

4H-EC3FS

biegesteifer Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild

Detailinformationen

Schraubenbild

Seite erweitert Februar 2025

• Kontakt • Programmübersicht • Bestelltext 

Infos auf dieser Seite

... als pdf 

- Eingabeoberfläche 
- Allgemeines Stirnplattenstoß 
- Rechenlaufsteuerg. / Material 
- Stoßgeometrie 
- FEM-Parameter 
- Nachweise im Brandfall 
- Schnittgrößen 
- Ergebnisübersicht 
- Nachweis Schrauben 
- Spannungsnachweis Platten 
- Schweißnahtnachweis 
- Querschnittsnachweis 
- mehrteilige Querschnitte 
- Ergebnisse / Verifikation 
- Stahlsorten 
- Ausdrucksteuerung 
- nationale EC-Anhänge 

Eingabeoberfläche



EC 3, biegesteifer Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild

Mit dem Programm 4H-EC3FS, wird ein biegesteifer Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild unter ein- oder zweiachsiger Belastung nach EC 3 nachgewiesen.

4H-EC3 - freier Stirnplattenstoß [Position 56: Freier Stirnplattenstoß]

Standard EN 1993-1-1, 6.2 Brandfall EN 1993-1-2, 4.2

Materialsicherheit genormt

Beanspruchbarkeit von Querschnitten γ_{M0} 1.00

Beanspruchbarkeit von Verbindungsmitteln γ_{M2} 1.25

einheitliche Stahlsorte
 Stahlsorte Vorgabe
 Kennung

einheitliche Schrauben
 Schraubengröße Vorgabe
 Festigkeitsklasse Vorgabe
 Passschraube
 Senkschraube
 Schraubengewinde in der Scherfuge
 Schraubenschaft in der Scherfuge

umlaufende Schweißnaht
 Kehlnaht
 Stumpfnah
 wirksame Nahtdicke a mm

Nachweise

nur Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch
 Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch und Tragfähigkeitsnachweise
 Schnittgrößenermittlung (FEM) und Tragfähigkeitsnachweise plastisch

Spannungsnachweis der Stirnplatte
 Verfahren elastisch plastisch
 Nachweis der Kontaktpressungen

Querschnittsnachweis des Trägers
 Verfahren elastisch plastisch

Nachweis der Schweißnähte
 Nachweis mit dem richtungsbezogenen Verfahren
 Nachweis mit dem vereinfachten Verfahren

Nachweis der Schrauben
 Schraubenabstände überprüfen

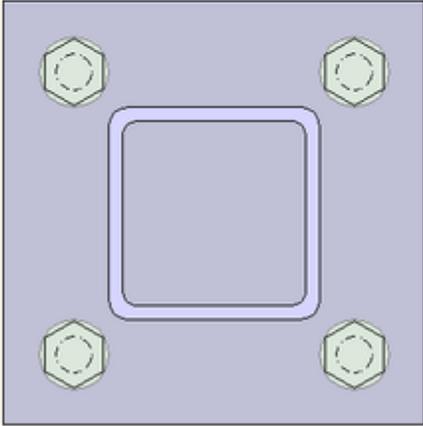


Bild vergrößern 

Die zugehörigen Eingabeparameter werden in eigenen Registerblättern verwaltet, die über folgende Symbole die dahinter liegende Parameterauswahl kenntlich machen.



Rechenlaufsteuerung / Material

Im ersten Registerblatt wird der Ablauf der Berechnung festgelegt.

Außerdem können die Teilsicherheitsbeiwerte, die Stahlgüte und die Schraubenparameter vorgegeben werden. Weiterhin können die zu führenden Nachweise ausgewählt werden.

Der Querschnitt wird zur Info maßstäblich am Bildschirm dargestellt.



Geometrie

Im zweiten Registerblatt werden die Stirnplatte und der Trägerquerschnitt festgelegt.

Außerdem wird die Anordnung von Profil und Schrauben auf dem Stirnblech beschrieben.

Der Querschnitt wird zur visuellen Kontrolle maßstäblich am Bildschirm dargestellt.



Berechnungseigenschaften / Ausgabeoptionen zur FEM

Im dritten Registerblatt werden Parameter für die FE-Berechnung festgelegt.

Außerdem können Ausgabeoptionen zu den Berechnungsergebnissen der FEM definiert werden.

Der Querschnitt wird zur Kontrolle maßstäblich am Bildschirm dargestellt.



Parameter für den Brandfall

Die zur Berechnung der Temperatur im Stahlquerschnitt benötigten Parameter werden im vierten Registerblatt festgelegt.



Bemessungsschnittgrößen

Die Schnittgrößen werden im fünften Registerblatt festgelegt und können entweder 'per Hand' eingegeben oder aus einem 4H-Stabwerksprogramm importiert werden.

Die Schnittgrößen beziehen sich auf den Schwerpunkt und das Koordinatensystem des Trägerprofils (x-y-z bzw. l-m-n).



Ergebnisübersicht

Im sechsten Registerblatt werden die Ergebnisse (Ausnutzungen) lastfallweise und detailliert im Überblick dargestellt.



nationaler Anhang

Weiterhin ist zur vollständigen Beschreibung der Berechnungsparameter der dem Eurocode zuzuordnende nationale Anhang zu wählen.

Über den **NA-Button** wird das entsprechende Eigenschaftsblatt aufgerufen.



Ausdrucksteuerung

Im Eigenschaftsblatt, das nach Betätigen des **Druckeinstellungs**-Buttons erscheint, wird der Ausgabeumfang der Druckliste festgelegt.



Druckliste einsehen

Das Statikdokument kann durch Betätigen des **Visualisierungs**-Buttons am Bildschirm eingesehen werden.



Ausdruck

Über den **Drucker**-Button wird in das Druckmenü gewechselt, um das Dokument auszudrucken. Hier werden auch die Einstellungen für die Visualisierung vorgenommen.



Planbearbeitung

Über den **Pläne**-Button wird das **pcae**-Programm zur Planbearbeitung aufgerufen.

Der aktuelle Querschnitt wird im **pcae**-Planerstellungsmodule dargestellt, kann dort

weiterbearbeitet, geplottet oder im DXF-Format exportiert werden.



Onlinehilfe

Über den [Hilfe](#)-Button wird die kontextsensitive Hilfe zu den einzelnen Registerblättern aufgerufen.



Eingabe beenden

Das Programm kann mit oder ohne Datensicherung verlassen werden.

Bei Speichern der Daten wird die Druckliste aktualisiert und in das globale Druckdokument eingefügt.

Allgemeines zum Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild

Stöße werden z.B. benötigt, um Trägerprofile zu verlängern oder Ecken auszubilden. Eine Konstruktion ist dann besonders günstig, wenn sie keine Zwängungen hervorruft und leicht zu montieren ist.

