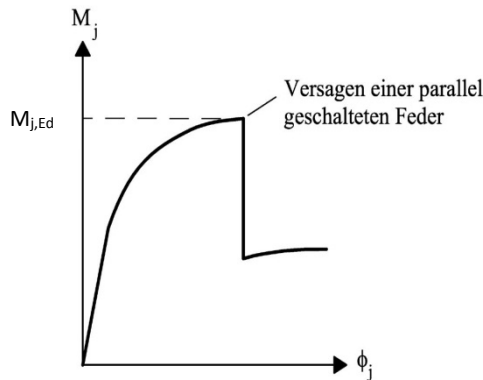


Abbildung 6.2 Versagen einer Wegfeder [7]

Der gesamte Anschluss wird der Belastung von $M_{j,Ed}$ nicht standhalten können, obwohl er in der Lage ist einen Teil der Momente zu übertragen [7].

6.2 Momenten-Rotations-Charakteristik

Durch das Federmodell kann der Anschluss als Rotationsfeder dargestellt werden. Die Rotationsfeder verbindet, wie im Bild Abbildung 6.3 dargestellt, die Bauteile im Kreuzungspunkt der Schwerpunktlinie.

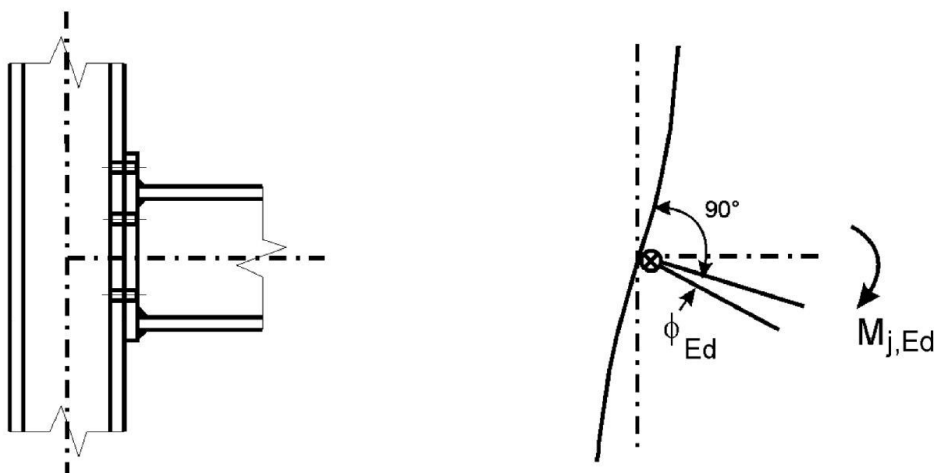


Abbildung 6.3 statisches Modell eines Anschlusses [2]

„Die Kenngrößen der Feder können in Form einer Momenten-Rotations-Charakteristik dargestellt werden, die die Beziehung zwischen dem am Anschluss angreifenden Biegemoment $M_{j,Ed}$ und der zugehörigen Rotation ϕ_{Ed} zwischen den verbundenen Bauteilen beschreibt [2]“. In der Abbildung 6.4 ist ersichtlich, dass die Momenten-

Rotations-Charakteristik die drei folgenden wesentlichen Kenngrößen für die Anschlusskonfiguration liefert.

- Momententragfähigkeit ($M_{j,Rd}$)
- Rotationssteifigkeit (S_j)
- Rotationskapazität (ϕ_{Cd})

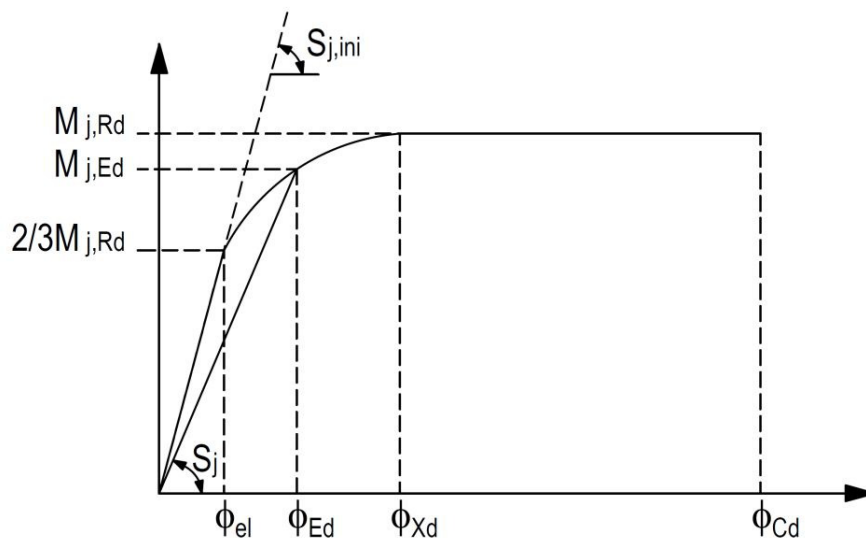


Abbildung 6.4 Momenten-Rotations-Charakteristik

Die Momenten-Rotations-Charakteristik eines Anschlusses ist eine Last-Verformungskurve mit einer nichtlinearen Federcharakteristik, welche vereinfacht als bi-lineare Kurve abgebildet wird. Solange sich der Knoten elastisch verhält, das heißt solange keine Faser einer Komponente im Anschluss die Fließgrenze erreicht, verhalten sich das Knotenmoment M_j und die Knotenrotation ϕ_j linear zueinander. Erst beim Erreichen der elastischen Momententragsfähigkeit geht die Kurve in eine nichtlineare Last-Verformungsbeziehung über. Der EC3-1-8 [2] legt die elastische Momententragsfähigkeit bei Erreichen von $2/3$ der plastischen Momententragsfähigkeit $M_{j,Rd}$ fest. Beim Überschreiten der elastischen Grenztragfähigkeit steigt die Verformung im Verhältnis zur Momententragsfähigkeit bis zum Erreichen der plastischen Grenztragfähigkeit $M_{j,Rd}$ schneller an. Dabei beginnt der Anschluss zu plastizieren, bis er bei ϕ_{Xd} vollständig durchplastiziert ist. Ab ϕ_{Xd} kann keine weitere Last aufgenommen werden, während die Verformung weiter anwächst. Die Verformung kann bis zur vorhandenen Rotationskapazität ϕ_{Cd} zunehmen. Darüber hinaus versagt der Anschluss [7].

Die Sekante der elastischen Momententragsfähigkeit wird als Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ bezeichnet. In der Literatur wird auch der Begriff Sekantensteifigkeit verwendet. Bei den verformbaren Anschlüssen sind die Rotationssteifigkeiten wichtige

Parameter, die für die Tragwerksberechnung benötigt werden. Solange $M_{j,Ed}$ kleiner als $2/3 M_{j,Rd}$ ist, kann für die Drehfeder im Tragwerkssystem die Anfangssteifigkeit $S_{j,ini}$ angesetzt werden. Beim Überschreiten in den plastischen Bereich ist dieses nicht mehr möglich und die Rotationssteifigkeit S_j muss berechnet werden. Dadurch, dass sich die Sekante reduziert, sobald sie die elastische Momententragfähigkeit überschreitet, sind die sich daraus ergebenden Verformungen im globalen Tragwerk zu berücksichtigen. Durch das Ansetzen der vorhandenen Rotationssteifigkeit S_j als Federkonstante, ergibt sich daraus wieder eine elastische Schnittgröße. So eine umfangreiche Berechnung ist mit einer Handrechnung nicht mehr zu bewältigen und setzt daher ein Bemessungsprogramm voraus.

6.3 Steifigkeitskoeffizienten

6.3.1 Allgemeines

Wie oben schon dargestellt, wird die Rotationssteifigkeit mittels der elastischen Steifigkeitskoeffizienten k_i der einzelnen Grundkomponenten berechnet. Der EC3-1-8 [2] gibt in der Tabelle 6.11 für die Berechnung der Steifigkeitskoeffizienten 16 mögliche Steifigkeitsfedern vor. Aus der Tabelle 6.10 ist auszuwählen, welche der Koeffizienten für den gegebenen Anschluss zu berücksichtigen sind. Bei einem Träger-Stützenanschluss handelt es sich in dieser Betrachtung, um eine einseitige Stirnplattenverbindung, die nach ihrer Anzahl der Schraubenreihen zu unterscheiden ist. Für eine einreihige Schraubenreihe werden folgende Steifigkeitskoeffizienten ermittelt:

- $k_1 \Rightarrow$ Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung
- $k_2 \Rightarrow$ Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung
- $k_3 \Rightarrow$ Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung
- $k_4 \Rightarrow$ Stützenflansch mit Biegebeanspruchung (für eine Schraubenreihe)
- $k_5 \Rightarrow$ Stirnplatte mit Biegebeanspruchung (für eine Schraubenreihe)
- $k_{10} \Rightarrow$ Schrauben mit Zugbeanspruchung (für eine Schraubenreihe)

Für zwei und mehr Schraubenreihen sind die Steifigkeitskoeffizienten folgendermaßen zu berücksichtigen:

- $k_1 \Rightarrow$ Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung
- $k_2 \Rightarrow$ Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung
- $k_{eq} \Rightarrow$ äquivalenter Steifigkeitskoeffizient (für eine Schraubenreihe)

Der äquivalente Steifigkeitskoeffizient k_{eq} setzt sich dabei aus den als Reihe geschalteten Wegfedern k_3 bis k_5 und k_{10} zusammen. Somit kann über den Wert die Verformbarkeit der Komponenten, die mit den Schrauben in Verbindung stehen, beurteilt werden.

6.3.2 Berechnung der Steifigkeitskoeffizienten

6.3.2.1 Allgemeines

Im Nachfolgenden wird jeder Steifigkeitskoeffizient der Komponenten vorgestellt. Eine genaue Herleitung der Formeln hat Björn Schmidt in seiner Dissertation [5] aufgezeigt. Für die einzelnen Komponenten wird eine Kraft-Dehnungsbeziehung hergestellt, die sich im elastischen Bereich befindet und auf dem HOOK'schen Gesetz beruht. In der Abbildung 6.1 ist eine grafische Darstellung der Berechnungsschritte aufgezeigt. Wie oben beschrieben, werden für alle Grundkomponenten Einzelsteifigkeiten k_i berechnet und werden, wie in Abbildung 6.1 a) dargestellt, im Schwerpunkt der Schraubenreihe angeordnet. Sind mehrere Schraubenreihen vorhanden, wird für jede einzelne Schraubenreihe ein effektiver Steifigkeitskoeffizient $k_{eff,j}$ berechnet, siehe Abbildung 6.1 b), der die gesamte Steifigkeit der Schraubenreihe des Zugbereiches beschreibt. In Abbildung 6.1 c) ist zu sehen, dass über dem Hebelarm z_{eq} die beiden Schraubenreihen zu einer resultierenden Wegfeder zusammengefasst werden. Im letzten Schritt werden diese Wegfedern aus dem Zug- und Druckbereich zu einer Drehfeder ϕ_j im Schnittpunkt der Stützen- und Trägerachse zusammengefasst. Diese Drehfeder beschreibt die Anfangsrotationssteifigkeit der Anschlusskonfiguration.

Bei den Steifigkeitskoeffizienten für den Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung, Stützenflansch und Stirnplatte auf Biegung werden die Steifigkeiten über das T-Stummelmodell ermittelt. Dabei geht die wirksame Länge l_{eff} in die Berechnung mit ein. Widersprechend den Berechnungen der Tragfähigkeit wird nach dem EC3-1-8 [2] Tabelle 6.11 dabei nur die kleinste wirksame Länge berücksichtigt, einzeln oder als Teil einer Schraubenreihengruppe. Das bedeutet, dass es möglich ist, wie im Beispiel 4 im Kapitel 8.5.3 ersichtlich, dass die erste Schraubenreihe als einzeln wirkend und die zweite Schraubenreihe als Schraubengruppe wirkend maßgebend werden. Dies widerspricht den Fließlinienmustern des T-Stummelmodells. Ebenso wird dabei nicht berücksichtigt, dass dem Versagensfall eine andere wirksame Länge zugrunde liegen kann.

6.3.2.2 k_1 Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung

Für das Stützenstegfeld mit Schubbeanspruchung ist folgende Formel zu verwenden:

$$k_1 = \frac{0,38 * A_{vc}}{\beta * z}$$

Mit	β	Übertragungsparameter für Rahmenecken immer 1,0
	z	Hebelarm nach Kapitel 6.3.3

Der Faktor 0,38 stammt aus der Herleitung der Integration der elastischen Schnittgrößenverteilung des T-Stummelmodells, sowie der Schubverformung des Stützenstegbleches [5].

Aussteifung

Bei einem ausgesteiften Anschluss wird $k_1 = \infty$ gesetzt. Im EC3-1-8 [2] wird die Ausführung der Aussteifung nicht näher beschrieben.

Deshalb sollte bedacht werden, dass eine geringe Aussteifung kaum Auswirkungen auf die Rotationssteifigkeit hat und es in dem Fall nicht angebracht wäre $k_1 = \infty$ zu setzen.

Stegblech

Die Stegbleche sind über A_{vc} zu berücksichtigen. Dabei ist der Wert A_{vc} um $b_s * t_{ws}$ zu vergrößern, jedoch nur für eine Seite der Verstärkung. Sollte der Steg auf beiden Seiten verstärkt werden, ist dieses zu vernachlässigen. Die Blechdicke der Verstärkung sollte mindestens der Blechdicke des Steges entsprechen.

6.3.2.3 k_2 Stützensteg mit Querdruckbeanspruchung

Für das Stützenstegfeld mit Querdruckbeanspruchung ist folgende Formel zu verwenden:

$$k_2 = \frac{0,7 * b_{eff,c,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

Mit $b_{eff,c,wc}$ effektive Breite des Stützensteges bei Druckbeanspruchung nach Formel (5.25)

Der Faktor von 0,7 wird berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass bis zu einem Wert von 2/3 der plastischen Grenztragfähigkeit $M_{j,Rd}$ ein linear elastisches Tragverhalten vorliegt [5].

Aussteifung

Bei einem ausgesteiften Anschluss wird $k_2 = \infty$ gesetzt. Im EC3-1-8 [2] wird die Ausführung der Aussteifung nicht näher beschrieben.

Deshalb sollte bedacht werden, dass eine geringe Aussteifung kaum Auswirkungen auf die Rotationssteifigkeit hat und es in dem Fall nicht angebracht wäre $k_2 = \infty$ zu setzen.

Stegblech

Ein nicht ausgesteifter Stützensteg mit Stegblechen ist über eine effektive Dicke des Steges zu berücksichtigen. Die Dicke $t_{wc,eff}$ wird mit $1,5 * t_{wc}$ für eine einseitige Ver-

stärkung und $2,0 * t_{wc}$ für beidseitige Verstärkungen angesetzt. Auch hier sollte die Blechdicke der Verstärkung mindestens der Blechdicke des Steges entsprechen.

6.3.2.4 k_3 Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung

Für das Stützenstegfeld mit Querkzugbeanspruchung ist folgende Formel zu verwenden:

$$k_3 = \frac{0,7 * b_{eff,t,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

Mit $b_{eff,t,wc}$ kleinster Wert der wirksamen Länge l_{eff} der Komponente, einzeln oder als Teil einer Gruppe wirkend, siehe Tabelle 5.2

Auch hier liegt der Faktor 0,7 wie in Kapitel 6.3.2.3 vor, der das linear elastische Tragverhalten berücksichtigt [5].

Stegblech

Handelt es sich um einen nicht ausgesteiften Stützensteg mit Stegblech, ist eine effektive Dicke des Steges zu berücksichtigen. Die Dicke $t_{wc,eff}$ hängt von der vorhandenen Schweißnaht ab. Die Werte für $t_{wc,eff}$ sind identisch mit der Tragfähigkeit anzusetzen und sind dem Kapitel 5.3.3 zu entnehmen.

6.3.2.5 k_4 Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

Für den Stützenflansch mit Biegebeanspruchung ist folgende Formel zu verwenden:

$$k_4 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_{fc}^3}{m^3}$$

Mit l_{eff} kleinster Wert der wirksamen Länge l_{eff} der Komponente, einzeln oder als Teil einer Gruppe wirkend, siehe Tabelle 5.2

In dieser Formel werden mit dem Faktor 0,9 die elastische Tragfähigkeit sowie das äquivalente T-Stummelmodell berücksichtigt. Dabei wird die Schraube auf Zug beansprucht und es entsteht im Flansch eine Biegebeanspruchung, die in den Randbereichen eine Abstützkraft verursacht. Es wird davon ausgegangen, dass die Unterkonstruktion keine Verformungen aufweist und somit ein Wert von $0,13 F_{t,R}$ für die Abstützkraft angenommen wird. Bei der Steifigkeitsermittlung wird immer davon ausgegangen, dass das Modell im Modus 1 versagt und somit das Modell unabhängig von der Schraubenverformung ist [5].

Futterplatte

Nach dem EC3-1-8 [1] haben Futterplatten an den Stützenflanschen keinen Einfluss auf die Rotationssteifigkeit. Auch hier entsteht eine Ungenauigkeit. Bei der Herleitung wurde davon ausgegangen, dass sich zwei Fließgelenke pro Seite ausbilden. Das erste bildet sich am Übergang vom Flansch zum Walzradius aus und das zweite in der Schraubenachse. Bei einer Futterplatte hat der Flansch nicht die Möglichkeit, das zweite Fließgelenk in der Schraubenachse auszubilden. Auch eine Berücksichtigung durch t_{fc} findet nicht statt. Es ist anzumerken, dass durch den Einsatz von Futterplatten sehr wohl eine Veränderung der Steifigkeit eintritt.

6.3.2.6 k_5 Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

Für die Stirnplatte mit Biegebeanspruchung ist folgende Formel zu verwenden:

$$k_5 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_p^3}{m^3}$$

Mit l_{eff} kleinster Wert der wirksamen Länge l_{eff} der Komponente, einzeln oder als Teil einer Gruppe wirkend, siehe Tabelle 5.2

Auch in dieser Formel wird, wie in Kapitel 6.3.2.5, durch den Faktor 0.9 die elastische Tragfähigkeit sowie das T-Stummelmodell mit einer Abstützkraft, die mit $0,13 F_{t,R}$ angenommen wird, berücksichtigt.

6.3.2.7 k_{10} Schrauben mit Zugbeanspruchung (für eine Schraubenreihe)

Für die Schrauben mit Zugbeanspruchung ist folgende Formel zu verwenden:

$$k_{10} = \frac{1,6 * A_s}{L_b}$$

Der Wert 1,6 berücksichtigt dabei die elastische Schraubenkraft und stellt damit eine Kraft-Dehnungsbeziehung her [5].

Der EC3-1-8 [2] schlägt vor, nur eine Formel für vorgespannte und nicht vorgespannte Schrauben zu verwenden. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass bei Rahmenecken in der Regel planmäßig vorgespannte hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet werden. Die Vorspannung bewirkt eine höhere Steifigkeit des Anschlusses, was vernachlässigt wird. Diese Vernachlässigung kann zu negativen Effekten beim Gesamttragwerk führen. Sollte das Tragwerk für die erhöhte Steifigkeit im Anschluss nicht genügend Rotationskapazität zur Verfügung stellen, könnte dieses einen Verlust der Standsicherheit zur Folge haben.

Es sollte beurteilt werden, inwieweit eine Berücksichtigung der erhöhten Steifigkeit stattfinden muss. Björn Schmidt gibt in seiner Dissertation [5] eine Formel für planmäßig vorgespannte HV-Schrauben an:

$$k_i = \frac{9,5 * A_s}{L_b}$$

6.3.2.8 k_{eq} äquivalenter Steifigkeitskoeffizient

Bei der Berechnung von Stirnplattenanschlüssen mit zwei oder mehr Schraubenreihen mit Zugbeanspruchung ist für die Komponenten im Zugbereich ein äquivalenter Steifigkeitskoeffizient mit folgender Formel zu ermitteln:

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r}{z_{eq}}$$

Darin sind enthalten:

- Mit
- $k_{eff,r}$ effektiver Steifigkeitskoeffizient für eine Schraubenreihe r
 - h_r der Abstand der Schraubenreihe vom Druckpunkt (Mitte Flansch Träger)
 - z_{eq} äquivalenter Hebelarm, siehe 6.3.3

Bei einer Stützen-Trägerverbindung mit einer Stirnplattenverbindung werden in der Regel für den äquivalenten Steifigkeitskoeffizienten k_{eq} alle Komponenten im Zugbereich herangezogen:

- Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung (k_3)
- Stützenflansch mit Biegebeanspruchung (k_4)
- Stirnplatte mit Biegebeanspruchung (k_5)
- Schrauben mit Zugbeanspruchung (k_{10})

6.3.2.9 effektiver Steifigkeitskoeffizient der Schraubenreihe

Der effektive Steifigkeitskoeffizient $k_{eff,r}$ für eine Schraubenreihe r , bestehend aus den Komponenten im Zugbereich, k_3 bis k_5 und k_{10} , wird wie folgt ermittelt:

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}$$

Der effektive Steifigkeitskoeffizient stellt somit die Verformbarkeit der Federreihenschaltung für die betrachtete Schraubenreihe dar.

Für eine Anschlusskonfiguration mit überstehender Stirnplatte ist es möglich, ein vereinfachtes Verfahren anzuwenden. Dabei wird nur die effektive Steifigkeit der außenliegenden Schraubenreihe ermittelt. Für die innenliegende Schraubenreihe wird eine Ersatzsteifigkeit angenommen, die der außenliegenden Schraubenreihe entspricht. Bei dem Verfahren führt das Ergebnis zu einer etwas geringeren Rotationssteifigkeit [2].

6.3.3 Hebelarm z

Der Hebelarm z ist der Abstand vom Druckpunkt, der in der Regel in der Mitte des Flansches angesetzt wird, bis zum Schwerpunkt der Schraubenreihe. Wenn zwei oder mehr Schraubenreihen vorliegen, wird anstelle $z = z_{eq}$ angesetzt. Der äquivalente Hebelarm z_{eq} wird wie folgt ermittelt:

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} * h_r}$$

Der äquivalente Hebelarm, wie in Abbildung 6.1 c) zu sehen, ist der Schwerpunkt der beiden effektiven Steifigkeitskoeffizienten. Der Hebelarm ist nicht aus geometrischen Beziehungen herzustellen, da er abhängig von der Kräfteverteilung der Schrauben ist. Nur in dem Fall, dass das vereinfachte Verfahren bei einer Anschlusskonfiguration mit überstehender Stirnplatte verwendet wird, ist der Hebelarm geometrisch zu ermitteln. Der Hebelarm ist dann der Mittelpunkt der beiden Schraubenreihen bis zum Druckpunkt (Mitte Flansch Träger).

6.4 Rotationssteifigkeit

Die Rotationssteifigkeit ist geprägt durch die Verformbarkeiten der einzelnen Komponenten des Anschlusses, die durch die elastischen Einzelsteifigkeiten k_i gekennzeichnet sind. Bei geschraubten Verbindungen sind bei zwei oder mehr Schraubenreihen die Einzelsteifigkeiten k_i der jeweiligen Komponenten, wie oben beschrieben, zusammenzufassen.

Der EC3-1-8 [2] lässt zu, dass einzelne Schraubenreihen vernachlässigt werden dürfen, wobei alle weiteren Schraubenreihen, die näher am Druckpunkt liegen, ebenfalls vernachlässigt werden müssen. Es ist dabei zu untersuchen, ob diese Vereinfachung eventuell einen negativen Einfluss auf das Gesamttragwerk haben könnte. Dieses ist der Fall, wenn sich Fließgelenke dort bilden, wo die Schnittgrößen sich nicht so wie geplant umlagern können.

Die Rotationssteifigkeit wird wie folgt ermittelt:

$$S_j = \frac{E * z^2}{\mu * \sum_i \frac{1}{k_i}}$$

Für die Ermittlung der Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ des Anschlusses ist aufgrund des linear elastischen Verhaltens in der Momenten-Rotations-Charakteristik $\mu = 1,0$ zu setzen. In dem Fall, dass $M_{j,Ed}$ kleiner ist als $2/3 M_{j,Rd}$, wird für die Schnittgrößenermittlung die Anfangsrotationssteifigkeit angesetzt. Übersteigt $M_{j,Ed}$ die elastische Grenztragfähigkeit und kommt in den plastischen Bereich, wird, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, die vorhandene Rotationssteifigkeit S_j angesetzt.

Die vorhandene Rotationssteifigkeit wird ermittelt durch:

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\mu}$$

Wie oben beschrieben, ist

$$\mu = 1,0$$

In dem Fall ist die vorhandene Rotationssteifigkeit mit der Anfangsrotationssteifigkeit, die in der Literatur auch oft als Sekantensteifigkeit benannt wird, identisch. Sobald $M_{j,Ed}$ darüber hinaus in den nichtlinearen Bereich kommt, wird

$$\mu = \left(\frac{1,5 * M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\Psi \quad \text{wenn } 2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd} \quad (6.13)$$

gerechnet. Dabei ist der Beiwert Ψ der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

Tabelle 6.1 Werte für den Beiwert Ψ [2]

Typ der Verbindung	Ψ
Geschweißt	2,7
Geschraubtes Stirnblech	2,7
Geschraubte Flanschwinkel	3,1
Fußplattenverbindung	2,7

Somit reduziert der Beiwert μ die Steifigkeit je nach Zuwachs des einwirkenden Moments zwischen 1 und 2,988, woraus sich ergibt, dass die Verformung größer sein wird, je näher sich die Belastung an die Grenztragfähigkeit annähert.

Für die anzusetzende Rotationssteifigkeit S_j im Tragwerk lässt der EC3-1-8 [2] zu, eine vereinfachte bi-lineare Momenten-Rotations-Charakteristik anzusetzen. Darauf wird näher im Kapitel 7.1 bei der Tragwerksberechnung eingegangen.

6.5 Rotationskapazität

Bei nachgiebigen Anschlüssen ist davon auszugehen, dass sich, durch die geringe plastische Grenztragfähigkeit der Anschlüsse im Vergleich zu den Trägern, die ersten plastischen Fließgelenke im Anschluss ausbilden. Der Rotationsnachweis ist folglich im Anschluss zu führen [7].

Die Rotationskapazität beschreibt das maximale Verdrehungsvermögen eines Anschlusses. Dieses zu beschreiben, beziehungsweise nachzuweisen, stellt bis heute, nach mehr als über 20 Jahren Forschung, immer noch eine Schwierigkeit dar. Es ist gelungen ein vereinfachtes Modell zu entwickeln, um die Rotationssteifigkeit bis zu ϕ_{Xd} in Abbildung 6.4 zu ermitteln. Bis heute liegt für die Rotationskapazität, die die Verdrehung bei ϕ_{Cd} darstellt, kein Nachweiskonzept mit ausreichenden Forschungsergebnissen vor.

Der EC3-1-8 [1] schreibt vor, dass die Rotationskapazität nachgewiesen werden muss, jedoch gibt er dafür nur konstruktive Anhaltswerte vor. „Es existiert jedoch kein Bemessungsverfahren, das sicherstellt, dass die vom System geforderten Rotationen mit einer bestimmten Sicherheit vom Knoten zur Verfügung gestellt werden können [6]“.

Die Rotationskapazität ist ein komplexes Gebilde aus Einflussfaktoren, welches es schwierig macht sie zu berechnen. Sie besteht aus der Rotationssteifigkeit des Anschlusses im elastischen Bereich sowie dem plastischen Anteil, der benötigt wird, um die Schnittkräfte umzulagern. Wird $M_{j,Rd}$ erreicht, wird von einer vollständigen Plastizierung ausgegangen. Dazu kommen noch elastische Anteile aus der Stützenverformung und Imperfektionen im Rahmensystem und Überfestigkeiten im Material hinzu. Diese Menge an unterschiedlichen Einflüssen macht die Berechnung so komplex. Für weitere Zusammenhänge dient die Literatur [6] als Hilfestellung.

Auf einen Nachweis der Rotationskapazität kann verzichtet werden, wenn die Biegetragfähigkeit $M_{j,Rd}$ des Anschlusses mindestens 20% größer ist als die plastische Biegetragfähigkeit $M_{pl,Rd}$ des Trägerquerschnitts. Mit dieser Forderung wird erreicht, dass sich ein Fließgelenk im Träger ausbildet und nicht direkt im Knoten. Voraussetzung dafür ist die Einhaltung der dazugehörigen erforderlichen Querschnittsklassen.

Wenn ein Nachweis erfolgen soll, dann sind folgende Parameter einzuhalten:

Schlankheit des Stegbleches

Die Schlankheit des Stegbleches ist, wie bei der Tragfähigkeit im Kapitel 5.3.1, auf $\frac{d_{wc}}{t_w} \leq 69 * \varepsilon$ begrenzt. Damit soll das örtliche Beulen im Stegblech vermieden werden.

