

Berechnungsgrundlagen für Stahlanschlüsse mit der Komponentenmethode nach EN 1993-1-8

Diese Dokumentation beinhaltet die Berechnungsgrundlagen zur Komponentenmethode nach EN 1993-1-8 in den Stahlprogrammen ST9 - Schraubanschlüsse Stahl, SRE+ Rahmenecken Stahl sowie den älteren Programmen ST10 - Geschraubte Rahmenecke und ST14 - Geschweisste Rahmenecke.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
Komponenten in der Träger-Stützenverbindung	3
Komponenten in der Stirnplattenverbindung	4
Grenzmoment der Verbindung	4
Effektive Tragfähigkeit $F_{t,Rd}$ in der Träger-Stützenverbindung	5
Effektive Tragfähigkeit $F_{t,Rd}$ in der Stirnplattenverbindung	6
Träger-Stützenverbindung und Stirnplattenstoß mit vertikal zweireihiger Schraubenanordnung	7
Modell der T-Stummel (vertikal 2-reihig)	7
Komponente Stützensteg auf Schub (nur Träger-Stützenverbindung)	15
Komponente Trägerflansch und -steg auf Druck	18
Komponente Trägersteg auf Druck (nur bei Vouten in Träger-Stützenverbindung)	18
Komponente Gurt auf Druck (nur bei Vouten in Träger-Stützenverbindung)	19
Komponente Stützensteg auf Zug (nur Träger-Stützenverbindung)	19
Komponente Stützenflansch auf Biegung (nur Träger-Stützenverbindung)	19
Komponente Stirnplatte auf Biegung	19
Komponente Trägersteg auf Zug	20
Grenztragfähigkeit der Verbindung bei Beanspruchung durch Moment und große Normalkraft	20
Nachweis der Schweißnähte	21
Nachweis der Querkrafttragfähigkeit	22
Rotationssteifigkeit	23
Klassifizierung nach der Tragfähigkeit	27
Träger-Stützenverbindung und Stirnplattenstoß mit vertikal vierreihiger Schraubenanordnung	28
Modell der T-Stummel (vertikal 4-reihig)	28
Elastische Begrenzung für ausreichende Verformbarkeit im Anschluss	36
Komponente Trägersteg auf Zug $F_{t,wb,Rd}$ und Komponente Stützensteg auf Zug $F_{t,wc,Rd}$	36
Steifigkeitskoeffizienten der einzelnen Komponenten	36
Literatur	37

Einleitung

Die Tragfähigkeit und Steifigkeit von Verbindungen im Stahlbau wird nach EN 1993-1-8 durch Berechnung der Grundkomponenten eines Anschlusses bestimmt. Diese Grundkomponenten sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Mit der Komponentenmethode ist es möglich, neben der Momententragfähigkeit auch das Verformungsverhalten des Anschlusses zu ermitteln. Damit können nachgiebige Verbindungen berücksichtigt werden. Mittels Feder gehen deren Anschlusssteifigkeiten in die Systemberechnung ein und führen so über eine iterative Berechnung zu einer Gesamtoptimierung der Konstruktion.

Einschränkungen bei der Anwendung in den Programmen

- Der Einfluss einer Normalkraft im Träger kann in der Berechnung von M_{Rd} vernachlässigt werden, wenn diese kleiner als 5% der plastischen Grenzkraft $N_{pl,Rd}$ des Trägers ausfällt, anderenfalls ist ein Interaktionsnachweis aus den Tragfähigkeiten M_{Rd} und N_{Rd} zu führen.
- Stahlgüten S235, S275, S355 sowie S460 - das Material muss ausreichende Duktilität besitzen.
- Bauteile besitzen ausreichend dicke Stege mit $d/t \leq 69\epsilon$, d.h. Schubbeulen darf nicht relevant sein.
- Schrauben können vorgespannt oder nicht-vorgespannt sein, im Verfahren werden nicht-vorgespannte Schrauben angenommen.
- Schraubenbild mit vertikal zwei Schraubenreihen, die sich innerhalb des Anschlussquerschnittes, einschließlich ggf. vorhandener Aussteifungen mit Gurt befinden und jeweils höchstens eine Schraubenreihe oberhalb bzw. unterhalb der äußeren Gurte.
- Schraubenbild mit vertikal vier Schraubenreihen, angeordnet um den jeweils äußeren gezogenen Trägergurt entsprechend AiF Modell im DAST Forschungsbericht 3/2009 [3] und Wagenknecht in Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, 2017 [4] für EN 1993.
- Aussteifungen vom Anschluss als Eckblech ohne Gurt werden nicht berücksichtigt.
- Steifen sind durchgehend, Breite und Dicke entsprechen mindestens den Flanschen der angeschlossenen Bauteile.
- Schweißnähte sind nur begrenzt duktil und sollten daher für die Momententragfähigkeit so dimensioniert werden, dass sie nicht bemessungsrelevant sind, d.h. eine andere Komponente zuerst versagt, bzw. das Fließen im Material der angeschlossenen Bauteile ausreichend früh vor dem Schweißnahtversagen erfolgt.

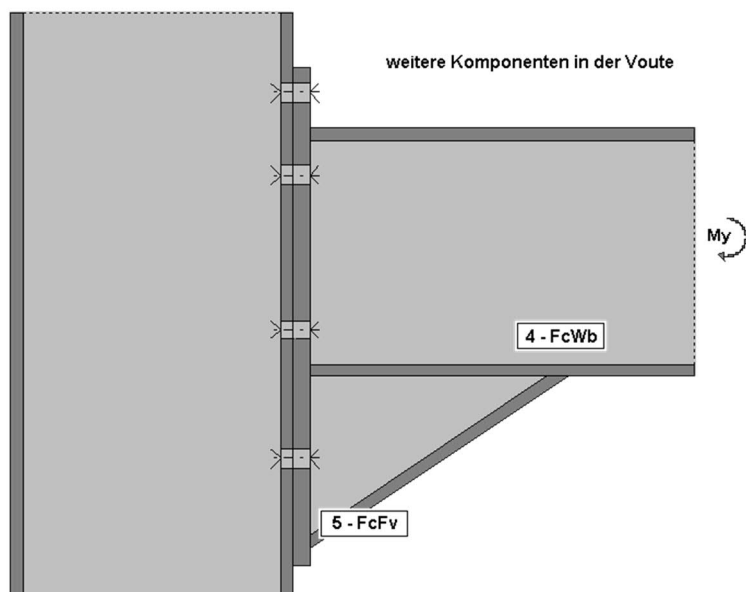
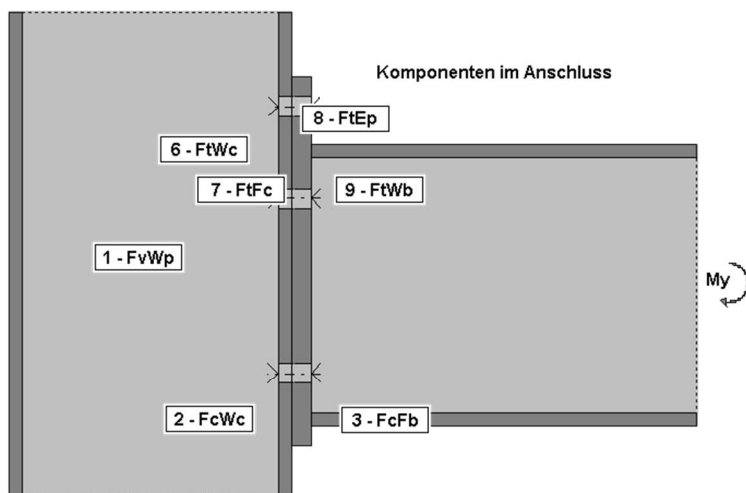
Komponenten in der Träger-Stützenverbindung

Allgemein:

- 1 - FvWp Stützensteg auf Schub (6.2.6.1 in [1])
- 2 - FcWc Stützensteg auf Druck (6.2.6.2 in [1])
- 3 - FcFb Trägerflansch und -steg auf Druck (6.2.6.7 in [1])
- 4 - FcWb Trägersteg auf Druck bei Vouten (Kap. 4 in [3])
- 5 - FcFv Voutengurt auf Druck (Kap. 4 in [3])

und jeweils in den T-Stummeln:

- 6 - FtWc Stützensteg auf Zug (6.2.6.3 in [1])
- 7 - FtFc Stützenflansch auf Biegung (6.2.6.4 in [1])
- 8 - FtEp Stirnplatte auf Biegung (6.2.6.5 in [1])
- 9 - FtWb Trägersteg auf Zug (6.2.6.8 in [1])



Komponenten in der Stirnplattenverbindung

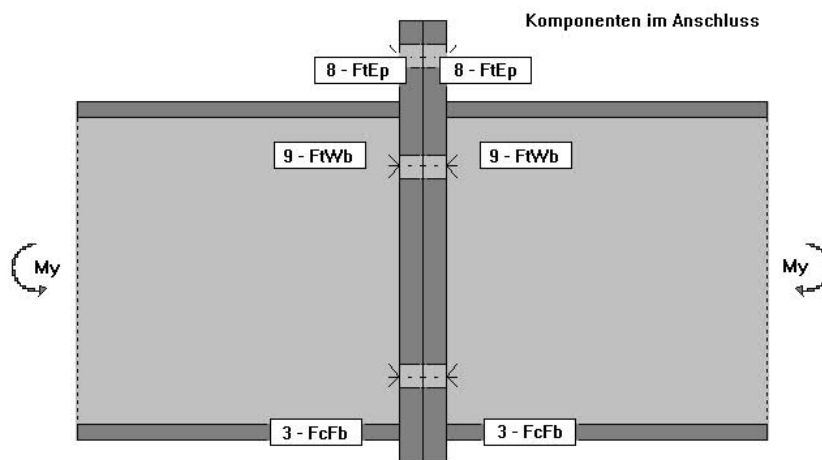
Allgemein :

3 - FcFb Trägerflansch und -steg auf Druck (6.2.6.7 in [1])

und jeweils in den T-Stummeln :

8 - FtEp Stirnplatte auf Biegung (6.2.6.5 in [1])

9 - FtWb Trägersteg auf Zug (6.2.6.8 in [1])



Grenzmoment der Verbindung

Das plastische Grenzmoment ergibt sich aus der Summe der Grenzkräfte jeder einzelnen Schraubenreihe i mit deren Abstand zum Druckpunkt h_i :

$$M_{aRd} = \sum_i h_i \cdot Ft_{iRd}$$

i Nummer der Schraubenreihe

h_i Abstand Schraubenreihe i zum Druckpunkt

Ft_{iRd} wirksame Grenzzugkraft Schraubenreihe i aus der Zusammensetzung aller Komponenten

Als Druckpunkt wird die Mitte des äußersten gedrückten Flansches im Träger, einschließlich einer ggf. vorhandenen Voute angenommen.

Die wirksame Grenzzugkraft einer Schraubenreihe ergibt sich dabei aus einem schrittweisen Berechnungsverfahren. Angefangen wird mit der vom Druckpunkt weitest entfernten Schraubenreihe und der Bestimmung des Gleichgewichtes aller Komponenten unter Berücksichtigung dieser Reihe. In den nächsten Schritten wird jeweils eine weitere Schraubenreihe (die in Richtung Druckpunkt nachfolgende) hinzugenommen und die Grenzkraft aus dem Zusammenspiel dieser Schraubengruppe unter Berücksichtigung des Gleichgewichtes aller Komponenten erneut berechnet. Näher zum Druckpunkt liegende Schraubenreihen als die gerade hinzugenommene, bleiben im jeweiligen Berechnungsschritt unberücksichtigt.

Welche Schraubenreihe als im Zugbereich liegende herangezogen wird, kann mit dem Faktor f aus den Optionen zum Berechnungsverfahren gesteuert werden. Vorgabewert ist 0,5 und bedeutet, dass sich der Zugbereich auf die halbe Anschlusshöhe erstreckt. Schrauben außerhalb dieses Bereiches werden dann nur zur Querkraftübertragung herangezogen.