Dabei haben sich Stirnplattenstöße bewährt, bei denen Stahlbleche ggf. schon im Fertigungswerk an die Enden des zu verbindenden Profils angeschweißt werden, die dann vor Ort auf der Baustelle verschraubt werden können.

Im Stahl-Hallenbau werden häufig große Doppel-T-Profile verwendet, die auf Grund der Lieferlängen der Profile gestoßen werden müssen.

Da von einer größtenteils einachsigen Belastung der Träger ausgegangen wird, ist die Berechnung dieser biegesteifen Träger-Träger-Verbindungen in der Bemessungsnorm DIN EN 1993-1-8 (hier: EC 3) explizit beschrieben. Es wird die Komponentenmethode (s. EC 3, Kap. 6) auf eine definierte Anschlusskonfiguration (s. EC 3, Bild 1.2) angewendet.

Andere Anschlüsse (z.B. zweiachsig belastete) können damit nicht bemessen werden.

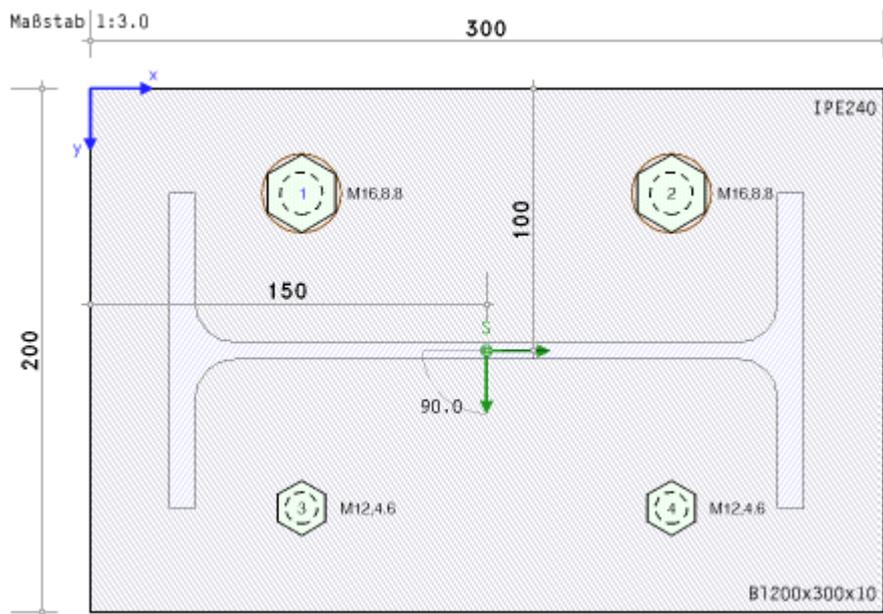
Die Komponentenmethode ist Grundlage des Programms [4H-EC3BT](#), biegesteifer Trägeranschluss, das auch Trägerstöße bemisst (s. [Handbuch](#) zu [4H-EC3BT](#)).

Voraussetzungen zur Anwendung der Komponentenmethode sind

- der Träger ist ein Doppel-T-Profil
- die Belastung erfolgt einachsig über die starke Achse
- das Schraubenbild ist bzgl. der Trägerachse symmetrisch
- in einer Schraubenreihe (d.h. symmetrisch zum Trägersteg) befinden sich zwei oder vier Schrauben
- im Überstand der Stirnplatte kann maximal eine Schraubenreihe berücksichtigt werden

Es ist offensichtlich, dass eine Vielzahl von Verbindungen aus dem Stahl- und Metallbau mit dieser Methode nicht berechnet werden können (z.B. Geländerholme an Balkonen oder Treppen, Befestigungen von Vordächern oder Fassaden, Rohrverbindungen).

Daher wird mit dem vorliegenden Programm [4H-EC3FS](#), biegesteifer Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild, ein zur EC3-Familie von [pcae](#) passendes Modul angeboten, das basierend auf der Finite-Elemente-Methode die Beanspruchung einer beliebig berandeten Stirnplatte mit beliebig angeordneten Schrauben unter räumlicher Belastung durch ein typisiertes Trägerprofil ermittelt.



Modellierung des Anschlusses

Das Stirnblech wird als gebettete 2D-Finite-Element-Platte ausgebildet, worin die Schrauben als Federlager integriert sind.

Der Bettungsmodul der Platte ist konstant und wirkt nur bei Druckbelastung (Zugausfall). Er sollte der Steifigkeit der gegengeschraubten zwei Stirnplatten entsprechen (wird bei Bedarf programmintern berechnet), d.h.

$$c_b = 2 \cdot E_{\text{Platte}} / t_{\text{Platte}} \quad \text{in kN/cm}$$

Die Platte wird entweder linear-elastisch oder plastisch berechnet.

Bei plastischer Berechnung wird die aufnehmbare Zug- oder Druckspannung der Stirnplatte nicht größer als die mit dem Auslastungsfaktor multiplizierte maximale Spannung, d.h.

$$\text{zul } f_{y,pl} = f_{y,f} \cdot f_{yd}$$

Analog zu den Schrauben (s.u.) kann die Ausnutzung der plastischen Grenzkraft beschränkt werden.

Der entsprechende Auslastungsfaktor wird programmintern auf $f_{y,f} = 0.95$ gesetzt, d.h. dass die Stirnplatte zu maximal 95% ausgenutzt werden kann.

Nach erfolgreicher Berechnung der Stirnplatte wird überprüft, ob die maximale Randdehnung $\max. \epsilon_{y,pl}$ eingehalten ist.

Die Dichte des FE-Netzes (FEM-Beschreibung s.u.) kann entweder automatisch ermittelt oder vom Anwender vorgegeben werden.

Bei programminterner Berechnung der Elementgrößen werden die geometrischen Abmessungen der Stirnplatte, des Trägerprofils sowie die Abstände der Schrauben berücksichtigt.

Die Schraubenlager können linear-elastisch oder plastisch in die Berechnung eingehen und wirken nur bei Zugbeanspruchung (Druckausfall).

Ihre Federsteifigkeiten werden aus den geometrischen Eigenschaften der Einzelschrauben abgeleitet, d.h.

$$c_f = E_{\text{Schraube}} \cdot A_{\text{Schraube}} / L \quad \text{mit} \quad L = 2 \cdot t_{\text{Platte}} + 2 \cdot t_p + 0.5 \cdot (t_k + t_m)$$

t_p Dicke der Unterlegscheibe

t_k Schraubenkopfhöhe

t_m Mutterhöhe

Der E-Modul der Schrauben wird angenommen zu $E_{\text{Schraube}} = 210.000 \text{ N/mm}^2$ (bei Edelstahlschrauben $E_{\text{Schraube}} = 200.000 \text{ N/mm}^2$), die Querschnittsfläche A_{Schraube} entspricht dem Spannungsquerschnitt der Schraube.