Schraubenversagen auf Zug

Die Biegetragfähigkeit wird bestimmt durch den Stützenflansch oder die Stirnplatte. Des Weiteren sollte die Dicke t des Stützenflansches oder der Stirnplatte, die nicht die versagende Komponente sein muss, folgende Bedingung einhalten:

$$t \leq 0,36 * d * \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_y}}$$

Aus dieser Forderung resultiert, dass entweder eine sehr dünne Stirnplatte ausgeführt werden muss oder aber die Schrauben größer bemessen werden müssen, um ein Schraubenversagen zu vermeiden. Wie in den Beispielen im Kapitel 8 zu sehen, wird häufig der Modus 2 maßgebend. Dabei bildet sich, wie beim T-Stummelmodell beschrieben, in der Komponente ein Fließgelenk. Bevor die Komponente vollständig durchplastiziert versagt die Schraube. Dies wird durch die Begrenzung von t vermieden, so dass Modus 1 eintritt und die Komponente an sich versagt, indem ihre Fließgrenze überschritten wird.

Schraubenversagen durch Abscheren

Es besteht nicht genügend Rotationskapazität, wenn der Anschluss durch die Abschertragfähigkeit der Schrauben bestimmt wird.

Diese Forderung stellt in ihrer Umsetzung kein Problem dar. In der Regel werden bei einem Träger-Stützenanschluss die Schraubenreihen in der Druckzone dafür herangezogen. Die Schrauben erhalten nur zu vernachlässigende Zugbeanspruchungen und können daher ohne weitere Interaktionen für Abscherbeanspruchungen angesetzt werden.

7 Kategorisierung eines Träger-Stützenanschlusses

7.1 Kategorisierung des Anschlusses

Wie in Kapitel 4.1 angesprochen muss der Anschluss kategorisiert werden. Ein Anschluss kann gelenkig, biegesteif oder nachgiebig sein.

Die Bezeichnung „Kategorisierung“ ist zum besseren Verständnis gewählt worden, da die Begrifflichkeiten vom EC3-1-8 [2] nicht konsequent beibehalten werden. Im EC3-1-8 [2] wird in diesem Zusammenhang die Bezeichnung „Anschlussmodelle“ verwendet.

Wenn ein Anschluss als gelenkig kategorisiert wird, wird bei der Tragwerksberechnung angenommen, dass dort keine Biegemomente übertragen werden können. Bei der Tragwerksberechnung ist ein Gelenk anzusetzen.

Bei einem als biegesteif kategorisierten Anschluss ist die Verformung des Anschlusses so gering, dass sie nicht mit angesetzt wird. Da der Anschluss als biegesteif in die Tragwerksberechnung eingeht, müssen dort Momente aufgenommen werden. Es muss nachgewiesen werden, dass der Anschluss diese aufnehmen kann.

Die beiden genannten Anschlusskategorien sind allgemein bekannt. Bei der Berechnung nach dem EC3-1-8 [2] kann ein Anschluss auch als nachgiebig kategorisiert werden. Das bedeutet, dass die Momenten-Rotations-Charakteristik des Anschlusses bei der Berechnung des Tragwerks mit einbezogen werden muss.

In welchem Maß die Momenten-Rotations-Charakteristik beachtet werden muss, hängt von dem gemäß EC3-1-8, z. B. 5.1.2 [2] gewählten Berechnungsverfahren ab. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wird das Berechnungsverfahren vor der Berechnung der Anschlusscharakteristik gewählt (siehe Abbildung 4.1). In dem EC3-1-8 [2] gibt es das elastische, das starr-plastische und das elastisch-plastische Berechnungsverfahren. Auf welche Weise die Momenten-Rotations-Charakteristik des Anschlusses in die Berechnung der jeweiligen Berechnungsverfahren eingeht, wird nachfolgend erläutert.

Elastische Tragwerksberechnung

Bei der elastischen Tragwerksberechnung hängt die Schnittgrößenverteilung der einzelnen Bauteile ausschließlich von der Rotationssteifigkeit ab. Das bedeutet, dass an den Knoten für die Schnittgrößenermittlung eine Knotensteifigkeit S_j angesetzt wird, die von $M_{j,Ed}$ abhängig ist.

Für die Berechnung der Knotensteifigkeit gibt es ein vereinfachtes Modell. Danach darf bis zu einem Biegemoment von $2/3 * M_{j,Rd}$ die Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ für die Knotensteifigkeit angesetzt werden (siehe Abbildung 7.1, links).

Für größere Biegemomente bis $M_{j,Rd}$ darf $S_{j,ini}/\eta$ angesetzt werden (siehe Abbildung 7.1, rechts). Für Stützen-Trägeranschlüsse mit geschraubtem Stirnblech ist $\eta = 2$ zu setzen.

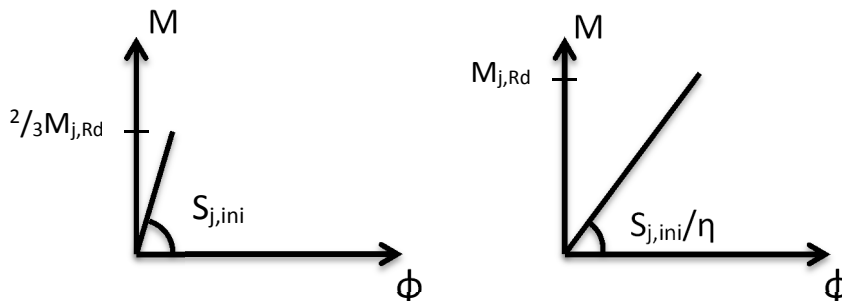


Abbildung 7.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren bei einer elastischen Tragwerksberechnung [6]

Bei dieser Berechnung muss der Anschluss eine ausreichend große Tragfähigkeit haben, die die Schnittgrößen am Knotenpunkt übertragen kann.

Starr-plastische Tragwerksberechnung

Bei der starr-plastischen Tragwerksberechnung wird das Tragwerk mit der Fließgelenktheorie berechnet. Das bedeutet, dass in den Knotenpunkten ein Fließgelenk mit der Biegesteifigkeit $M_{j,Rd}$ angesetzt wird. Demzufolge muss der Anschluss nur nach der Tragfähigkeit klassifiziert werden.

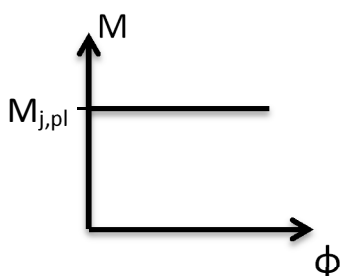


Abbildung 7.2 Nachweisverfahren bei einer starr-plastischen Tragwerksberechnung [6]

In Abbildung 7.2 wird deutlich, dass die elastischen Verformungen nicht berücksichtigt werden, allerdings muss laut EC3-1-8 [2] die Rotationskapazität des Anschlusses entsprechend groß sein, um den Rotationsanforderungen zu genügen.

Dennoch gibt es dort, wie in Kapitel 6.5 beschrieben, keine Berechnungsmöglichkeit.

Elastisch-plastische Tragwerksberechnung

Bei der elastisch-plastischen Tragwerksberechnung wird die vollständige Momenten-Rotations-Charakteristik mit berücksichtigt. Die Ermittlung der Schnittgrößen wird mit dem elastischen und plastischen Knotenverhalten durchgeführt.

Wie in Abbildung 7.3 zu sehen ist, darf als Vereinfachung ein bi-linearer Verlauf der Momenten-Rotations-Charakteristik angenommen werden.

Da sowohl die Tragfähigkeit als auch die Rotationssteifigkeit berücksichtigt werden, muss auch der Anschluss nach beiden Eigenschaften klassifiziert werden.

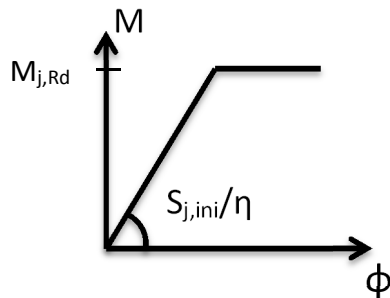


Abbildung 7.3 Nachweisverfahren bei einer elastisch-plastischen Tragwerksberechnung

Nachdem dargestellt wurde wie ein nachgiebiger Anschluss in eine Tragwerksberechnung mit einbezogen wird, ist noch die Frage offen, wie ein Anschluss kategorisiert wird.

Die Kategorie eines Anschlusses hängt von der Klassifizierung ab. Ein Anschluss wird zum einen nach seiner Tragfähigkeit und zum anderen nach seiner Steifigkeit klassifiziert. Das Berechnungsverfahren bestimmt die Klassifizierung des Anschlusses. Dies ist in Tabelle 7.2 in der zweiten Spalte abzulesen.

Bei dem elastisch-plastischen Berechnungsverfahren wird, wie in Tabelle 7.1 zu sehen, sowohl nach Tragfähigkeit als auch nach Rotationssteifigkeit klassifiziert.

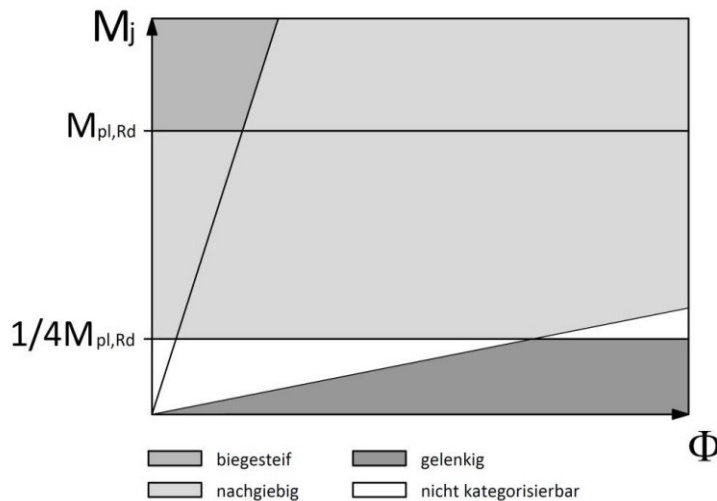
Tabelle 7.1 Kategorisierung für das elastisch-plastische Berechnungsverfahren [11]

		Beanspruchbarkeit		
		volltragfähig	teiltragfähig	gelenkig
Steifigkeit	starr	■	■	
	verformbar	■	■	
	gelenkig			■

Das Vorgehen bei der Klassifizierung nach Tragfähigkeit ist im Kapitel 7.2 beschrieben und die Klassifizierung nach Rotationssteifigkeit ist im Kapitel 7.3 beschrieben.

Wie in der Tabelle 7.1 und Grafik 7.1 veranschaulicht, gibt es Kombinationsmöglichkeiten nach denen ein Anschluss nicht für ein elastisch-plastisches Berechnungsverfahren kategorisiert werden kann. Der EC3-1-8 [2] trifft keine Aussage dazu wie der Anschluss

zu kategorisieren ist, wenn eine dieser Kombinationen auftritt. Bei solchen Anschlüssen ist die Tragfähigkeit oder Rotationssteifigkeit so gering, dass es zu besonders unwirtschaftlichen Ergebnissen führt.



Grafik 7.1 Übersichtsgrafik für die Kategorisierung

Werden in dieser Grafik die Biegetragfähigkeit $M_{j,Rd}$ und die Rotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ eingetragen, dann kann an der Lage des Schnittpunktes der beiden Geraden die Kategorisierung abgelesen werden.

In Tabelle 7.2 ist die Kategorisierung nach Klassen zusammengefasst.

Tabelle 7.2 Kategorisierung nach Klassifizierung in Abhängigkeit vom Berechnungsverfahren

Berechnungsverfahren	Klassifizierung der Anschlüsse nach	Klassifizierung der Anschlüsse		
		gelenkig	starr	verformbar
elastisch	Rotationssteifigkeit (Kapitel 7.2)	gelenkig	starr	verformbar
starr-plastisch	Tragfähigkeit (Kapitel 7.3)	gelenkig	volltragfähig	teiltragfähig
elastisch-plastisch	Rotationssteifigkeit + Tragfähigkeit (Tabelle 7.1)	gelenkig	biegesteif	nachgiebig
Anschlusskategorie		gelenkig	biegesteif	nachgiebig

Mit den hier ermittelten Kategorien kann jetzt, wie oben erläutert, der Anschluss in das Tragwerk entsprechend eingegeben werden.

7.2 Klassifizierung nach der Tragfähigkeit

Nachdem nun die Biegetragfähigkeit gemäß Kapitel 5 berechnet worden ist, kann der Stützen-Trägeranschluss klassifiziert werden. Die Tragfähigkeit wird in folgende Klassen unterteilt:

- Volltragfähig
- Gelenkig
- Teiltragfähig

Dabei hängt die Einordnung in eine Klasse von der Biegetragfähigkeit des Anschlusses und der kleineren Momententragfähigkeit der angeschlossenen Bauteile, also der Stütze und des Trägers, ab.

$$M_{pl,Rd} = \min\{M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd}\}$$

Mit $M_{b,pl,Rd}$ plastische Momententragfähigkeit des Trägers

$M_{c,pl,Rd}$ plastische Momententragfähigkeit der Stütze

In Abbildung 7.4 sind die „Grenzen für die Klassifizierung nach der Tragfähigkeit [12]“ veranschaulicht.

Volltragfähiger Anschluss

Die Biegetragfähigkeit eines volltragfähigen Anschlusses (Bereich 3 und 4 in Abbildung 7.4) darf nicht geringer sein als die Momententragfähigkeit der beiden angeschlossenen Bauteile. Insofern gilt:

$$M_{j,Rd} \geq M_{pl,Rd}$$

Ein volltragfähiger Anschluss, dessen Biegetragfähigkeit 20% größer ist als das Grenzmoment aus Formel (7.2) (Bereich 4 in Abbildung 7.4), hat zudem ein ausreichendes Rotationsvermögen.

$$M_{j,Rd} \geq 1,2 * M_{pl,Rd}$$

Gelenkiger Anschluss

Das Grenzmoment für einen gelenkigen Anschluss (Bereich 1 in Abbildung 7.4) ist wie nachfolgend definiert:

$$M_{j,Rd} \leq 0,25 * M_{pl,Rd}$$

Bislang wurde davon ausgegangen, dass ein gelenkiger Anschluss keine Momente übertragen kann. An den Formeln für das Grenzmoment eines gelenkigen Anschlusses

ist ersichtlich, dass diese Anschlüsse nach dem EC3-1-8 [2] heutzutage eine geringe Momententragfähigkeit haben, die aber bei dem Tragwerk nicht berücksichtigt werden.

Teiltragfähiger Anschluss

Der teiltragfähige Anschluss liegt zwischen dem volltragfähigen und dem gelenkigen Anschluss (Bereich 2 in Abbildung 7.4).

Demzufolge gilt für den teiltragfähigen Anschluss:

$$M_{pl,Rd} > M_{j,Rd} > 0,25 * M_{pl,Rd}$$

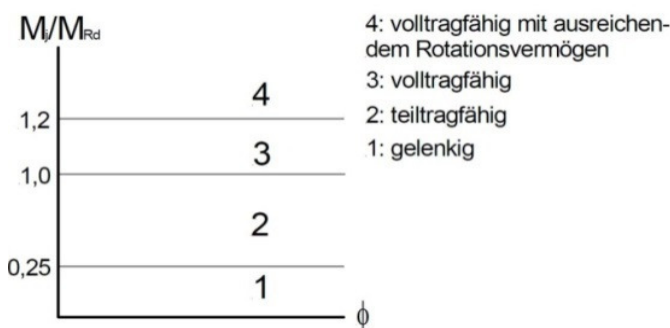


Abbildung 7.4 Grenzen für die Klassifizierung nach der Tragfähigkeit [12]

7.3 Klassifizierung nach der Rotationssteifigkeit

Nachdem die Steifigkeit $S_{j,ini}$ eines Anschlusses ermittelt ist, müssen die Auswirkungen der Steifigkeiten im Tragwerk beurteilt werden. Dafür gibt der EC3-1-8 [2] Grenzwerte vor, mit denen es möglich ist den Anschluss zu klassifizieren.

Es wird zwischen Anschlüssen mit einer

- starren (Zone 1),
- verformbaren (Zone 2)
- oder gelenkigen (Zone 3)

Konfiguration unterschieden. Grenzwerte liegen für Zone 1 und Zone 3 vor. Anschlüsse, die die Grenzwerte nicht einhalten, werden automatisch der Zone 2 zugeordnet. Mit dieser Klassifikation wird beurteilt, ob eine Berücksichtigung durch eine Drehfeder in der Tragwerksberechnung für die Schnittgrößenermittlung stattfinden muss. Kapitel 7.1 gibt einen Überblick, ab wann die Rotationssteifigkeit bei verformbaren Anschlüssen zu berücksichtigen ist. In dem Kapitel 10 ist zusätzlich aufgezeigt, welche Auswirkungen sich durch das Ansetzen der Rotationssteifigkeit bei der Schnittgrößenermittlung ergeben.

Abbildung 7.5 soll veranschaulichen, dass eine hohe Rotationssteifigkeit eine immer geringer werdende Verformung ϕ zur Folge hat und wie die Grenzkriterien zu verstehen sind.

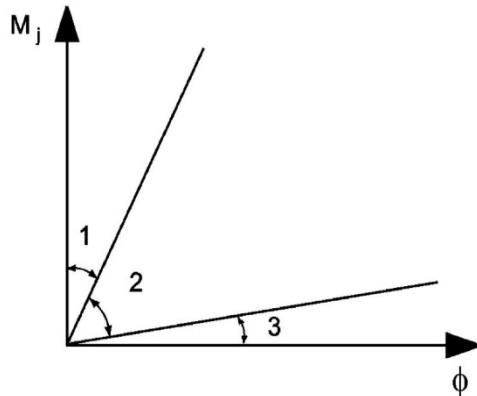


Abbildung 7.5 Klassifizierung nach Zonen [2]

Eine Klassifikation durch die Rotationssteifigkeit findet immer in Abhängigkeit des vorhandenen Tragwerks statt. Hierbei hat das Verhältnis zwischen Systemlänge (Abstand der Stützen) und Trägheitsmoment des angeschlossenen Trägers einen großen Einfluss auf die Beurteilung des Anschlusses im globalen System. Umso größer das Verhältnis ist, desto starrer ist der Anschluss im System. Daraus kann sich ergeben, dass ein optisch starr wirkender Anschluss in einem relativ kurzen System als verformbar klassifiziert wird und in einem im Verhältnis dazu langen System als starr anzusehen ist.

Im Umkehrschluss bedeutet das aber, dass ein optisch verformbar wirkender Anschluss, z.B. durch fehlende Stegsteifen in einem kurzen System, als starr klassifiziert werden kann.

Im Folgenden werden die Grenzwerte der einzelnen Zonen vorgestellt:

Zone 1

Grundsätzlich gilt:

$$S_{j,ini} = K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

Mit L_b Spannweite eines Trägers von Stützenachse zu Stützenachse
 $K_b = 8$ unverschiebliche Systeme
 $K_b = 25$ verschiebliche Systeme

Der Grenzwert berücksichtigt die Trägerschlankheit sowie den Beiwert K_b . Der Wert soll die Horizontalverschiebungen des Rahmentragwerks berücksichtigen. Dazu ist zwischen unverschieblichen und verschieblichen Systemen zu unterscheiden.

unverschiebliches System

Ein Rahmen wird im EC3-1-8 [2] als unverschieblich definiert, wenn mindestens 80% der auftretenden Horizontalverschiebungen im System durch zusätzliche Aussteifungen reduziert werden. Inwieweit und in welcher Form das nachzuweisen ist, ist nicht vorgegeben. Ein unverschiebliches System liegt z. B. vor, wenn eine Rahmenkonstruktion zur Erweiterung an einer Stahlbetonkonstruktion angeschlossen wird. Solch eine Konstruktion muss keine Momente übertragen.

verschiebliches System

ein verschiebliches System muss folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{K_b}{K_c} \geq 0,1$$

Mit K_b Mittelwert aller I_b/L_b für alle Deckenträger eines Geschosses

I_b Flächenträgheitsmoment zweiter Ordnung eines Trägers

L_b Spannweite eines Trägers von Stütze zu Stütze

K_c Mittelwert aller I_b/L_b für alle Stützen eines Geschosses

I_c Flächenträgheitsmoment zweiter Ordnung einer Stütze

L_c Geschosshöhe einer Stütze

Sollte das Verhältnis $K_b / K_c \leq 0,1$ sein, dann ist der Anschluss als verformbar anzunehmen. Dieses geschieht, wenn die Schlankheit des Trägers gegenüber den Stützen im System sehr gering ist.

Allgemeine Hinweise

Einen biegesteifen Anschluss für ein verschiebliches System herzustellen ist durch das manuelle Einschweißen von Verstärkungsblechen sehr aufwendig und kostenintensiv. Es stellt sich die Frage, ob es wirtschaftlich ist, das Tragwerk als ein unverschiebliches System auszuführen. Wie oben beschrieben, muss die Horizontalverschiebung im Tragwerk um 80% reduziert werden. Dieses ist nur durch ebenfalls aufwendig herzustellende Verbände oder ähnliches zu erreichen.

Bei der Wahl der Bemessungsprogramme ist darauf zu achten, welcher Grenzwert für ein starres Verhalten vorgegeben wird. In den zurzeit aufkommenden Modulen unterschiedlicher Hersteller ist oft nur ein Grenzwert vorgegeben und es ist möglich, dass es der Grenzwert für ein unverschiebliches System ist. Der Grenzwert für ein verschiebliches System fordert hingegen eine viel höhere Rotationssteifigkeit. In dem Fall ist der Anschluss verformbar und nicht starr. Somit müssten die Verformungen im Tragwerk

Berücksichtigung finden, da sich in dem Fall die Schnittkräfte verändern und es dadurch möglich wird, dass sich Fließgelenke im Anschluss bilden. Hierzu muss der Anschluss genügend Rotationskapazität zur Verfügung stellen, welches ebenfalls nach Kapitel 6.5 nachzuweisen ist.

Zone 2

Hält eine Anschlusskonfiguration weder den Grenzwert eines starren Anschlusses aus Zone 1 noch den Grenzwert eines gelenkigen Anschlusses aus Zone 3 ein, ist der Anschluss in Zone 2 als verformbarer Anschluss zu klassifizieren. Es ist aber auch möglich, starre und gelenkige Anschlusskonfigurationen in der Zone 2 einzuordnen und dementsprechend zu bemessen.

Zone 3

Ein Anschluss gilt als gelenkig, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$S_{j,ini} \leq 0,5 * E * \frac{I_b}{L_b}$$

8 Beispiele

8.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden von fünf ausgewählten geschraubten Stirnplattenanschlüssen die Berechnungen nach dem EC3-1-8 [2] vorgestellt. Dabei handelt es sich um

- Beispiel 1 Anschluss mit zwei Schraubenreihen ohne Aussteifungen
- Beispiel 2 Anschluss mit einer Schraubenreihe ohne Aussteifungen
- Beispiel 3 Anschluss mit zwei Schraubenreihen und Stegsteifen in der Stütze
- Beispiel 4 Anschluss mit überstehender Stirnplatte ohne Aussteifung
- Beispiel 5 Anschluss mit Futterplatten am Stützenflansch

Somit werden eine Vielzahl von Regelungen aus dem EC3-1-8 [2] in den Berechnungen von der Tragfähigkeit und der Rotationssteifigkeit mit der Komponentenmethode vorgestellt.

Um den Anschluss vergleichen zu können, sind allen Anschlusskonfigurationen Stützen im Profil HEA 500 S235 und Träger im Profil HEA 400 S235 zu Grunde gelegt. Für die Profilwerte der Stützen und Träger wurde bei den Berechnungen der Beispiele das Tafelwerk [13] verwendet.

Für die Ermittlung der Grenzwerte der Klassifizierung nach der Rotationssteifigkeit werden die Anschlusskonfigurationen beispielhaft in folgendes Rahmensystem integriert:

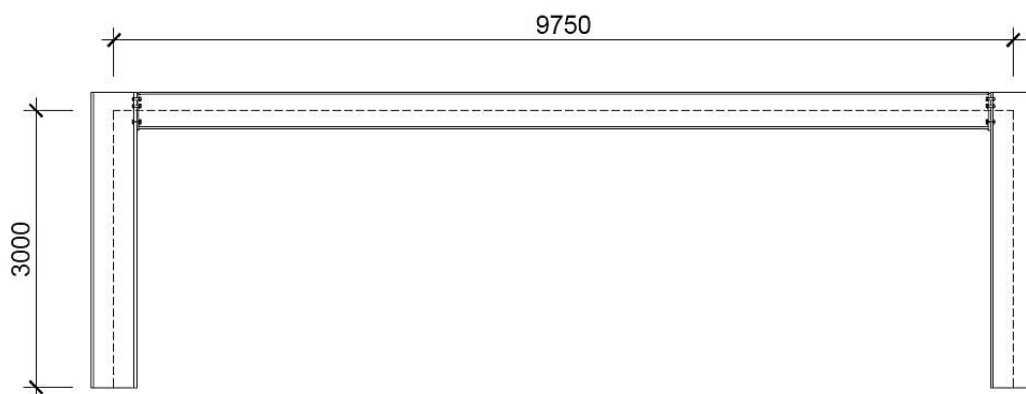


Abbildung 8.1 Rahmentragwerk

Am Ende wird die Kategorisierung nach allen Berechnungsverfahren in Anlehnung an Tabelle 7.2 und Grafik 7.1 dargestellt.