Effektive Tragfähigkeit $F_{t_{Rd}}$ in der Träger-Stützenverbindung

Das $F_{t_{Rd}}$ eines Berechnungsschrittes zur Schraubenreihe i ergibt sich aus der minimalen Grenzzugkraft der folgenden Bedingungen:

1. $F_{t_{Rd}}$ der einzelnen Schraubenreihe (also als T-Stummel mit nur einer Schraubenreihe) durch Minimum aus

$F_{t_{Wc}}$	Stützensteg auf Zug
$F_{t_{Fc}}$	Stützenflansch auf Biegung
$F_{t_{Ep}}$	Stirnplatte auf Biegung
$F_{t_{Wb}}$	Trägersteg auf Zug

2. Abminderung des $F_{t_{Rd}}$ aus 1. so dass die Summe aller betrachteten Schraubenreihen einschließlich der Reihe i höchstens dem Minimum aus

$F_{v_{Wp}}$	Stützensteg auf Schub
$F_{c_{Wc}}$	Stützensteg auf Druck
$F_{c_{Fb}}$	Trägerflansch und -steg auf Druck, nur ohne Voute
$F_{c_{Wb}}$	Trägersteg auf Druck, nur bei Vouten,
$F_{c_{Fv}}$	Gurt auf Druck, nur bei Vouten

 entspricht

3. ist die Schraubenreihe i Teil eines mehrreihigen T-Stummels im Stützengurt, muss $F_{t_{Rd}}$ aus 2. ggf. so abgemindert werden, dass für alle Gruppen von Schrauben im T-Stummel bis und einschließlich der Reihe i die Grenzkraft dieser Schraubengruppe als T-Stummel betrachtet nicht überschritten wird, Bedingung:

$F_{t_{Wc}}$	Stützensteg auf Zug dieser Gruppe
$F_{t_{Fc}}$	Stützenflansch auf Biegung dieser Gruppe
$F_{t_{Ep}}$	Stirnplatte auf Biegung der entsprechenden Gruppe plattenseitig
$F_{t_{Wb}}$	Trägersteg auf Zug der entsprechenden Gruppe plattenseitig

4. ist die Schraubenreihe i Teil eines mehrreihigen T-Stummels in der Stirnplatte, muss $F_{t_{Rd}}$ aus 3. ggf. durch Gruppierung der Schraubenreihen im T-Stummel analog Schritt 3 abgemindert werden, Bedingung:

$F_{t_{Wc}}$	Stützensteg auf Zug der entsprechenden Gruppe stützensseitig
$F_{t_{Fc}}$	Stützenflansch auf Biegung der entsprechenden Gruppe stützensseitig
$F_{t_{Ep}}$	Stirnplatte auf Biegung dieser Gruppe
$F_{t_{Wb}}$	Trägersteg auf Zug dieser Gruppe

5. ist $F_{t_{Rd}}$ einer vorher berechneten Schraubenreihe j (also $j < i$) größer als $1,9 \cdot B_{t_{Rd}}$, so wird $F_{t_{Rd}}$ der Schraubenreihe i durch $F_{t_{Rd}} \leq F_{t_{j_{Rd}}} \cdot h_j / h_i$ begrenzt, mit

h_j	Abstand Schraubenreihe j zum Druckpunkt
h_i	Abstand Schraubenreihe i zum Druckpunkt
$B_{t_{Rd}}$	Minimum aus Durchstanstragfähigkeit $B_{p_{Rd}}$ und Grenzzugkraft $F_{t_{Rd}}$ der Schraube aus der Schraubenstatik

Effektive Tragfähigkeit F_{tRd} in der Stirnplattenverbindung

Das F_{tRd} eines Berechnungsschrittes zur Schraubenreihe i ergibt sich aus der minimalen Grenzzugkraft der folgenden Bedingungen:

1. F_{tRd} der einzelnen Schraubenreihe (also als T-Stummel mit nur einer Schraubenreihe) durch Minimum aus

F_{tEp}	Stirnplatte auf Biegung
F_{tWb}	Trägersteg auf Zug

2. Abminderung des F_{tRd} aus 1. so dass die Summe aller betrachteten Schraubenreihen einschließlich der Reihe i höchstens dem Minimum aus

F_{cFb}	Trägerflansch und -steg auf Druck
-----------	-----------------------------------

 entspricht

3. ist die Schraubenreihe i Teil eines mehrreihigen T-Stummels in der Stirnplatte, muss F_{tRd} aus 2. ggf. durch Gruppierung der Schraubenreihen im T-Stummel analog Schritt 2 abgemindert werden, Bedingung:

F_{tEp}	Stirnplatte auf Biegung dieser Gruppe
F_{tWb}	Trägersteg auf Zug dieser Gruppe

4. ist F_{tRd} einer vorher berechneten Schraubenreihe j (also $j < i$) größer als $1,9 \cdot B_{tRd}$, so wird F_{tRd} der Schraubenreihe i durch $F_{tRd} \leq F_{tjRd} \cdot h_j / h_i$ begrenzt, mit

h_j	Abstand Schraubenreihe j zum Druckpunkt
h_i	Abstand Schraubenreihe i zum Druckpunkt
B_{tRd}	Minimum aus Durchstanztragfähigkeit B_{pRd} und Grenzzugkraft F_{tRd} der Schraube aus der Schraubenstatik

Berechnung elastisch- elastisch

Erfolgt die Tragwerksberechnung nach dem Verfahren elastisch - elastisch, kann das Grenzmoment der Verbindung aus dem plastischen M_{aRd} abgeleitet werden:

$$M_{aRd,elastisch} = \frac{2}{3} M_{aRd,plastisch}$$

Träger-Stützenverbindung und Stirnplattenstoß mit vertikal zweireihiger Schraubenanordnung

Modell der T-Stummel (vertikal 2-reihig)

Die einzelnen Komponenten zur Übertragung der Zugkräfte im Anschluss

FtWc	Stützensteg auf Zug
FtFc	Stützenflansch auf Biegung
FtEp	Stirnplatte auf Biegung
FtWb	Trägersteg auf Zug

werden durch idealisierende, äquivalente T-Stummel unter Zugbeanspruchung modelliert, deren Versagensmechanismus durch Fließlinienmodelle beschrieben ist.

Ein T-Stummel besteht aus zugbeanspruchtem Steg und biegebeanspruchtem Gurt. In den Schraubenachsen wirkt Zug, der sich an den Außenrändern, die als starre Lager idealisiert werden, abstützen kann. Nach Anmerkung 1 in Tabelle 6.2 [1] darf angenommen werden, dass bei Träger-Stützenverbindungen und Stirnplattenstößen Abstützkräfte auftreten. Ob diese Abstützkräfte auftreten, wird vom Programm entsprechend Tabelle 6.2 durch die Bedingung $L_b \leq L_b^*$ geprüft. Treten nach dieser Bedingung keine Abstützkräfte auf, wird zur Bestimmung der Tragfähigkeit des T-Stummels statt Versagensart 1 und Versagensart 2 die Versagensart 4 – Plattenversagen ohne Abstützkraft angenommen.

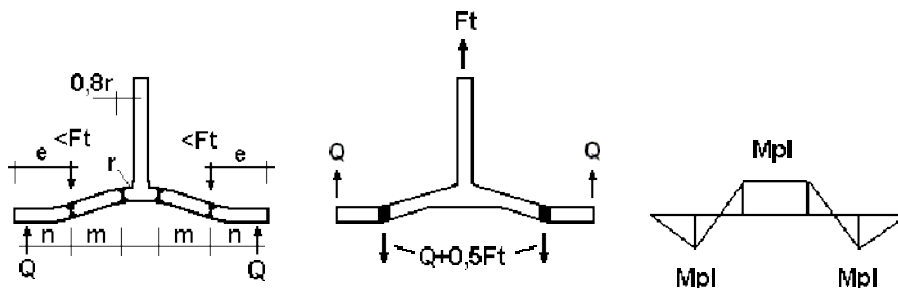
Für Stirnplattenstöße erfolgt der Test auf mögliche Abstützkräfte abweichend von Tabelle 6.2 nach der in Wagenknecht [5] angegebenen Gleichung (3.21). Dabei wird von sich symmetrisch gegenüberliegenden T-Stummeln ausgegangen und deren gegenseitige Stützung berücksichtigt.

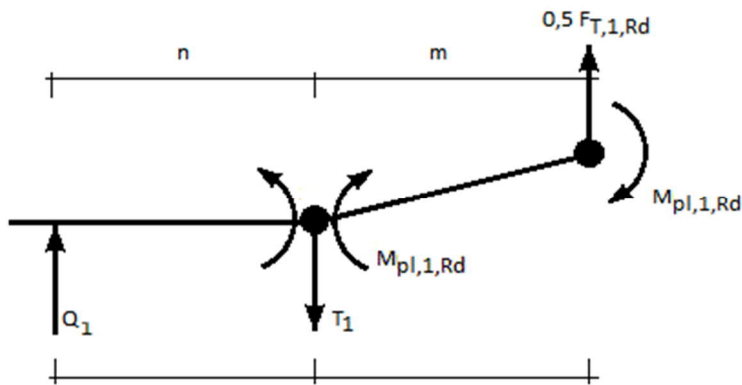
Ggf. kann im Programm über die Berechnungsoption „Abstützkräfte pauschal“ eine Modellierung durchgeführt werden, in der unterstellt wird, dass sich immer Abstützkräfte einstellen. Dann erfolgt keine Prüfung $L_b \leq L_b^*$ und es sind nur die Versagensarten 1 bis 3 maßgeblich.

Eine Besonderheit stellt die Schraubenreihe im nicht ausgesteiften Überstand der Stirnplatte dar. Hier wird ein T-Stummel angenommen, dessen zugbeanspruchter Steg nicht dem Trägersteg, sondern dem Gurt des Trägers entspricht. Er wird also um 90° gedreht angenommen.

Im T-Stummelmodell werden folgende Versagensarten unterschieden:

Versagensart 1 : vollständiges Fließen der Gurte (i.d.R. bei $t_f/d_s < 0,75$ für FK 10.9)





$$F_{t1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1,Rd}}{m}$$

mit $M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

- und l_{eff1} : wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1
 t_f : Dicke Stummelflansch

durch Verwendung von Futterplatten kann die Grenzzugkraft $F_{t1,Rd}$ erhöht werden:

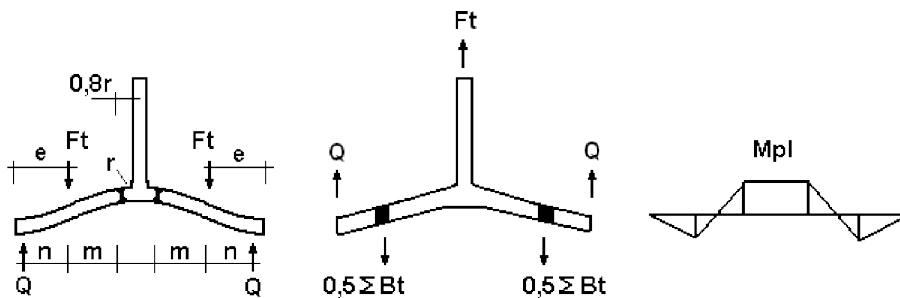
$$F_{t1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1,Rd} + 2 \cdot M_{bp,Rd}}{m}$$

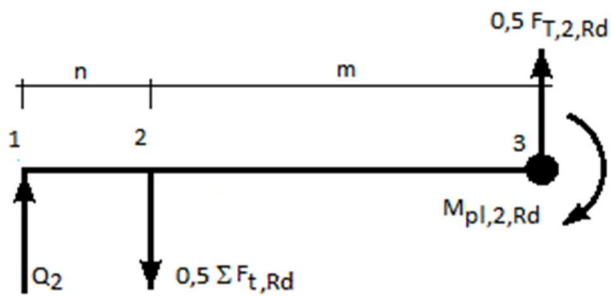
mit $M_{bp,Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,1} \cdot t_{bp}^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

- und l_{eff1} : wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1
 t_{bp} : Dicke Futterplatte

Die Futterplatte soll dabei die gesamte Breite des Stummelflansches überdecken und mindestens der gesamten wirksamen Länge für die betroffenen Schraubenreihen im T-Stummel entsprechen, mit einem Mindestüberstand von $2 \cdot d$ über die Endschrauben (d Nenndurchmesser der Schrauben).