Bei plastischer Berechnung der Schrauben wird die aufnehmbare Zugkraft einer Schraube nicht größer als die mit dem Auslastungsfaktor multiplizierte maximale Schraubenzugkraft, d.h.

$$\text{zul } F_{t,pl} = f_{t,f} \cdot F_{t,Rd} \quad \text{mit} \quad F_{t,Rd} = 0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}$$

In Analogie zu EC 3-1-8, 6.2.7.2(9), kann die Zugausnutzung der plastischen Grenzkraft beschränkt werden.

Der entsprechende Auslastungsfaktor wird programmintern auf $f_{t,f} = 0.95$ gesetzt, d.h. dass die Schrauben zu maximal 95% ausgenutzt werden können.

Nach erfolgreicher Berechnung der Schraubenkräfte wird überprüft, ob die zulässige Bruchdehnung $\epsilon_{t,f}$ der Schraube eingehalten ist.

Schrauben mit Vorspannung

Schrauben der Größen M12 bis M30 können entweder mit normaler oder großer Schlüsselweite ausgeführt werden. Schrauben mit großer Schlüsselweite gelten programmintern als vorgespannt.

Die Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 (HV) lassen eine kontrollierte volle Vorspannung zu mit (s. EC 3-1-8, 3.9.1(2))

$$F_{p,C} = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

Im Programm 4H-EC3FS wird jedoch bei HV-Schrauben die Regelvorspannkraft

$$F_{p,C^*} = 0.7 \cdot f_{yb} \cdot A_s$$

(s. EC 3-1-8, NA-DE, NDP zu 3.4.2(1)) angesetzt.

Schrauben der anderen Festigkeitsklassen werden mit 50% der Regelvorspannkraft z.B. gegen Lösen gesichert.

Die Vorspannung bewirkt eine zusätzliche Druckbelastung des Stirnblechs im Bereich der Unterlegscheiben, die als äußere Last in der FE-Berechnung berücksichtigt wird.

Nach erfolgreicher Berechnung der Schraubenkräfte wird überprüft, ob die zulässige Bruchdehnung $\epsilon_{t,f}$ der Schraube eingehalten ist.

Lastaufbringung

Die Schnittgrößen wirken im Schwerpunkt des Trägerquerschnitts und werden über Schweißnähte und ggf. Druckkontakt als Spannungen auf die Stirnplatte übertragen.

Programmintern werden die elastischen Spannungen in den Querschnittsblechen ermittelt und als Trapezlasten auf die Platte aufgebracht.

Zur numerischen Stabilisierung wird der belastete Plattenbereich verstärkt, so dass auch die Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben des Trägerquerschnitts gestützt ist.

Finite-Elemente-Methode

Die FE-Methode ist ein anerkanntes Näherungsverfahren zur Lösung von Randwertaufgaben im Ingenieurwesen.

Die Lösung wird nicht geschlossen berechnet, sondern in Teilbereichen, den finiten Elementen, durch einfachere Ansatzfunktionen angenähert.

Im Programm 4H-EC3FS wird die Kirchhoff-Theorie für dünne Platten mit rechteckigen DKQ-Plattenelementen (*discrete Kirchhoff quadrilateral plate element*: 4 Knoten mit je 3 Freiheitsgraden: 1 Verschiebung, 2 Verdrehungen) verwendet. Das DKQ-Element ist eins der Standardelemente zur Lösung von Plattenproblemen.

Die Ansatzfunktionen des DKQ-Elements über die Elementkanten sind für die Verschiebung kubisch, für die Verdrehungen um die lange Kante linear. Die Momente entlang der Kanten werden daher linear, die Querkräfte konstant angenähert.

Für einen glatten Schnittgrößenverlauf werden die Ergebnisse eines Elements aus den umliegenden Elementen gemittelt.

Als Berechnungsparameter sind neben den geometrischen Daten die Materialwerte des Stirnblechs (Elastizitätsmodul E_p , Dicke t_p , Querdehnzahl μ und Bettungsmodul c_b) und der Schrauben (Federsteifigkeit c_f , Vorspannkraft $F_{p,C}$) erforderlich.

Auf Grund des nichtlinearen, von der Belastung abhängigen Verhaltens der Stirnplattenbettung (keine Bettung in abhebenden Plattenbereichen) und der Schraubenzugkräfte (keine Federwirkung in gedrückten Bereichen) sollte die Elementdichte für die Approximationsgenauigkeit nicht zu grob gewählt werden.

Ebenso beeinflusst die Toleranzgrenze die Genauigkeit der Rechenergebnisse positiv und die Rechenzeit negativ.

Nachweise

Bei elastischer Berechnung der Stirnplatte kann das Nachweisverfahren 'elastisch' oder 'plastisch' gewählt werden (Ausnutzung U_σ), wobei die Schnittgrößen (Plattenmomente m_{xx} , m_{xy} , m_{yy} und -querkräfte q_x , q_y) nach der Elastizitätstheorie ermittelt werden.

Die Kontaktpressungen (Druckspannungen positiv) b_z der Stirnplatten gegeneinander werden elastisch nachgewiesen (Ausnutzung U_b).

Mit Hilfe der FEM werden die Zugkräfte F_t und die Dehnungen w_t der Schrauben ermittelt. Da die Dehnungen ϵ_{wt} die zulässige Bruchdehnung ϵ nicht überschreiten dürfen, ist der Anschluss nicht nachweisbar, wenn die

ub

entsprechende Ausnutzung $U_{wt} > 1$ ist.

Ist ein zulässiger Spannungszustand der Verbindung erreicht, werden die Zugkräfte in den Schrauben in Kombination mit den einwirkenden Querkräften und Torsionsmomenten gegen Zug/Durchstanzen (Ausnutzung U_{tp}), Abscheren mit Zug (Ausnutzung U_{vt}) und Lochleibung (Ausnutzung U_b) nachgewiesen.

Zusätzlich kann der Trägerquerschnitt an der Anschlussstelle elastisch oder plastisch nachgewiesen werden (s. EC 3-1-1, 6.2). Die plastische Tragreserve sollte jedoch nur in Sonderfällen ausgenutzt werden, da die Lastübertragung der Schnittgrößen vom Träger in das Stirnblech über den elastischen Spannungszustand erfolgt.

Das Modell geht davon aus, dass die gesamte Belastung des Trägers über die umlaufenden Schweißnähte (Kehl- oder Stumpfnähte) an das Stirnblech abgegeben wird (keine Druckkraftübertragung durch das Querschnittsprofil). Der Nachweis kann mit dem richtungsbezogenen oder dem vereinfachten Verfahren (s. EC 3-1-8, 4.5.3) durchgeführt werden.