8.2 Beispiel 1: Anschluss mit zwei Schraubenreihen ohne Aussteifungen

8.2.1 System

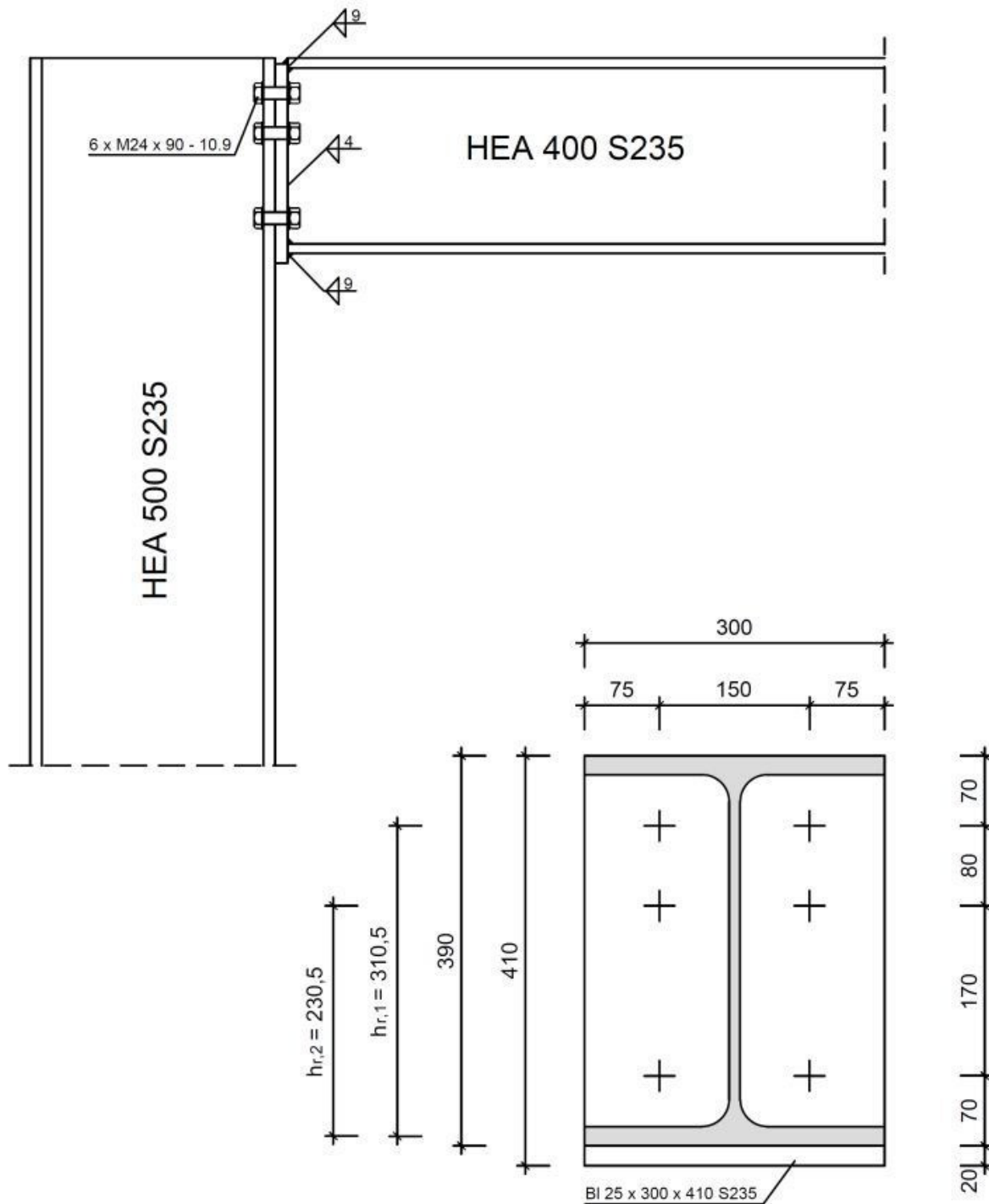


Abbildung 8.2 - Beispiel 1 - Anschluss mit zwei Schraubenreihen ohne Aussteifungen

8.2.2 Werte

Stütze: HEA 500	Träger: HEA 400	Stirnplatte / Schrauben
$h_c = 49 \text{ cm}$	$h_b = 39 \text{ cm}$	$h_p = 41 \text{ cm}$
$b_c = 30 \text{ cm}$	$b_b = 30 \text{ cm}$	$b_p = 30 \text{ cm}$
$t_{wc} = 1,2 \text{ cm}$	$t_{wb} = 1,1 \text{ cm}$	$t_p = 2,5 \text{ cm}$
$t_{fc} = 2,3 \text{ cm}$	$t_{fb} = 1,9 \text{ cm}$	$a_f = 9 \text{ mm}$
$r_c = 2,7 \text{ cm}$	$r_b = 2,7 \text{ cm}$	$a_w = 4 \text{ mm}$
$d_c = 39 \text{ cm}$	$d_b = 29,8 \text{ cm}$	Größe: M24
$A_c = 198 \text{ cm}^2$	$A_b = 159 \text{ cm}^2$	Festigkeitsklasse: 10.9
$A_{vc} = 75,2 \text{ cm}^2$	$A_{vb} = 57,4 \text{ cm}^2$	$A_s = 3,53 \text{ cm}^2$
$M_{y,pl,Rd} = 928,0 \text{ kNm}$	$M_{y,pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$	$F_{t,Rd} = 254,2 \text{ kN}$
QK 1	QK 1	$L_b = 2,55 \text{ cm} + \text{Paketstärke}$
$I_y = 86970 \text{ cm}^4$	$I_y = 45070 \text{ cm}^4$	

T-Stummel Stützensseite	T-Stummel Trägerseite
$m = (15-1,2)/2-0,8*2,7 = 4,74 \text{ cm}$	$m = (15-1,1)/2-0,8*0,4*2^{0,5} = 6,50 \text{ cm}$
$e = 7,5 \text{ cm}$	$m_2 = 7,0-1,9-0,8*0,9*2^{0,5} = 4,08 \text{ cm}$
$e_1 = 7,0 \text{ cm}$	$e = 7,5 \text{ cm}$
$p = 8,0 \text{ cm}$	$p = 8,0 \text{ cm}$
$n = \min \{7,5 ; 1,25*4,74\} = 5,93 \text{ cm}$	$n = \min \{7,5 ; 1,25*6,50\} = 7,50 \text{ cm}$
$L_b = 2,55+2,3+2,5 = 7,35 \text{ cm}$	$\lambda_1 = 6,50/(6,50+7,5) = 0,464$
	$\lambda_2 = 4,08/(6,50+7,5) = 0,291$
	$\alpha \approx 6,71$

8.2.3 Effektive Länge l_{eff}

8.2.3.1 Stützenseite

1. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{2 * \pi * m ; \pi * m + 2 * e_1\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{2 * \pi * 4,74 ; \pi * 4,74 + 2 * 7,0\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{29,78 ; 28,89\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 28,89 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{4 * m + 1,25 * e ; 2 * m + 0,625 * e + e_1\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{4 * 4,74 + 1,25 * 7,5 ; 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 7,0\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{28,34 ; 21,17\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 21,17 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * m$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * 4,74$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 29,78 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * m + 1,25 * e$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * 4,74 + 1,25 * 7,5$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 28,34 \text{ cm}$$

1. und 2. Schraubenreihe*1. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe*

$$l_{eff,cp} = \min\{\pi * m + p ; 2 * e_1 + p\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{\pi * 4,74 + 8,0 ; 2 * 7,0 + 8,0\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{22,89 ; 22,00\}$$

$$l_{eff,cp} = 22,00 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p ; 0,5 * p + e_1\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0 ; 0,5 * 8,0 + 7,0\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{18,17 ; 11,00\}$$

$$l_{eff,nc} = 11,00 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 4,74 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 22,89 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p$$

$$l_{eff,nc} = 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0$$

$$l_{eff,nc} = 18,17 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,cp} = 22,00 + 22,89 = 44,89 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,nc} = 11,00 + 18,17 = 29,17 \text{ cm}$$

8.2.3.2 Trägerseite**1. Schraubenreihe**

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \alpha * m$$

$$l_{eff,nc} = 6,71 * 6,5$$

$$l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 4 * m + 1,25 * e$$

$$l_{eff,nc} = 4 * 6,5 + 1,25 * 7,5$$

$$l_{eff,nc} = 35,38 \text{ c}$$

1. und 2. Schraubenreihe***1. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe***

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 6,5 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 28,42 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * p + \alpha * m - (2 * m + 0,625 * e)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * 8,0 + 6,71 * 6,5 - (2 * 6,5 + 0,625 * 7,5)$$

$$l_{eff,nc} = 29,93 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 6,5 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 28,42 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p$$

$$l_{eff,nc} = 2 * 6,5 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0$$

$$l_{eff,nc} = 21,69 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,cp} = 28,42 + 28,42 = 56,84 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,nc} = 29,93 + 21,69 = 51,62 \text{ cm}$$

8.2.4 Tragfähigkeit**8.2.4.1 Komponente 1: Stützensteg mit Schubbeanspruchung**Schlankheit des Stützensteges

$$\frac{d_c}{t_{wc}} = \frac{39}{1,2} = 32,5 \leq 69 = 69 * \sqrt{\frac{23,5}{23,5}} = 69 * \varepsilon$$

Schubtragfähigkeit

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 * f_{y,wc} * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{0,9 * 23,5 * 75,2}{\sqrt{3} * 1,0}$$

$$V_{wp,Rd} = 918,26 \text{ kN}$$

8.2.4.2 Komponente 2: Stützensteg mit Beanspruchung durch QuerdruckWirksame Breite

$$s_p = \min\{2 * t_p ; t_p + u - \sqrt{2} * a_f\} = \min\{2 * 2,5 ; 2,5 + 2,0 - \sqrt{2} * 0,9\}$$

$$s_p = \min\{5,00 ; 3,23\} = 3,23 \text{ cm}$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2 * \sqrt{2} * a_f + 5 * (t_{fc} + r_c) + s_p$$

$$b_{eff,c,wc} = 1,9 + 2 * \sqrt{2} * 0,9 + 5 * (2,3 + 2,7) + 3,23$$

$$b_{eff,c,wc} = 32,68 \text{ cm}$$

Abminderungswert ω

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,c,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (32,68 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,860$$

Berechnung k_{wc}

$$k_{wc} = 1,00$$

Berechnung $\bar{\lambda}_p$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 * \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} * d_{wc} * f_{y,wc}}{E * t_{wc}^2}} = 0,932 * \sqrt{\frac{32,68 * 39 * 23,5}{21000 * 1,2^2}} = 0,928$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,928 \geq 0,612 \quad \Rightarrow \text{Formel (5.24) maßgebend; } \rho \text{ muss berechnet werden}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,928 - 0,2}{0,928^2} = 0,845$$

Tragfähigkeit

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega * k_{wc} * \rho * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{0,860 * 1,00 * 0,845 * 32,68 * 1,2 * 23,5}{1,1}$$

$$F_{c,wc,Rd} = 608,83 \text{ kN}$$

8.2.4.3 Komponente 3: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

Vor der Komponente 3 ist die Komponente 4 berechnet worden, um die wirksamen Breiten zu erhalten. Aus Gründen der Übersicht ist die Reihenfolge der Komponenten beibehalten worden.

1. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 21,17 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (21,17 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,933$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,933 * 21,17 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 557,00 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (28,34 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,889$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,889 * 28,34 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 710,48 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 29,17 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (29,17 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,883$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,883 * 29,17 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 726,35 \text{ kN}$$

8.2.4.4 Komponente 4: Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_{fc}^3} = \frac{8,8 * 4,74^3 * 3,53 * 2}{29,17 * 2,3^3} = 18,64 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 18,64 = L_b^*$$

1. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{28,89; 21,17\} = 21,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 21,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 657,94 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 657,94}{4,74} = 555,22 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 21,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 21,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 657,94 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 657,94 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 405,88 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{555,22 ; 405,88 ; 508,4\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 405,88 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min\{l_{eff,cp} ; l_{eff,nc}\} = \min\{29,78 ; 28,34\} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kN}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 880,77}{4,74} = 743,27 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 880,77 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 447,64 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{743,27 ; 447,64 ; 508,4\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 447,64 \text{ kN}$$

1. + 2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min\{l_{eff,cp} ; l_{eff,nc}\} = \min\{44,89 ; 29,17\} = 29,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 906,57 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 906,57}{4,74} = 765,04 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 29,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 906,57 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 906,57 + 5,93 * 4 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 735,03 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 * 254,2 = 1016,8 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{765,04 ; 735,03 ; 1016,8\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 735,03 \text{ kN}$$

8.2.4.5 Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_p^3} = \frac{8,8 * 6,50^3 * 3,53 * 2}{51,62 * 2,5^3} = 21,15 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 21,15 = L_b^*$$

1. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 43,62\} = 40,84 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 40,84 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1499,59 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1499,59}{6,50} = 922,82 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 43,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1601,67 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1601,67 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 501,17 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{922,82; 501,17; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 501,17 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 35,38\} = 35,38 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 35,38 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$
$$= 1299,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1299,11}{6,50} = 799,45 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 35,38 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 35,38 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$
$$= 1299,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1299,11 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 457,94 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{799,45; 457,94; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 457,94 \text{ kN}$$

1. + 2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{56,84; 51,62\} = 51,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 51,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1895,42 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1895,42}{6,50} = 1166,41 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 51,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 51,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1895,42 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1895,42 + 7,50 * 4 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 815,49 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 * 254,2 = 1016,8 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{1166,41; 815,49; 1016,8\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 815,49 \text{ kN}$$

8.2.4.6 Komponente 6: Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung

Querschnittsklasse des Trägers: 1

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{602,1 * 100}{39 - 1,9} = 1622,91 \text{ kN}$$

8.2.4.7 Komponente 7: Trägersteg mit Zugbeanspruchung**1. Schraubenreihe**

$$b_{eff,t,wb} = 43,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 43,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1127,58 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 35,38 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 35,38 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 914,57 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 51,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 51,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1334,38 \text{ kN}$$

8.2.4.8 Zusammenfassung der Tragfähigkeiten der Komponenten

Komponente	1. Schraubenreihe	2. Schraubenreihe	1. + 2. Schraubenreihe /andere Komponenten
1	–	–	918,26 kN
2	–	–	608,83 kN
3	557,00 kN	710,48 kN	726,35 kN
4	405,88 kN	447,64 kN	735,03 kN
5	501,17 kN	457,94 kN	815,49 kN
6	–	–	1622,91 kN
7	1127,58 kN	914,57 kN	1334,38 kN

8.2.4.9 BiegetragfähigkeitTragfähigkeit der Schraubenreihen einzeln betrachtet

$$F_{tr,Rd} = \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$F_{t1,Rd} = \min\{557,00 ; 405,88 ; 501,17 ; 1127,58\}$$

$$F_{t1,Rd} = 405,88 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = \min\{710,48 ; 447,64 ; 457,94 ; 914,57\}$$

$$F_{t2,Rd} = 447,64 \text{ kN}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} = 405,88 + 447,64 = 853,52 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der druck- und schubbeanspruchten Komponenten

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,wc,Rd} ; F_{c,fb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 853,52 \text{ kN} \geq 608,83 \text{ kN} = \min\{918,26 ; 608,83 ; 1622,91\}$$

⇒ Abminderung der Schraubenreihe, die dem Druckpunkt näher ist.

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}$$

$$F_{t2,Rd} = \sum F_{tr,Rd} - F_{t1,Rd} = 608,83 - 405,88 = 202,95 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der Schraubengruppen

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 608,83 \text{ kN} \leq 726,35 \text{ kN} = \min\{726,35 ; 735,03 ; 815,49 ; 1334,38\}$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Spröbruchversagen

$$F_{tx,Rd} \leq 1,9 * F_{t,Rd}$$

$$405,88 \text{ kN} \leq 482,98 \text{ kN} = 1,9 * 254,2$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Biegetragfähigkeit

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd} = h_1 * F_{t1,Rd} + h_2 * F_{t2,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = 31,05 * 405,88 + 23,05 * 202,95$$

$$M_{j,Rd} = 17280,57 \text{ kNcm} = 172,81 \text{ kNm}$$

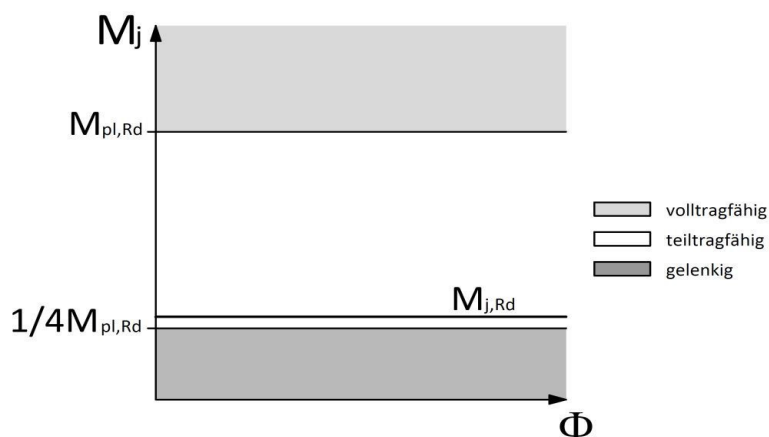
8.2.4.10 Klassifizierung nach Tragfähigkeit

$$M_{pl,Rd} = \min\{M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd}\} = \min\{602,1 ; 928,0\} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} > M_{j,Rd} > 0,25 * M_{pl,Rd}$$

$$602,1 > 172,8 > 150,53$$

⇒ Anschluss ist teiltragfähig, siehe Grafik 8.1:



Grafik 8.1 Klassifizierung des Anschlusses nach der Tragfähigkeit

8.2.5 Rotationssteifigkeit

8.2.5.1 Steifigkeitskoeffizienten der Grundkomponenten

Stützensteg mit Schubbeanspruchung

$$k_1 = \frac{0,38 * A_{vc}}{\beta * z}$$

$$k_1 = \frac{0,38 * 75,2}{1,0 * 27,06} = 1,056 \text{ cm}$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruk

$$k_2 = \frac{0,7 * b_{eff,c,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

$$k_2 = \frac{0,7 * 32,68 * 1,2}{39} = 0,704 \text{ cm}$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

$$k_3 = \frac{0,7 * b_{eff,t,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

$$k_{3,1} = \frac{0,7 * 11 * 1,2}{39} = 0,237 \text{ cm}$$

$$k_{3,2} = \frac{0,7 * 18,17 * 1,2}{39} = 0,391 \text{ cm}$$

Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$k_4 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_{fc}^3}{m^3}$$

$$k_{4,1} = \frac{0,9 * 11 * 2,3^3}{4,74^3} = 1,131 \text{ cm}$$

$$k_{4,2} = \frac{0,9 * 18,17 * 2,3^3}{4,74^3} = 1,868 \text{ cm}$$

Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$k_5 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_p^3}{m^3}$$

$$k_{5,1} = \frac{0,9 * 28,42 * 2,5^3}{6,50^3} = 1,455 \text{ cm}$$

$$k_{5,2} = \frac{0,9 * 21,69 * 2,5^3}{6,50^3} = 1,111 \text{ cm}$$

Schraube auf Zug

$$k_{10} = \frac{1,6 * A_s}{L_b} = \frac{1,6 * 3,53}{7,35} = 0,768 \text{ cm}$$

8.2.5.2 effektiver Steifigkeitskoeffizient der Schraubenreihe

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}\right)}$$

$$k_{eff,1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,237} + \frac{1}{1,131} + \frac{1}{1,455} + \frac{1}{0,768}\right)} = 0,141 \text{ cm}$$

$$k_{eff,2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,391} + \frac{1}{1,868} + \frac{1}{1,111} + \frac{1}{0,768}\right)} = 0,189 \text{ cm}$$

8.2.5.3 Hebelarme

$$h_{r1} = 39 - \frac{1,9}{2} - 7 = 31,05 \text{ cm}$$

$$h_{r2} = 39 - \frac{1,9}{2} - 7 - 8 = 23,05 \text{ cm}$$

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} * h_r}$$

$$z_{eq} = \frac{0,141 * 31,05^2 + 0,189 * 23,05^2}{0,141 * 31,05 + 0,189 * 23,05} = 27,06 \text{ cm}$$

8.2.5.4 äquivalenter Steifigkeitskoeffizient

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r}{z_{eq}}$$

$$k_{eq} = \frac{0,141 * 31,05 + 0,189 * 23,05}{27,06} = 0,323 \text{ cm}$$

8.2.5.5 Anfangsrotationssteifigkeit

$$S_{j,ini} = \frac{E * z^2}{\mu * \sum_i \frac{1}{k_i}}$$

$$S_{j,ini} = \frac{21000 * 27,06^2}{1,0 \left(\frac{1}{1,056} + \frac{1}{0,704} + \frac{1}{0,323} \right)} = 2.814.569 \frac{kNcm}{rad}$$

$$S_{j,ini} = 28.146 \frac{kNm}{rad}$$

8.2.5.6 Rotationssteifigkeit

$$\mu = \left(1,5 * \frac{M_{Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi =$$

$$\mu = \left(1,5 * \frac{152,84}{172,81} \right)^{2,7} = 2,12$$

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\mu}$$

$$S_j = \frac{2814569}{2,12} = 1.327.627 \frac{kNcm}{rad}$$

$$S_j = 13,28 \frac{kNm}{rad}$$

8.2.5.7 Klassifizierung nach RotationssteifigkeitRahmenbedingungen

Die Grenzwerte für verschiebliche Systeme dürfen nur angenommen werden, wenn die Bedingung von $K_b / K_s \geq 0,1$ eingehalten wird.

$$K_b = I_b / L_b = 45070 / 975 = 46 \text{ cm}$$

$$K_c = I_c / L_c = 86970 / 300 = 257 \text{ cm}$$

$$K_b / K_s \geq 0,1$$

$$46 / 257 = 0,18 \geq 0,10$$

Bei der Klassifizierung darf auch der Beiwert $K_b = 25$ angesetzt werden.

Zone 1*verschiebliche Systeme*

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$2.814.569 \frac{\text{kNcm}}{\text{rad}} \leq 24.268.462 \frac{\text{kNcm}}{\text{rad}} = 25 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem verschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

unverschiebliche Systeme

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$2.814.569 \frac{\text{kNcm}}{\text{rad}} \leq 7.765.908 \frac{\text{kNcm}}{\text{rad}} = 8 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem unverschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

Zone 3

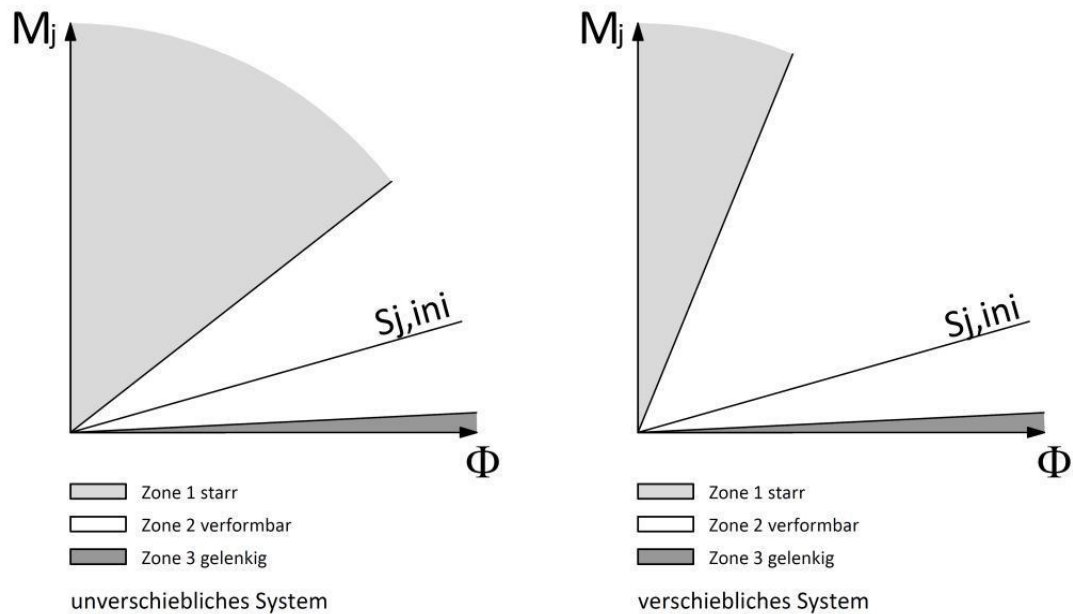
$$S_{j,ini} \leq 0,5 * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$2.814.569 \frac{\text{kNcm}}{\text{rad}} \leq 485.369 = \frac{\text{kNcm}}{\text{rad}} 0,5 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Im System liegt keine gelenkige Anschlusskonfiguration vor.

Ergebnis

Der Anschluss ist weder in Zone 1 noch in Zone 3 klassifizierbar, somit liegt eine Klassifikation der Zone 2 vor. Dabei handelt es sich um einen verformbaren Anschluss. Die folgende Grafik 8.2 gibt einen Überblick, inwieweit der Anschluss in dem Tragwerk verformbar ist, abhängig davon, ob es sich um ein unverschiebliches oder verschiebliches System handelt.

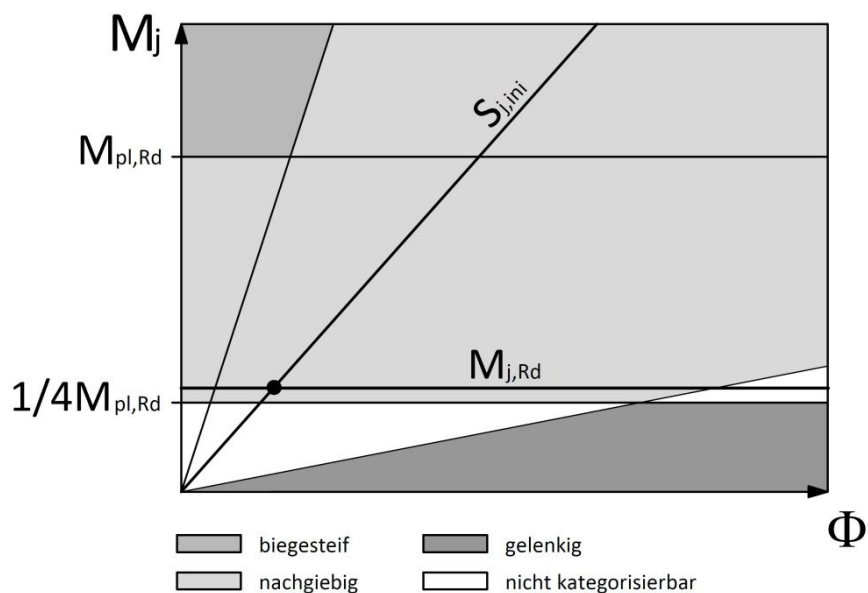


Grafik 8.2 Klassifizierung des Anschlusses nach der Rotationssteifigkeit

8.2.6 Kategorisierung

Berechnungsverfahren	Klassifizierung der Anschlüsse nach	Klassifizierung der Anschlüsse	Kategorie des Anschlusses
elastisch	Rotationssteifigkeit (Kapitel 7.2)	verformbar	nachgiebig
starr-plastisch	Tragfähigkeit (Kapitel 7.3)	teiltragfähig	nachgiebig
elastisch-plastisch	Rotationssteifigkeit + Tragfähigkeit (Tabelle 7.1)	verformbar + teiltragfähig	nachgiebig

Die Kategorisierung dieses Anschlusses wird in der folgenden Grafik 8.3 dargestellt:



Grafik 8.3 Kategorisierung des Anschlusses

8.3 Beispiel 2: Anschluss mit einer Schraubenreihe ohne Aussteifungen

8.3.1 System

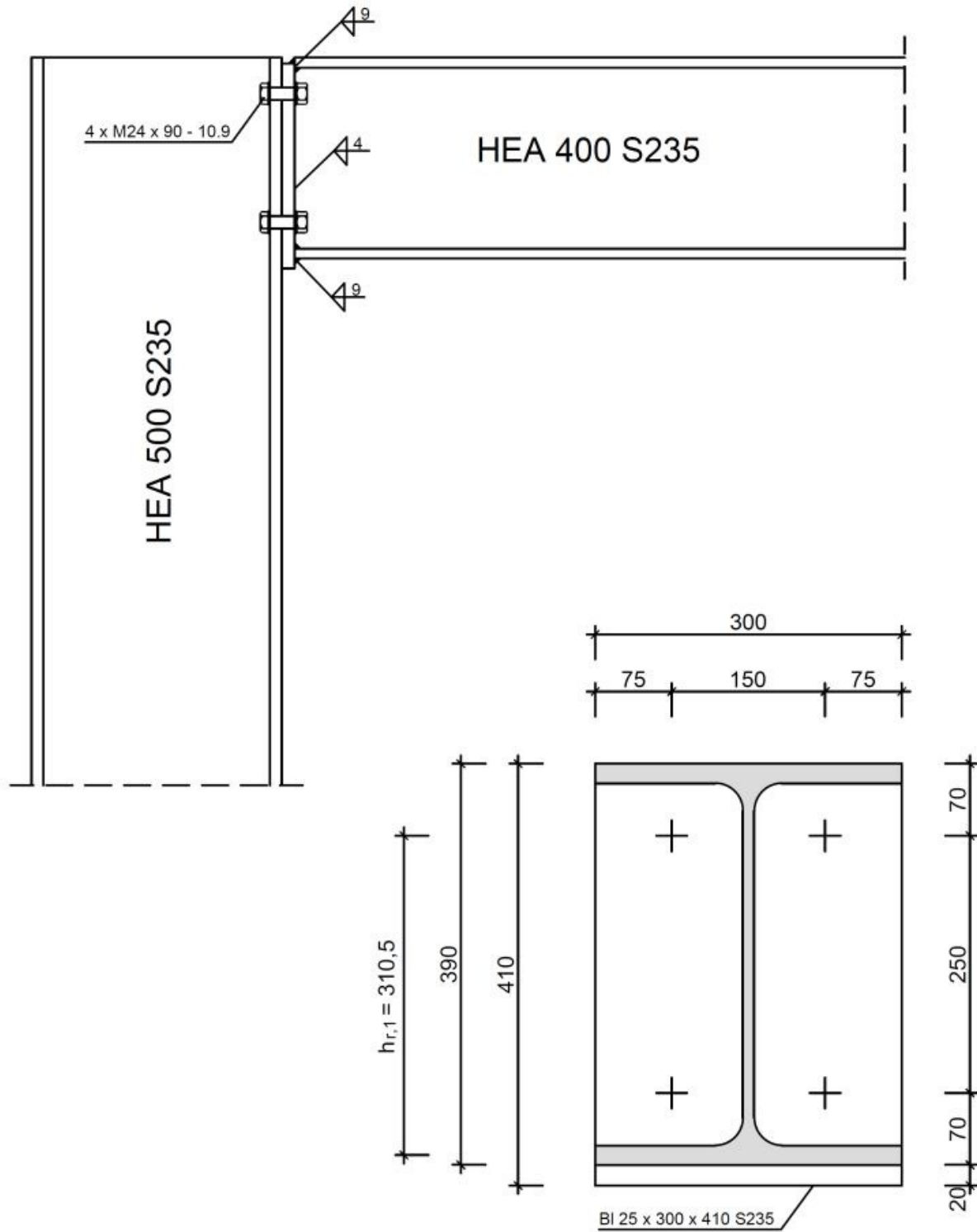


Abbildung 8.3 - Beispiel 2 - Anschluss mit einer Schraubenreihe ohne Aussteifungen

8.3.2 Werte

Stütze: HEA 500	Träger: HEA 400	Stirnplatte / Schrauben
$h_c = 49 \text{ cm}$	$h_b = 39 \text{ cm}$	$h_p = 41 \text{ cm}$
$b_c = 30 \text{ cm}$	$b_b = 30 \text{ cm}$	$b_p = 30 \text{ cm}$
$t_{wc} = 1,2 \text{ cm}$	$t_{wb} = 1,1 \text{ cm}$	$t_p = 2,5 \text{ cm}$
$t_{fc} = 2,3 \text{ cm}$	$t_{fb} = 1,9 \text{ cm}$	$a_f = 9 \text{ mm}$
$r_c = 2,7 \text{ cm}$	$r_b = 2,7 \text{ cm}$	$a_w = 4 \text{ mm}$
$d_c = 39 \text{ cm}$	$d_b = 29,8 \text{ cm}$	Größe: M24
$A_c = 198 \text{ cm}^2$	$A_b = 159 \text{ cm}^2$	Festigkeitsklasse: 10.9
$A_{vc} = 75,2 \text{ cm}^2$	$A_{vb} = 57,4 \text{ cm}^2$	$A_s = 3,53 \text{ cm}^2$
$M_{y,pl,Rd} = 928,0 \text{ kNm}$	$M_{y,pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$	$F_{t,Rd} = 254,2 \text{ kN}$
QK 1	QK 1	$L_b = 2,55 \text{ cm} + \text{Paketstärke}$
$I_y = 86970 \text{ cm}^4$	$I_y = 45070 \text{ cm}^4$	

T-Stummel Stützensseite	T-Stummel Trägerseite
$m = (15-1,2)/2-0,8*2,7 = 4,74 \text{ cm}$	$m = (15-1,1)/2-0,8*0,4*2^{0,5} = 6,50 \text{ cm}$
$e = 7,5 \text{ cm}$	$m_2 = 7,0-1,9-0,8*0,9*2^{0,5} = 4,08 \text{ cm}$
$e_1 = 7,0 \text{ cm}$	$e = 7,5 \text{ cm}$
$n = \min \{7,5 ; 1,25*4,74\} = 5,93 \text{ cm}$	$n = \min \{7,5 ; 1,25*6,50\} = 7,50 \text{ cm}$
$L_b = 2,55+2,3+2,5 = 7,35 \text{ cm}$	$\lambda_1 = 6,50/(6,50+7,5) = 0,464$
	$\lambda_2 = 4,08/(6,50+7,5) = 0,291$
	$\alpha \approx 6,71$

8.3.3 Effektive Länge l_{eff}

8.3.3.1 Stützenseite

$$l_{eff,cp} = \min\{2 * \pi * m ; \pi * m + 2 * e_1\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{2 * \pi * 4,74 ; \pi * 4,74 + 2 * 7,0\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{29,78 ; 28,89\}$$

$$l_{eff,cp} = 28,89 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{4 * m + 1,25 * e ; 2 * m + 0,625 * e + e_1\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{4 * 4,74 + 1,25 * 7,5 ; 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 7,0\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{28,34 ; 21,17\}$$

$$l_{eff,nc} = 21,17 \text{ cm}$$

8.3.3.2 Trägerseite

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \alpha * m$$

$$l_{eff,nc} = 6,71 * 6,5$$

$$l_{eff,ncc} = 43,62 \text{ cm}$$

8.3.4 Tragfähigkeit

8.3.4.1 Komponente 1: Stützensteg mit Schubbeanspruchung

Schlankheit des Stützensteiges

$$\frac{d_c}{t_w} = \frac{39}{1,2} = 32,5 \leq 69 = 69 * \sqrt{\frac{23,5}{23,5}} = 69 * \varepsilon$$

Schubtragfähigkeit

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 * f_{y,wc} * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{0,9 * 23,5 * 75,2}{\sqrt{3} * 1,0}$$

$$V_{wp,Rd} = 918,26 \text{ kN}$$

8.3.4.2 Komponente 2: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck

Wirksame Breite

$$s_p = \min\{2 * t_p ; t_p + u - \sqrt{2} * a_f\} = \min\{2 * 2,5 ; 2,5 + 2,0 - \sqrt{2} * 0,9\}$$

$$s_p = \min\{5,00 ; 3,23\} = 3,23 \text{ cm}$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2 * \sqrt{2} * a_f + 5 * (t_{fc} + r_c) + s_p$$

$$b_{eff,c,wc} = 1,9 + 2 * \sqrt{2} * 0,9 + 5 * (2,3 + 2,7) + 3,23$$

$$b_{eff,c,wc} = 32,68 \text{ cm}$$

Abminderungswert ω

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,c,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (32,68 * 1,2 / 75,2)^2}}$$

$$\omega = 0,860$$

Berechnung k_{wc}

$$k_{wc} = 1,00$$

Berechnung $\bar{\lambda}_p$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 * \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} * d_{wc} * f_{y,wc}}{E * t_{wc}^2}} = 0,932 * \sqrt{\frac{32,68 * 39 * 23,5}{21000 * 1,2^2}} = 0,928$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,928 \geq 0,612 \quad \Rightarrow \text{Formel (5.24) maßgebend; } \rho \text{ muss berechnet werden}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,928 - 0,2}{0,928^2} = 0,845$$

Tragfähigkeit

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega * k_{wc} * \rho * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{0,860 * 1,00 * 0,845 * 32,68 * 1,2 * 23,5}{1,1}$$

$$F_{c,wc,Rd} = 608,83 \text{ kN}$$

8.3.4.3 Komponente 3: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

Vor der Komponente 3 ist die Komponente 4 berechnet worden, um die wirksamen Breiten zu erhalten. Aus Gründen der Übersicht ist die Reihenfolge der Komponenten beibehalten worden.

1. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 21,17 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (21,17 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,933$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,933 * 21,17 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 557,00 \text{ kN}$$

8.3.4.4 Komponente 4: Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_f^3} = \frac{8,8 * 4,74^3 * 3,53 * 1}{21,17 * 2,3^3} = 12,84 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 12,84 = L_b^*$$

Modus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{28,89; 21,17\} = 21,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 21,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 657,94 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 657,94}{4,74} = 555,22 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 21,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 21,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 657,94 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 657,94 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 405,88 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{555,22; 405,88; 508,4\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 405,88 \text{ kN}$$

8.3.4.5 Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_p^3} = \frac{8,8 * 6,50^3 * 3,53 * 1}{40,84 * 2,5^3} = 13,37 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 13,37 = L_b^*$$

Modus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 43,62\} = 40,84 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 40,84 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1499,59 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1499,59}{6,50} = 922,82 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 43,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1601,67 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1601,67 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 501,17 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Traqfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{922,82; 501,17; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 501,17 \text{ kN}$$

8.3.4.6 Komponente 6: Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung

Querschnittsklasse des Trägers: 1

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{602,1 * 100}{39 - 1,9} = 1622,91 \text{ kN}$$

8.3.4.7 Komponente 7: Trägersteg mit Zugbeanspruchung

$$b_{eff,t,wb} = 43,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 43,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1127,58 \text{ kN}$$

8.3.4.8 Zusammenfassung der Tragfähigkeiten der Komponenten

Komponente	1. Schraubenreihe	Andere Komponenten
1	–	918,26 kN
2	–	608,83 kN
3	557,00 kN	–
4	405,88 kN	–
5	501,17 kN	–
6	–	1622,91 kN
7	1127,58 kN	–

8.3.4.9 BiegetragfähigkeitTragfähigkeit der Schraubenreihe

$$F_{t1,Rd} = \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,wc,Rd} ; F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{c,fb,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$F_{t1,Rd} = \min\{918,26 ; 608,83 ; 557,00 ; 405,88 ; 501,17 ; 1622,91 ; 1127,58\}$$

$$F_{t1,Rd} = 405,88 \text{ kN}$$

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd} = h_1 * F_{t1,Rd} = 31,05 * 405,88$$

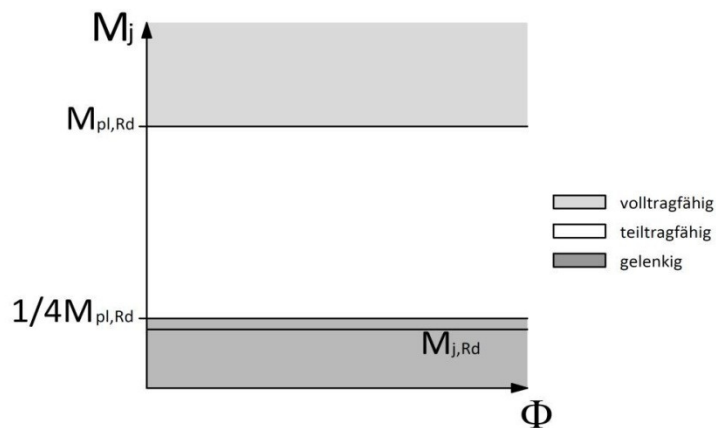
$$M_{j,Rd} = 12602,57 \text{ kNcm} = 126,03 \text{ kNm}$$

8.3.4.10 Klassifizierung nach Tragfähigkeit

$$M_{pl,Rd} = \min\{M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd}\} = \min\{602,1 ; 928,0\} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 126,03 \text{ kNm} \leq 150,53 = 0,25 * 602,1 = 0,25 * M_{pl,Rd}$$

⇒ Anschluss ist gelenkig, siehe Grafik 8.4:



Grafik 8.4 Klassifizierung des Anschlusses nach der Tragfähigkeit

8.3.5 Rotationssteifigkeit

8.3.5.1 Steifigkeitskoeffizienten der Grundkomponenten

Stützensteg mit Schubbeanspruchung

$$k_1 = \frac{0,38 * A_{vc}}{\beta * z}$$

$$k_1 = \frac{0,38 * 75,2}{1,0 * 31,05} = 0,920 \text{ cm}$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck

$$k_2 = \frac{0,7 * b_{eff,c,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

$$k_2 = \frac{0,7 * 32,68 * 1,2}{39} = 0,704 \text{ cm}$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

$$k_3 = \frac{0,7 * b_{eff,t,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

$$k_3 = \frac{0,7 * 21,17 * 1,2}{39} = 0,456 \text{ cm}$$

Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$k_4 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_{fc}^3}{m^3}$$

$$k_4 = \frac{0,9 * 21,17 * 2,3^3}{4,74^3} = 2,177 \text{ cm}$$

Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$k_5 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_p^3}{m^3}$$

$$k_5 = \frac{0,9 * 40,84 * 2,5^3}{6,50^3} = 2,091 \text{ cm}$$

Schraube auf Zug

$$k_{10} = \frac{1,6 * A_s}{L_b}$$

$$k_{10} = \frac{1,6 * 3,53}{7,35} = 0,768 \text{ cm}$$

8.3.5.2 Hebelarm

$$z = 39 - \frac{1,9}{2} - 7 = 31,05 \text{ cm}$$

8.3.5.3 Anfangsrotationssteifigkeit

$$S_{j,ini} = \frac{E * z^2}{\mu * \sum_i \frac{1}{k_i}}$$

$$S_{j,ini} = \frac{21000 * 31,05^2}{1,0 \left(\frac{1}{0,920} + \frac{1}{0,704} + \frac{1}{0,456} + \frac{1}{2,177} + \frac{1}{2,091} + \frac{1}{0,768} \right)}$$

$$= 2.917.286 \frac{kNcm}{rad}$$

$$S_{j,ini} = 29.173 \frac{kNm}{rad}$$

8.3.5.4 Klassifizierung nach RotationssteifigkeitRahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen sind identisch mit Beispiel 1 siehe Kapitel 8.2.5.7

Zone 1

verschiebliche Systeme

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$2.917.286 \frac{kNcm}{rad} \leq 24.268.462 \frac{kNcm}{rad} = 25 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem verschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

unverschiebliche Systeme

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$2.917.286 \frac{kNcm}{rad} \leq 7.765.908 \frac{kNcm}{rad} = 8 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem unverschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

Zone 3

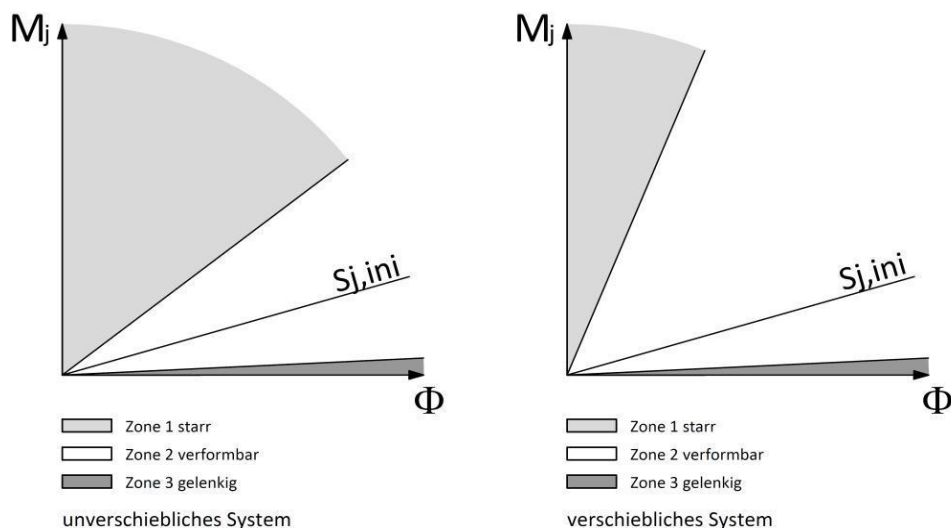
$$S_{j,ini} \leq 0,5 * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$2.917.286 \frac{kNcm}{rad} \leq 485.369 \frac{kNcm}{rad} = 0,5 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Im System liegt keine gelenkige Anschlusskonfiguration vor.

Ergebnis

Der Anschluss ist weder in Zone 1 noch in Zone 3 klassifizierbar, somit liegt eine Klassifikation der Zone 2 vor. Dabei handelt es sich um einen verformbaren Anschluss. Die folgende Grafik 8.5 gibt einen Überblick, inwieweit der Anschluss in dem Tragwerk verformbar ist, abhängig davon, ob es sich um ein unverschiebliches oder verschiebliches System handelt.



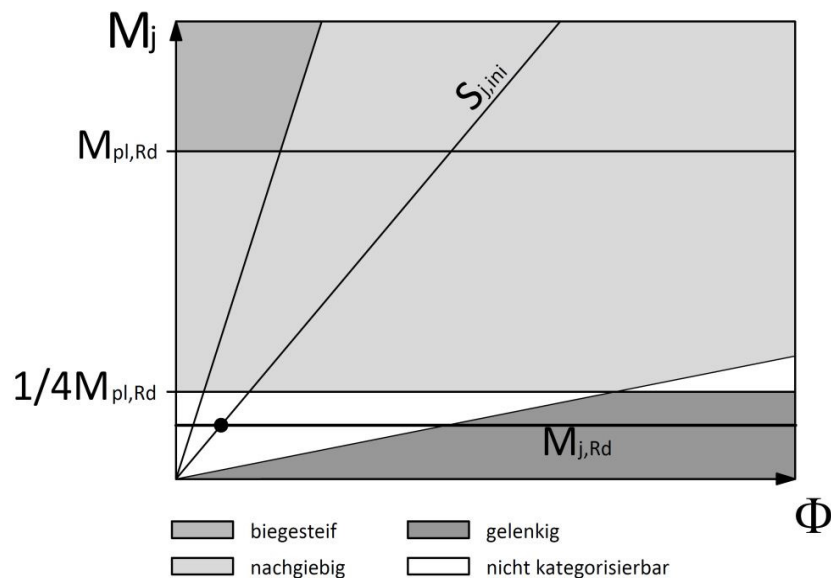
Grafik 8.5 Klassifizierung des Anschlusses nach der Rotationssteifigkeit

8.3.6 Kategorisierung

Berechnungsverfahren	Klassifizierung der Anschlüsse nach	Klassifizierung der Anschlüsse	Kategorie des Anschlusses
elastisch	Rotationssteifigkeit (Kapitel 7.2)	verformbar	nachgiebig
starr-plastisch	Tragfähigkeit (Kapitel 7.3)	gelenkig	gelenkig
elastisch-plastisch	Rotationssteifigkeit + Tragfähigkeit (Tabelle 7.1)	verformbar + gelenkig	nicht kategorisierbar

Bei diesem Anschluss tritt eine Kombination von Klassifizierungen auf, die, wie in Kapitel 7.1 erklärt, nach dem EC3-1-8 [2] für eine elastisch-plastische Berechnung keiner Kategorie zugeordnet werden kann.

Die Kategorisierung dieses Anschlusses wird in der folgenden Grafik 8.6 dargestellt:



Grafik 8.6 Kategorisierung des Anschlusses

Das resultiert daher, dass sich bei der Klassifizierung der Rotationssteifigkeit ein verformbarer Anschluss ergeben hat. Somit sind die Auswirkungen der Vorformungen im Tragwerk zu berücksichtigen. In der Tragfähigkeit hat sich allerdings ein gelenkiger Anschluss ergeben. Demnach würden dem Anschluss keine Momente in den Berechnungen zugeordnet werden. Dieser Anschluss ist dennoch in der Lage, ein geringes Moment von $126,03 \text{ kNm}$ aufzunehmen.

Durchaus können alle Anschlüsse als nachgiebige Anschlüsse bemessen werden, in diesem Fall ist die Tragfähigkeit des Anschlusses im Verhältnis zur Querschnittstragfähigkeit allerdings so gering, dass es zu einem sehr unwirtschaftlichen Ergebnis führt.

8.4 Beispiel 3: Anschluss mit zwei Schraubenreihen und Stegsteifen

8.4.1 System

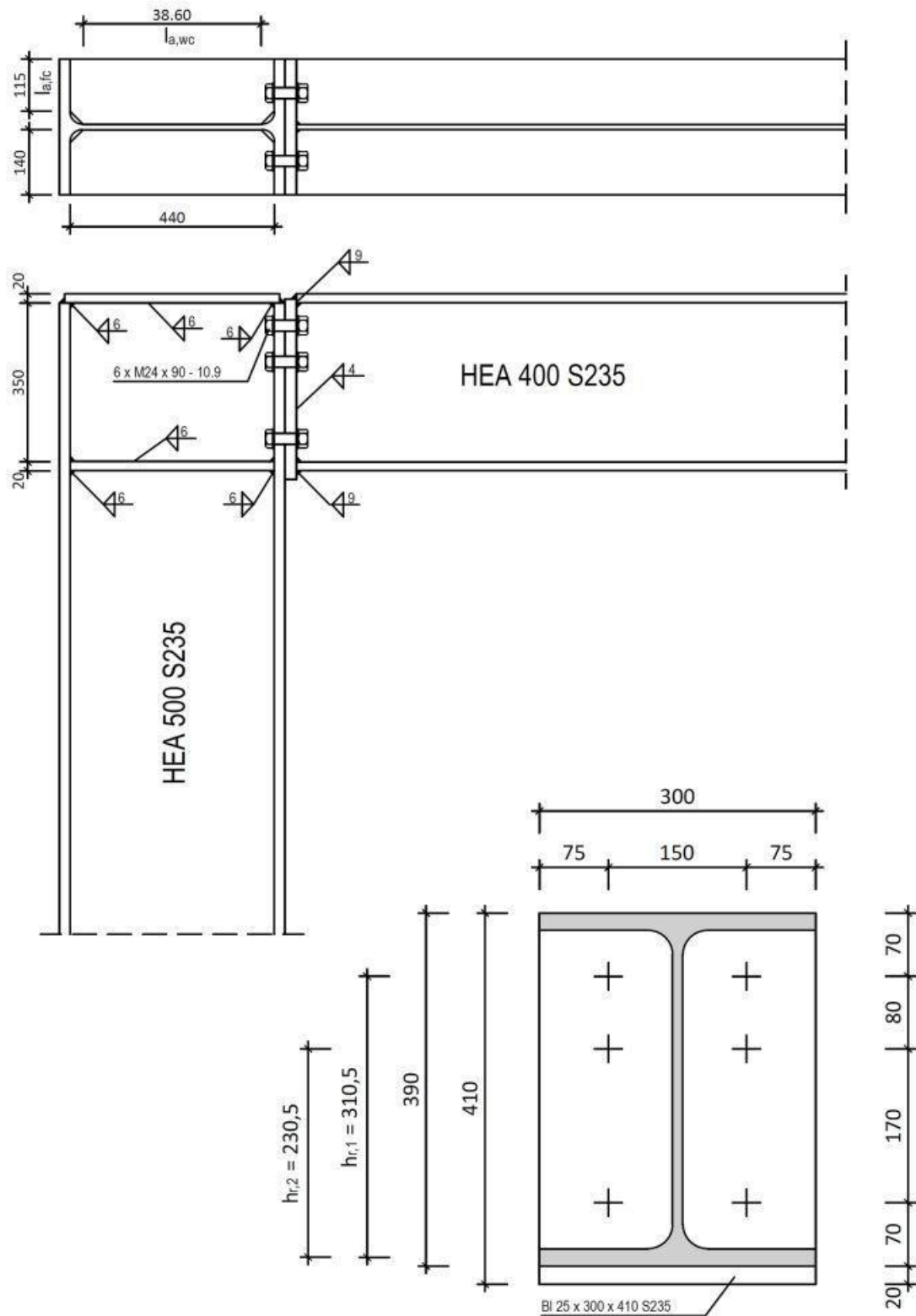


Abbildung 8.4 - Beispiel 3 - Anschluss mit zwei Schraubenreihen und Stegsteifen

8.4.2 Werte

Stütze: HEA 500	Träger: HEA 400	Stirnplatte / Schrauben
$h_c = 49 \text{ cm}$	$h_b = 39 \text{ cm}$	$h_p = 41 \text{ cm}$
$b_c = 30 \text{ cm}$	$b_b = 30 \text{ cm}$	$b_p = 30 \text{ cm}$
$t_{wc} = 1,2 \text{ cm}$	$t_{wb} = 1,1 \text{ cm}$	$t_p = 2,5 \text{ cm}$
$t_{fc} = 2,3 \text{ cm}$	$t_{fb} = 1,9 \text{ cm}$	$a_f = 9 \text{ mm}$
$r_c = 2,7 \text{ cm}$	$r_b = 2,7 \text{ cm}$	$a_w = 4 \text{ mm}$
$d_c = 39 \text{ cm}$	$d_b = 29,8 \text{ cm}$	Größe: M24
$A_c = 198 \text{ cm}^2$	$A_b = 159 \text{ cm}^2$	Festigkeitsklasse: 10.9
$A_{vc} = 75,2 \text{ cm}^2$	$A_{vb} = 57,4 \text{ cm}^2$	$A_s = 3,53 \text{ cm}^2$
$M_{y,pl,Rd} = 928,0 \text{ kNm}$	$M_{y,pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$	$F_{t,Rd} = 254,2 \text{ kN}$
QK 1	QK 1	$L_b = 2,55 \text{ cm} + \text{Paketstärke}$
$I_y = 86970 \text{ cm}^4$	$I_y = 45070 \text{ cm}^4$	$t_{st} = 2,0 \text{ cm}$
		$l_{a,fc} = 11,5 \text{ cm}$

T-Stummel Stützenseite	T-Stummel Trägerseite
$m = (15-1,2)/2-0,8*2,7 = 4,74 \text{ cm}$	$m = (15-1,1)/2-0,8*0,4*2^{0,5} = 6,50 \text{ cm}$
$m_2 = 7,0-2,0-0,8*0,6*2^{0,5} = 4,32 \text{ cm}$	$m_2 = 7,0-1,9-0,8*0,9*2^{0,5} = 4,08 \text{ cm}$
$e = 7,5 \text{ cm}$	$e = 7,5 \text{ cm}$
$p = 8,0 \text{ cm}$	$p = 8,0 \text{ cm}$
$n = \min \{7,5 ; 1,25*4,74\} = 5,93 \text{ cm}$	$n = \min \{7,5 ; 1,25*6,50\} = 7,50 \text{ cm}$
$\lambda_1 = 4,74/(4,74+7,5) = 0,387$	$\lambda_1 = 6,50/(6,50+7,5) = 0,464$
$\lambda_2 = 3,98/(4,74+7,5) = 0,353$	$\lambda_2 = 4,08/(6,50+7,5) = 0,291$
$\alpha \approx 6,95$	$\alpha \approx 6,71$
$L_b = 2,55+2,3+2,5 = 7,35 \text{ cm}$	

8.4.3 Effektive Länge l_{eff}

8.4.3.1 Stützenseite

1. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * m$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * 4,74$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 29,78 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \alpha * m$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 6,95 * 4,74$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 32,94 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * m$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * 4,74$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 29,78 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * m + 1,25 * e$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * 4,74 + 1,25 * 7,5$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 28,34 \text{ cm}$$

1. und 2. Schraubenreihe*1. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe*

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 4,74 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 22,89 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * p + \alpha * m - (2 * m + 0,625 * e)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * 8,0 + 6,95 * 4,74 - (2 * 4,74 + 0,625 * 7,5)$$

$$l_{eff,nc} = 22,78 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 4,74 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 22,89 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p$$

$$l_{eff,nc} = 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0$$

$$l_{eff,nc} = 18,17 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,cp} = 22,89 + 22,89 = 45,78 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,nc} = 22,78 + 18,17 = 40,95 \text{ cm}$$

8.4.3.2 Trägerseite**1. Schraubenreihe**

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \alpha * m$$

$$l_{eff,nc} = 6,71 * 6,5$$

$$l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 4 * m + 1,25 * e$$

$$l_{eff,nc} = 4 * 6,5 + 1,25 * 7,5$$

$$l_{eff,nc} = 35,38 \text{ cm}$$

1. und 2. Schraubenreihe***1. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe***

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 6,5 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 28,42 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * p + \alpha * m - (2 * m + 0,625 + e)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * 8,0 + 6,71 * 6,5 - (2 * 6,5 + 0,625 + 7,5)$$

$$l_{eff,nc} = 29,93 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 6,5 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 28,42 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p$$

$$l_{eff,nc} = 2 * 6,5 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0$$

$$l_{eff,nc} = 21,69 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,cp} = 28,42 + 28,42 = 56,84 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,nc} = 29,93 + 21,69 = 51,62 \text{ cm}$$

8.4.4 Tragfähigkeit

8.4.4.1 Komponente 1: Stützensteg mit Schubbeanspruchung

Schlankheit des Stützensteiges

$$\frac{d_c}{t_w} = \frac{39}{1,2} = 32,5 \leq 69 = 69 * \sqrt{\frac{23,5}{23,5}} = 69 * \varepsilon$$

Schubtragfähigkeit

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 * f_{y,wc} * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{0,9 * 23,5 * 75,2}{\sqrt{3} * 1,0} = 918,26 \text{ kN}$$

Erhöhung durch Aussteifung

$$M_{pl,fc,Rd} = 0,25 * t_{fc}^2 * b_c * f_{y,c} = 0,25 * 2,3^2 * 30 * 23,5 = 932,36 \text{ kNcm}$$

$$M_{pl,st,Rd} = 0,25 * t_{st}^2 * 2 * l_{a,fc} * f_{y,c} = 0,25 * 2,0^2 * 2 * 11,5 * 23,5 \\ = 540,50 \text{ kNcm}$$

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4 * M_{pl,fc,Rd}}{d_s} = \frac{4 * 932,36}{39 - 2,0} = 100,80 \text{ kN}$$

$$V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2 * M_{pl,fc,Rd} + 2 * M_{pl,st,Rd}}{d_s} = \frac{2 * 932,36 + 2 * 540,50}{39 - 2,0} = 79,61 \text{ kN}$$

$$V_{wp,Rd} = 918,26 + 79,61 = 997,87 \text{ kN}$$

8.4.4.2 Komponente 2: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck

Es wird davon ausgegangen, dass die Stütze mit der Aussteifung die Belastung aus dem Querdruck des Trägerflansches aufnehmen kann, weil die Aussteifung ungefähr so groß ist wie der Trägerflansch. Deshalb ist

$$F_{c,wc,Rd} \geq 1622,91 \text{ kN}$$

8.4.4.3 Komponente 3: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

Vor der Komponente 3 ist die Komponente 4 berechnet worden, um die wirksamen Breiten zu erhalten. Aus Gründen der Übersicht ist die Reihenfolge der Komponenten beibehalten worden.

1. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 32,94 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (32,94 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,858$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,858 * 32,94 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 797,00 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (28,34 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,889$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,889 * 28,34 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 710,48 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe als Gruppe

$$b_{eff,t,wc} = 40,95 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (40,95 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,802$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,802 * 40,95 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 926,14 \text{ kN}$$

Die Erhöhung der Tragfähigkeit durch das obere Stegblech wird in diese Berechnung nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 5.3.3).

8.4.4.4 Komponente 4: Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_f^3} = \frac{8,8 * 4,74^3 * 3,53 * 2}{40,95 * 2,3^3} = 13,28 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 13,28 = L_b^*$$

1. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{29,78; 32,94\} = 29,78 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,78 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 925,53 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 925,53}{4,74} = 781,04 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 32,94 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 32,94 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1023,73 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1023,73 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 474,44 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{781,04 ; 474,44 ; 508,4\}$$

$$= 474,44 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min\{l_{eff,cp} ; l_{eff,nc}\} = \min\{29,78 ; 28,34\} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 880,77}{4,74} = 743,27 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 880,77 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 447,64 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\}$$

$$= \min\{743,27 ; 447,64 ; 508,4\} = 447,64 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe als GruppeModus 1

$$l_{eff,1} = \min\{l_{eff,cp} ; l_{eff,nc}\} = \min\{45,78 ; 40,95\} = 40,95 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 40,95 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1272,67 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1272,67}{4,74} = 1073,98 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 40,95 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 40,95 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1272,67 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1272,67 + 5,93 * 4 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 803,65 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 * 254,2 = 1016,8 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{1073,98 ; 803,65 ; 1016,8\}$$

$$= 803,65 \text{ kN}$$

8.4.4.5 Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung1. Schraubenreihe

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_p^3} = \frac{8,8 * 6,50^3 * 3,53 * 2}{51,62 * 2,5^3} = 21,15 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 21,15 = L_b^*$$

Modus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 43,62\} = 40,84 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 40,84 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1499,59 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1499,59}{6,50} = 922,82 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 43,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1601,67 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1601,67 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 501,17 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{922,82; 501,17; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 501,17 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 35,38\} = 35,38 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 35,38 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$
$$= 1299,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1299,11}{6,50} = 799,45 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 35,38 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 35,38 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$
$$= 1299,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1299,11 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 457,94 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{799,45; 457,94; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 457,94 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe als GruppeModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{56,84; 51,62\} = 51,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 51,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1895,42 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1895,42}{6,50} = 1166,41 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 51,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 51,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1895,42 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1895,42 + 7,50 * 4 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 815,49 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 * 254,2 = 1016,8 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{1166,41; 815,49; 1016,8\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 815,49 \text{ kN}$$

8.4.4.6 Komponente 6: Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung

Querschnittsklasse des Trägers: 1

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{602,1 * 100}{39 - 1,9} = 1622,91 \text{ kN}$$

8.4.4.7 Komponente 7: Trägersteg mit Zugbeanspruchung1. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 43,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 43,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1127,58 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 35,38 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 35,38 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 914,57 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe als Gruppe

$$b_{eff,t,wb} = 51,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 51,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1334,38 \text{ kN}$$

8.4.4.8 Zusammenfassung der Tragfähigkeiten der Komponenten

Komponente	1. Schraubenreihe	2. Schraubenreihe	1. + 2. Schraubenreihe /andere Komponenten
1	–	–	997,87 kN
2	–	–	≥ 1622,91 kN _
3	797,00 kN	710,48 kN	926,14 kN
4	474,44 kN	447,67 kN	803,65 kN
5	501,17 kN	457,94 kN	815,49 kN
6	–	–	1622,91 kN
7	1127,58 kN	914,57 kN	1334,38 kN

8.4.4.9 BiegetragfähigkeitTragfähigkeit der Schraubenreihen einzeln betrachtet

$$F_{tr,Rd} = \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$F_{t1,Rd} = \min\{797,00 ; 474,44 ; 501,17 ; 1127,58\}$$

$$F_{t1,Rd} = 474,44 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = \min\{710,48 ; 447,64 ; 457,94 ; 914,57\}$$

$$F_{t2,Rd} = 447,64 \text{ kN}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} = 474,44 + 447,64 = 922,08 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der druck- und schubbeanspruchten Komponenten

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,fb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 922,08 \text{ kN} \leq 997,87 \text{ kN} = \min\{997,87 ; 1622,91\}$$

⇒ Keine Abminderung erforderlich

Tragfähigkeit der Schraubengruppen

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 922,08 \text{ kN} \geq 803,65 \text{ kN} = \min\{926,14 ; 803,65 ; 815,49 ; 1334,38\}$$

⇒ Abminderung der Schraubenreihe, die dem Druckpunkt näher ist.