Versagensart 2 : Schraubenversagen und Fließen der Gurte (i.d.R. bei $0,75 < t_f/d_s < 1,25$ für FK 10.9)





$$F_{T2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl2,Rd} + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m+n}$$

mit $M_{pl2,Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,2} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

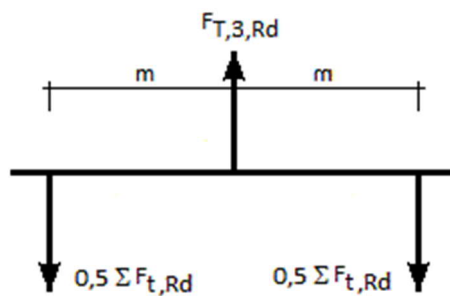
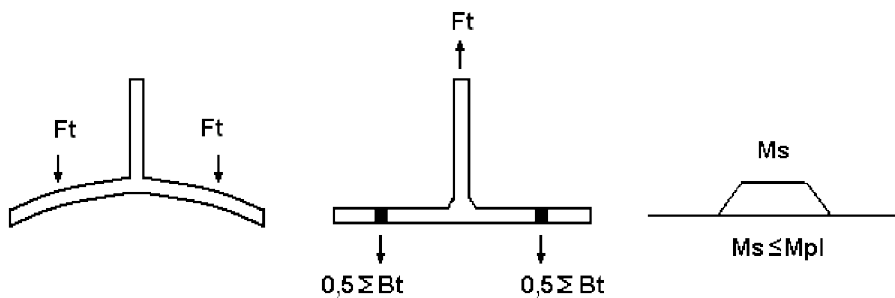
und l_{eff2} : wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 2

t_f : Dicke Stummelflansch

$B_{t,Rd}$: Minimum aus Durchstantragfähigkeit $B_{p,Rd}$ und Grenzzugkraft $F_{t,Rd}$ der Schraube aus der Schraubenstatik

$\sum B_{t,Rd}$: Summe $B_{t,Rd}$ aller Schrauben im T-Stummel

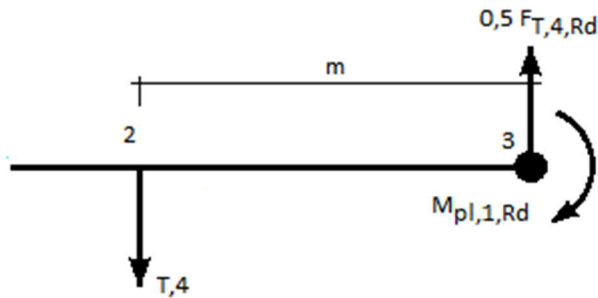
Versagensart 3 : Schraubenversagen (i.d.R. bei $t_f/d_s > 1,25$ für FK 10.9)



$$F_{T3,Rd} = \sum B_{t,Rd}$$

mit $\sum B_{t,Rd}$: siehe Versagensart 2

Versagensart 4 : Plattenversagen ohne Abstützkräfte



$$F_{t4,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl1,Rd}}{m}$$

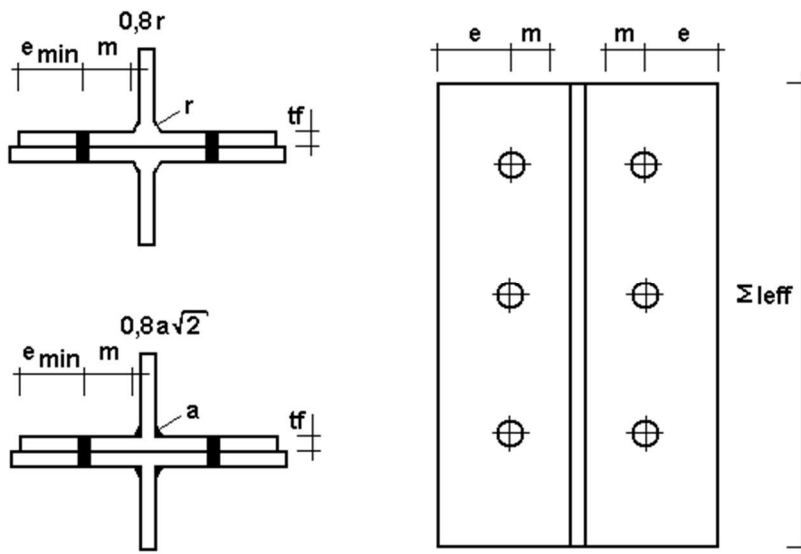
mit $M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und l_{eff1} : wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1

t_f : Dicke Stummelflansch

Abmessungen im T-Stummel :

$$n = e_{min} \quad \text{und} \quad n \leq 1,25 \cdot m$$



Alternative Methode zur Berechnung Versagensart 1:

Durch genauere Erfassung des Fließlinienverlaufs im Lastverteilungsbereich der Schraubenköpfe kann die Tragfähigkeit der Versagensart 1 erhöht werden. Ein erweitertes Modell setzt die Schraubenkräfte unter der Unterlegscheibe und dem Schraubenkopf bzw. der Schraubenmutter gleichmäßig auf den Gurt verteilt, statt konzentriert in der Schraubenachse an.

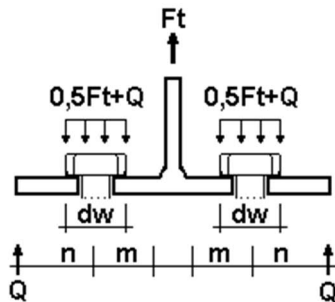
$$F_{t1,Rd} = \frac{(8 \cdot n - 2 \cdot ew) \cdot M_{pl1,Rd}}{2 \cdot m \cdot n - ew \cdot (m + n)}$$

mit $ew = dw / 4$

dw Durchmesser Unterlegscheibe bzw. Breite Schraubenkopf/-mutter. Für Schrauben mit FK 4.6 und 5.6 nimmt das Programm wegen der fehlenden Unterlegscheibe die Breite des Schraubenkopfes an (Eckmaß).

Bei Verwendung von Futterplatten bestimmt sich die Grenzzugkraft F_{t1Rd} aus:

$$F_{t1Rd} = \frac{(8 \cdot n - 2 \cdot e_w) \cdot M_{pl1Rd} + 4 \cdot n \cdot M_{bpRd}}{2 \cdot m \cdot n - e_w \cdot (m + n)}$$

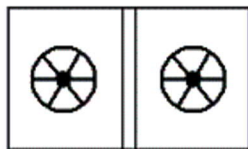


Wirksame Längen l_{eff} der T-Stummel

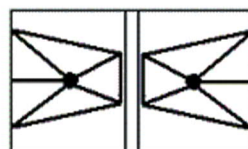
Die wirksamen Längen im Ersatzmodell der T-Stummel entsprechen den Längen der Fließlinien zur jeweiligen Versagensart und können von den geometrischen Längen der Verbindung abweichen. Die Fließlinienlänge einer Schraube bestimmt sich durch deren Lage: randnah, neben einer Aussteifung, am Anfang/Ende einer Gruppe bzw. im inneren einer Gruppe.

Es wird zwischen kreisförmigen und nicht kreisförmigen Mustern der Fließlinien unterschieden.

l_{eff} der Versagensart 2 entspricht den nicht kreisförmigen, l_{eff} der Versagensart 1 entspricht der kleineren Länge aus kreisförmigen und nicht kreisförmigen Mustern. Effektive Längen von T-Stummeln mit mehreren Schraubenreihen setzen sich aus der Summe der Längen jeder Einzelreihe bezüglich deren Lage zusammen.

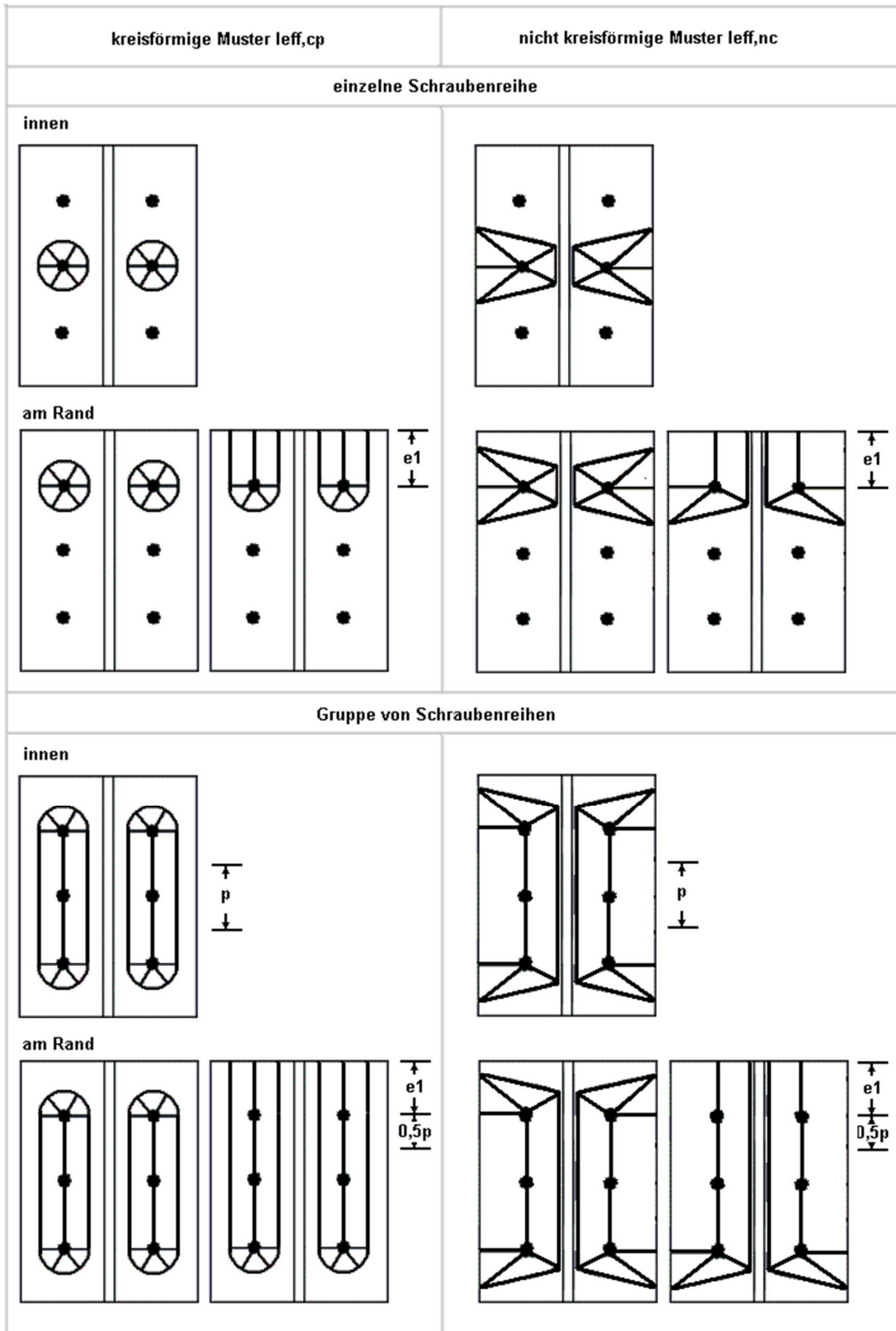


kreisförmige Muster $l_{eff,cp}$

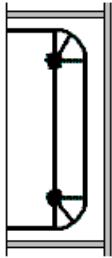


nicht kreisförmige Muster $l_{eff,nc}$

Beispiel-Fließmuster an nicht ausgesteifter Stütze:

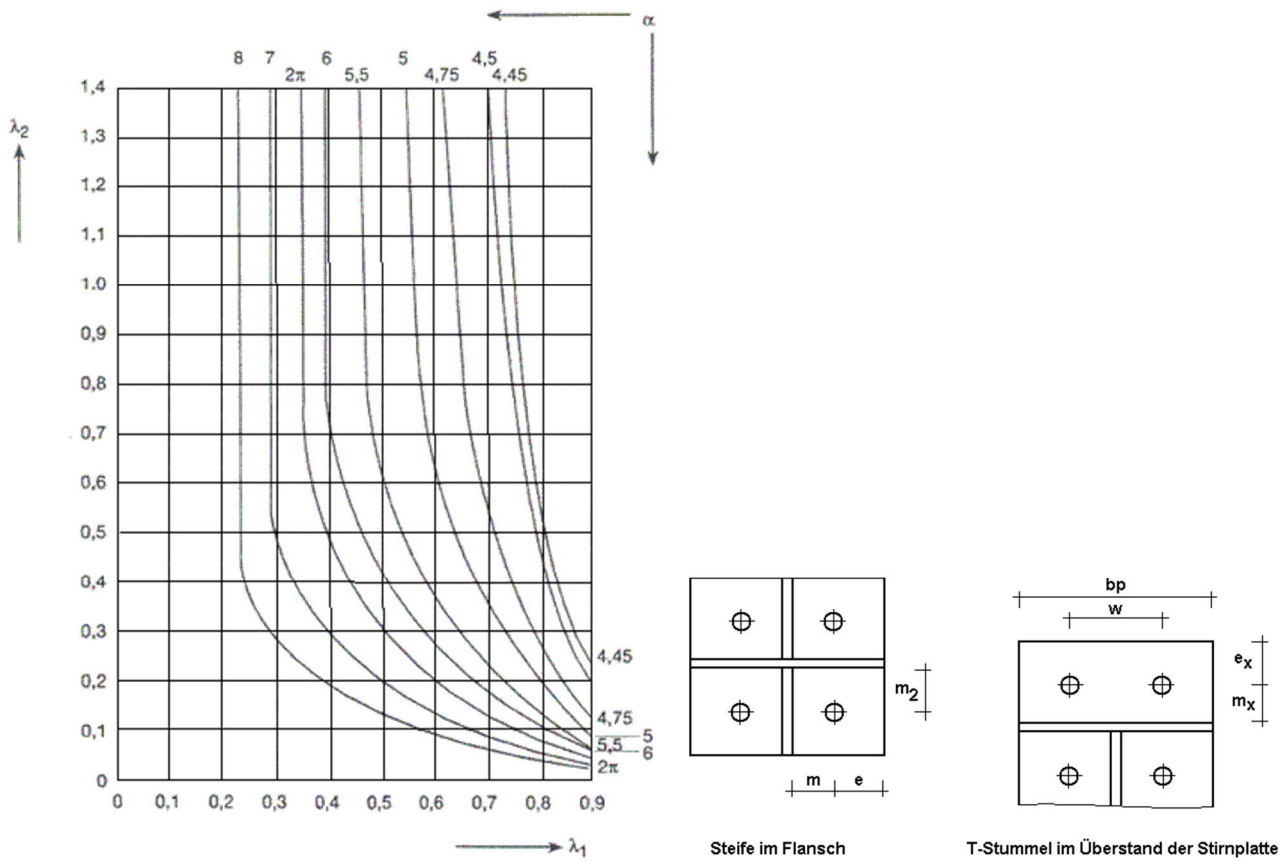


Im Nachweis der Zugtragfähigkeit N_{Rd} einer Verbindung wird für $l_{eff,cp}$ ein ergänzendes Muster untersucht, welches sich im Innenbereich des Anschlusses/Trägers entlang der Aussteifungen ausbildet, siehe [5].



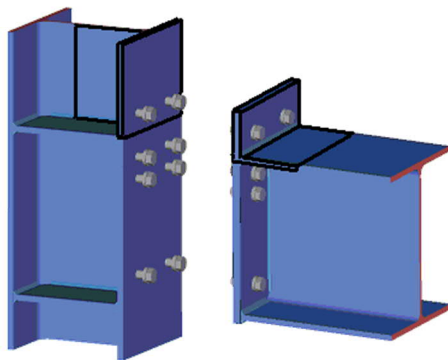
Wirksame Längen l_{eff} :

Lage der Schraubenreihen	einzeln		Gruppe	
	kreisförmig $l_{eff,cp}$	nicht kreisförmig $l_{eff,nc}$	kreisförmig $l_{eff,cp}$	nicht kreisförmig $l_{eff,nc}$
innere Schraubenreihe neben einer Steife	$2 \cdot \pi \cdot m$	$\alpha \cdot m$	$\pi \cdot m + p$	$0,5 \cdot p + \alpha \cdot m - (2 \cdot m + 0,625 \cdot e)$
andere innere Schraubenreihe	$2 \cdot \pi \cdot m$	$4 \cdot m + 1,25 \cdot e$	$2 \cdot p$	p
andere äußere Schraubenreihe	$\min \left[\begin{array}{l} 2 \cdot \pi \cdot m \\ \pi \cdot m + 2 \cdot e_1 \end{array} \right]$	$\min \left[\begin{array}{l} 4 \cdot m + 1,25 \cdot e \\ 2 \cdot m + 0,625 \cdot e + e_1 \end{array} \right]$	$\min \left[\begin{array}{l} \pi \cdot m + p \\ 2 \cdot e_1 + p \end{array} \right]$	$\min \left[\begin{array}{l} 2 \cdot m + 0,625 \cdot e + 0,5 \cdot p \\ e_1 + 0,5 \cdot p \end{array} \right]$
äußere Schraubenreihe neben einer Steife	$\min \left[\begin{array}{l} 2 \cdot \pi \cdot m \\ \pi \cdot m + 2 \cdot e_1 \end{array} \right]$	$e_1 + \alpha \cdot m - (2 \cdot m + 0,625 \cdot e)$	-	-
Modus 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ jedoch $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\Sigma l_{eff,1} = \Sigma l_{eff,nc}$ jedoch $\Sigma l_{eff,1} \leq \Sigma l_{eff,cp}$	
Modus 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\Sigma l_{eff,2} = \Sigma l_{eff,nc}$	

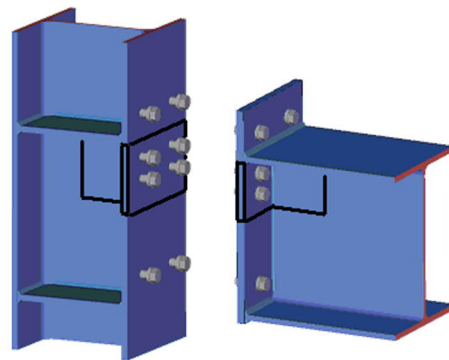


Der Hilfswert α für T-Stummel im Bereich von Aussteifungen ergibt sich nach Bild J 27 in [8] mit den folgenden λ -Werten:

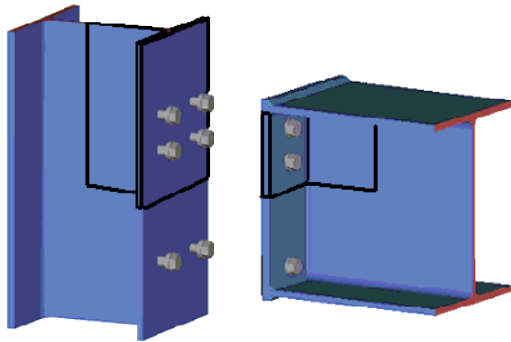
$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} \quad \text{und} \quad \lambda_2 = \frac{m_2}{m+e}$$



Bsp. T-Stummel in ausgesteifter Stütze Teil 1



Bsp. T-Stummel in ausgesteifter Stütze Teil 2



Bsp.: T-Stummel in nicht ausgesteifter Stütze

Komponente Stützensteg auf Schub (nur Träger-Stützenverbindung)

Die Tragfähigkeit für Schubbeanspruchung im nicht ausgesteiften Stützensteg ergibt sich aus:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{vc} \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}$$

A_{vc} : schubwirksame Fläche der Stütze

für Walzprofile $A_{vc} = A_{gesamt} - 2 \cdot A_{gurt} + t_{gurt} \cdot (s_{steg} + 2 \cdot r_{Ausrundung})$

für geschweißte Profile $A_{vc} = t_{gurt} \cdot (h_{gesamt} - t_{gurt,oben} - t_{gurt,unten})$

$$F_{wp,Rd} = V_{wp,Rd} / \beta$$

β Übertragungsparameter für Anschlussmoment (Schubeinfluss Stützenstegfeld) nach Tab. 5.4 in [1].

Für einseitig ausgeführte Anschlüsse ist β näherungsweise 1, der Parameter kann in den Berechnungsoptionen für andere Konfigurationen angepasst werden.

Stegblechverstärkung

Eine Möglichkeit, die Schubtragfähigkeit zu erhöhen, ist die Anordnung eines einseitigen Stegbleches der Dicke t_s in der Stütze. Die Breite b_s sollte bis an die Eckausrundungen reichen und die Länge l_s so groß sein, dass die effektiven Breiten des Steges unter Druck und Zug überdeckt sind.

Die erforderlichen Abmessungen werden vom Programm vorgeschlagen. In der Eingabe kann gewählt werden, ob die Stegblechverstärkung nur bei Schnittkraftkombinationen mit Zug an der Riegeloberseite oder nur bei Zug an der Riegelunterseite bzw. immer für Wechselmomente vorgesehen wird, entsprechend passen sich die erf. Längen automatisch an.

Das Stegblech sollte rundherum mit einer Kehlnaht von $a_w \geq t_s / \sqrt{2}$ angeschweißt werden.

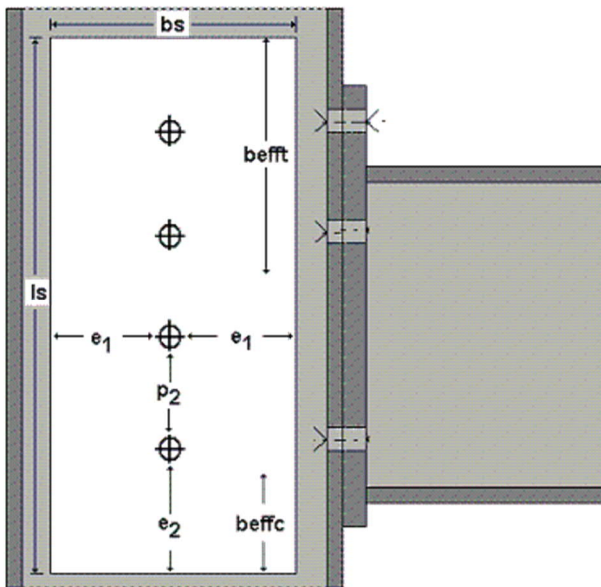
A_{vc} erhöht sich um: $b_s \cdot \min[t_s; s_{\text{Stützensteg}}]$

Die Stegblechverstärkung erhöht auch die Tragfähigkeit der Komponenten Stützensteg auf Zug und Stützensteg auf Druck.

Das Programm prüft das Stegblech auf geeignetes Zusammenwirken mit dem Stützensteg und gibt erforderlichenfalls die Kennwerte für Lochschweißungen oder Schrauben aus.