Voraussetzungen

- Trägerprofil und Schrauben müssen sich vollständig auf der Stirnplatte befinden
- Öffnungen müssen sich ebenfalls vollständig auf der Stirnplatte befinden
- die Schnittgrößen sind auf das Koordinatensystem der *Statik* im Trägerschwerpunkt bezogen
- Aussteifungen als ergänzende Profilelemente können nicht berücksichtigt werden

Rechenlaufsteuerung / Material



im Register 1 befinden sich die Angaben zur Rechenlaufsteuerung und der allgemeinen Materialbeschreibung.

Standard EN 1993-1-1, 6.2 Brandfall EN 1993-1-2, 4.2

Materialsicherheit genormt

Beanspruchbarkeit von Querschnitten γ_{M0} 1.00

Beanspruchbarkeit von Verbindungsmitteln γ_{M2} 1.25

einheitliche Stahlorte

Stahlsorte Vorgabe

Kennung

umlaufende Schweißnaht

Kehlnaht

Stumpfnah

wirksame Nahtdicke a mm

einheitliche Schrauben

Schraubengröße Vorgabe

Festigkeitsklasse Vorgabe

Passschraube

Senkschraube

Schraubengewinde in der Scherfuge

Schraubenschaft in der Scherfuge

Nachweise

nur Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch

Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch und Tragfähigkeitsnachweise

Schnittgrößenermittlung (FEM) und Tragfähigkeitsnachweise plastisch

Spannungsnachweis der Stirnplatte

Verfahren elastisch plastisch

Nachweis der Kontaktpressungen

Querschnittsnachweis des Trägers

Verfahren elastisch plastisch

Nachweis der Schweißnähte

Nachweis mit dem richtungsbezogenen Verfahren

Nachweis mit dem vereinfachten Verfahren

Nachweis der Schrauben

Schraubenabstände überprüfen

Bild vergrößern



Allgemeines

Im Programm 4H-EC3FS können die Eingabedaten über die Copy-Paste-Funktion von einem Bauteil in ein anderes Bauteil desselben Typs exportiert werden.

▷ Daten exportieren

▷ Daten importieren

Dazu ist der aktuelle Datenzustand im abgebenden Bauteil über den Button **Daten exportieren** in die Zwischenablage zu kopieren und anschließend über den Button **Daten importieren** aus der Zwischenablage in das aktuell geöffnete Bauteil zu übernehmen.

Diese Funktionalität ermöglicht es außerdem, die Eingabedaten eines Trägerstoßes aus dem **pcae**-Programm 4H-EC3BT, Biegesteifer Trägeranschluss, in das aktuelle Programm zu übertragen.

▷ Daten aus 4H-EC3BT importieren

▷ Daten nach 4H-EC3SA exportieren

Die Daten können **nicht** zurücktransportiert werden.

Umgekehrt können die aktuellen Eingabedaten zur detaillierten Untersuchung der Schweißnähte in das **pcae**-Programm 4H-EC3SA, Schweißnahtanschluss exportiert werden.

Die Berechnung erfolgt entweder bei Normaltemperatur für die ständige und veränderliche Bemessungssituation oder bei Hochtemperaturbelastung im Brandfall für die außergewöhnliche Bemessungssituation.

Standard EN 1993-1-1, 6.2

Brandfall EN 1993-1-2, 4.2

Materialsicherheitsbeiwerte

Im Programm 4H-EC3FS werden für den Nachweis von Trägerstößen nach EC 3-1-1 und EC 3-1-8 folgende Materialsicherheitsbeiwerte herangezogen

Materialsicherheit (genormt)

Beanspruchbarkeit von Querschnitten γ_{M0} 1.00

Beanspruchbarkeit von Verbindungsmitteln γ_{M2} 1.25

Im Brandfall gilt folgender Sicherheitsbeiwert

Materialsicherheit (genormt)

Beanspruchbarkeit von Bauteilen im Brandfall $\gamma_{M,fi}$ 1.00

Die Werte können entweder den entsprechenden Normen (s. Nationaler **Anhang**) entnommen oder vom Anwender vorgegeben werden.

Stahlsorte

Stirnblech und Trägerprofil können eigene Materialien zugeordnet werden.

Der Übersichtlichkeit halber kann an dieser Stelle eine einheitliche Stahlgüte für die Stirnplatte und das Trägerprofil gewählt werden.

einheitliche Stahlsorte

Stahlsorte Vorgabe

Kennung

Da die Beschreibung der Stahlparameter für Verbindungen nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der **Stahlorten** verwiesen.

Schrauben

Es kann entweder ein einheitliches Material für alle Schrauben vorgegeben oder jeder Schraube eine eigene Schraubensorte zugeordnet werden.

Schraubengröße und -festigkeit können bei **freier** Schraubenanordnung (s. **Register 2**) übersteuert werden.

Schrauben der Größen M12 bis M30 und der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 mit großer Schlüsselweite werden planmäßig vorgespannt (s. **FEM**).

Schrauben mit geringerer Festigkeit und großer Schlüsselweite werden gegen Lösen gesichert.

Wird die Vorspannung der Schrauben bei der Berechnung berücksichtigt, ist zus. die Bruchdehnung zu prüfen.

Die Abschertragfähigkeit der Schraube ist abhängig vom wirksamen Durchmesser der Schraube, der sich danach richtet, ob das Schraubengewinde oder der Schraubenschaft in der Scherfuge liegt.

einheitliche Schrauben

Schraubengröße	M12	<input type="checkbox"/> Vorgabe
Festigkeitsklasse	8.8	<input checked="" type="checkbox"/> Vorgabe
char. Streckgrenze	f_{yb}	640.0 N/mm ²
char. Zugfestigkeit	f_{ub}	800.0 N/mm ²
Bruchdehnung	ϵ_{ub}	12.0 %

normale Schlüsselweite große Schlüsselweite
 Passschraube $f_{ub} > 700$ N/mm²: HV-Schraube planmäßig vorgespannt
 Senkschraube
 Schraubengewinde in der Scherfuge
 Schraubenschaft in der Scherfuge

Da die Beschreibung der weiteren Schraubenparameter für Verbindungen nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der **Schrauben** verwiesen.

Schweißnähte

Die Verbindung zwischen Träger und Stirnplatte erfolgt über umlaufende Kehl- oder Stumpfnähte.

umlaufende Schweißnaht

- Kehlnaht
 Stumpfnäht durchgeschweißt
 nicht durchgeschweißt
 wirksame Nahtdicke a 4.0 mm

Kehl- und nicht durchgeschweißte Stumpfnähte werden mit einer wirksamen Nahtdicke $a \leq \min(t - \Delta t) / 2$ bzw. bei Hohlprofilen $a \leq t - \Delta t$ berechnet. Bei durchgeschweißten Stumpfnähten wird $a = t$ vorausgesetzt.