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}$$

$$F_{t2,Rd} = \sum F_{tr,Rd} - F_{t1,Rd} = 803,65 - 474,44 = 329,21 \text{ kN}$$

Sprödbbruchversagen

$$F_{tx,Rd} \leq 1,9 * F_{t,Rd}$$

$$474,44 \text{ kN} \leq 482,98 \text{ kN} = 1,9 * 254,2$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Biegetragfähigkeit

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd} = h_1 * F_{t1,Rd} + h_2 * F_{t2,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = 31,05 * 474,44 + 23,05 * 329,21$$

$$M_{j,Rd} = 22319,65 \text{ kNcm} = 223,20 \text{ kNm}$$

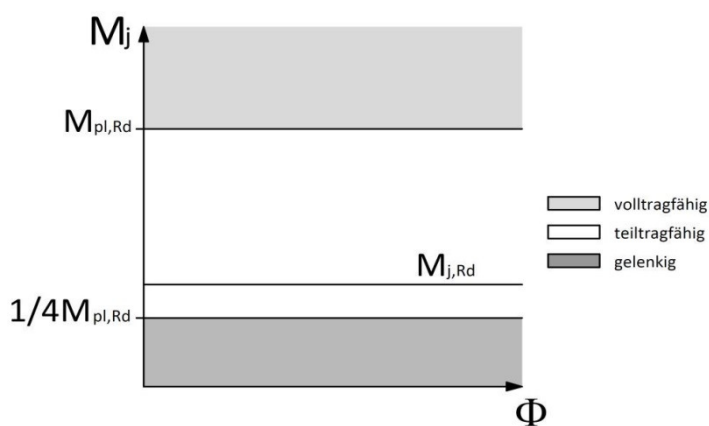
8.4.4.10 Klassifizierung nach Tragfähigkeit

$$M_{pl,Rd} = \min\{M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd}\} = \min\{602,1 ; 928,0\} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} > M_{j,Rd} > 0,25 * M_{pl,Rd}$$

$$602,1 > 223,20 > 150,53$$

⇒ Anschluss ist teiltragfähig, siehe Grafik 8.7:



Grafik 8.7 Klassifizierung des Anschlusses nach der Tragfähigkeit

8.4.5 Rotationssteifigkeit

8.4.5.1 Steifigkeitskoeffizienten der Grundkomponenten

Stützensteg mit Schubbeanspruchung

$$k_1 = \infty$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck

$$k_2 = \infty$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querkzug

$$k_3 = \frac{0,7 * b_{eff,t,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

$$k_{3,1} = \frac{0,7 * 22,78 * 1,2}{39} = 0,491 \text{ cm}$$

$$k_{3,2} = \frac{0,7 * 18,17 * 1,2}{39} = 0,391 \text{ cm}$$

Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$k_4 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_{fc}^3}{m^3}$$

$$k_{4,1} = \frac{0,9 * 22,78 * 2,3^3}{4,74^3} = 2,342 \text{ cm}$$

$$k_{4,2} = \frac{0,9 * 18,17 * 2,3^3}{4,74^3} = 1,868 \text{ cm}$$

Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$k_5 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_p^3}{m^3}$$

$$k_{5,1} = \frac{0,9 * 28,42 * 2,5^3}{6,50^3} = 1,455 \text{ cm}$$

$$k_{5,2} = \frac{0,9 * 21,69 * 2,5^3}{6,50^3} = 1,111 \text{ cm}$$

Schraube auf Zug

$$k_{10} = \frac{1,6 * A_s}{L_b}$$

$$k_{10} = \frac{1,6 * 3,53}{7,35} = 0,768 \text{ cm}$$

8.4.5.2 effektiver Steifigkeitskoeffizient der Schraubenreihe

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}\right)}$$

$$k_{eff,1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,491} + \frac{1}{2,342} + \frac{1}{1,455} + \frac{1}{0,768}\right)} = 0,225 \text{ cm}$$

$$k_{eff,2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,391} + \frac{1}{1,868} + \frac{1}{1,111} + \frac{1}{0,768}\right)} = 0,189 \text{ cm}$$

8.4.5.3 Hebelarme

$$h_{r1} = 39 - \frac{1,9}{2} - 7 = 31,05 \text{ cm}$$

$$h_{r2} = 39 - \frac{1,9}{2} - 7 - 8 = 23,05 \text{ cm}$$

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} * h_r}$$

$$z_{eq} = \frac{0,225 * 31,05^2 + 0,189 * 23,05^2}{0,225 * 31,05 + 0,189 * 23,05} = 27,98 \text{ cm}$$

8.4.5.4 äquivalenter Steifigkeitskoeffizient

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r}{z_{eq}}$$

$$k_{eq} = \frac{0,225 * 31,05 + 0,189 * 23,05}{27,98} = 0,405 \text{ cm}$$

8.4.5.5 Anfangsrotationssteifigkeit

$$S_{j,ini} = \frac{E * z^2}{\mu * \sum_i \frac{1}{k_i}}$$

$$S_{j,ini} = \frac{21000 * 27,98^2}{1,0 * \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{\infty} + \frac{1}{0,405} \right)} = 6.665.363 \frac{kNcm}{rad} = 66.644 \frac{kNm}{rad}$$

8.4.5.6 Klassifizierung nach RotationssteifigkeitRahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen sind identisch mit Beispiel 1, siehe Kapitel 8.2.5.7

Zone 1

verschiebliche Systeme

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$6.665.363 \frac{kNcm}{rad} \leq 24.268.462 \frac{kNcm}{rad} = 25 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem verschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

unverschiebliche Systeme

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$6.665.363 \frac{kNcm}{rad} \leq 7.765.908 \frac{kNcm}{rad} = 8 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem unverschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

Zone 3

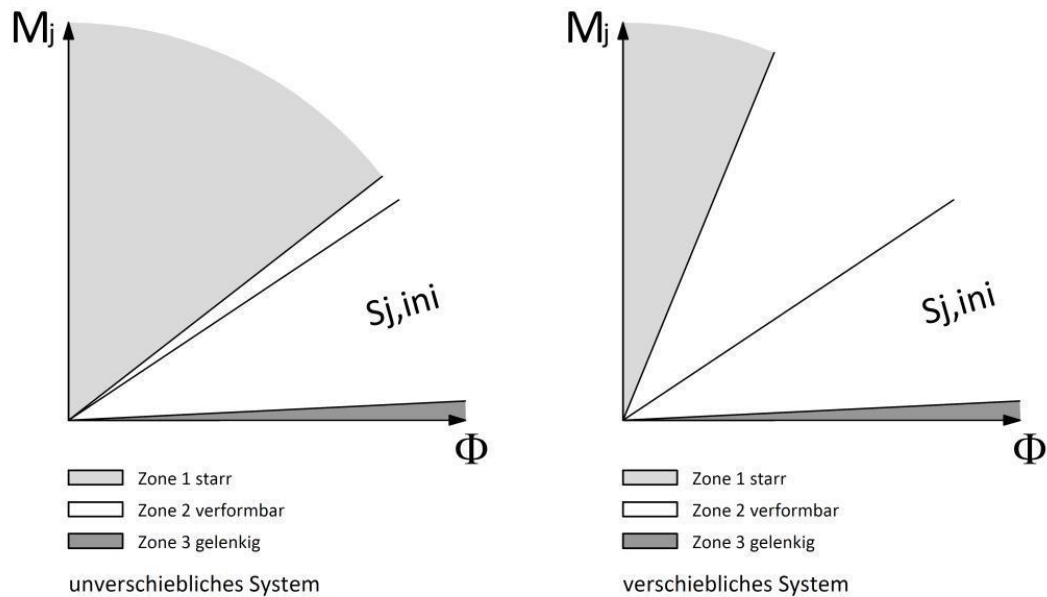
$$S_{j,ini} \leq 0,5 * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$6.665.363 \frac{kNcm}{rad} \geq 485.369 \frac{kNcm}{rad} = 0,5 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Im System liegt keine gelenkige Anschlusskonfiguration vor.

Ergebnis

Der Anschluss ist weder in Zone 1 noch in Zone 3 klassifizierbar, somit liegt eine Klassifikation der Zone 2 vor. Dabei handelt es sich um einen verformbaren Anschluss. Die folgende Grafik 8.8 gibt einen Überblick, inwieweit der Anschluss in dem Tragwerk verformbar ist, abhängig davon, ob es sich um ein unverschiebliches oder verschiebliches System handelt.

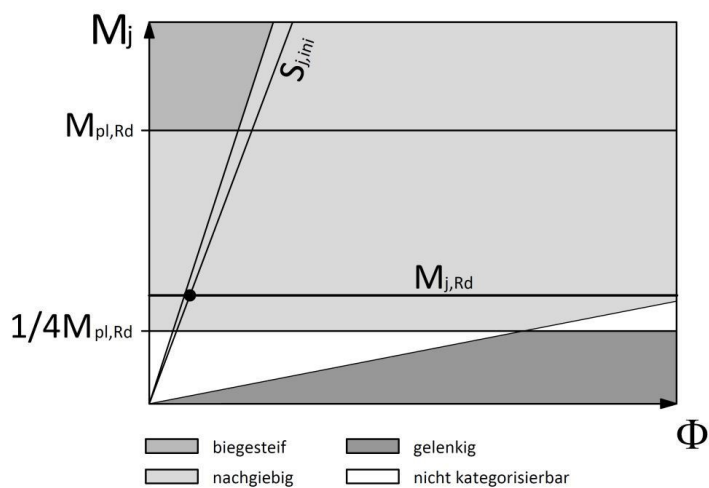


Grafik 8.8 Klassifizierung des Anschlusses nach der Rotationssteifigkeit

8.4.6 Kategorisierung

Berechnungsverfahren	Klassifizierung der Anschlüsse nach	Klassifizierung der Anschlüsse	Kategorie des Anschlusses
elastisch	Rotationssteifigkeit (Kapitel 7.2)	verformbar	nachgiebig
starr-plastisch	Tragfähigkeit (Kapitel 7.3)	teiltragfähig	nachgiebig
elastisch-plastisch	Rotationssteifigkeit + Tragfähigkeit (Tabelle 7.1)	verformbar + teiltragfähig	nachgiebig

Die Kategorisierung dieses Anschlusses wird in der folgenden Grafik 8.9 dargestellt:



Grafik 8.9 Kategorisierung des Anschlusses

8.5 Beispiel 4: Anschluss mit überstehender Stirnplatte ohne Aussteifung

8.5.1 System

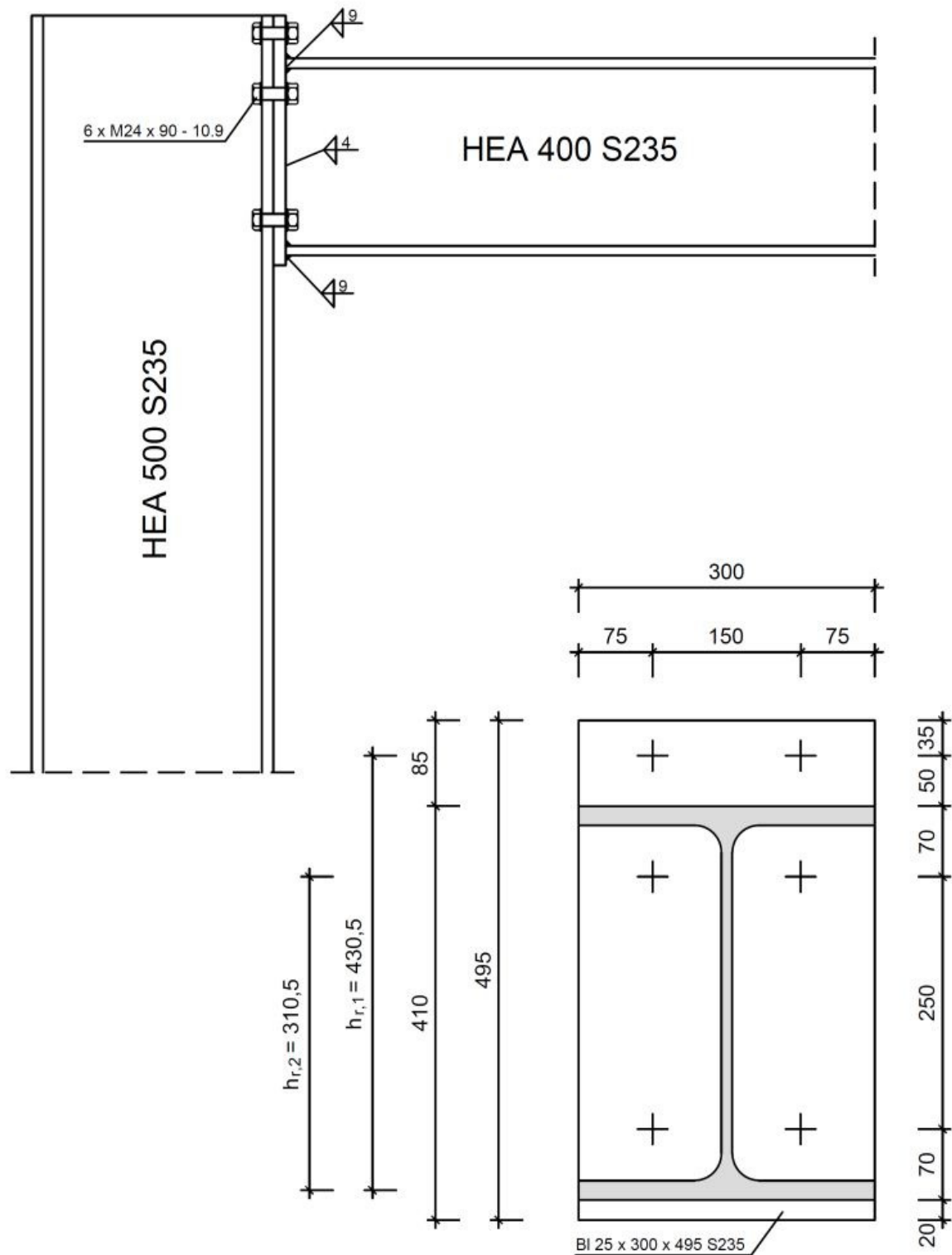


Abbildung 8.5 - Beispiel 4 - Anschluss mit überstehender Stirnplatte ohne Aussteifung

8.5.2 Werte

Stütze: HEA 500	Träger: HEA 400	Stirnplatte / Schrauben
$h_c = 49 \text{ cm}$	$h_b = 39 \text{ cm}$	$h_p = 49,5 \text{ cm}$
$b_c = 30 \text{ cm}$	$b_b = 30 \text{ cm}$	$b_p = 30 \text{ cm}$
$t_{wc} = 1,2 \text{ cm}$	$t_{wb} = 1,1 \text{ cm}$	$t_p = 2,5 \text{ cm}$
$t_{fc} = 2,3 \text{ cm}$	$t_{fb} = 1,9 \text{ cm}$	$a_f = 9 \text{ mm}$
$r_c = 2,7 \text{ cm}$	$r_b = 2,7 \text{ cm}$	$a_w = 4 \text{ mm}$
$d_c = 39 \text{ cm}$	$d_b = 29,8 \text{ cm}$	Größe: M24
$A_c = 198 \text{ cm}^2$	$A_b = 159 \text{ cm}^2$	Festigkeitsklasse: 10.9
$A_{vc} = 75,2 \text{ cm}^2$	$A_{vb} = 57,4 \text{ cm}^2$	$A_s = 3,53 \text{ cm}^2$
$M_{y,pl,Rd} = 928,0 \text{ kNm}$	$M_{y,pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$	$F_{t,Rd} = 254,2 \text{ kN}$
QK 1	QK 1	$L_b = 2,55 \text{ cm} + \text{Paketstärke}$
$I_y = 86970 \text{ cm}^4$	$I_y = 45070 \text{ cm}^4$	

T-Stummel Stützenseite	T-Stummel Trägerseite
$m = (15-1,2)/2-0,8*2,7 = 4,74 \text{ cm}$	$m = (15-1,1)/2-0,8*0,4*2^{0,5} = 6,50 \text{ cm}$
$e = 7,5 \text{ cm}$	$m_2 = 7,0-1,9-0,8*0,9*2^{0,5} = 4,08 \text{ cm}$
$e_1 = 3,5 \text{ cm}$	$m_x = 5,0-0,8*0,9*2^{0,5} = 3,98 \text{ cm}$
$p = 12,0 \text{ cm}$	$e = 7,5 \text{ cm}$
$n = \min \{7,5 ; 1,25*4,74\} = 5,93 \text{ cm}$	$e_x = 3,5 \text{ cm}$
$L_b = 2,55+2,3+2,5 = 7,35 \text{ cm}$	$p = 12,0 \text{ cm}$
	$w = 15,0 \text{ cm}$
	$n = \min \{7,5 ; 1,25*6,50\} = 7,50 \text{ cm}$
	$\lambda_1 = 6,50/(6,50+7,5) = 0,464$
	$\lambda_2 = 4,08/(6,50+7,5) = 0,291$
	$\alpha \approx 6,71$

8.5.3 Effektive Länge l_{eff}

8.5.3.1 Stützenseite

1. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{2 * \pi * m ; \pi * m + 2 * e_1\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{2 * \pi * 4,74 ; \pi * 4,74 + 2 * 3,5\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{29,78 ; 21,89\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 21,89 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{4 * m + 1,25 * e ; 2 * m + 0,625 * e + e_1\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{4 * 4,74 + 1,25 * 7,5 ; 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 3,5\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{28,34 ; 17,67\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 17,67 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * m$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * 4,74$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 29,78 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * m + 1,25 * e$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * 4,74 + 1,25 * 7,5$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 28,34 \text{ cm}$$

1. und 2. Schraubenreihe*1. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe*

$$l_{eff,cp} = \min\{\pi * m + p ; 2 * e_1 + p\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{\pi * 4,74 + 12,0 ; 2 * 3,5 + 12,0\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{26,89 ; 19,00\}$$

$$l_{eff,cp} = 19,00 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p ; 0,5 * p + e_1\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 12,0 ; 0,5 * 12,0 + 3,5\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{20,17 ; 9,50\}$$

$$l_{eff,nc} = 9,50 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 4,74 + 12,0$$

$$l_{eff,cp} = 26,89 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p$$

$$l_{eff,nc} = 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 12,0$$

$$l_{eff,nc} = 20,17 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,cp} = 19,00 + 26,89 = 45,89 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,nc} = 9,50 + 20,17 = 29,67 \text{ cm}$$

8.5.3.2 Trägerseite**1. Schraubenreihe**

$$l_{eff,cp} = \min\{2 * \pi * m_x ; \pi * m_x + w ; \pi * m_x + 2 * e\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{2 * \pi * 3,98 ; \pi * 3,98 + 15 ; \pi * 3,98 + 2 * 7,5\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{25,01 ; 27,50 ; 27,50\}$$

$$l_{eff,cp} = 25,01 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{4 * m_x + 1,25 * e_x ; e + 2 * m_x + 0,625 * e_x ; 0,5 * b_p ; 0,5 * w + 2 * m_x + 0,625 * e_x\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{4 * 3,98 + 1,25 * 3,5 ; 7,5 + 2 * 3,98 + 0,625 * 3,5 ; 0,5 * 30 ; 0,5 * 15 + 2 * 3,98 + 0,625 * 3,5\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{20,30 ; 17,65 ; 15,00 ; 17,65\}$$

$$l_{eff,nc} = 15,00 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \alpha * m$$

$$l_{eff,nc} = 6,71 * 6,5$$

$$l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

8.5.4 Tragfähigkeit

8.5.4.1 Komponente 1: Stützensteg mit Schubbeanspruchung

Schlankheit des Stützensteges

$$\frac{d_c}{t_w} = \frac{39}{1,2} = 32,5 \leq 69 = 69 * \sqrt{\frac{23,5}{23,5}} = 69 * \varepsilon$$

Schubtragfähigkeit

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 * f_{y,wc} * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{0,9 * 23,5 * 75,2}{\sqrt{3} * 1,0}$$

$$V_{wp,Rd} = 918,26 \text{ kN}$$

8.5.4.2 Komponente 2: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck

Wirksame Breite

$$s_p = \min\{2 * t_p ; t_p + u - \sqrt{2} * a_f\} = \min\{2 * 2,5 ; 2,5 + 2,0 - \sqrt{2} * 0,9\}$$

$$s_p = \min\{5,00 ; 3,23\} = 3,23 \text{ cm}$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2 * \sqrt{2} * a_f + 5 * (t_{fc} + r_c) + s_p$$

$$b_{eff,c,wc} = 1,9 + 2 * \sqrt{2} * 0,9 + 5 * (2,3 + 2,7) + 3,23$$

$$b_{eff,c,wc} = 32,68 \text{ cm}$$

Abminderungswert ω

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,c,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (32,68 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,860$$

Berechnung k_{wc}

$$k_{wc} = 1,00$$

Berechnung $\bar{\lambda}_p$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 * \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} * d_{wc} * f_{y,wc}}{E * t_{wc}^2}} = 0,932 * \sqrt{\frac{32,68 * 39 * 23,5}{21000 * 1,2^2}} = 0,928$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,928 \geq 0,612 \quad \Rightarrow \text{Formel (5.24) maßgebend; } \rho \text{ muss berechnet werden}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,928 - 0,2}{0,928^2} = 0,845$$

Tragfähigkeit

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega * k_{wc} * \rho * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{0,860 * 1,00 * 0,845 * 32,68 * 1,2 * 23,5}{1,1}$$

$$F_{c,wc,Rd} = 608,83 \text{ kN}$$

8.5.4.3 Komponente 3: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

Vor der Komponente 3 ist die Komponente 4 berechnet worden, um die wirksamen Breiten zu erhalten. Aus Gründen der Übersicht ist die Reihenfolge der Komponenten beibehalten worden.

1. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 17,67 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (17,67 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,952$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,952 * 17,67 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 474,38 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (28,34 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,889$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,889 * 28,34 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 710,48 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe als Gruppe

$$b_{eff,t,wc} = 29,67 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (29,67 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,880$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,880 * 29,67 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 736,29 \text{ kN}$$

8.5.4.4 Komponente 4: Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_{fc}^3} = \frac{8,8 * 4,74^3 * 3,53 * 2}{29,67 * 2,3^3} = 18,33 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 18,33 = L_b^*$$

1. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{21,89; 17,67\} = 17,67 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 17,67 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 549,16 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 549,16}{4,74} = 463,43 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 17,67 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 17,67 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 549,16 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 549,16 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 385,49 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{463,43 ; 385,49 ; 508,4\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 385,49 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp} ; l_{eff,nc}\} = \min \{29,78 ; 28,34\} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 880,77}{4,74} = 743,27 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 880,77 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 447,64 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{743,27 ; 447,64 ; 508,4\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 447,64 \text{ kN}$$

1. + 2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min\{l_{eff,cp} ; l_{eff,nc}\} = \min\{45,89 ; 29,67\} = 29,67 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,67 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 922,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 922,11}{4,74} = 778,15 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 29,67 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,67 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 922,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 922,11 + 5,93 * 4 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 737,94 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 * 254,2 = 1016,8 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd}\} = \min\{778,15 ; 737,94 ; 1016,8\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 737,94 \text{ kN}$$

8.5.4.5 Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung1.SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{25,01; 15,00\} = 15,00 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 15,00 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0} = 550,78 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m_x} = \frac{4 * 550,78}{3,98} = 553,55 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 15,00 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 15,00 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0} = 550,78 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n_x * \sum F_{t,Rd}}{m_x + n_x} = \frac{2 * 550,78 + 3,5 * 2 * 254,2}{3,98 + 3,50} = 385,16 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{553,55; 385,16; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 385,16 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 43,62\} = 40,84 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 40,84 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1499,59 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1499,59}{6,50} = 922,82 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 43,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1601,67 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1601,67 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 501,17 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{922,82; 501,17; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 501,17 \text{ kN}$$

Vereinfachtes Verfahren

Zur Veranschaulichung des vereinfachten Verfahrens wird die Tragfähigkeit der Schraubenreihen zusätzlich nach diesem berechnet.

1. und 2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{25,01; 15,00\} = 15,00 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 15,00 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0} = 550,78 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m_x} = \frac{4 * 550,78}{3,98} = 553,55 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 15,00 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 15,00 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0} = 550,78 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n_x * \sum F_{t,Rd}}{m_x + n_x} = \frac{2 * 550,78 + 3,5 * 2 * 254,2}{3,98 + 3,50} = 385,16 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{553,55; 385,16; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 385,16 \text{ kN}$$

8.5.4.6 Komponente 6: Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung

Querschnittsklasse des Trägers: 1

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{602,1 * 100}{39 - 1,9} = 1622,91 \text{ kN}$$

8.5.4.7 Komponente 7: Trägersteg mit Zugbeanspruchung**1. Schraubenreihe**

$$b_{eff,t,wb} = 15,00 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 15,00 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 387,75 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 43,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 43,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1127,58 \text{ kN}$$

Vereinfachtes Verfahren

Zur Veranschaulichung des vereinfachten Verfahrens wird die Tragfähig der Schraubenreihen zusätzlich nach diesem berechnet.

1. und 2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 15,00 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 15,00 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 387,75 \text{ kN}$$

8.5.4.8 Zusammenfassung der Tragfähigkeiten der Komponenten

Komponente	1. Schraubenreihe	2. Schraubenreihe	1. + 2. Schraubenreihe /andere Komponenten
1	–	–	918,26 kN
2	–	–	608,83 kN
3	474,38 kN	710,48 kN	736,29 kN
4	385,49 kN	447,41 kN	737,94 kN
5	385,16 kN	501,17 kN	–
6	–	–	1622,91
7	387,75 kN	1127,58 kN	–

Vereinfachtes Verfahren

Hier sind nur Komponenten aufgeführt, die sich bei dem vereinfachten Verfahren geändert haben.

Komponente	1. Schraubenreihe	2. Schraubenreihe	1. + 2. Schraubenreihe /andere Komponenten
5	385,16 kN	385,16 kN	–
7	387,75 kN	387,75 kN	–

8.5.4.9 BiegetragfähigkeitTragfähigkeit der Schraubenreihen einzeln betrachtet

$$F_{tr,Rd} = \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$F_{t1,Rd} = \min\{474,38 ; 385,49 ; 385,16 ; 387,75\}$$

$$F_{t1,Rd} = 385,16 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = \min\{710,48 ; 447,64 ; 501,17 ; 1127,58\}$$

$$F_{t2,Rd} = 447,64 \text{ kN}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} = 385,16 + 447,64 = 832,80 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der druck- und schubbeanspruchten Komponenten

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,wc,Rd} ; F_{c,fb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 832,80 \text{ kN} \geq 608,83 \text{ kN} = \min\{918,26 ; 608,83 ; 1622,91\}$$

⇒ Abminderung der Schraubenreihe, die dem Druckpunkt näher ist.

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}$$

$$F_{t2,Rd} = \sum F_{tr,Rd} - F_{t1,Rd} = 608,83 - 385,16 = 223,67 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der Schraubengruppen

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 608,83 \text{ kN} \leq 736,29 \text{ kN} = \min\{736,29 ; 737,94\}$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Sprödbbruchversagen

$$F_{tx,Rd} \leq 1,9 * F_{t,Rd}$$

$$385,16 \text{ kN} \leq 482,98 \text{ kN} = 1,9 * 254,2$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Biegetragfähigkeit

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd} = h_1 * F_{t1,Rd} + h_2 * F_{t2,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = 43,05 * 385,16 + 31,05 * 223,67$$

$$M_{j,Rd} = 23526,09 \text{ kNcm} = 235,26 \text{ kNm}$$

Vereinfachtes Verfahren

Zur Veranschaulichung des vereinfachten Verfahrens wird die Tragfähigkeit der Schraubenreihen zusätzlich nach diesem berechnet.