Wenn $b_s > 40 \cdot \epsilon \cdot t_s$, mit $\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$, so gilt:

$\max(e_1, e_2, p) \leq 40 \cdot \epsilon \cdot t_s$ sowie $d_0 \geq t_s$



Sind jeweils im äußeren Druck- und Zugbereich der Stegblechverstärkung Rippen angeordnet, kann $V_{wp,Rd}$ im Stützenfeld um $V_{wp,Rd,add}$ erhöht werden.

$$V_{wp,Rd,add} = \frac{4 \cdot M_{pl,fc,Rd}}{d_s} \quad \text{und} \quad V_{wp,Rd,add} \leq \frac{2 \cdot M_{pl,fc,Rd} + 2 \cdot M_{pl,st,Rd}}{d_s}$$

mit

- d_s : Abstand Mittellinien der Rippen
- $M_{pl,fc,Rd}$: plastisches Grenzmoment eines Stützenflanschs
- $M_{pl,st,Rd}$: plastisches Grenzmoment einer Rippe

Diagonalsteife

Eine weitere Möglichkeit, die Schubtragfähigkeit im Stützensteg zu verbessern, bietet das Programm durch die Anordnung einer Diagonalsteife von links oben nach rechts unten, d.h. für die übliche Beanspruchung der Verbindung durch Druck unten und Zug oben.

Die aufnehmbare Grenzkraft $F_{cRd,diagonale}$ der Diagonalsteife ergibt sich aus:

- der Spannung in der Diagonalsteife
- dem Knicknachweis der Diagonalsteife
- dem Beulnachweis der freien Ränder der Diagonalsteife

Die Komponente wird dann durch den größeren Wert aus $F_{cRd,diagonale}$ und F_{wpRd} bestimmt.

Komponente Stützensteg auf Druck (nur Träger-Stützenverbindung)

Die Tragfähigkeit für nicht ausgesteiften Stützensteg auf Druck ergibt sich aus:

$$F_{c,wc,Rd} = k_{wc} \cdot \omega \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad \text{und} \quad F_{c,wc,Rd} \leq \rho \cdot k_{wc} \cdot \omega \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

$b_{eff,c,wc}$: mitwirkende Breite Stützensteg auf Druck

ρ : Abminderungsfaktor für Plattenbeulen

ω : Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Schub im Steg

k_{wc} : Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Normalspannung im Steg

t_{wc} : Dicke Stützensteg, bei vorhandener Stegblechverstärkung erhöht sich der Wert zu $1,5 t_{wc}$.

$$b_{eff,c,wc} = t_{Riegelgurt} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_{w,gurt} + 5 \cdot (t_{Stützengurt} + s) + s_p$$

s : Ausrundung bei gewalzter Stütze,

$\sqrt{2} \cdot a_{wc}$ bei geschweißter Stütze

s_p : 45° Ausbreitung durch die Stirnplatte, mindestens $t_{Stirnplatte}$ und bei ausreichendem Überstand bis zu $2 t_{Stirnplatte}$.

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \lambda_p \leq 0,72$$

$$\rho = (\lambda_p - 0,22) / \lambda_p^2 \quad \text{für } \lambda_p > 0,72$$

λ_p : Plattenschlankheit

$$\lambda_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \cdot d_{wc} \cdot f_y}{E \cdot t_{wc}^2}}$$

d_{wc} : Höhe Steg ohne Ausrundung bzw. Schweißnaht

für einen Übertragungsparameter $\beta = 1$ ergibt sich

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

A_{vc} : schubwirksame Fläche der Stütze wie in Komponente Stützensteg auf Schub

Andere Übertragungsparameter ergeben ein ω entsprechend Tabelle 6.3 in [1].

$k_{wc} = 1$ im Allgemeinen, bzw.
 $k_{wc} = 1,7 - \sigma_{ed} / f_y$ wenn die Normalspannung σ_{ed} in der Stütze $0,7 f_y$ überschreitet
 σ_{ed} ist die Normalspannung im Stützensteg aus $M_y = M_{y,oben} - M_{y,rechts}$ und $N = N_{oben} - V_{z,rechts}$ im Schnittpunkt der Systemachsen

Hinweis: Das rahmenknickähnliche Beulen im nicht ausgesteiften Stützensteg auf Druck sollte konstruktiv verhindert werden.

Stegsteifen

Die Tragfähigkeit der Komponente kann durch Rippen im Druckbereich des Stützenstegs verbessert werden. Sind entsprechende Rippen abgeordnet ergibt sich eine aufnehmbare Grenzkraft F_{cRd_Rippe} aus dem Spannungsnachweis in der Rippe.

Die Komponente wird dann durch den größeren Wert aus F_{cRd_Rippe} und $F_{c,wc,Rd}$ bestimmt.

Hinweis: Im System Knie-Eck mit Zuglasche und positiver Momentenbeanspruchung, also Druck oben, wird die Zuglasche vernachlässigt. Eine Aussteifung des Druckbereiches ergibt sich durch die Kopfplatte der Stütze. Ist keine Kopfplatte vorhanden, rechnet das Programm den Stegbereich als nicht ausgesteift.

Komponente Trägerflansch und -steg auf Druck

Die Tragfähigkeit für Trägerflansch und -steg auf Druck ergibt sich mit ausreichender Genauigkeit aus:

$$F_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h_{Anschluss} - t_{Trägergurt})$$

$h_{Anschluss}$ Höhe vom Anschluss im Anschnitt Stirnplatte (einschließlich Aussteifung)
 $M_{c,Rd}$ Grenzmoment des Trägers unter Interaktion mit Querkraft

In Abhängigkeit der Schlankheit von Steg und Gurten wird der Trägerquerschnitt durch Querschnittsklassen analog 5.5.2 in [2] beschrieben. Besitzt der Trägerquerschnitt Aussteifungen mit Gurt, wird er vereinfachend durch die äußeren Gurte und der gesamten Steghöhe beschrieben.

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd} \quad \text{für Querschnittsklasse 1 und 2}$$

$$M_{c,Rd} = W_{el} \cdot f_{yd} \quad \text{für Querschnittsklasse 3}$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot f_{yd} \quad \text{für Querschnittsklasse 4}$$

W_{eff} Widerstandsmoment des Querschnitts mit den wirksamen Querschnittsteilen unter Druck

Komponente Trägersteg auf Druck (nur bei Vouten in Träger-Stützenverbindung)

Im Anschluss gevouteter Träger wird statt der Komponente Trägersteg auf Druck die Komponente Trägersteg auf Druck am Voutenansatz, also der Stelle der Kraftumlenkung, untersucht. Deren Tragfähigkeit ergibt sich aus:

$$F_{c,wb,Rd} = \frac{b_{eff,c,wbl} \cdot t_{Riegelsteg} \cdot k_{wb} \cdot f_y}{\tan \beta \cdot \gamma_{M0}} \quad \text{und} \quad F_{c,wb,Rd} \leq \frac{\rho \cdot b_{eff,c,wbl} \cdot t_{Riegelsteg} \cdot k_{wb} \cdot f_y}{\tan \beta \cdot \gamma_{M1}}$$

$b_{eff,c,wbl}$ mitwirkende Breite Riegelsteg auf Druck, analog $b_{eff,c,wc}$ bei Stützensteg auf Druck zu bestimmen

k_{wb} Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Normalspannung im Steg

$t_{Riegelsteg}$ Dicke Riegelsteg

$\tan \beta$	Neigungswinkel der Voute
ρ	Abminderungsfaktor für Plattenbeulen, analog zu ρ bei Stützensteg auf Druck

Stegsteifen

Die Tragfähigkeit der Komponente kann durch Rippen im Bereich des Trägerstegs verbessert werden. Sind entsprechende Rippen abgeordnet ergibt sich eine aufnehmbare Grenzkraft F_{cRd_Rippe} aus dem Spannungsnachweis in der Rippe.

Die Komponente wird dann durch den größeren Wert aus F_{cRd_Rippe} und $F_{c,wb,Rd}$ bestimmt.

Komponente Gurt auf Druck (nur bei Vouten in Träger-Stützenverbindung)

Im Anschluss gevouteter Träger wird statt der Komponente Trägerflansch auf Druck die Komponente Gurt auf Druck am Anschluss Vouten untersucht. Deren Tragfähigkeit ergibt sich aus:

$$F_{c,fv,Rd} = b_v \cdot t_{fv} \cdot \cos \beta \cdot f_y \cdot \gamma_{M0}$$

t_{fv}	Dicke vom Voutengurt
$\cos \beta$	Neigung Voute
b_v	$\min(b_{fv}, b_{iv})$
b_{fv}	Breite Voutengurt

$$b_{iv} = 42 \cdot t_{fv} \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \text{ in N/mm}^2$$

Komponente Stützensteg auf Zug (nur Träger-Stützenverbindung)

Die Tragfähigkeit für nicht ausgesteiften Stützensteg auf Druck ergibt sich aus:

$$F_{t,wc,Rd} = \omega \cdot b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

$b_{eff,t,wc}$	mitwirkende Breite Stützensteg entspricht der wirksamen Länge des äquivalenten T-Stummel im Gurt (siehe Modell der T-Stummel)
ω	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Schub im Steg, entspricht dem Abminderungsfaktor ω aus der Komponente Stützensteg auf Druck unter Ansatz von $b_{eff,t,wc}$
t_{wc}	Dicke Stützensteg, bei vorhandener Stegblechverstärkung erhöht sich der Wert zu $1,5 t_{wc}$ wenn Schweißnahtdicken $a_w \geq t_{steg}$ verwendet werden oder zu $1,4 t_{wc}$ bzw. $1,3 t_{wc}$ bei Schweißnahtdicken $a_w \geq t_s / \sqrt{2}$ je nach verwendeter Stahlgüte

Komponente Stützenflansch auf Biegung (nur Träger-Stützenverbindung)

Die Tragfähigkeit $F_{t,fc,Rd}$ vom Stützenflansch auf Biegung ergibt sich aus der Tragfähigkeit $F_{t,Rd}$ im Modell des äquivalenten T-Stummels (siehe Modell der T-Stummel).

Komponente Stirnplatte auf Biegung

Die Tragfähigkeit $F_{t,ep,Rd}$ der Stirnplatte auf Biegung ergibt sich aus der Tragfähigkeit $F_{t,Rd}$ im Modell des äquivalenten T-Stummels (siehe Modell der T-Stummel).

Komponente Trägersteg auf Zug

Die Zugtragfähigkeit im Trägersteg ergibt sich aus:

$$F_{t,wb,Rd} = b_{\text{eff},t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

$b_{\text{eff},t,wb}$	mitwirkende Breite Trägersteg, entspricht der wirksamen Länge des äquivalenten T-Stummel in der Stirnplatte (siehe Modell der T-Stummel)
t_{wb}	Dicke Trägersteg

Grenztragfähigkeit der Verbindung bei Beanspruchung durch Moment und große Normalkraft

Ist die einwirkende Normalkraft N_{Ed} im angeschlossenen Bauteil nicht größer als 5% der plastischen Beanspruchbarkeit $N_{pl,Rd}$ seines Querschnitts, kann die Tragfähigkeit nach dem oben genannten Verfahren ermittelt werden. Der Normalkraftanteil wird dabei in den Zug- und Druckkomponenten berücksichtigt.

$$\text{Es gilt } \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

Anderenfalls wird die Tragfähigkeit nach Gleichung (6.25) in [1] als konservative Näherung bestimmt:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

Dazu wird in getrennten Berechnungsabläufen jeweils M_{Rd} ohne gleichzeitige Wirkung von N_{Ed} und N_{Rd} ohne gleichzeitige Wirkung von M_{Ed} ermittelt und aus diesen Ergebnissen die oben angeführte Interaktion bestimmt.

Die Tragfähigkeit N_{Rd} ergibt sich sinngemäß aus den für M_{Rd} geltenden Einzelkomponenten.

Bei N_{Ed} als Zugkraft wird diese auf alle Schrauben verteilt, d.h. es gibt im Nachweis der Querkrafttragfähigkeit keine Schraubenreihe ohne gleichzeitige Zugkraftbeanspruchung.

Unsymmetrische Schraubenanordnung führt durch Berücksichtigung der Exzentrizität zu einer Abminderung der Zugtragfähigkeit. Effektive Fließmuster ergeben sich als Gruppe über alle vorhandenen und in der Höhe benachbarten Schraubenreihen.