Da die Beschreibung der Schweißnähte für Verbindungen nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der **Schweißnähte** verwiesen.

Nachweise

Das Programm 4H-EC3FS weist die Tragfähigkeit des biegesteifen Stirnplattenstoßes mittels der FE-Methode nach. Dabei werden die Stirnplatte als gebettete FE-Platte und die Schrauben als elastische oder plastische FE-Zugfedern (s. **Register 3**) modelliert.

Nachweise

- nur Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch
 Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch und Tragfähigkeitsnachweise
 Schnittgrößenermittlung (FEM) und Tragfähigkeitsnachweise plastisch
-
- Spannungsnachweis der Stirnplatte
 Verfahren elastisch plastisch
 Nachweis der Kontaktpressungen
 Querschnittsnachweis des Trägers
 Verfahren elastisch plastisch
-
- Nachweis der Schweißnähte
 umlaufende Kehlnaht: kurze Nähte vernachlässigen
 Nachweis mit dem richtungsbezogenen Verfahren
 Nachweis mit dem vereinfachten Verfahren
-
- Nachweis der Schrauben
 Schraubenabstände überprüfen

Die Schnittgrößenermittlung kann elastisch oder plastisch erfolgen. Bei elastischer Schnittgrößenermittlung kann der **Spannungsnachweis** der Stirnplatte entweder elastisch oder plastisch durchgeführt werden.

Die plastische Schnittgrößenermittlung beinhaltet den plastischen Spannungsnachweis der Stirnplatte.

Zusätzlich kann der Nachweis der Kontaktpressungen (Drucknachweis) geführt werden.

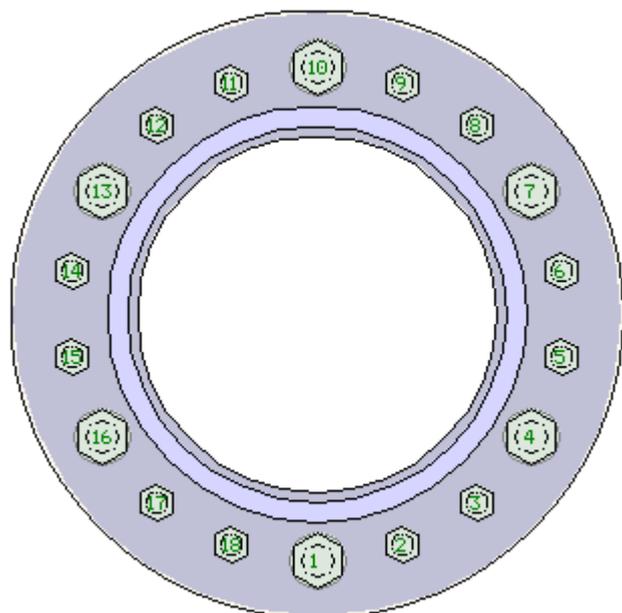
Optional kann ein elastischer oder plastischer **Querschnittsnachweis** des Trägers für die eingegebenen Schnittgrößenkombinationen durchgeführt werden.

Das Profil wird umlaufend auf die Stirnplatte geschweißt. Die **Schweißnähte** werden entweder mit dem richtungsbezogenen oder vereinfachten Verfahren nachgewiesen.

Bei umlaufender Kehlnaht können kurze Nähte vernachlässigt werden.

Optional kann die Tragfähigkeit der **Schrauben** unter Abscher- und Zugbeanspruchung berechnet werden. Die Überprüfung der Schraubenabstände untereinander und zum Stirnplattenrand kann unterdrückt werden.

Zur visuellen Kontrolle der Eingabeparameter wird der Anschluss maßstabsgetreu am Bildschirm dargestellt.



Stirnplatte / Trägerprofil / Schraubenanordnung



im Register 2 befinden sich die Angaben zur Stirnplatte, zum Trägerprofil und zur Schraubenanordnung