Tragfähigkeit der Schraubenreihen einzeln betrachtet

$$F_{tr,Rd} = \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$F_{t1,Rd} = \min\{474,38 ; 385,49 ; 385,16 ; 387,75\}$$

$$F_{t1,Rd} = 385,16 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = \min\{710,48 ; 447,64 ; 385,16 ; 387,75\}$$

$$F_{t2,Rd} = 385,16 \text{ kN}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} = 385,16 + 385,16 = 770,32 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der druck- und schubbeanspruchten Komponenten

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,wc,Rd} ; F_{c,fb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 770,32 \text{ kN} \geq 608,83 \text{ kN} = \min\{918,26 ; 608,83 ; 1622,91\}$$

⇒ Abminderung der Schraubenreihe, die dem Druckpunkt näher ist.

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}$$

$$F_{t2,Rd} = \sum F_{tr,Rd} - F_{t1,Rd} = 608,83 - 385,16 = 223,67 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der Schraubengruppen

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 608,83 \text{ kN} \leq 736,29 \text{ kN} = \min\{736,29 ; 737,94\}$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Spröbruchversagen

$$F_{tx,Rd} \leq 1,9 * F_{t,Rd}$$

$$385,16 \text{ kN} \leq 482,98 \text{ kN} = 1,9 * 254,2$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Biegetragfähigkeit

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd} = h_1 * F_{t1,Rd} + h_2 * F_{t2,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = 43,05 * 385,16 + 31,05 * 223,67$$

$$M_{j,Rd} = 23526,09 \text{ kNcm} = 235,26 \text{ kNm}$$

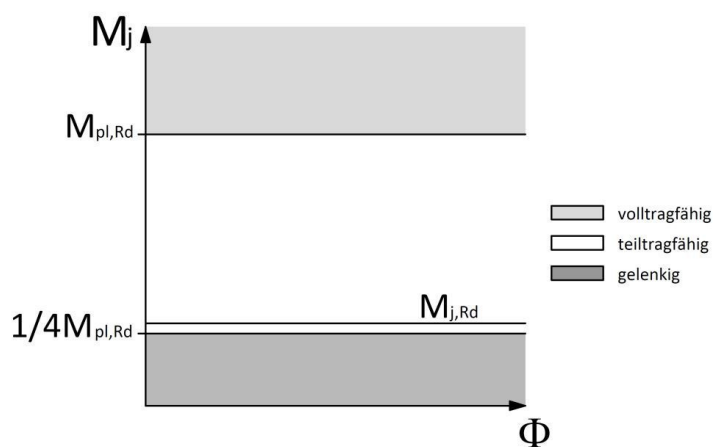
8.5.4.10 Klassifizierung nach Tragfähigkeit

$$M_{pl,Rd} = \min\{M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd}\} = \min\{602,1 ; 928,0\} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} > M_{j,Rd} > 0,25 * M_{pl,Rd}$$

$$602,1 > 235,26 > 150,53$$

⇒ Anschluss ist teiltragfähig, siehe Grafik 8.10:



Grafik 8.10 Klassifizierung des Anschlusses nach der Tragfähigkeit

8.5.5 Rotationssteifigkeit

8.5.5.1 Steifigkeitskoeffizienten der Grundkomponenten

Stützensteg mit Schubbeanspruchung

$$k_1 = \frac{0,38 * A_{vc}}{\beta * z} = \frac{0,38 * 75,2}{1,0 * 36,18} = 0,790 \text{ cm}$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck

$$k_2 = \frac{0,7 * b_{eff,c,wc} * t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 * 32,68 * 1,2}{39} = 0,704 \text{ cm}$$

Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

$$k_3 = \frac{0,7 * b_{eff,t,wc} * t_{wc}}{d_c}$$

$$k_{3,1} = \frac{0,7 * 9,50 * 1,2}{39} = 0,205 \text{ cm}$$

$$k_{3,2} = \frac{0,7 * 20,17 * 1,2}{39} = 0,434 \text{ cm}$$

Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$k_4 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_{fc}^3}{m^3}$$

$$k_{4,1} = \frac{0,9 * 9,50 * 2,3^3}{4,74^3} = 0,977 \text{ cm}$$

$$k_{4,2} = \frac{0,9 * 20,17 * 2,3^3}{4,74^3} = 2,074 \text{ cm}$$

Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$k_5 = \frac{0,9 * l_{eff} * t_p^3}{m^3}$$

$$k_{5,1} = \frac{0,9 * 15 * 2,5^3}{6,50^3} = 0,768 \text{ cm}$$

$$k_{5,2} = \frac{0,9 * 40,84 * 2,5^3}{6,50^3} = 2,091 \text{ cm}$$

Schraube auf Zug

$$k_{10} = \frac{1,6 * A_s}{L_b} = \frac{1,6 * 3,53}{7,35} = 0,768 \text{ cm}$$

8.5.5.2 effektiver Steifigkeitskoeffizient der Schraubenreihe

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}\right)}$$

$$k_{eff,1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,205} + \frac{1}{0,977} + \frac{1}{0,768} + \frac{1}{0,768}\right)} = 0,118 \text{ cm}$$

$$k_{eff,2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,434} + \frac{1}{2,074} + \frac{1}{2,091} + \frac{1}{0,768}\right)} = 0,219 \text{ cm}$$

8.5.5.3 Hebelarme

$$h_{r1} = 39 + 5 - \frac{1,9}{2} = 43,05 \text{ cm} \quad h_{r2} = 43,05 - 12 = 31,05 \text{ cm}$$

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} * h_r} = \frac{0,118 * 43,05^2 + 0,219 * 31,05^2}{0,118 * 43,05 + 0,219 * 31,05} = 36,18 \text{ cm}$$

8.5.5.4 äquivalenter Steifigkeitskoeffizient

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} * h_r}{z_{eq}} = \frac{0,118 * 43,05 + 0,219 * 31,05}{36,18} = 0,328 \text{ cm}$$

8.5.5.5 Anfangsrotationssteifigkeit

$$S_{j,ini} = \frac{E * z^2}{\mu * \sum_i \frac{1}{k_i}}$$

$$S_{j,ini} = \frac{21000 * 36,18^2}{1,0 \left(\frac{1}{0,790} + \frac{1}{0,704} + \frac{1}{0,328}\right)} = 4.793.124 \frac{\text{kNcm}}{\text{rad}} = 47.931 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}}$$

8.5.5.6 Klassifizierung nach RotationssteifigkeitRahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen sind identisch mit Beispiel 1, siehe Kapitel 8.2.5.7

Zone 1*verschiebliche Systeme*

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$4.793.124 \frac{kNcm}{rad} \leq 24.268.462 \frac{kNcm}{rad} = 25 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem verschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

unverschiebliche Systeme

$$S_{j,ini} \geq K_b * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$4.793.124 \frac{kNcm}{rad} \leq 7.765.908 \frac{kNcm}{rad} = 8 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Bei einem unverschieblichen System liegt keine starre Anschlusskonfiguration vor.

Zone 3

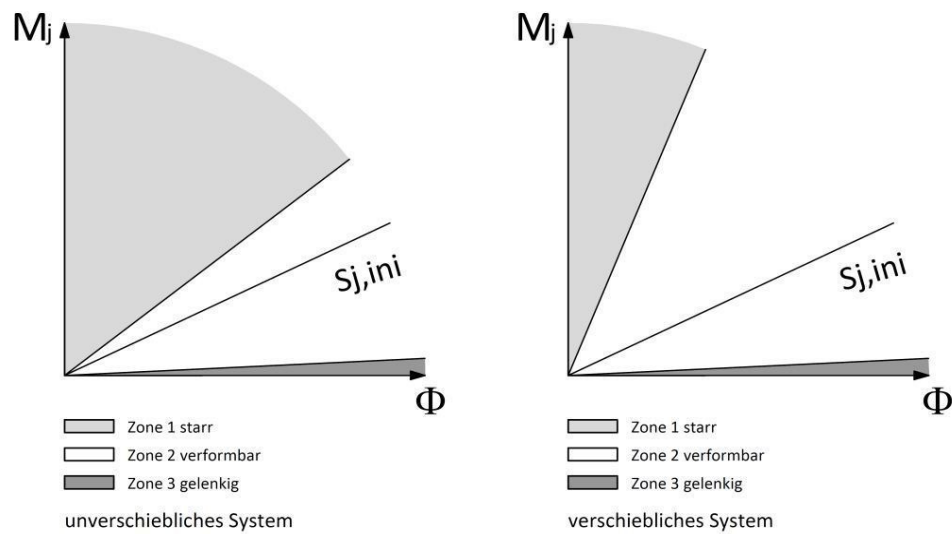
$$S_{j,ini} \leq 0,5 * E * \frac{I_b}{L_b}$$

$$4.793.124 \frac{kNcm}{rad} \geq 485.369 \frac{kNcm}{rad} = 0,5 * 21000 * \frac{45070}{975}$$

Im System liegt keine gelenkige Anschlusskonfiguration vor.

Ergebnis

Der Anschluss ist weder in Zone 1 noch in Zone 3 klassifizierbar, somit liegt eine Klassifikation der Zone 2 vor. Dabei handelt es sich um einen verformbaren Anschluss. Die folgende Grafik 8.11 gibt einen Überblick, in wie weit der Anschluss in dem Tragwerk verformbar ist, abhängig davon, ob es sich um ein unverschiebliches oder verschiebliches System handelt.

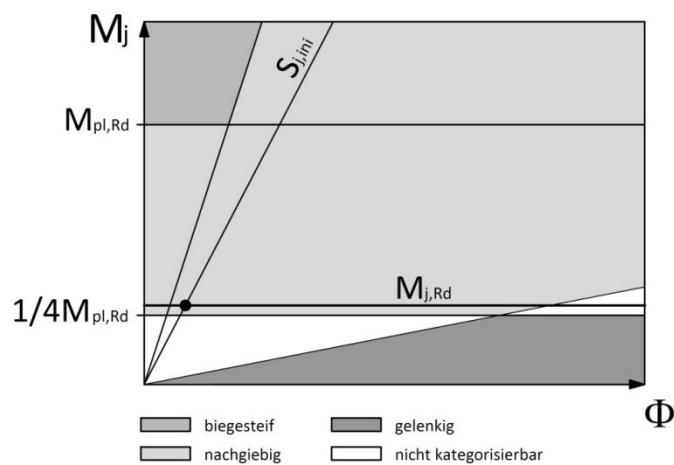


Grafik 8.11 Klassifizierung des Anschlusses nach der Rotationssteifigkeit

8.5.6 Kategorisierung

Berechnungsverfahren	Klassifizierung der Anschlüsse nach	Klassifizierung der Anschlüsse	Kategorie des Anschlusses
elastisch	Rotationssteifigkeit (Kapitel 7.2)	verformbar	nachgiebig
starr-plastisch	Tragfähigkeit (Kapitel 7.3)	teiltragfähig	nachgiebig
elastisch-plastisch	Rotationssteifigkeit + Tragfähigkeit (Tabelle 7.1)	verformbar + teiltragfähig	nachgiebig

Die Kategorisierung dieses Anschlusses wird in der folgenden Grafik 8.12 dargestellt:



Grafik 8.12 Kategorisierung des Anschlusses

8.6 Beispiel 5: Anschluss mit Futterplatten am Stützenflansch

8.6.1 System

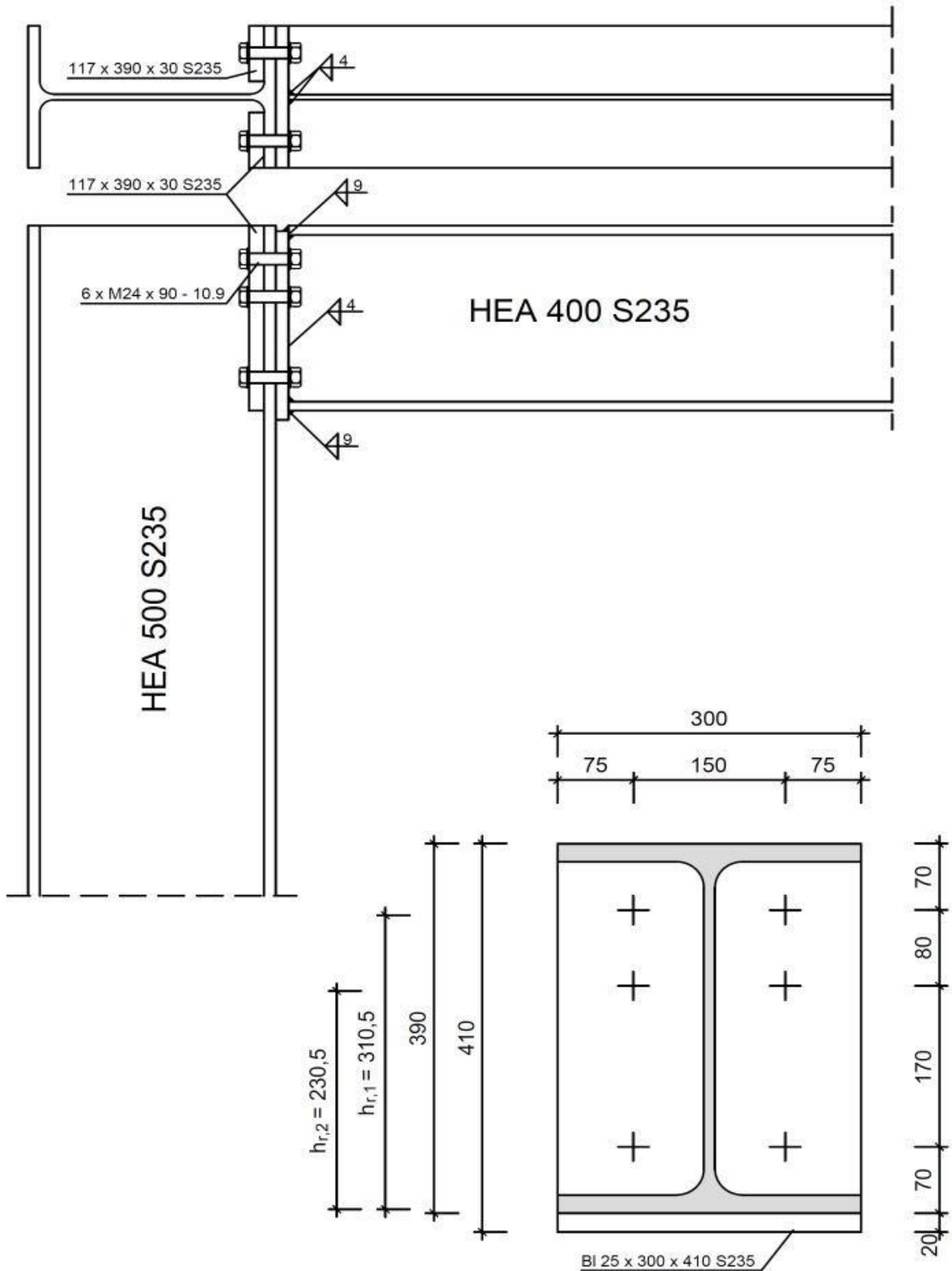


Abbildung 8.6 - Beispiel 5 - Anschluss mit Futterplatten am Stützenflansch

8.6.2 Werte

Stütze: HEA 500	Träger: HEA 400	Stirnplatte / Schrauben
$h_c = 49 \text{ cm}$	$h_b = 39 \text{ cm}$	$h_p = 41 \text{ cm}$
$b_c = 30 \text{ cm}$	$b_b = 30 \text{ cm}$	$b_p = 30 \text{ cm}$
$t_{wc} = 1,2 \text{ cm}$	$t_{wb} = 1,1 \text{ cm}$	$t_p = 2,5 \text{ cm}$
$t_{fc} = 2,3 \text{ cm}$	$t_{fb} = 1,9 \text{ cm}$	$a_f = 9 \text{ mm}$
$r_c = 2,7 \text{ cm}$	$r_b = 2,7 \text{ cm}$	$a_w = 4 \text{ mm}$
$d_c = 39 \text{ cm}$	$d_b = 29,8 \text{ cm}$	Größe: M24
$A_c = 198 \text{ cm}^2$	$A_b = 159 \text{ cm}^2$	Festigkeitsklasse: 10.9
$A_{vc} = 75,2 \text{ cm}^2$	$A_{vb} = 57,4 \text{ cm}^2$	$A_s = 3,53 \text{ cm}^2$
$M_{y,pl,Rd} = 928,0 \text{ kNm}$	$M_{y,pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$	$F_{t,Rd} = 254,2 \text{ kN}$
QK 1	QK 1	$L_b = 2,55 \text{ cm} + \text{Paketstärke}$
$I_y = 86970 \text{ cm}^4$	$I_y = 45070 \text{ cm}^4$	$t_{bp} = 3,0 \text{ cm}$

T-Stummel Stützensseite	T-Stummel Trägerseite
$m = (15-1,2)/2-0,8*2,7 = 4,74 \text{ cm}$	$m = (15-1,1)/2-0,8*0,4*2^{0,5} = 6,50 \text{ cm}$
$e = 7,5 \text{ cm}$	$m_2 = 7,0-1,9-0,8*0,9*2^{0,5} = 4,08 \text{ cm}$
$e_1 = 7,0 \text{ cm}$	$e = 7,5 \text{ cm}$
$p = 8,0 \text{ cm}$	$p = 8,0 \text{ cm}$
$n = \min \{7,5 ; 1,25*4,74\} = 5,93 \text{ cm}$	$n = \min \{7,5 ; 1,25*6,50\} = 7,50 \text{ cm}$
$L_b = 2,55+2,3+2,5+3,0 = 10,35 \text{ cm}$	$\lambda_1 = 6,50/(6,50+7,5) = 0,464$
	$\lambda_2 = 4,08/(6,50+7,5) = 0,291$
	$\alpha \approx 6,71$

8.6.3 Effektive Länge l_{eff}

8.6.3.1 Stützenseite

1. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{2 * \pi * m ; \pi * m + 2 * e_1\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{2 * \pi * 4,74 ; \pi * 4,74 + 2 * 7,0\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = \min\{29,78 ; 28,89\}$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 28,89 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{4 * m + 1,25 * e ; 2 * m + 0,625 * e + e_1\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{4 * 4,74 + 1,25 * 7,5 ; 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 7,0\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \min\{28,34 ; 21,17\}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 21,17 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * m$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 2 * \pi * 4,74$$

$$l_{\text{eff,cp}} = 29,78 \text{ cm}$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * m + 1,25 * e$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 4 * 4,74 + 1,25 * 7,5$$

$$l_{\text{eff,nc}} = 28,34 \text{ cm}$$

1. und 2. Schraubenreihe*1. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe*

$$l_{eff,cp} = \min\{\pi * m + p ; 2 * e_1 + p\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{\pi * 4,74 + 8,0 ; 2 * 7,0 + 8,0\}$$

$$l_{eff,cp} = \min\{22,89 ; 22,00\}$$

$$l_{eff,cp} = 22,00 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p ; 0,5 * p + e_1\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{2 * 4,71 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0 ; 0,5 * 8,0 + 7,0\}$$

$$l_{eff,nc} = \min\{18,17 ; 11,00\}$$

$$l_{eff,nc} = 11,00 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 4,74 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 22,89 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p$$

$$l_{eff,nc} = 2 * 4,74 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0$$

$$l_{eff,nc} = 18,17 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,cp} = 22,00 + 22,89 = 44,89 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,nc} = 11,00 + 18,17 = 29,17 \text{ cm}$$

8.6.3.2 Trägerseite**1. Schraubenreihe**

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = \alpha * m$$

$$l_{eff,nc} = 6,71 * 6,5$$

$$l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * m$$

$$l_{eff,cp} = 2 * \pi * 6,5$$

$$l_{eff,cp} = 40,84 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 4 * m + 1,25 * e$$

$$l_{eff,nc} = 4 * 6,5 + 1,25 * 7,5$$

$$l_{eff,nc} = 35,38 \text{ cm}$$

1. und 2. Schraubenreihe***1. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe***

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 6,5 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 28,42 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * p + \alpha * m - (2 * m + 0,625 * e)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 * 8,0 + 6,71 * 6,5 - (2 * 6,5 + 0,625 * 7,5)$$

$$l_{eff,nc} = 29,93 \text{ cm}$$

2. Schraubenreihe als Teil einer Gruppe

$$l_{eff,cp} = \pi * m + p$$

$$l_{eff,cp} = \pi * 6,5 + 8,0$$

$$l_{eff,cp} = 28,42 \text{ cm}$$

$$l_{eff,nc} = 2 * m + 0,625 * e + 0,5 * p$$

$$l_{eff,nc} = 2 * 6,5 + 0,625 * 7,5 + 0,5 * 8,0$$

$$l_{eff,nc} = 21,69 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,cp} = 28,42 + 28,42 = 56,84 \text{ cm}$$

$$\sum l_{eff,nc} = 29,93 + 21,69 = 51,62 \text{ cm}$$

8.6.4 Tragfähigkeit

8.6.4.1 Komponente 1: Stützensteg mit Schubbeanspruchung

Schlankheit des Stützensteiges

$$\frac{d_c}{t_w} = \frac{39}{1,2} = 32,5 \leq 69 = 69 * \sqrt{\frac{23,5}{23,5}} = 69 * \varepsilon$$

Schubtragfähigkeit

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 * f_{y,wc} * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{0,9 * 23,5 * 75,2}{\sqrt{3} * 1,0}$$

$$V_{wp,Rd} = 918,26 \text{ kN}$$

8.6.4.2 Komponente 2: Stützensteg mit Beanspruchung durch QuerdruckWirksame Breite

$$s_p = \min\{2 * t_p ; t_p + u - \sqrt{2} * a_f\} = \min\{2 * 2,5 ; 2,5 + 2,0 - \sqrt{2} * 0,9\}$$

$$s_p = \min\{5,00 ; 3,23\} = 3,23 \text{ cm}$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2 * \sqrt{2} * a_f + 5 * (t_{fc} + r_c) + s_p$$

$$b_{eff,c,wc} = 1,9 + 2 * \sqrt{2} * 0,9 + 5 * (2,3 + 2,7) + 3,23$$

$$b_{eff,c,wc} = 32,68 \text{ cm}$$

Abminderungswert ω

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,c,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (32,68 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,860$$

Berechnung k_{wc}

$$k_{wc} = 1,00$$

Berechnung $\bar{\lambda}_p$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 * \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} * d_{wc} * f_{y,wc}}{E * t_{wc}^2}} = 0,932 * \sqrt{\frac{32,68 * 39 * 23,5}{21000 * 1,2^2}} = 0,928$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,928 \geq 0,612 \quad \Rightarrow \text{Formel (5.24) maßgebend; } \rho \text{ muss berechnet werden}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,928 - 0,2}{0,928^2} = 0,845$$

Tragfähigkeit

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega * k_{wc} * \rho * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

$$= \frac{0,860 * 1,00 * 0,845 * 3268 * 1,2 * 23,5}{1,1} = 608,83 \text{ kN}$$

8.6.4.3 Komponente 3: Stützensteg mit Beanspruchung durch Querzug

Vor der Komponente 3 ist die Komponente 4 berechnet worden, um die wirksamen Breiten zu erhalten. Aus Gründen der Übersicht ist die Reihenfolge der Komponenten beibehalten worden.

1. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 21,17 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (21,17 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,933$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,933 * 21,17 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 557,00 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (28,34 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,889$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,889 * 28,34 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 710,48 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wc} = 29,17 \text{ cm}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (b_{eff,t,wc} * t_{wc} / A_{vc})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 * (29,17 * 1,2 / 75,2)^2}} = 0,883$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega * b_{eff,t,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,883 * 29,17 * 1,2 * 23,5}{1,0} = 726,35 \text{ kN}$$

8.6.4.4 Komponente 4: Stützenflansch mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_f^3} = \frac{8,8 * 4,74^3 * 3,53 * 2}{29,17 * 2,3^3} = 18,64 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 18,64 = L_b^*$$

1. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{28,89; 21,17\} = 21,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 21,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 657,94 \text{ kNcm}$$

$$M_{bp,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{bp}^2 * \frac{f_{y,bp}}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 21,17 * 3,0^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1119,36 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd} + 2 * M_{bp,Rd}}{m} = \frac{4 * 657,94 + 2 * 1119,36}{4,74} = 1027,53 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 21,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 21,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 657,94 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 657,94 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 405,88 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{1027,53; 405,88; 508,4\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 405,88 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min\{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min\{29,78; 28,34\} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kNcm}$$

$$M_{bp,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{bp}^2 * \frac{f_{y,bp}}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 3,0^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1498,48 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd} + 2 * M_{bp,Rd}}{m} = \frac{4 * 880,77 + 2 * 1498,48}{4,74} = 1375,54 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 28,34 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 28,34 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 880,77 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 880,77 + 5,93 * 2 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 447,64 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{1375,54; 447,64; 508,4\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 447,64 \text{ kN}$$

1. + 2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{44,89; 29,17\} = 29,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 906,57 \text{ kNcm}$$

$$M_{bp,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{bp}^2 * \frac{f_{y,bp}}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,17 * 3,0^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1542,36 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd} + 2 * M_{bp,Rd}}{m} = \frac{4 * 906,57 + 2 * 1542,36}{4,74} = 1415,82 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 29,17 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_{fc}^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 29,17 * 2,3^2 * \frac{23,5}{1,0} = 906,57 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 906,57 + 5,93 * 4 * 254,2}{4,74 + 5,93} = 735,03 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 * 254,2 = 1016,8 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,fc,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{1415,82; 735,03; 1016,8\}$$

$$F_{t,fc,Rd} = 735,03 \text{ kN}$$

8.6.4.5 Komponente 5: Stirnplatte mit Biegebeanspruchung

$$L_b = 2,55 + t_{fc} + t_p = 2,55 + 2,3 + 2,5 = 7,35 \text{ cm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 * m^3 * A_s * n_b}{\sum l_{eff,1} * t_p^3} = \frac{8,8 * 6,50^3 * 3,53 * 2}{51,62 * 2,5^3} = 21,15 \text{ cm}$$

$$L_b = 7,35 \leq 21,15 = L_b^*$$

1. Schraubenreihe**Modus 1**

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 43,62\} = 40,84 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 40,84 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1499,59 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1499,59}{6,50} = 922,82 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 43,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 43,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1601,67 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1601,67 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 501,17 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Traagfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{922,82; 501,17; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 501,17 \text{ kN}$$

2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{40,84; 35,38\} = 35,38 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 35,38 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1299,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1299,11}{6,50} = 799,45 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 35,38 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 35,38 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1299,11 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1299,11 + 7,50 * 2 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 457,94 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 254,2 = 508,4 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{799,45; 457,94; 508,4\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 457,94 \text{ kN}$$

1. + 2. SchraubenreiheModus 1

$$l_{eff,1} = \min \{l_{eff,cp}; l_{eff,nc}\} = \min \{56,84; 51,62\} = 51,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 51,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1895,42 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1895,42}{6,50} = 1166,41 \text{ kN}$$

Modus 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 51,62 \text{ cm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 * \sum l_{eff} * t_p^2 * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,25 * 51,62 * 2,5^2 * \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 1895,42 \text{ kNcm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1895,42 + 7,50 * 4 * 254,2}{6,50 + 7,50} = 815,49 \text{ kN}$$

Modus 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 4 * 254,2 = 1016,8 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit

$$F_{t,ep,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{1166,41; 815,49; 1016,8\}$$

$$F_{t,ep,Rd} = 815,49 \text{ kN}$$

8.6.4.6 Komponente 6: Trägerflansch und –steg mit Druckbeanspruchung

Querschnittsklasse des Trägers: 1

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{602,1 * 100}{39 - 1,9} = 1622,91 \text{ kN}$$

8.6.4.7 Komponente 7: Trägersteg mit Zugbeanspruchung1. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 43,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 43,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1127,58 \text{ kN}$$

2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 35,38 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 35,38 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 914,57 \text{ kN}$$

1. + 2. Schraubenreihe

$$b_{eff,t,wb} = 51,62 \text{ cm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} * t_{wb} * \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = 51,62 * 1,10 * \frac{23,5}{1,0} = 1334,38 \text{ kN}$$

8.6.4.8 Zusammenfassung der Tragfähigkeiten der Komponenten

Komponente	1. Schraubenreihe	2. Schraubenreihe	1. + 2. Schraubenreihe /andere Komponenten
1	–	–	918,26 kN
2	–	–	608,83 kN
3	557,00 kN	710,48 kN	726,35 kN
4	405,88 kN	447,64 kN	735,03 kN
5	501,17 kN	457,94 kN	815,49 kN
6	–	–	1622,91 kN
7	1127,58 kN	914,57 kN	1334,38 kN

8.6.4.9 BiegetragfähigkeitTragfähigkeit der Schraubenreihen einzeln betrachtet

$$F_{tr,Rd} = \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$F_{t1,Rd} = \min\{557,00 ; 405,88 ; 501,17 ; 1127,58\} = 405,88 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = \min\{710,48 ; 447,64 ; 457,94 ; 914,57\} = 447,64 \text{ kN}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd} = 405,88 + 447,64 = 853,52 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der druck- und schubbeanspruchten Komponenten

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{V_{wp,Rd} ; F_{c,wc,Rd} ; F_{c,fb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 853,52 \text{ kN} \geq 608,83 \text{ kN} = \min\{918,26 ; 608,83 ; 1622,91\}$$