Nachweis der Schweißnähte

Schweißnähte sind nur begrenzt duktil und sollten daher so dimensioniert werden, dass sie nicht bemessungsrelevant sind, d.h. eine der anderen Komponenten zuerst versagt.

In den Optionen zur Berechnung kann festgelegt werden, ob die Schweißnähte im Anschluss Riegel – Stirnplatte volltragfähig bemessen werden sollen, d.h. der Nachweis mit dem Grenzmoment M_{aRd} und der Grenzquerkraft V_{Rd} vom Anschluss erfolgt.

Soll das Verformungsverhalten der Verbindung bis zur vollen Rotationskapazität ausgenutzt werden, müssen die Schweißnähte das 1,4-fache M_{aRd} für unverschiebliche und das 1,7-fache M_{aRd} für verschiebliche Rahmen übertragen können. Diese Bedingung wird vom Programm nicht geprüft und muss ggf. bei der Eingabe berücksichtigt werden.

Der Schweißnahtnachweis im Anschluss Stirnplatte erfolgt als vereinfachter Nachweis entsprechend eingestellter Option entweder über die statischen Werte des Gesamtschweißnahtbildes als Nachweis der Vergleichsspannung oder über die Teilschnittgrößen am jeweiligen Gurt und am Steg.

Nachweis über die Teilschnittgrößen:

Der Steg übernimmt die gesamte Querkraft im Anschluss und wird im Bereich der effektiven T-Stummel-Länge mit dessen Zugkräften beansprucht. Das Programm führt an dieser Stelle einen Vergleichsspannungsnachweis.

Der Druckgurt im Anschluss wird mit der ermittelten Druckkraft aus der Berechnung des Grenzmomentes der Verbindung geführt.

Alle anderen Gurte werden nur konstruktiv nachgewiesen. Als erforderliche Schweißnahtdicke wird dabei die im Nachweis des Druckgurtes ermittelte Dicke angenommen. Sollen die Schweißnähte volltragfähig ausgebildet werden, setzt das Programm eine Mindestdicke für beide Kehlnähte zusammen aus der 1,1-fachen Dicke des angeschlossenen Gurtes voraus.

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit

Die Querkraft wird je nach eingestellter Berechnungsoption allein über die Schraubenreihen im Druckbereich (dieser wird durch den Faktor f bestimmt) oder zusätzlich auch über die zugbeanspruchten Schraubenreihen abgetragen.

Schrauben im Druckbereich müssen innerhalb des Anschlussquerschnittes bzw. im Bereich einer Eckaussteifung liegen.

Die Berechnung erfolgt nach Abschnitt 3.6.1 in [1].

$$F_{V,Rd} = A \cdot \alpha_v \cdot f_{ub} / \gamma_{M2} \quad \text{Grenzabscherkraft}$$

bei Interaktion mit Zug F_t und Abscheren V_a ergibt sich nach Tabelle 3.4 in [1]

$$\text{aus} \left(\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} \right) + \left(\frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \right) \leq 1,0$$

$$\text{die reduzierte Grenzabscherkraft } F_{V,Interaktion,Rd} = F_{V,Rd} \cdot \left(0,4 / 1,4 \right)$$

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot t \cdot d_{sch} \cdot f_y / \gamma_{M2} \quad \text{Grenzlochleibungskraft}$$

A	maßgebender Abscherquerschnitt
f_{ub}	charakteristische Schraubenzugfestigkeit
F_t	Zugkraft einer Schraube
F_{tRd}	Grenzzugkraft
d_{sch}	Schraubenschaftdurchmesser
t	Blechdicke

Wird die Schubtragfähigkeit des angeschlossenen Trägers V_{wbRd} durch die Grenzquerkraft im Anschluss V_{aRd} überschritten, gibt das Programm eine Warnung aus, bricht aber nicht mit der Berechnung ab.

Soll die Schubtragfähigkeit vom Träger in die Berechnung einfließen, kann die entsprechende Option angewählt werden. Es erfolgt dann eine Begrenzung auf 50% der Riegelschubtragfähigkeit V_{wbRd} .

Einfluss des Faktors f für die Höhe des Zugbereiches:

Näher zur Druckzone liegende Schrauben können bei der Berechnung der Momententragfähigkeit vernachlässigt werden. Sie wirken dann mit ihrer vollen Grenzabscherkraft, so dass sich ggf. eine höhere Querkrafttragfähigkeit der Verbindung ergibt. Die Unterbewertung der Momententragfähigkeit ist im Allgemeinen gering und wird für Verbindungen, in denen mindestens 50% der Schrauben auf Zug wirken und sich die vernachlässigten Schrauben im Bereich des 0,4-fachen Abstandes der äußersten gezogenen Schraube zum Druckpunkt befinden, mit 15% abgeschätzt.

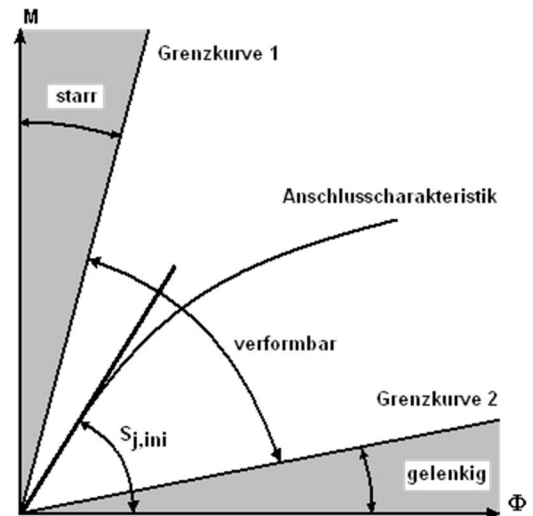
Rotationssteifigkeit

Mit der Anfangssteifigkeit $S_{j,ini}$ kann beurteilt werden, ob die Verbindung als starr, verformbar oder gelenkig charakterisiert werden kann.

Die Verbindung gilt als starr, wenn $S_{j,ini}$ größer als die Grenzkurve 1 ist. In diesem Fall hat die Verformung im Anschluss keinen Einfluss auf die Tragwerksberechnung.

Die Grenzkurven 1 und 2 werden durch die Steifigkeit des angeschlossenen Riegels bezogen auf dessen Länge ermittelt.

Abhängig von der möglichen Anschlussverdrehung ergeben sich Klassifikationen für seitlich unausgesteifte, d.h. verschiebliche und seitlich ausgesteifte Rahmen.



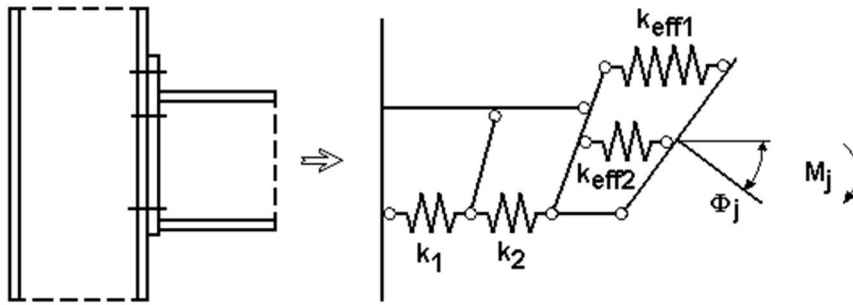
Anschlüsse in verschieblichen Rahmen	
gelenkig	$S_{j,ini} \leq 0,5 \cdot E \cdot I_b / L_b$
verformbar	$0,5 \cdot E \cdot I_b / L_b < S_{j,ini} < 25 \cdot E \cdot I_b / L_b$
starr	$S_{j,ini} \geq 25 \cdot E \cdot I_b / L_b$
Anschlüsse in unverschieblichen Rahmen	
gelenkig	$S_{j,ini} \leq 0,5 \cdot E \cdot I_b / L_b$
verformbar	$0,5 \cdot E \cdot I_b / L_b < S_{j,ini} < 8 \cdot E \cdot I_b / L_b$
starr	$S_{j,ini} \geq 8 \cdot E \cdot I_b / L_b$

E	E-Modul
I_b	Trägheitsmoment eines Trägers
L_b	Systemlänge eines Trägers

Seitlich unverschiebliche Rahmen müssen dabei das Kriterium $K_b / K_c \geq 0,1$ für jedes Stockwerk erfüllen.

K_b	Mittelwert aus allen I_b / L_b aller Träger eines Geschosses
K_c	Mittelwert aus allen I_c / L_c aller Stützen eines Geschosses
mit	
I_c	Trägheitsmoment einer Stütze
L_c	Geschosshöhe einer Stütze

Die Momenten- Rotationskurve der Verbindung ergibt sich entsprechend der Komponentenmethode als Zusammensetzung der einzelnen Kraft- Verformungskurven jeder im Anschluss beteiligten Komponente.



Beispiel einer nicht ausgesteiften Verbindung mit zwei Schraubenreihen

Die Wegfedern jeder einzelnen Komponente i werden durch deren Steifigkeitskoeffizienten k_i beschrieben.

Die Rotationssteifigkeit S_j ergibt sich aus:

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

z Hebelarm,

bei nur einer Schraubenreihe im Zugbereich als Abstand dieser Reihe zum Druckpunkt im Anschluss

bei mehreren Schraubenreihen im Zugbereich als äquivalenter Hebelarm z_{eq}

μ Steifigkeitsverhältnis

k_i Steifigkeitskoeffizient einer Komponente

äquivalenter Hebelarm für alle Schraubenreihen im Zugbereich :

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r} \quad \text{für alle Schraubenreihen } r \text{ im Zugbereich}$$

$k_{eff,r}$ effektiver Steifigkeitskoeffizient der Schraubenreihe r

h_r Abstand der Schraubenreihe r vom Druckpunkt im Anschluss

Steifigkeitsverhältnis μ

$$\mu = 1 \quad \text{wenn } M_{j,SD} \leq \frac{2}{3} \cdot M_{j,Rd}$$

und zur Berücksichtigung der nichtlinearen Verhaltens in der Anschlusscharakteristik

$$\mu = \left(1,5 \cdot M_{j,SD} / M_{j,Rd}\right)^\psi \quad \text{wenn } \frac{2}{3} \cdot M_{j,Rd} < M_{j,SD} \leq M_{j,Rd}$$

mit $\psi = 2,7$ für geschraubte Verbindungen

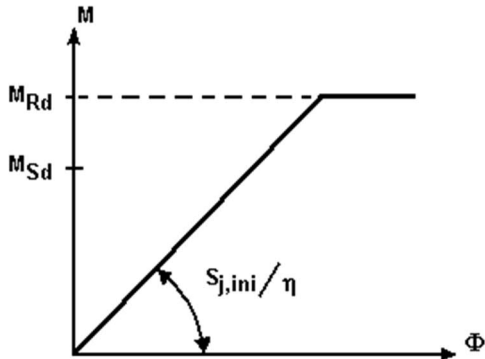
Anfangssteifigkeit $S_{j,ini}$

$$S_{j,ini} = S_j \quad \text{mit dem Steifigkeitsverhältnis } \mu = 1$$

vereinfachte bi-lineare Momenten- Rotationscharakteristik

Die Rotationssteifigkeit S_j darf zur linear-elastischen und elastisch-plastischen Berechnung aus einem vereinfachten Modell der Anschlusscharakteristik entnommen werden:

$$S_{jn} = S_{j,ini} / \eta \quad \text{mit } \eta = 2 \text{ für geschraubte Stirnplatten}$$



Die Steifigkeitskoeffizienten der einzelnen Komponenten

k1 Stützenstegfeld auf Schub (nur Träger-Stützenverbindung)

$$k_1 = \frac{0,38 \cdot A_{vc}}{\beta \cdot z_{eq}}$$

z_{eq} Hebelarm

A_{vc} schubwirksame Fläche der Stütze, siehe entsprechende Komponente

β Übertragungsparameter für Komponentenmethode nach Tab. 5.4 in [1]

Ist das Stützenstegfeld durch eine Diagonalstife verstärkt, wird der Steifigkeitskoeffizient k1 als unendlich groß angenommen.