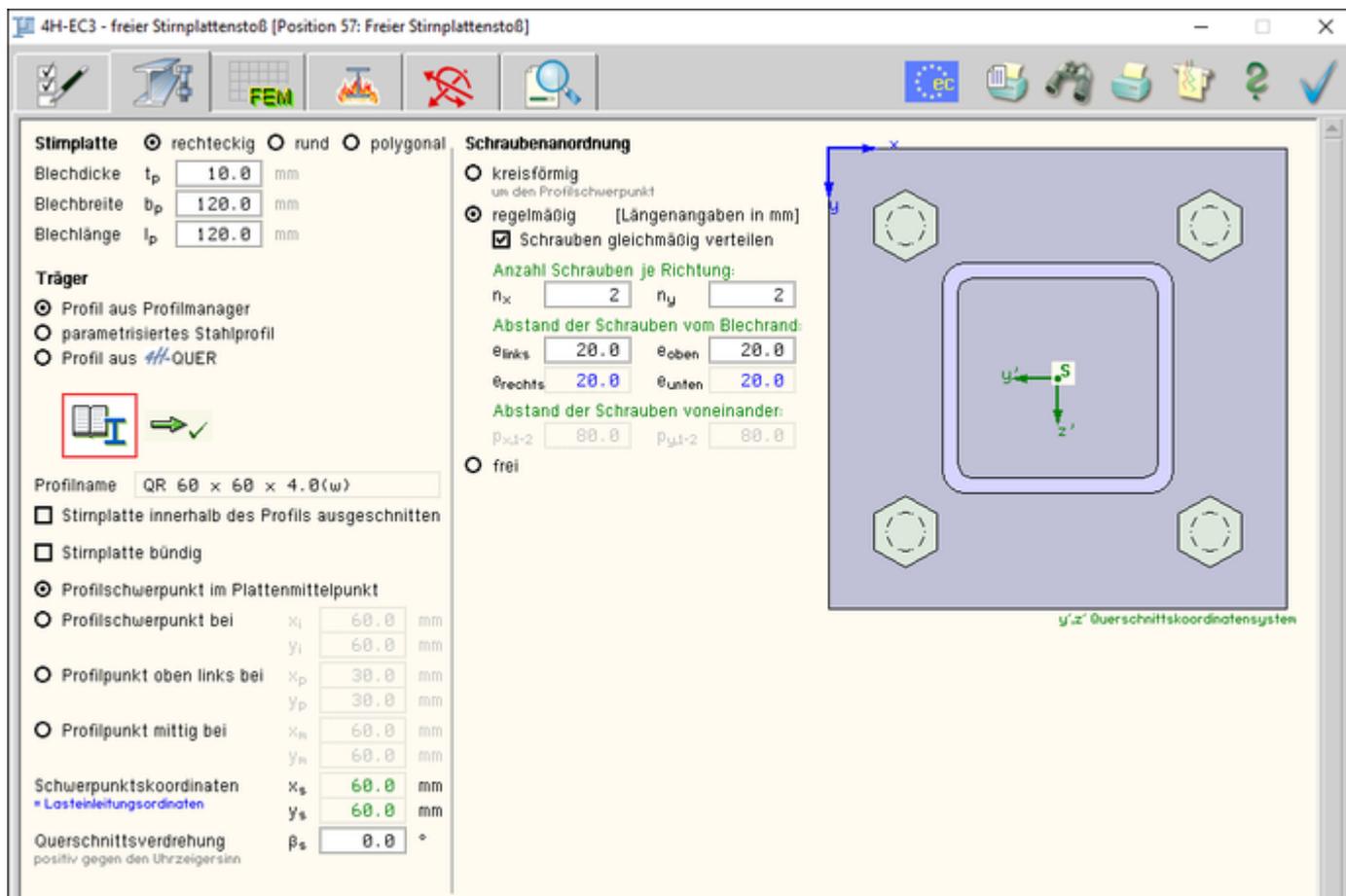


Bild vergrößern

Stirplatte

Die Stirplatte kann rechteckig, rund oder polygonal umrandet sein.

Ist die Stahlorte nicht einheitlich vereinbart (s. [Register 1](#)) ist die Stahlorte vorzugeben.

Die rechteckige Stirplatte wird über ihre Breite und Länge, die runde Stirplatte über den Durchmesser beschrieben.

Stirplatte rechteckig rund polygonal

Blechdicke t_p mm

Blechbreite b_p mm

Blechlänge l_p mm

Stahlorte Vorgabe

Kennung

Stirplatte rechteckig rund polygonal

Blechdicke t_p mm

Durchmesser \varnothing_p mm

Stahlorte Vorgabe

Kennung

Bei einer polygonalen Stirplatte sind die Koordinaten bzgl. des Ursprungs (0/0) anzugeben. Zur Info werden die max. Breite und Länge angezeigt.

Stirplatte rechteckig rund polygonal

	x	y
	mm	mm
1:	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="75.0"/>
2:	<input type="text" value="130.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>
3:	<input type="text" value="260.0"/>	<input type="text" value="75.0"/>
4:	<input type="text" value="260.0"/>	<input type="text" value="225.0"/>
5:	<input type="text" value="130.0"/>	<input type="text" value="300.0"/>
6:	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="225.0"/>

neu

Blechdicke t_p mm

max. Breite b_p mm

max. Länge l_p mm

Stahlorte Vorgabe

Kennung

Trägerprofil

Der Querschnitt kann entweder über den **pcae**-eigenen Profilmanager in das Programm importiert oder als parametrisiertes Stahlprofil eingegeben werden.

Ist das **pcae**-Programm **4H-QUER**, Querschnittswerte, installiert, kann alternativ ein beliebiger Querschnitt erstellt und in das Programm **4H-EC3FS** geladen werden.

Um ein Profil aus dem Angebot des **Profilmanagers** zu wählen, ist der grün unterlegte Pfeil zu anklicken.

Das externe **pcae**-Programm wird aufgerufen und ein Profil kann aktiviert werden. Bei Verlassen des Profilmanagers werden die benötigten Daten übernommen und der Profilname protokolliert.

Die hinterlegten Profilparameter können am Bildschirm eingesehen werden, wenn auf **parametrisiertes Stahlprofil** umgeschaltet wird.

Zur Definition eines **parametrisierten Stahlprofils** ist zunächst die Profilkategorie festzulegen.

In Abhängigkeit davon werden Profilhöhe, Stegdicke sowie ggf. Flanschbreiten und -dicken zur Eingabe angeboten.

Flanschneigungen werden nicht berücksichtigt.

Bei gewalzten Doppel-T-Profilen wird der Ausrundungsradius r zwischen Flansch und Steg bzw. r_2 an den äußeren Flanschrändern geometrisch berücksichtigt, während geschweißte Blechprofile mit Schweißnähten (Kehlnähte der Dicke a oder durchgeschweißte Stumpfnähte) zusammengefügt sind.

Diese Schweißnähte werden **nicht** nachgewiesen.

Das Profil wird maßstabsgetreu am Bildschirm dargestellt, wobei die Neigungen von Flanschen oder Steg nicht berücksichtigt werden.

Ist das **pcae**-Programm **4H-QUER** installiert, wird eine entsprechende Eingabemöglichkeit angeboten.

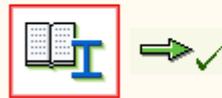
Das externe Programm wird über den gelb unterlegten **Aktions-**Button  mit dieser Vorgabe aufgerufen.

In einer grafischen Oberfläche kann dort der Querschnitt konstruiert oder aus einer Bibliothek geladen und an das aufrufende Programm **4H-EC3FS** übergeben werden.

Der **4H-QUER**-Querschnitt muss den Programmvorgaben entsprechend dünnwandig sein.

Weitere Informationen zur Bedienung des Programms **4H-QUER** s. zugehöriges **Handbuch**.

- Profil aus Profilmanager
- parametrisiertes Stahlprofil
- Profil aus **4H-QUER**



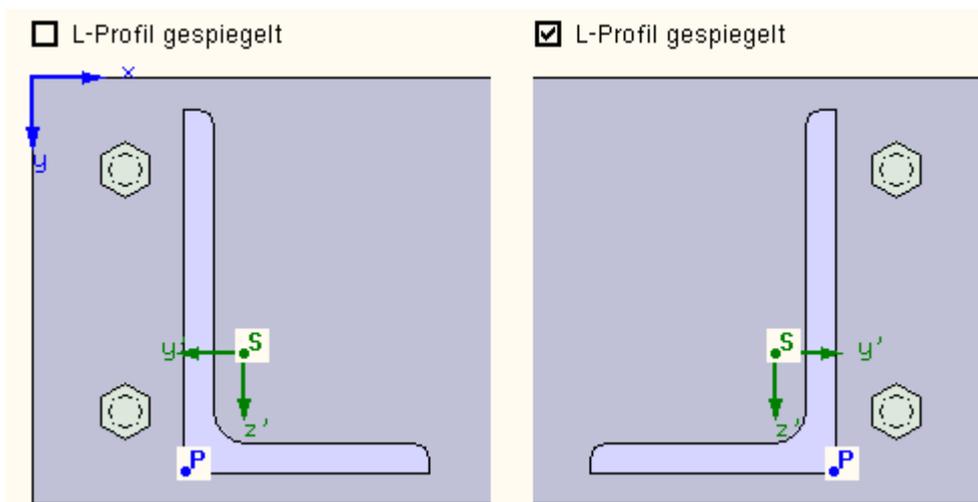
Profilname

- Profil aus Profilmanager
- parametrisiertes Stahlprofil
- Profil aus **4H-QUER**