⇒ Abminderung der Schraubenreihe, die dem Druckpunkt näher ist.

$$\sum F_{tr,Rd} = F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}$$

$$F_{t2,Rd} = \sum F_{tr,Rd} - F_{t1,Rd} = 608,83 - 405,88 = 202,95 \text{ kN}$$

Tragfähigkeit der Schraubengruppen

$$\sum F_{tr,Rd} \leq \min\{F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd}\}$$

$$\sum F_{tr,Rd} = 608,83 \text{ kN} \leq 726,35 \text{ kN} = \min\{726,35 ; 735,03 ; 815,49 ; 1334,38\}$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Sprödbbruchversagen

$$F_{tx,Rd} \leq 1,9 * F_{t,Rd}$$

$$405,88 \text{ kN} \leq 482,98 \text{ kN} = 1,9 * 254,2$$

⇒ Keine weitere Abminderung erforderlich

Biegetragfähigkeit

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r * F_{tr,Rd} = h_1 * F_{t1,Rd} + h_2 * F_{t2,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = 31,05 * 405,88 + 23,05 * 202,95$$

$$M_{j,Rd} = 17280,57 \text{ kNcm} = 172,81 \text{ kNm}$$

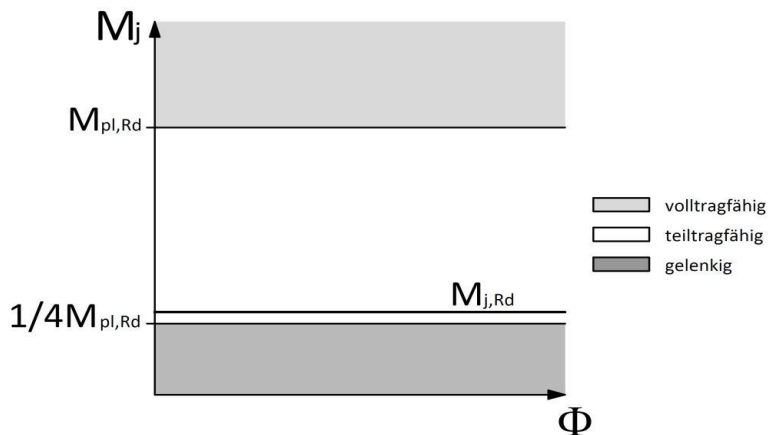
8.6.4.10 Klassifizierung nach Tragfähigkeit

$$M_{pl,Rd} = \min\{M_{b,pl,Rd} ; M_{c,pl,Rd}\} = \min\{602,1 ; 928,0\} = 602,1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} > M_{j,Rd} > 0,25 * M_{pl,Rd}$$

$$602,1 > 172,8 > 150,53$$

⇒ Anschluss ist teiltragfähig, siehe Grafik 8.13:



Grafik 8.13 Klassifizierung des Anschlusses nach der Tragfähigkeit

8.6.5 Rotationssteifigkeit

Da sich, wie in Kapitel 6.3.2.5 beschrieben, keinerlei Auswirkungen durch eine Futterplatte ergeben, ist die Rotationssteifigkeit dieses Beispiels identisch mit dem Beispiel 1 im Kapitel 8.2.5. Daraus ergibt sich eine Anfangsrotationssteifigkeit von:

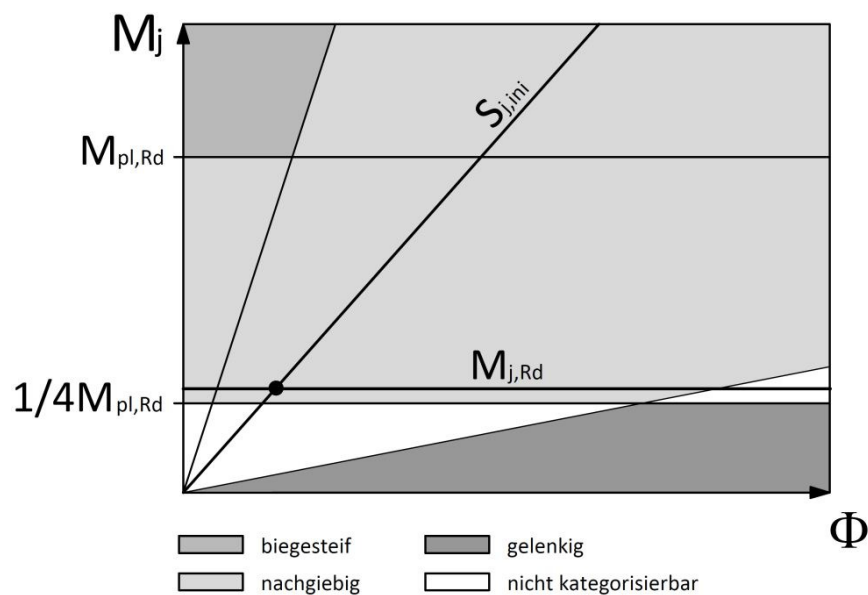
$$S_{j,ini} = 28.146 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}}$$

Ebenso entspricht die Klassifizierung der Rotationssteifigkeit dem Beispiel 1 in Kapitel 8.2.5.7. Es resultiert ein verformbarer Anschluss. Die Werte sind dem Beispiel 1 zu entnehmen.

8.6.6 Kategorisierung

Berechnungsverfahren	Klassifizierung der Anschlüsse nach	Klassifizierung der Anschlüsse	Kategorie des Anschlusses
elastisch	Rotationssteifigkeit (Kapitel 7.2)	verformbar	nachgiebig
starr-plastisch	Tragfähigkeit (Kapitel 7.3)	teiltragfähig	nachgiebig
elastisch-plastisch	Rotationssteifigkeit + Tragfähigkeit (Tabelle 7.1)	verformbar + teiltragfähig	nachgiebig

Die Kategorisierung dieses Anschlusses wird in der folgenden Grafik 8.8 dargestellt:



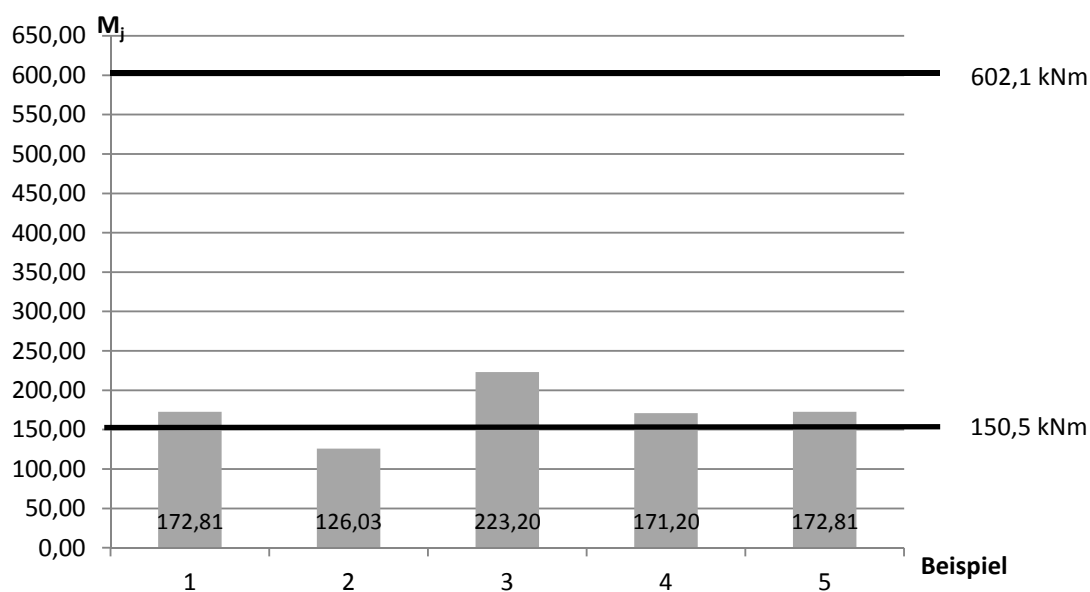
Grafik 8.14 Kategorisierung des Anschlusses

9 Vergleich der Anschlüsse

9.1 Nach Klassifizierung der Tragfähigkeit

Die Anschlüsse in den Beispielen sind hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit gut zu vergleichen, weil sich weder Stützen- noch Trägerprofil ändert. Deshalb bleiben die Grenzwerte für die Klassifizierung gleich.

Für eine volltragfähige Verbindung muss der Anschluss ein Moment $M_{j,Rd} = 602,1 \text{ kNm}$ übertragen können. Damit der Anschluss als gelenkig klassifiziert wird, darf das Moment nicht größer als $M_{j,Rd}/4 = 150,5 \text{ kNm}$ sein. In der Grafik 9.1 wird die Biegetragfähigkeit der Beispiele 1 bis 5 veranschaulicht.



Grafik 9.1 Vergleich der Beispiele nach Tragfähigkeit

Allgemein lässt sich für diese Beispiele herleiten, dass alle Anschlüsse teiltragfähig sind und zum gelenkigen Bereich tendieren. Nur der Anschluss mit einer Schraubenreihe (Beispiel 2) ist als gelenkig zu klassifizieren.

Es ist zu erkennen, dass die Biegetragfähigkeit des Anschlusses abnimmt, wenn nur noch eine Schraubenreihe (Beispiel 2) auf Zug beansprucht wird.

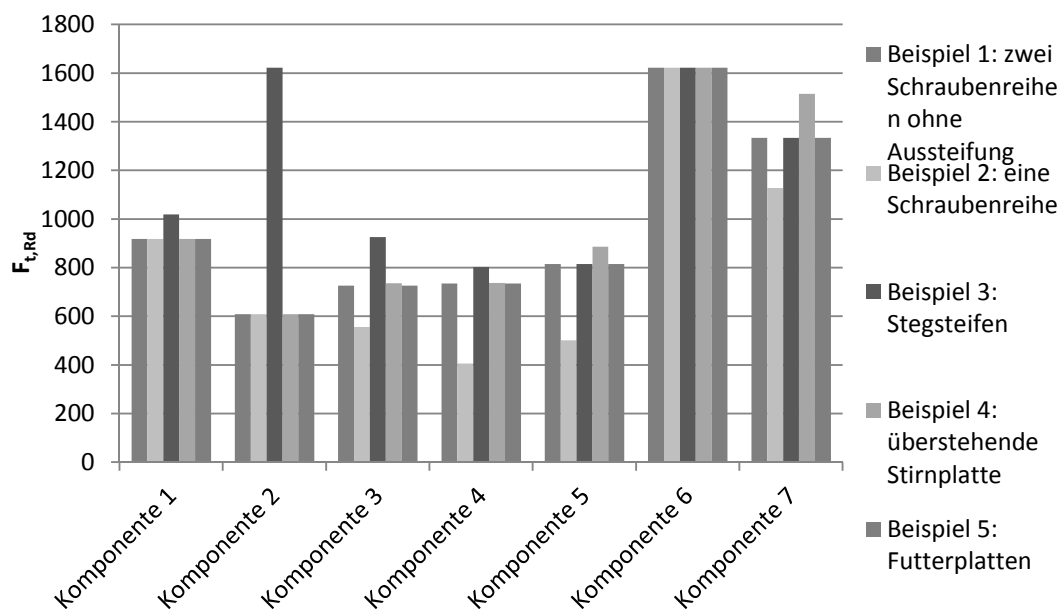
Im Gegensatz dazu nimmt die Biegetragfähigkeit mit einer Stegsteife in der Stütze (Beispiel 3) zu. Das ist damit zu begründen, dass die Biegetragfähigkeit des Anschlusses aus Beispiel 1 zuvor durch den Stützensteg mit Druckbeanspruchung begrenzt wurde. Durch die Aussteifung ist der Steg nicht mehr maßgebend.

Die Biegetragfähigkeiten der Beispiele 4 und 5 verändern sich kaum im Vergleich zum Anschluss aus Beispiel 1. Hier wird, wie zuvor beschrieben, die Tragfähigkeit durch den Stützensteg auf Druckbeanspruchung begrenzt. Die etwas geringere Biegetragfähigkeit

des Anschlusses mit einem überstehenden Stirnblech ist damit zu erklären, dass bei diesem Anschluss die obere Schraubenreihe weniger Kräfte überträgt als wäre sie unter dem Trägerflansch angeordnet. Die Schraubenkräfte in Beispiel 5 ändern sich nicht, weil in Beispiel 1 Modus 2 maßgebend ist und die Futterplatte nur Auswirkungen auf Modus 1 hat.

Auffallend ist, dass keine der aussteifenden Maßnahmen dazu führt, dass der Anschluss volltragfähig wird. Es wird kaum möglich sein ohne weitere Maßnahmen mit der Verbindung einen biegesteifen Anschluss herzustellen.

Die Veränderungen der Tragfähigkeit der einzelnen Komponenten der hier vorgestellten Anschlüsse ist in Grafik 9.2 zu sehen.



Grafik 9.2 Vergleich der Tragfähigkeit der Komponenten

Dabei ist zu bemerken, dass sich die Tragfähigkeiten der Komponenten 1 bis 3 durch eine Stegsteife (siehe Beispiel 3) erhöhen. Bei den anderen Beispielen ist der Stützensteg, wie in den Berechnungen zu sehen, die Komponente mit der kleinsten Tragfähigkeit. Demzufolge führt der Stützensteg dazu, dass die Tragfähigkeit nicht mehr durch diesen begrenzt wird.

Des Weiteren kann die Tragfähigkeit der Komponenten 5 und 7 mit einer überstehenden Stirnplatte verbessert werden. Die Schraubenreihen auf der Trägerseite dürfen dabei nicht als Schraubengruppe angesehen werden. Da die wirksame Länge der Schraubengruppe kleiner ist als die Summe der wirksamen Längen der beiden einzelnen Schraubenreihen, ist die Tragfähigkeit der Schraubenreihen bei einer überstehenden Stirnplatte größer.

Hingegen wird die Tragfähigkeit bei den Komponenten 3 bis 5 und 7 durch die Abminderung der Anzahl der Schraubenreihen auf Zugbeanspruchung verringert. Da nur noch eine Schraube auf Zug beansprucht wird, reduziert sich die wirksame Länge, was zur Folge hat, dass die Tragfähigkeit der genannten Komponenten verringert wird, weil diese Tragfähigkeit maßgebend wird.

Komponente 6 hat in allen Beispielen die gleiche Tragfähigkeit, weil bei der Berechnung nur die Biegetragfähigkeit des Trägerquerschnitts mit einberechnet wird. Da sich dieser nicht verändert, bleibt die Tragfähigkeit gleich.

In der Grafik 9.2 ist zu erkennen, dass die Tragfähigkeit der Beispiele 2 und 3 durch die Komponente 4 begrenzt wird, weil sie dort die kleinste Tragfähigkeit haben. Der Grenzwert der Tragfähigkeit von den anderen Beispielen wird durch die Komponente 2 bestimmt.

Im Beispiel 4 sind die Abmessungen des Anschlusses identisch mit denen der Typisierten Verbindung Nummer 493 nach [14]. In Abbildung 9.1 ist die Beanspruchbarkeit des Anschlusses abgebildet. Der Typisierte Anschluss hat mit einem Stützenprofil HEA 650 eine Biegetragfähigkeit von $M_{j,Rd} = 256,4 \text{ kNm}$ und mit einem HEA 400 Profil $M_{j,Rd} = 192,3 \text{ kNm}$.

Beanspruchbarkeiten (in kN und kNm)																	
Nr.	Anschluss			%	Anschluss nach DIN				Anschluss nach EC 3				Träger	erf. Stütze (S 235)			
	Trägerprofil S 235	Typ	Schr. 10.9		$M_{y,1,Rd}$ kNm	Grenz- zust.	$M_{y,2,Rd}$ kNm	$V_{z,Rd}$ kN	$M_{y,1,Rd}$ kNm	Grenz- zust.	$M_{y,2,Rd}$ kNm	$V_{z,Rd}$ kN	$M_{c,y,Rd}$ kNm	IPE	HEA	HEB	HEM
493	HEA 400	IH3.1	M 24		320,5	EPB	154,7	389,1	320,5	EPB	154,7	389,1	602,0	Trägerstoß			
				100	320,5		154,7	389,1	320,5		154,7	389,1	602,0	/	900	600	300
				80	256,4		143,8	389,1	256,4		143,8	389,1	602,0	/	650	400	240
				60	192,3		102,9	389,1	192,3		102,9	389,1	602,0	600	400	280	220

Abbildung 9.1 Typisierte Verbindung

In den fünf Beispielen ist ein HEA 500 Stützenprofil gewählt worden. Die Tragfähigkeit des Anschlusses beträgt $M_{j,Rd} = 171,2 \text{ kNm}$ und ist damit 11 % geringer als die Tragfähigkeit eines Typisierten Anschlusses mit einer HEA 400 Stütze. Das bedeutet, dass die Anschlüsse weniger beansprucht werden dürfen als die, der Typisierten Anschlüsse.

Auf diese Unterschiede wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

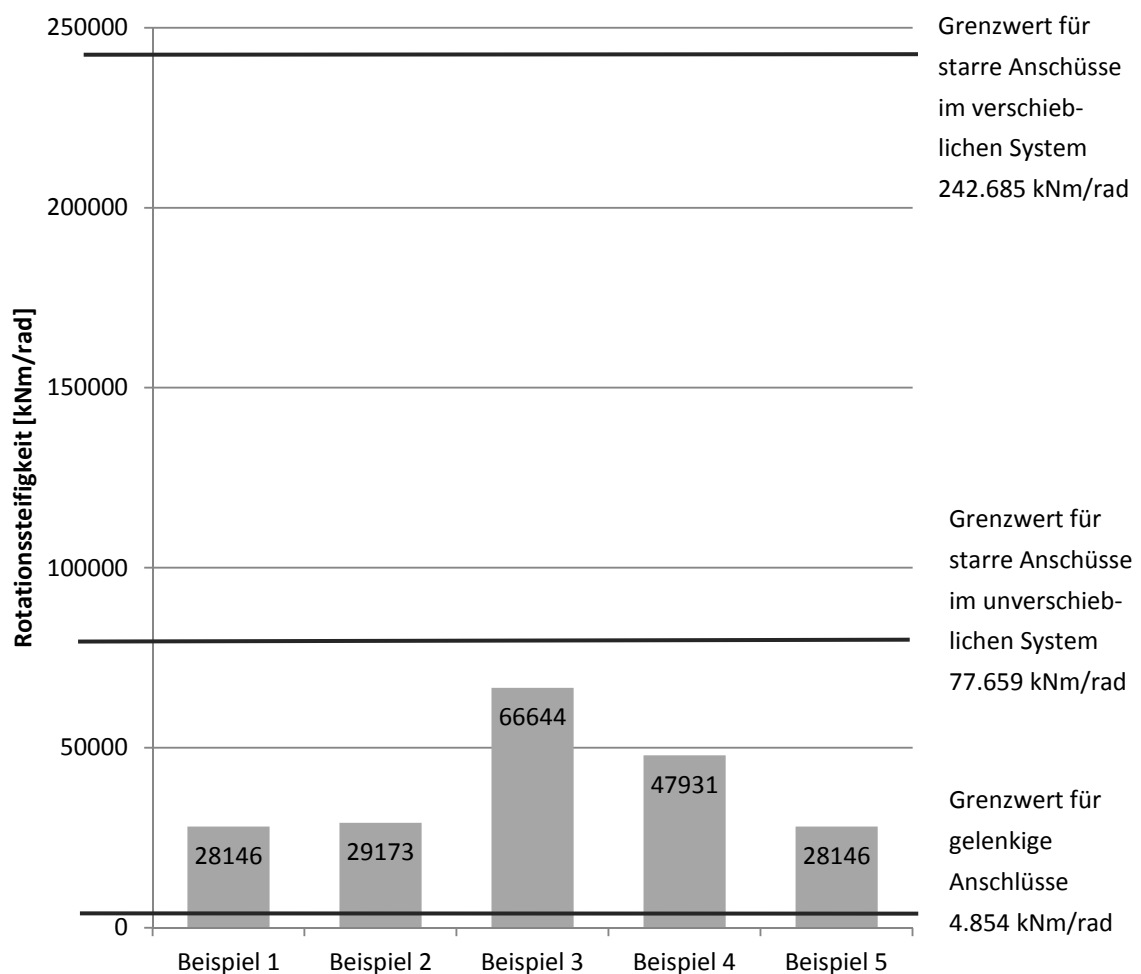
9.2 Nach Klassifizierung der Rotationssteifigkeit

Die Grenzwerte für die Klassifikation in allen Beispielen sind identisch, da keine Veränderungen in den Trägerprofilen oder Trägerlängen vorhanden sind, deshalb kann die Rotationssteifigkeit gut verglichen werden.

Bei einem starren System wird, wie in Kapitel 6.3.3 beschrieben, nach einem unver-schieblichen und verschieblichen System unterschieden, je nachdem, in welchem Maß die Horizontalverschiebung im Tragwerk unterbunden wird.

Für einen starren Anschluss in dem vorliegenden Tragwerk, bei einem unverschieblichen System, wird eine Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ von 77.659 kNm/rad benötigt. In der Grafik 9.3 wird deutlich, dass im Beispiel 3 (Anschluss mit zwei Schraubenreihen und Stegsteifen in der Stütze) dieser Grenzwert mit 66.644 kNm/rad im Vergleich zu den anderen Beispielen fast erreicht wird. Auch Beispiel 4 (Anschluss mit überstehender Stirnplatte ohne Aussteifung) hat eine höhere Steifigkeit im Vergleich zum Beispiel 1 (Anschluss mit zwei Schraubenreihen ohne Aussteifungen). Alle weiteren Anschlüsse haben ca. 1/3 des Grenzwertes erreicht.

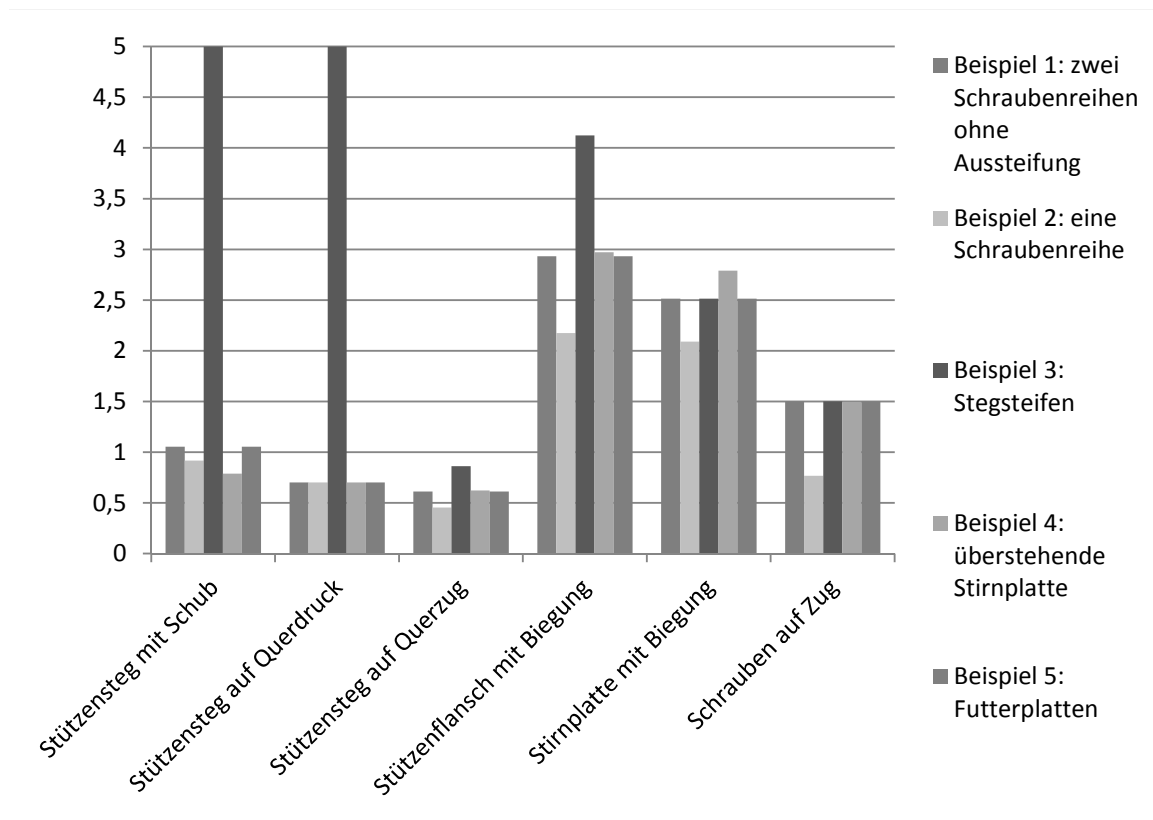
Für ein verschiebliches System liegt der Grenzwert für die Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ mit 242.685 kNm/rad deutlich über den vorhandenen Anfangsrotationssteifigkeiten der Beispiele. Daraus wird ersichtlich, dass diese Anschlüsse für eine starre Klassifikation nicht geeignet sind.



Grafik 9.3 Vergleich der Beispiele nach Rotationssteifigkeit

In der folgenden Grafik 9.4 werden die einzelnen Komponenten nach ihren äquivalenten Steifigkeitskoeffizienten verglichen. In den Beispielberechnungen erfolgte nach dem EC3-1-8 [2] nur eine Berechnung des äquivalenten Steifigkeitskoeffizienten für den gesamten Zugbereich. Für eine bessere Darstellung der anteiligen Steifigkeiten der einzelnen Komponenten wurden hierfür jeweils die äquivalenten Steifigkeitskoeffizienten ermittelt.

Wie oben beschrieben, hat das Beispiel 3 die größte Rotationssteifigkeit. In Grafik 9.4 wird deutlich, dass die vorhandene Aussteifung der Stütze auf die Steifigkeiten aller stützenseitigen Komponenten Einfluss hat. Sehr großen Einfluss hat dabei der Stützensteg auf Schub- und Querdruckbeanspruchung. Diese Werte sind nur bis 5 dargestellt, jedoch geht aus den Berechnungen hervor, dass sie als unendlich groß angesetzt sind.



Grafik 9.4 Vergleich der Rotationssteifigkeit nach den äquivalenten Steifigkeitskoeffizienten

Widersprechend der Rotationssteifigkeit sind die Steifigkeitskoeffizienten des Beispiels 2 geringer als die der andern Beispiele. Durch den Einfluss des Hebelarms z bei der Rotationssteifigkeit, der bei diesen Ergebnissen noch keine Berücksichtigung gefunden hat, sind die Anteile der Steifigkeit deutlich geringer. Bei dem Beispiel ist z , der Hebelarm von der Schraubenreihe zum Druckpunkt, wesentlich größer als in den anderen Beispielen. Daraus folgt, dass die Anfangsrotationssteifigkeit insgesamt höher ist als hier dargestellt.

Es ist auch zu erkennen, dass die Schrauben in allen Beispielen den gleichen Anteil an der Steifigkeit besitzen. Ausgenommen vom Beispiel 2, da nur eine Schraubenreihe vorhanden ist. Um diesen Anteil zu erhöhen, müssten größere Schrauben eingesetzt oder entgegen dem EC3-1-8 [2] die Vorspannung der Schrauben berücksichtigt werden.

Zum Beispiel 4 lässt sich sagen, dass die wachsende Steifigkeit des Stützenflansches und der Stirnplatte mit Biegebeanspruchung sich darauf zurückführen lässt, dass diese Komponenten durch den Trägerflansch ausgesteift werden, welches bei der wirksamen Länge vom T-Stummelmodell Berücksichtigung findet. Die geringere Steifigkeit beim Stützensteg mit Schubbeanspruchung resultiert aus dem Einfluss des Hebelarms z . Der Hebelarm ist durch die Schraubenreihe über dem Trägerflansch größer als in den anderen Beispielen.

Das Beispiel 5 ist mit dem Beispiel 1 identisch. Der Grund dafür ist, wie im Kapitel 6.3.2.5 beschrieben, dass die Futterplatte gemäß EC3-1-8 [2] keinen Einfluss auf die Rotationssteifigkeit hat.

Wird die Grafik 9.4 allgemein betrachtet lässt sich anmerken, dass der Stützensteg mit Querkzugbeanspruchung nur eine geringe Steifigkeit liefert. Die Rotationssteifigkeit dieser Komponente kann durch das Einsetzen einer Stegblechverstärkung erhöht werden. Dabei sei anzumerken, dass daraus eine erhöhte Steifigkeit des Stützenflansches resultiert.

Um einen starren Anschluss zu erlangen, sollten mehrere Varianten der hier vorgestellten Beispiele miteinander kombiniert werden. Ist das noch nicht ausreichend, kann anstelle eines HEA-Profils als Träger ein IPE-Profil eingesetzt werden. So ein Profil hätte zur Folge, dass sich durch die Reduzierung des Flächenträgheitsmomentes auch der Grenzwert für das Tragwerk erheblich reduziert.

9.3 Nach Kategorisierung

In der Tabelle 9.1 werden die Ergebnisse der Beispiele gegenübergestellt. Daraus wird deutlich, dass es sich bei allen Beispielen in der Kategorisierung um nachgiebige Anschlusskonfigurationen handelt. Nur das Beispiel 2 lässt sich bei einer elastisch-plastischen Bemessung in eine Kategorie einordnen, dieses ist näher unter Kapitel 8.3.6 erläutert.