k2 Stützensteg auf Druck (nur Träger-Stützenverbindung)

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

$b_{eff,c,wc}$ mitwirkende Breite Stützensteg auf Druck

t_{wc} Dicke Stützensteg, bei vorhandener Stegblechverstärkung erhöht sich der Wert zu $1,5 t_{wc}$.

d_c lichte Höhe Stützensteg

Ist der Stützensteg im Druckpunkt mit Rippen verstärkt, wird der Steifigkeitskoeffizient k2 als unendlich groß angenommen.

k3 Stützensteg auf Zug (nur Träger-Stützenverbindung)

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

$b_{eff,t,wc}$ kleinste wirksame Länge der äquivalenten T-Stummel für die beteiligten Schrauben im Zugbereich

t_{wc} Dicke Stützensteg, bei vorhandener Stegblechverstärkung erhöht sich der Wert, siehe entsprechende Komponente

d_c lichte Höhe Stützensteg

k4 Stützenflansch auf Biegung (für eine Schraubenreihe)

$$k_4 = \frac{0,9 \cdot I_{\text{eff}} \cdot t_{\text{fc}}^3}{m^3}$$

I_{eff} kleinste wirksame Länge für diese Schraubenreihe im äquivalenten T-Stummel

t_{fc} Dicke Stützenflansch

m Abstand Schraube zum Steg, siehe Modell der T-Stummel

k5 Stirnplatte auf Biegung

$$k_5 = \frac{0,9 \cdot I_{\text{eff}} \cdot t_p^3}{m^3}$$

I_{eff} kleinste wirksame Länge für diese Schraubenreihe im äquivalenten T-Stummel

t_p Dicke Stirnplatte

m Abstand Schraube zum Steg, siehe Modell der T-Stummel, im überstehenden Teil der Stirnplatte
 $m = m_x$

k10 Schrauben auf Zug

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

A_s Spannungsquerschnitt der Schraube

L_b Dehnlänge der Schraube, entspricht der Klemmlänge zzgl. halber Kopf und Mutterhöhe

k_{eff} Effektiver Steifigkeitskoeffizient einer Schraubenreihe

die Steifigkeitskoeffizienten k_3 , k_4 , k_5 und k_{10} einer Schraubenreihe r lassen sich zusammenfassen:

$$k_{\text{eff},r} = \frac{1}{\frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}}$$

aus diesen ermittelt sich der äquivalente Steifigkeitskoeffizient aller zugbeanspruchten Schraubenreihen r :

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

z_{eq} äquivalenter Hebelarm für alle Schraubenreihen im Zugbereich, siehe Ausführungen zur Rotationssteifigkeit

h_r Abstand der Schraubenreihe r vom Druckpunkt im Anschluss

Klassifizierung nach der Tragfähigkeit

Die Verbindung kann in Abhängigkeit der Momentenwiderstände aus den angeschlossenen Bauteilen als volltragfähig, gelenkig oder teiltragfähig klassifiziert werden.

Eine Verbindung am Stützenkopf (Knieeck) gilt als volltragfähig, wenn

$$M_{j,Rd} \geq \min[M_{b,pl,Rd} \cdot M_{c,pl,Rd}] \text{ erfüllt ist.}$$

Bei einer volltragfähigen Verbindung zwischen zwei Stockwerken (T-Eck) muss $M_{j,Rd} \geq \min[M_{b,pl,Rd} \cdot 2 \cdot M_{c,pl,Rd}]$ eingehalten sein.

$M_{b,pl,Rd}$ plastisches Grenzmoment im Träger

$M_{c,pl,Rd}$ plastisches Grenzmoment der Stütze

Als gelenkig gilt die Verbindung, wenn deren Momentenwiderstand $M_{j,Rd}$ kleiner oder gleich $\frac{1}{4}$ des Momentenwiderstands für Volltragfähigkeit ist.

Die dargestellten Bemessungsregeln

Alle anderen Verbindungen werden als teiltragfähig angesehen.

Hinweis: Zur linear-elastischen Berechnung ist eine Klassifizierung der Verbindung nach ihrer Steifigkeit ausreichend.

Zur elastisch-plastischen Berechnung ist eine Klassifizierung nach Steifigkeit und auch nach Tragfähigkeit erforderlich.

Träger-Stützenverbindung und Stirnplattenstoß mit vertikal vierreihiger Schraubenanordnung

Die dargestellten Bemessungsregeln werden in der Norm nur für vertikal zweireihige Schraubenanordnung angegeben.

Eine Anwendung der Komponentenmethode auf Verbindungen mit vertikal vierreihiger Schraubenanordnung ist Teil verschiedener Forschungsprojekte.

In unseren Programmen wird das Modell aus dem AiF Projekt [4] und der Veröffentlichung von Wagenknecht [5] als AiF/GW-Modell umgesetzt. Es orientiert sich an dem in der Norm entwickelten Modell und erweitert dieses auf eine vertikal vierreihige Schraubenanordnung, die wiederum horizontal um den äußeren gezogenen Gurt im Anschluss gruppiert, angeordnet ist.

Modell der T-Stummel (vertikal 4-reihig)

Im AiF/GW-Modell werden die Versagensarten zwischen den T-Stummeln im Überstand und im inneren unter einer Steife unterschieden.

Grenztugfähigkeiten F_{tRd} im Überstand

Für die Grenztugfähigkeiten im Überstand gelten die Annahmen aus dem Modell der vertikal 2-reihigen Schraubenanordnung. Dder Überstand wird 90° gedreht angenommen mit dem Gurt als Steg des äquivalenten T-Stummels. Also entsprechend DIN EN 1993-1-8:

Versagensart 1 : vollständiges Fließen der Gurte

$$F_{t1Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1Rd}}{m}$$

mit $M_{pl1Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und l_{eff1} wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1
 t_f Dicke Stummelflansch

durch Verwendung von Futterplatten kann die Grenzzugkraft F_{t1Rd} erhöht werden:

$$F_{t1Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1Rd} + 2 \cdot M_{bpRd}}{m}$$

mit $M_{bpRd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,1} \cdot t_{bp}^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und l_{eff1} wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1
 t_{bp} Dicke Futterplatte

Versagensart 2 : Schraubenversagen und Fließen der Gurte

$$F_{t2Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl2Rd} + n \cdot \sum B_{tRd}}{m + n}$$

mit $M_{pl2Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,2} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und l_{eff2} wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 2
 t_f Dicke Stummelflansch

B_{tRd} Minimum aus Durchstanztragfähigkeit B_{pRd} und Grenzzugkraft F_{tRd} der Schraube aus der Schraubenstatik

$\sum B_{tRd}$ Summe B_{tRd} aller Schrauben im T-Stummel

Versagensart 3 : Schraubenversagen

$$F_{t3,Rd} = \sum B_{t,Rd}$$

mit $\sum B_{t,Rd}$ siehe Versagensart 2

Versagensart 4 : Plattenversagen ohne Abstützkräfte

$$F_{t4,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl1,Rd}}{m}$$

mit $M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot \sum l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und l_{eff1} wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1

t_f Dicke Stummelflansch

Eine Untersuchung auf Abstützkräfte erfolgt in Analogie zum Modell der vertikal zweireihigen Schraubenanordnung.

Alternative Methode zur Berechnung Versagensart 1:

$$F_{t1,Rd} = \frac{(8 \cdot n - 2 \cdot ew) \cdot M_{pl1,Rd}}{2 \cdot m \cdot n - ew \cdot (m + n)}$$

mit $ew = dw / 4$

dw Durchmesser Unterlegscheibe bzw. Breite Schraubenkopf/-mutter. Für Schrauben mit FK 4.6 und 5.6 nimmt das Programm wegen der fehlenden Unterlegscheibe die Breite des Schraubenkopfes an (Eckmaß).

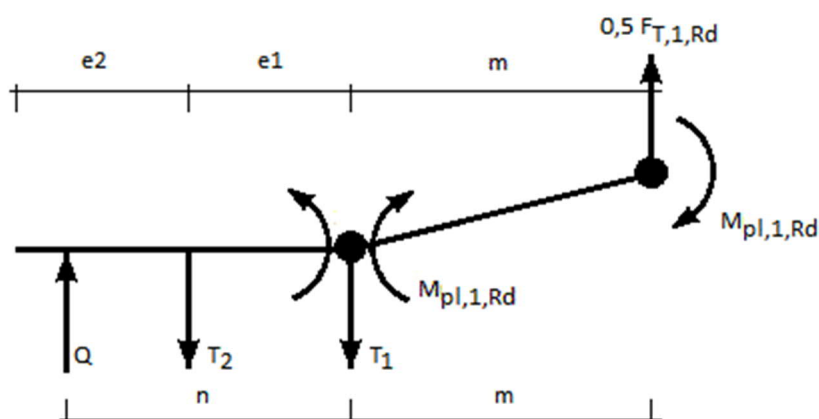
Bei Verwendung von Futterplatten bestimmt sich die Grenzzugkraft $F_{t1,Rd}$ aus:

$$F_{t1,Rd} = \frac{(8 \cdot n - 2 \cdot ew) \cdot M_{pl1,Rd} + 4 \cdot n \cdot M_{bp,Rd}}{2 \cdot m \cdot n - ew \cdot (m + n)}$$

Grenztugfähigkeiten $F_{t,Rd}$ für die inneren Schraubenreihen

AiF/GW-Modell

Versagensart 1 : vollständiges Fließen der Gurte



$$F_{t1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1,Rd}}{m}$$

mit $M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot \sum leff_{,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und $leff1$ wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1

t_f Dicke Stummelflansch

$n = e_1 + e_2 \leq 1,25 \cdot m$

Durch Verwendung von Futterplatten kann die Grenzzugkraft $F_{t1,Rd}$ erhöht werden:

$$F_{t1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1,Rd} + 2 \cdot M_{bp,Rd}}{m}$$

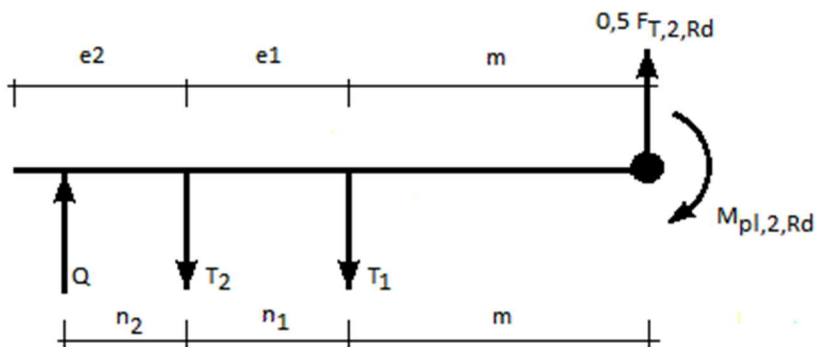
mit $M_{bp,Rd} = 0,25 \cdot \sum leff_{,1} \cdot t_{bp}^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und $leff1$ wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1

t_{bp} Dicke Futterplatte

$n = e_1 + e_2 \leq 1,25 \cdot m$

Versagensart 2 : Schraubenversagen und Fließen der Gurte



$$F_{t2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl2,Rd} + n \cdot \sum B_{t,Rd} \cdot (3,6 - 1,6 \cdot \frac{n_1}{n})}{m+n}$$

$$F_{t2,Rd} \leq 3,6 \cdot \sum B_{t,Rd}$$

mit $M_{pl2,Rd} = 0,25 \cdot \sum leff_{,2} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$

und $leff2$ wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 2

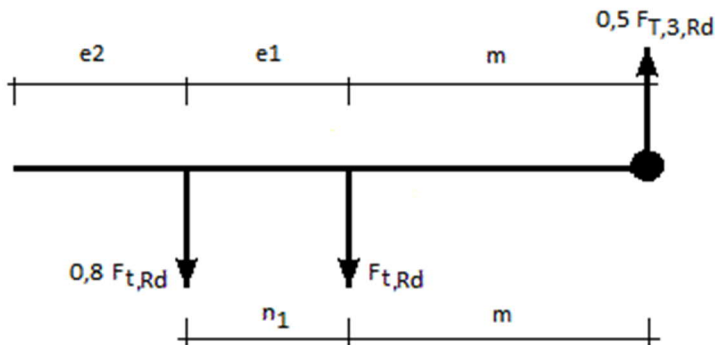
t_f Dicke Stummelflansch

$B_{t,Rd}$ Minimum aus Durchstantragfähigkeit $B_{p,Rd}$ und Grenzzugkraft $F_{t,Rd}$ der Schraube aus der Schraubenstatik