Profilkategorie	T-Profil <input type="checkbox"/>	
Profilhöhe	h	<input type="text" value="100.0"/> mm
Stegdicke	t_w	<input type="text" value="5.6"/> mm
Flanschbreite	b_f	<input type="text" value="100.0"/> mm
Flanschdicke	t_f	<input type="text" value="8.5"/> mm
<input checked="" type="radio"/> gewalztes Profil	Ausrundungsradius	r <input type="text" value="12.0"/> mm
<input type="radio"/> geschweißtes Profil		r_2 <input type="text" value="0.0"/> mm

- Profil aus Profilmanager
- parametrisiertes Stahlprofil
- Profil aus **4H-QUER** 

Besonderheit beim ungleichschenkligen L-Profil



Das aus dem Profil-Manager oder parametrisiert eingegebene L-Profil ist derart orientiert, dass der kürzere Flansch

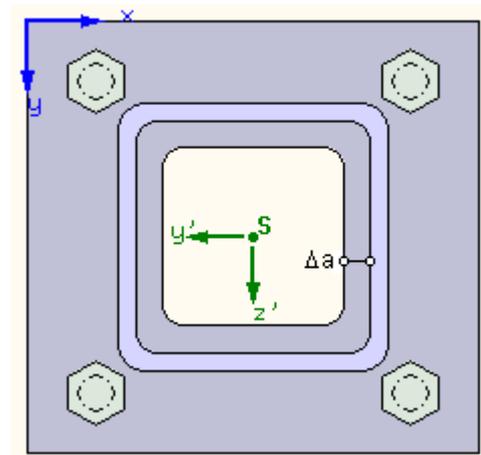
nach rechts zeigt.

Um das Querschnittskordinatensystem umzudrehen, kann das **L-Profil gespiegelt** werden.

Besonderheit beim Hohlprofil (Kreisrohr, Rechteckrohr)

Rohrverbindungen erfordern, dass die **Stirnplatte innerhalb des Hohlprofils ausgeschnitten** ist.

Die Öffnung folgt der inneren Rohrberandung, kann allerdings einen Abstand zum Innenrand Δa erhalten.



Besonderheit beim polygonalen Querschnitt (4H-QUER)

Aussparung in der Stirnplatte
 rund polygonal

	x	y
	mm	mm
1:	78.0	100.0
2:	130.0	70.0
3:	182.0	100.0
4:	182.0	160.0
5:	130.0	190.0
6:	78.0	160.0

neu →

Um auch mit polygonalen Querschnitten eine durchgehende Rohrverbindung zu modellieren, kann eine **Aussparung in der Stirnplatte** angeordnet werden. Sie kann rund oder polygonal umrandet sein.

Für eine **runde** Aussparung sind die Mittelpunktskoordinaten bezogen auf das Stirnplattenkoordinatensystem und der Radius anzugeben.

Eine **polygonale** Aussparung wird über die x-,y-Koordinaten bezogen auf das Stirnplattenkoordinatensystem beschrieben.

Anschließend ist das Profil auf der Stirnplatte zu platzieren. Dazu bestehen folgende Wahlmöglichkeiten

<input checked="" type="radio"/>	Profilschwerpunkt im Plattenmittelpunkt		
<input type="radio"/>	Profilschwerpunkt bei	x_i	110.0 mm
		y_i	70.0 mm
<input type="radio"/>	Profileckpunkt unten bei	x_p	110.0 mm
		y_p	11.8 mm
<input type="radio"/>	Profilpunkt mittig bei	x_m	110.0 mm
		y_m	117.8 mm
	Schwerpunktskoordinaten = Lasteinleitungsordinaten	x_s	110.0 mm
		y_s	70.0 mm
	Querschnittsverdrehung positiv gegen den Uhrzeigersinn	β_s	-135.0 °

y', z' Querschnittskordinatensystem

Wird eine Möglichkeit aktiviert, ergeben sich die Koordinaten der anderen Anordnungsvarianten und werden angezeigt.

Der Festhaltepunkt (hier S für den Plattenschwerpunkt) wird in der maßstäblichen Bildschirmgrafik gekennzeichnet. Die Optionen **Profileckpunkt unten** und **Profilpunkt mittig** sind bei einer runden Stirnplatte **nicht** verfügbar.

Die Querschnittsverdrehung bezieht sich auf die gewählte Variante, d.h. bei dem Festhaltepunkt **Profilschwerpunkt im Plattenschwerpunkt** wird das Profil um den Punkt S gedreht.

Ein positiver Drehwinkel dreht entgegen dem Uhrzeigersinn.



Der Verdrehwinkel β beeinflusst nicht die Schraubenanordnung, da sich diese an den Rändern der Stirnplatte orientieren.

Stirnplatte bündig

y', z' Querschnittskordinatensystem

Über **Stirnplatte bündig** kann die Stirnplattengröße exakt an das Trägerprofil angepasst werden. Ist dieser Button aktiviert, können die Stirnplattenabmessungen nicht verändert werden.

Diese Option ist bei einer polygonalen Stirnplatte **nicht** verfügbar.



Die Schraubenanordnung ist von dieser Option ausgenommen.

Schraubenanordnung

Die Schrauben können **kreisförmig**, **regelmäßig** oder **frei** auf der Stirnplatte angeordnet werden.

kreisförmig

Schraubenanordnung

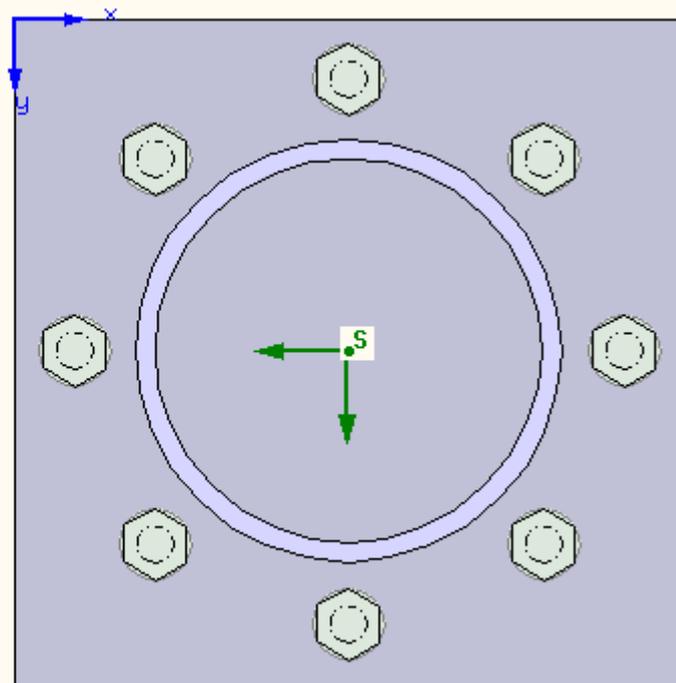
kreisförmig

um den Profilschwerpunkt

Anzahl Schrauben n_r
 Radius r mm

regelmäßig

frei



Eine kreisförmige Anordnung wird i.A. bei rotationssymmetrischen Profilen, z.B. Rohrprofilen verwendet.