Es ist auch zu erkennen, dass die Schwankungen der Ergebnisse in der Rotationssteifigkeit in keinem Verhältnis zur Tragfähigkeit stehen. Deutlich wird dieses bei dem Beispiel 2, wo eine erhöhte Rotationssteifigkeit vorhanden ist, obwohl im Vergleich zu Beispiel 1 nur eine Schraubenreihe vorhanden ist. Das resultiert daher, dass ein großer

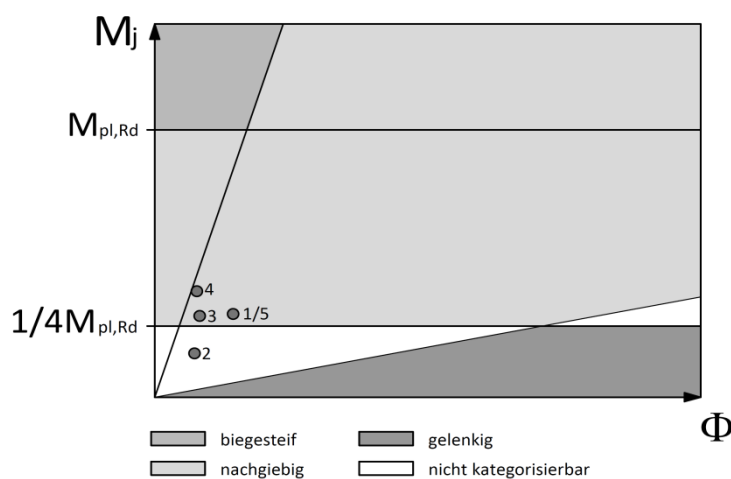
Hebelarm z zur Verfügung steht. Dennoch besitzt der Anschluss eine nur geringe Tragfähigkeit.

Tabelle 9.1 Übersicht der Ergebnisse in der Kategorisierung

	Beispiel	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4	Beispiel 5
elastische Berechnung	nachgiebig	nachgiebig	nachgiebig	nachgiebig	nachgiebig
starr-plastische Berechnung	nachgiebig	gelenkig	nachgiebig	nachgiebig	nachgiebig
elastisch-plastische Berechnung	nachgiebig	-----	nachgiebig	nachgiebig	nachgiebig
$M_{j,Rd} [kNm]$	172,81	126,03	223,20	171,20	172,81
$S_{j,ini} \left[\frac{kNm}{rad} \right]$	28.146	29.173	66.644	47.931	28.146

Es ist aber auch anzumerken, dass Aussteifungen durch Stegsteifen im Stützensteg eine Steigerung der Tragfähigkeit sowie Rotationssteifigkeit bewirken.

In der Grafik 9.5 werden die Ergebnisse der Kategorisierung noch einmal gegenübergestellt.



Grafik 9.5 Vergleich der Kategorisierungen

Daraus wird deutlich, dass im Verhältnis zur plastischen Querschnittstragfähigkeit von $602,1 \text{ kNm}$ die Anschlüsse nur ein geringes Moment übertragen können. Somit wären die Anschlüsse auch unter Berücksichtigung der Verformungen nicht wirtschaftlich ausnutzbar und sollten aus diesem Grund überdacht werden.

10 Auswirkungen auf das Tragwerk

Die Rotationssteifigkeit ist bei allen nachgiebigen Anschlüssen zu berücksichtigen, denn sie haben grundsätzlich nicht nur auf den Knoten, sondern auch auf das Tragwerk insgesamt Einfluss. Während der Tragwiderstand eines Anschlusses zunächst nur die Verbindung lokal definiert, beeinflusst das Rotationsvermögen das Rahmentragwerk global. Durch eine nachgiebige Verbindung und den Einfluss der Steifigkeit sowie die vorhandene Rotationskapazität verlagern sich die Schnittgrößen im Gesamtsystem.

Dieses Kapitel soll aufzeigen, welchen Einfluss ein gegebener Anschluss auf das globale Tragwerksystem haben kann. Dabei werden die unterschiedlichen Kategorien dargestellt. Bei dem nachgiebigen Anschluss wird aufgezeigt, wie dieser im Tragwerk zu berücksichtigen ist.

Allgemeines

In den nachfolgenden Erläuterungen werden die elastischen Schnittgrößen aus dem, in Abbildung 8.1 auf Seite 8-1, dargestellten Tragwerk ermittelt. Dieses Tragwerk wird dabei vertikal mit 35 kN/m belastet. Das Tragwerk stellt ein fiktives Beispiel dar, woran die Momentenverläufe ermittelt und dargestellt werden. Nachgiebige Anschlüsse haben auch Einfluss auf Normal- und Querkräfte, welche hier nicht weiter betrachtet werden. Auch alle weiteren Einflüsse werden dabei vernachlässigt, wie z.B. Querschnitts-, Stabilitätsnachweise, sowie weitere Anschlussnachweise. Die Schnittgrößenermittlung erfolgt über das Programm RSTAB 8.01 vom Hersteller „Ingenieur-Software Dlubal GmbH“. In dieser Ausarbeitung werden nur die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Bei allen nachfolgenden Beispielrechnungen in diesem Kapitel sind die Abmessungen des Tragwerks und der Profile identisch, abgestimmt auf das Beispiel 1 im Kapitel 8.2. In diesen Beispielen ändern sich nur die Anschlusskategorien.

Ein gelenkiger Anschluss

In Abbildung 10.1 ist der Momentenverlauf eines Tragwerks mit einem gelenkig gelagerten Trägerprofil dargestellt. Um stabiles System zu erhalten, werden die Stützenfüße voll eingespannt. Die Rahmenecken sind als Momentengelenke bei der Berechnung berücksichtigt worden.

Durch die Belastung ist der Träger bei einer Berechnung nach der Elastizitätstheorie, wie sie im EC3-1-1 [1] angegeben ist, zu 77% ausgenutzt. Der Trägerquerschnitt HEA 400 kann demnach eine maximale Spannung nach folgender Ermittlung aufnehmen:

$$M_{el,y} = \sigma_{x,Ed} * W_{el,y} = \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} * 2310 \text{ cm}^3}{100} = 542,85 \text{ kNm}$$

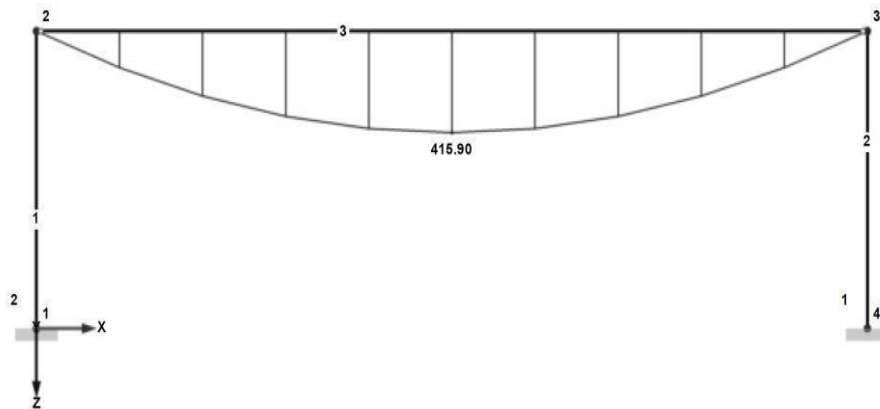


Abbildung 10.1 Momentenverlauf eines gelenkigen Anschlusses

Wie oben erwähnt, sind in diesem statischen Modell die Stützenfüße voll einzuspannen, welches in der Herstellung sehr aufwändig und kostenintensiv ist.

Ein biegesteifer Anschluss

In der Abbildung 10.2 ist der Momentenverlauf eines Tragwerks mit biegesteifen Anschlüssen dargestellt. Im Vergleich zur Abbildung 10.1 sind hier zweiwertige Lager an den Fußpunkten und keine Volleinspannung.

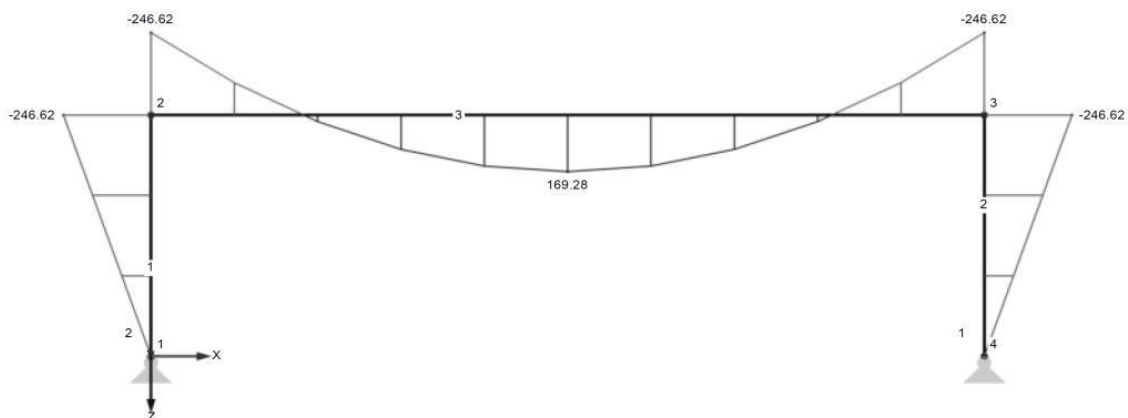


Abbildung 10.2 Momentenverlauf bei einem biegesteigen Anschluss

Es ist zu erkennen, dass sich das Feldmoment stark reduziert hat. Dafür ist jedoch in der Rahmenecke ein großes Moment zu übertragen. So ein Tragwerk muss einen Anschluss aufweisen, der nach Tabelle 7.2 als biegesteif kategorisiert wird. Die Verformungen des Anschlusses haben keine Auswirkungen auf die Schnittgrößen, jedoch ist die Fertigung aufwändig und kostenintensiv.

Der Anschluss in dem Beispiel 1 aus Kapitel 8.2 wäre nicht in der Lage, das vorhandene Moment zu übertragen.

Ein nachgiebiger Anschluss

Nachfolgend wird der nachgiebige Anschluss vorgestellt. Dabei wird aufgezeigt wie der Anschluss im Tragwerk Berücksichtigung findet. Wie zuvor beschrieben, wird in diesem Tragwerk der Anschluss aus Kapitel 8.2 eingesetzt. Zudem sind die durch den Anschluss resultierenden Verformungen über die Rotationssteifigkeit einzubeziehen.

Wie in Kapitel 7.1 erläutert, muss dazu im ersten Schritt das Berechnungsverfahren bestimmt werden. In diesem Beispiel wird sich auf eine elastisch-plastische Bemessung festgelegt. Darauf erfolgt, wie in Kapitel 8.2 dargelegt, die Berechnung des Anschlusses. Dazu wird die Momententragfähigkeit $M_{j,Rd}$, sowie die Anfangsrotationssteifigkeit $S_{j,ini}$ ermittelt.

In dem Tragwerk wird nun in die Rahmenecke ein Gelenk mit einer Federkonstanten in Höhe von $S_{j,ini}$ gesetzt. Dadurch wird im Tragwerkssystem die vorhandene Momenten-Rotations-Charakteristik des Anschlusses berücksichtigt. Mittels dieser Gegebenheiten wird nun, wie in Abbildung 10.3 zu sehen ist, ein Momentenverlauf erzeugt, der ein Moment $M_{j,Ed}$ in Höhe von $152,84 \text{ kNm}$ in der Rahmenecke aufweist. Das Bemessungsmoment ist geringer als $M_{j,Rd} = 172,81 \text{ kNm}$.

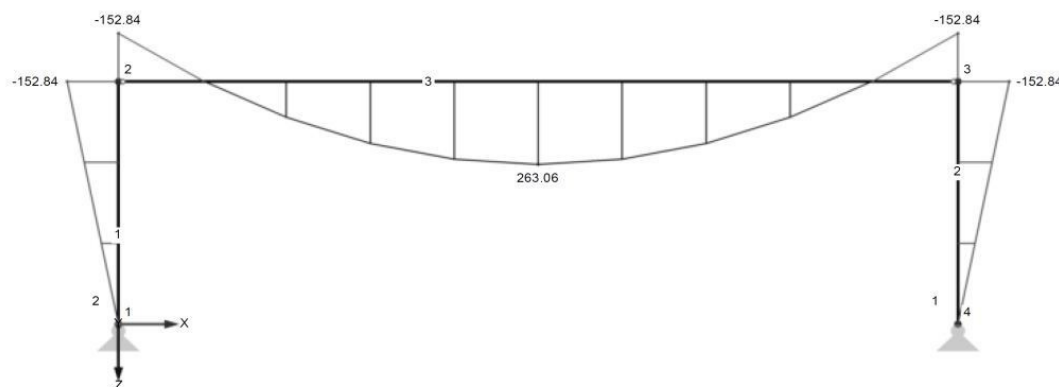


Abbildung 10.3 Momentenverlauf eines nachgiebigen Anschlusses. Angesetzt ist die Federkonstante in Höhe von $S_{j,ini}$

Nun wird über das Verhältnis von $M_{j,Rd}$ des Anschlusses und $M_{j,Ed}$ aus der Abbildung 10.3 das Steifigkeitsverhältnis μ berechnet. Dieses erfolgt über die Formel (6.13). Im Beispiel 1 unter Kapitel 8.2.5.6 ist dazu die entsprechende Berechnung aufgezeigt. Dieser μ -Wert wird folglich in die Formel (6.12) für S_j eingesetzt und ergibt die vorhandene Rotationssteifigkeit für das System.

Im letzten Schritt wird die vorhandene Rotationssteifigkeit S_j nun anstelle von $S_{j,ini}$ im Tragwerk eingegeben und neue Schnittgrößen ermittelt. Die Abbildung 10.4 zeigt den Momentenverlauf unter der gegebenen Verformung in Abhängigkeit der Belastung.

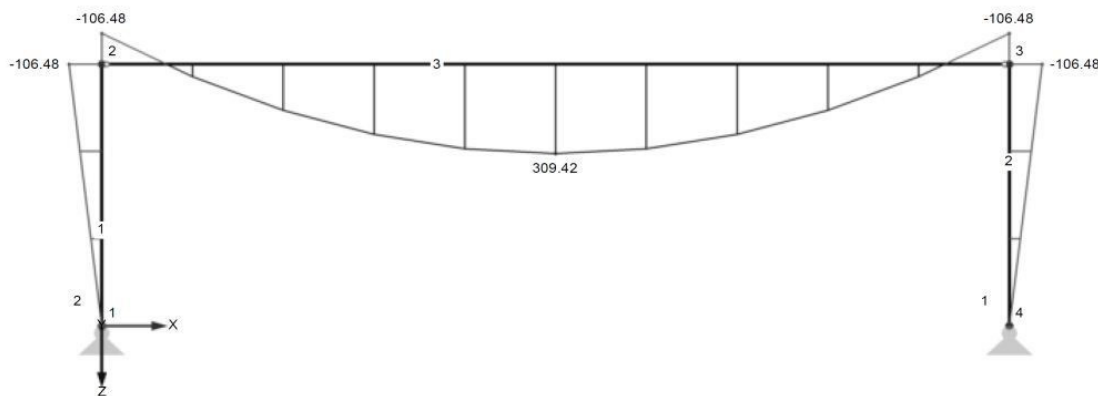


Abbildung 10.4 Momentenverlauf bei einem nachgiebigen Anschluss. Angesetzt ist die Federkonstante in Höhe von S_j ,

In der Abbildung 10.4 ist deutlich eine Veränderung der Schnittgrößen zu sehen. Im Vergleich zu dem biegesteifen Anschluss ist das Eckmoment deutlich um mehr als die Hälfte reduziert. Dafür ist allerdings das Feldmoment gestiegen. Es ist jedoch noch deutlich kleiner als bei einer gelenkigen Verbindung. Bestimmt wird das System in der Rahmenecke durch die Tragfähigkeit und Rotation des Anschlusses. Der Träger selbst wird nach dem größeren Feldmoment bemessen.

An dieser Stelle muss noch nachgewiesen werden, dass der Anschluss in der Lage ist die vorhandenen Schnittgrößen im Anschluss auch umlagern zu können. Das wird über den Nachweis der Rotationskapazität erfüllt. Darauf wurde im Kapitel 6.5 näher eingegangen.

In der letzten Abbildung 10.5 in diesem Kapitel wird zum Vergleich der Momentenverlauf des möglichen vereinfachten Verfahrens dargestellt. Wie in Kapitel 7.1 bereits beschrieben, lässt der EC3-1-8 [1] zu, für $M_{Ed} \geq 2/3 M_{j,Rd}$ vereinfacht $S_{j,ini}/\eta$ anzusetzen. Da dies nicht im Beispiel 1 gezeigt wird, erfolgt die Berechnung von S_j an dieser Stelle:

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\eta} = \frac{28134 \frac{kNm}{rad}}{2} = 14073 \frac{kNm}{rad}$$

In diesem Beispiel wurde eine Federkonstante in Höhe von 14.073 kNm/rad im Tragwerk berücksichtigt und die daraus resultierenden Schnittgrößen gemäß Abbildung 10.5 ermittelt.

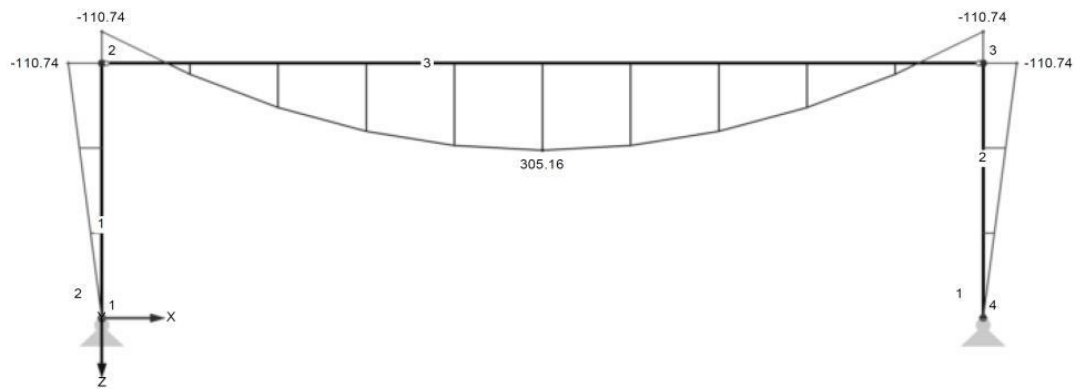


Abbildung 10.5 Momentenverlauf eines nachgiebigen Anschlusses. Angesetzt ist die Federkonstante in Höhe von $S_{j,ini} / \eta$

Das Eckmoment unterscheidet sich in der Abbildung 10.5 zu dem in Abbildung 10.4 um $4,26 \text{ kNm}$. Der Unterschied ist so gering, dass die Vereinfachung in diesem Beispiel mit einer reduzierten Berechnung angebracht wäre.

In der folgenden Tabelle 10.1 werden abschließend alle Schnittgrößen noch einmal gegenübergestellt:

Tabelle 10.1 Vergleich der Schnittgrößen

Anschluss	Eckmoment [kNm]	Feldmoment [kNm]
gelenkig	-----	415,90
biegesteif	-246,62	169,28
nachgiebig	-106,48	309,42
Vereinfachtes Verfahren	-110,74	305,16

11 Resümee

Der EC3-1-8 [2] bietet ein umfangreiches Bemessungskonzept für die Berechnung von Anschlüssen. Da nicht nur die Tragfähigkeit eines Anschlusses berücksichtigt wird, sondern auch die Rotationssteifigkeit, kann der Anschluss wirtschaftlicher dimensioniert werden.

In dieser Bachelorarbeit wurden ausschließlich einseitige Träger-Stützenanschlüsse mit geschraubten Stirnplattenverbindungen analysiert. Die Berechnung ist, wie in den Beispielen der Ausarbeitung zu sehen, für eine Handrechnung sehr umfangreich und daher eher ungeeignet. Mit den Erläuterungen in der Bachelorarbeit kann diese Berechnung nachvollzogen und auf eigene Beispiele angewandt werden.

Dafür wurde zunächst erläutert, inwieweit sich die Berechnung des Anschlusses auf das Bemessungskonzept auswirkt. Nach einer kurzen Einführung in die Kategorisierung wurden die Berechnung der Tragfähigkeit und der Rotationssteifigkeit vorgestellt. Anschließend ist erklärt worden wie der Anschluss zu kategorisieren ist. Diese Berechnungen wurden daraufhin anhand von fünf ausgewählten Beispielen verdeutlicht.

Bei dem Vergleich der Anschlüsse hinsichtlich der Klassifizierung nach der Tragfähigkeit ist zu erkennen, dass sich die Tragfähigkeit bei den Beispielen, je nach Verstärkungsmaßnahme, ändert. Jedoch ist die Veränderung im Vergleich mit den Grenztragfähigkeiten verhältnismäßig klein. Der Anschluss ist bei allen Kombinationen teiltragfähig mit der Tendenz zum gelenkigen Bereich.

Bei den Beispielrechnungen hat sich ergeben, dass zwei Faktoren, einerseits die Aussteifung im Stützensteg und andererseits der Hebelarm zum Schraubenschwerpunkt, einen relativ großen Einfluss auf die Rotationssteifigkeit haben.

Der Vergleich der Anschlüsse in Bezug auf die Kategorisierung zeigt, dass bei dieser Kombination aus Träger- und Stützenprofilen kaum eine Veränderung in der Kategorisierung stattgefunden hat. Keiner der Anschlüsse erreicht den biegesteifen Bereich annähernd.

Aufschlussreich wäre zu prüfen, ob die Erkenntnisse aus den Vergleichen auch auf andere Profil-Kombinationen zutreffen oder ob diese sogar verallgemeinert werden können. Interessant wäre auch, einen Anschluss mit den Profilen aus den gerechneten Beispielen, welcher alle Variationen aus Beispiel 3 bis 5 vereint, zu bemessen und zu kategorisieren. Die Frage ist, ob diese Maßnahmen ausreichen würden, um einen biegesteifen Anschluss zu erhalten.

12 Literaturverzeichnis

- [1]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** *DIN EN 1993-1-1: 2010-08: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.*
- [2]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** *DIN EN 1993-1-8: 2010-12: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*
- [3]. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** *DIN 18800:1990-11: Stahlbauten; Bemessung und Konstruktion.*
- [4]. **Kuhlmann, U., et al.** *Forschungsbericht 4/2001; Verformungsverhalten der Komponenten von wirtschaftlichen steifenlosen Anschlüssenkonfigurationen für die Anwendung plastischer Bemessungskonzepte im Stahlbau.* [Hrsg.] Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST. Düsseldorf : Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2001.
- [5]. **Schmidt, Björn.** *Zum Tragverhalten von geschraubten momententragfähigen Stirnplattenverbindungen mit 4 Schrauben in jeder Schraubenreihe, Dissertation.* Dortmund : s.n., 2008.
- [6]. **Kuhlmann, Prof. Dr. -Ing. Ulrike, Rybinski, Dipl. -Ing. Markus und Rölle, Dipl. -Ing. Lars.** *Anschlüsse im Stahl- und Verbundbau.* [Hrsg.] Bundesvereinigung der Prüfeningenieure für Bautechnik e.V. *Der Prüfeningenieur.* 32, April 2008.
- [7]. **Kühnemund, Frank.** *Zum Rotationsnachweis nachgiebiger Knoten im Stahlbau, Dissertation.* [Hrsg.] Prof. Dr. -Ing. Ulrike Kuhlmann. Stuttgart : Institut für Konstruktion und Entwurf, 2003.
- [8]. **Steurer, Anton.** *Das Tragverhalten und Rotationsvermögen geschraubter Stirnplattenverbindungen.* ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion -IBK-. Zürich : s.n., 1999.
- [9]. **Wagenknecht.** *Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, 3. Auflage.* Berlin : Beutz Verlag GmbH, 2011. Bd. 2.
- [10]. **Kindmann, Univ.-Prof. Dr. -Ing. Rolf und Frickel, Dr. -Ing. Jörg.** *Plastische Bemessung im Stahlbau.* [Hrsg.] Bundesvereinigung der Prüfeningenieure für Bautechnik e.V. *Der Prüfeningenieur.* 22, April 2003.
- [11]. **Forster, Dipl. -Ing. Magnus.** *Stirnplatten - starre bzw. nachgiebige Anschlüsse. Tech - News.* Tuttlingen : Landesvereinigung der Prüfeningenieure für Baustatik in Baden-Württemberg e.V., 2009 / 1.

- [12]. **Schwarzlos, Anja.** *Erweiterung der Komponentenmethode nach EC 3-1.8 um die Interaktion der Schnittgrößen Biegemoment und Normalkraft, Dissertation.* Technische Universität Cottbus : s.n., 2005.
- [13]. **Goris Prof. Dr. Ing., Alfons.** *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen.* Köln : Werner Verlag, 19. Aufl. 2010.
- [14]. **-DSTV-, Deutscher Stahlbau-Verband, [Hrsg.].** *Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau.* Düsseldorf : Stahlbau Verlagsgesellschaft, 2002.
- [15]. **Unterwegner, Harald und Greiner, Richard.** *Zur Rotationssteifigkeit standardisierter geschraubter Stirnplattenverbindungen nach Eurocode.* *Stahlbau*, 73. 2004.
- [16]. **Kindmann, Rolf und Stracke, Michael.** *Verbindungen im Stahl- und Verbundbau, 3. Auflage.* Berlin : Ernst & Sohn Verlag, 2012.
- [17]. **Kahlmeyer, Hebestreit und Vogt.** *Stahlbau nach EC3, Bemessung und Konstruktion Träger - Stützen - Verbindungen, 6. Auflage.* Köln : Werner Verlag, 2012.
- [18]. **Hoier, Ing. Andreas.** *Modellierung eines geschraubten Stahlknotenanschlusses mit finiten Elementen, Diplomarbeit.* Universität Stuttgart : s.n., März 2007.

Anlage 1Vereinfachung zu Komponente 2

Formel (5.23):

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega * k_{wc} * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$$

Formel (5.24):

$$F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega * k_{wc} * \rho * b_{eff,c,wc} * t_{wc} * f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

Wenn für $\gamma_{M0} = 1,0$ und $\gamma_{M1} = 1,1$ eingesetzt wird, ergibt sich aus beiden vorherigen Formeln folgendes:

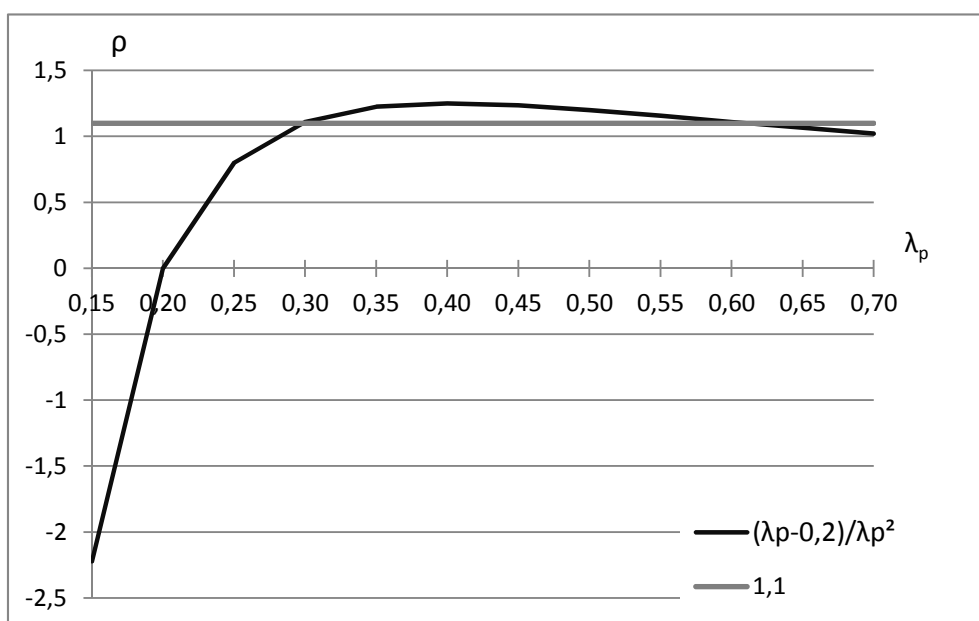
$$F_{c,wc,Rd} \leq F_{c,wc,Rd} * \frac{\rho}{1,1}$$

$$1 \leq \frac{\rho}{1,1}$$

Demzufolge wird Formel (5.23) maßgebend, wenn $\rho \geq 1,1$ ist.

Formel (5.30):

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2}$$



Graphik A1 Formel (5.30)

In der Graphik A1 ist zum einen die Formel (5.30) und zum anderen eine Gerade bei 1,1 eingezeichnet. Es ist deutlich zu sehen, dass ρ nur in einem bestimmten Bereich größer als 1,1 ist.

Zur Bestimmung dieses Bereiches wird ρ in der Formel (5.30) zu 1,1 gesetzt und anschließend nach $\bar{\lambda}_p$ umgeformt.

$$1,1 = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,2}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$\bar{\lambda}_{p_1} = 0,297 \quad \wedge \quad \bar{\lambda}_{p_2} = 0,612$$

Folglich wird Formel (5.23) maßgebend, wenn $0,297 < \bar{\lambda}_p < 0,612$ ist.