$\sum B_{t,Rd}$ Summe $B_{t,Rd}$ aller Schrauben im T-Stummel

$n = n_1 + n_2$ und $n_2 \leq 1,25 \cdot m$

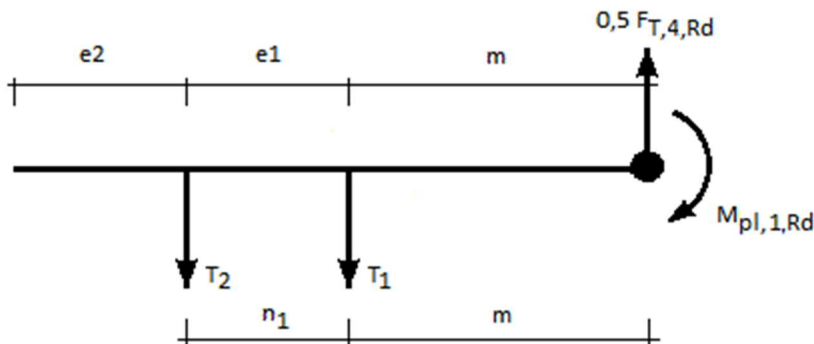
Versagensart 3 : Schraubenversagen



$$Ft_{3,Rd} = 3,6 \cdot \sum Bt_{Rd}$$

mit $\sum_{n_1} Bt_{Rd}$ siehe Versagensart 2
 n_1 e_1

Versagensart 4 : Plattenversagen ohne Abstützkräfte



$$Ft_{4,Rd} = \frac{3,6 \cdot M_{pl1,Rd}}{m}$$

mit $M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot \sum leff,1 \cdot t_f^2 \cdot fy / \gamma_{M0}$

und $leff1$ wirksame Länge des T-Stummels für Versagensart 1

t_f Dicke Stummelflansch

n_1 e_1

Eine Untersuchung auf Abstützkräfte erfolgt in Analogie zum Modell der vertikal zweireihigen Schraubenanordnung.

Alternative Methode zur Berechnung Versagensart 1:

$$Ft_{1,Rd} = \frac{(8 \cdot n - 2 \cdot ew) \cdot M_{pl1,Rd}}{2 \cdot m \cdot n - ew \cdot (m + n)}$$

mit $ew = dw / 4$

dw Durchmesser Unterlegscheibe bzw. Breite Schraubenkopf/-mutter. Für Schrauben mit FK 4.6 und 5.6 nimmt das Programm wegen der fehlenden Unterlegscheibe die Breite des Schraubenkopfes an (Eckmaß).

Bei Verwendung von Futterplatten bestimmt sich die Grenzzugkraft F_{t1Rd} aus:

$$F_{t1Rd} = \frac{(8 \cdot n - 2 \cdot ew) \cdot M_{pl1Rd} + 4 \cdot n \cdot M_{bpRd}}{2 \cdot m \cdot n - ew \cdot (m + n)}$$

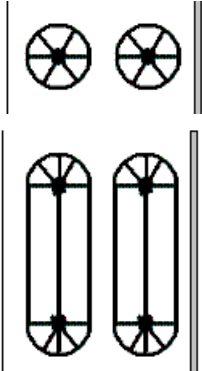
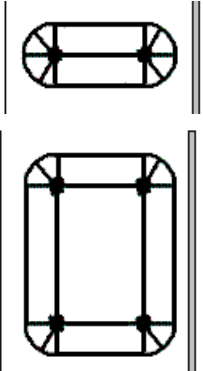
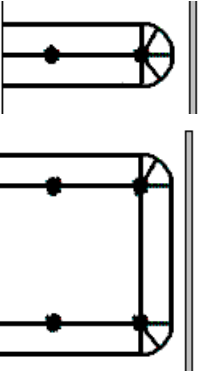
Wirksame Längen l_{eff} der T-Stummel

Die wirksamen Längen im Ersatzmodell der T-Stummel entsprechen den Längen der Fließlinien zur jeweiligen Versagensart und können von den geometrischen Längen der Verbindung abweichen. Die Fließlinienlänge einer Schraube bestimmt sich durch deren Lage: randnah, neben einer Aussteifung, am Anfang/Ende einer Gruppe bzw. im inneren einer Gruppe.

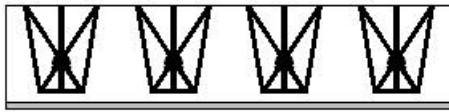
Es wird zwischen kreisförmigen und nicht kreisförmigen Mustern der Fließlinien unterschieden.

l_{eff} der Versagensart 2 entspricht den nicht kreisförmigen, l_{eff} der Versagensart 1 entspricht der kleineren Länge aus kreisförmigen und nicht kreisförmigen Mustern. Effektive Längen von T-Stummeln mit mehreren Schraubenreihen setzen sich aus der Summe der Längen jeder Einzelreihe bezüglich deren Lage zusammen.

Für die vertikale Gruppierung der kreisförmigen Fließmuster $l_{eff,cp}$ werden drei Typen eingeführt:

Typ 1 die vertikalen Reihen wirken einzeln	Typ2 die benachbarten vertikalen Reihen wirken gemeinsam	Typ3 die benachbarten Gruppen wirken gemeinsam bis zum zum freien Rand
		

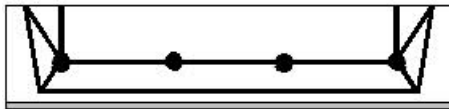
Nichtkreisförmige Muster leff,nc im Überstand



$$16m_x + 5e_x$$



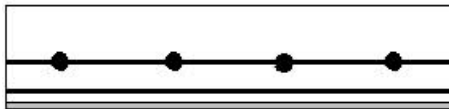
$$8m_x + 2,5e_x + 2e_1$$



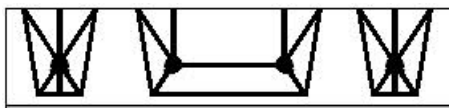
$$4m_x + 1,25e_x + 2e_1 + 2e_2$$



$$4m_x + 1,25e_x + 2e_1 + 2e_2$$



$$b_p = w + 2e_1 + 2e_2$$

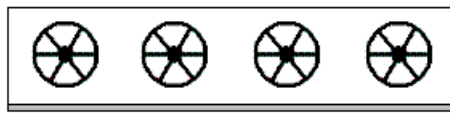


$$12m_x + 3,75e_x + w$$

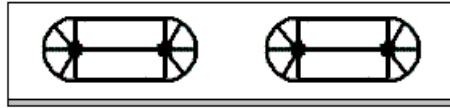


$$8m_x + 2,5e_x + w + 2e_2$$

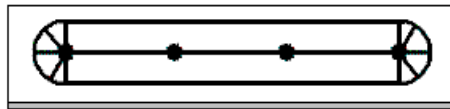
Kreisförmige Muster leff,cp im Überstand



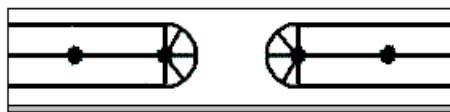
$$8\pi m_x$$



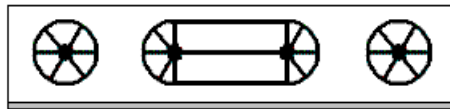
$$4\pi m_x + 4e_1$$



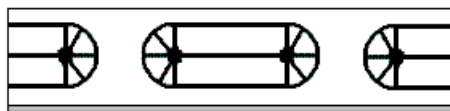
$$2\pi m_x + 2w + 4e_1$$



$$2\pi m_x + 4e_1 + 4e_2$$



$$6\pi m_x + 2w$$



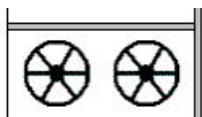
$$4\pi m_x + 4e_2 + 2w$$

Nichtkreisförmige Muster innen leff,nc an Steife

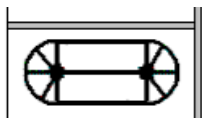


$$\alpha m_1$$

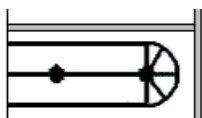
Kreisförmige Muster innen leff,cp an Steife



$$4\pi m_1$$



$$2\pi m_1 + 2e_1$$



$$\pi m_1 + 2e_1 + 2e_2$$

Nichtkreisförmige Muster innen leff,nc im nicht ausgesteiften Bereich

einzeln	einzeln am freien Rand
$4m_1 + 1,25(e_1 + e_2)$	$2m_1 + 0,625(e_1 + e_2) + e_{Rand}$
Gruppe	Gruppe am freien Rand
$4m_1 + 1,25(e_1 + e_2) + p$	$2m_1 + 0,625(e_1 + e_2) + p + e_{Rand}$

Kreisförmige Muster innen leff,cp im nicht ausgesteiften Bereich

einzeln Typ 2	einzeln Typ 2	einzeln Typ 3
$4\pi m_1$	$2\pi m_1 + 2e_1$	$\pi m_1 + 2e_1 + 2e_2$
Gruppe Typ 1	Gruppe Typ 2	Gruppe Typ 3
$4\pi m_1 + 4p$	$2\pi m_1 + 2p + 2e_1$	$\pi m_1 + p + 2e_1 + 2e_2$
Gruppe Typ 1 am freien Rand	Gruppe Typ 2 am freien Rand	Gruppe Typ 3 am freien Rand
$2\pi m_1 + 4p + 4e_{Rand}$	$\pi m_1 + e_1 + 2p + 2e_{Rand}$	$0,5\pi m_1 + e_1 + e_2 + p + e_{Rand}$

Elastische Begrenzung für ausreichende Verformbarkeit im Anschluss

Die Begrenzung erfolgt analog zum zweireihigen Modell:

ist $F_{t,Rd}$ einer vorher berechneten Schraubenreihe j (also $j < i$) größer als $3,8 \cdot B_{t,Rd}$, so wird $F_{t,Rd}$ der Schraubenreihe i durch $F_{t,Rd} \leq F_{t,Rd} \cdot h_j / h_i$ begrenzt, mit

h_j Abstand Schraubenreihe j zum Druckpunkt

h_i Abstand Schraubenreihe i zum Druckpunkt

Komponente Trägersteg auf Zug $F_{t,wb,Rd}$ und Komponente Stützensteg auf Zug $F_{t,wc,Rd}$

Die Berechnung erfolgt identisch zum zweireihigen Modell.

Steifigkeitskoeffizienten der einzelnen Komponenten

k_{10} Schrauben auf Zug

$$k_{10} = \frac{3,2 \cdot A_s}{L_b}$$

A_s Spannungsquerschnitt der Schraube

L_b Dehnlänge der Schraube, entspricht der Klemmlänge zzgl. halber Kopf und Mutterhöhe

Die Berechnung aller anderen Steifigkeitskoeffizienten erfolgt identisch zum zweireihigen Modell.

Literatur

- [1] DIN EN 1993 Teil 1-8
- [2] DIN EN 1993 Teil 1-1
- [3] Stahlbau Kalender 2005; 7. Jahrgang; Ernst & Sohn, Berlin 2005.
- [4] Forschungsbericht 3/2009: Entwicklung eines Bemessungsmodells für geschraubte, momententragfähige Kopfplattenverbindungen mit 4 Schrauben in einer Schraubenreihe auf der Grundlage der prEN 1993-1-1:2003; Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt, Düsseldorf
- [5] WAGENKNECHT: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 3 Komponentenmethode, 2. Auflage; Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich 2017