Die Schrauben werden, beginnend mit einer Schraube bei sechs Uhr gegen den Uhrzeigersinn im Radius r um den Profilschwerpunkt gleichmäßig verteilt. Es sollten mindestens drei Schrauben vorhanden sein.

Die Schrauben sind vom selben Typ (s. [einheitliche Schrauben Register 1](#)).

regelmäßig

Schraubenanordnung

kreisförmig

um den Profilschwerpunkt

regelmäßig [Längenangaben in mm]

Schrauben gleichmäßig verteilen

Anzahl Schrauben je Richtung:

n_x n_y

Abstand der Schrauben vom Blechrand:

e_{links} e_{oben}

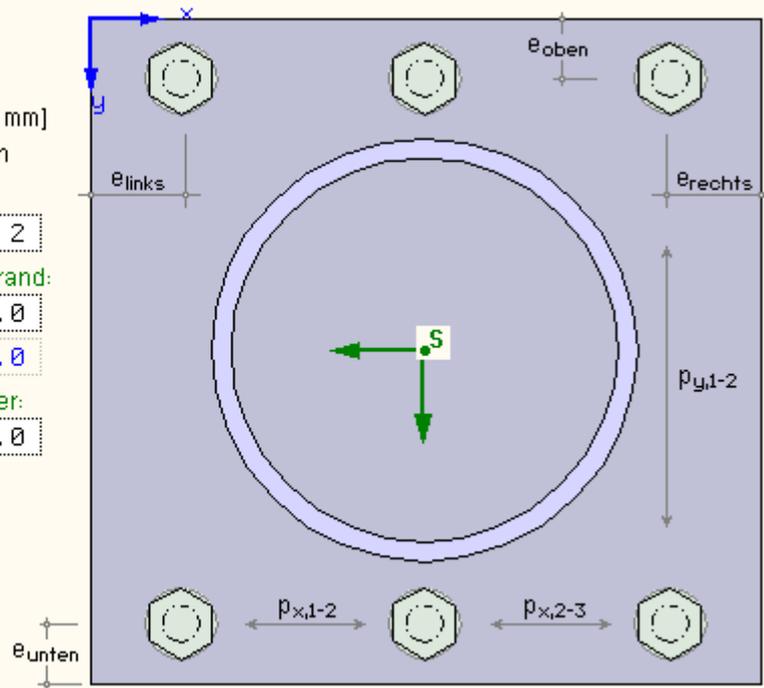
e_{rechts} e_{unten}

Abstand der Schrauben voneinander:

$p_{x,1-2}$ $p_{y,1-2}$

$p_{x,2-3}$

frei



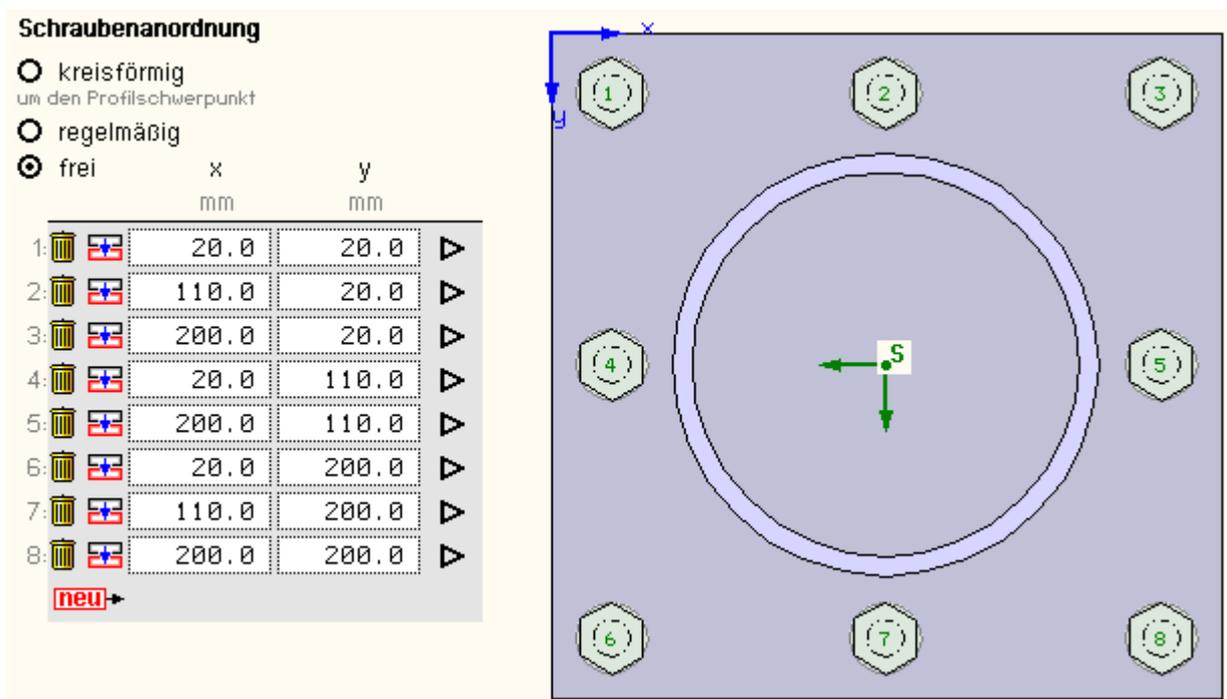
In der zweiten Variante zur Anordnung der Schrauben auf der Stirnplatte werden die Schrauben regelmäßig verteilt.

Es werden die Anzahl an Schrauben in x- und y-Richtung der Stirnplatte sowie die Abstände der Schrauben vom Blechrand links (= rechts) und oben (= unten) abgefragt.

Die Abstände der Schrauben in x- und y-Richtung der Stirnplatte $p_{x,i}$ und $p_{y,j}$ können reihen- bzw. spaltenweise beliebig vorgegeben werden.

Ist der Schalter **Schrauben gleichmäßig verteilen** aktiviert, werden die Schraubenabstände vom Programm gleichmäßig gesetzt und können nicht geändert werden. Auch hier sind alle Schrauben vom selben Typ (s. [einheitliche Schrauben Register 1](#)).

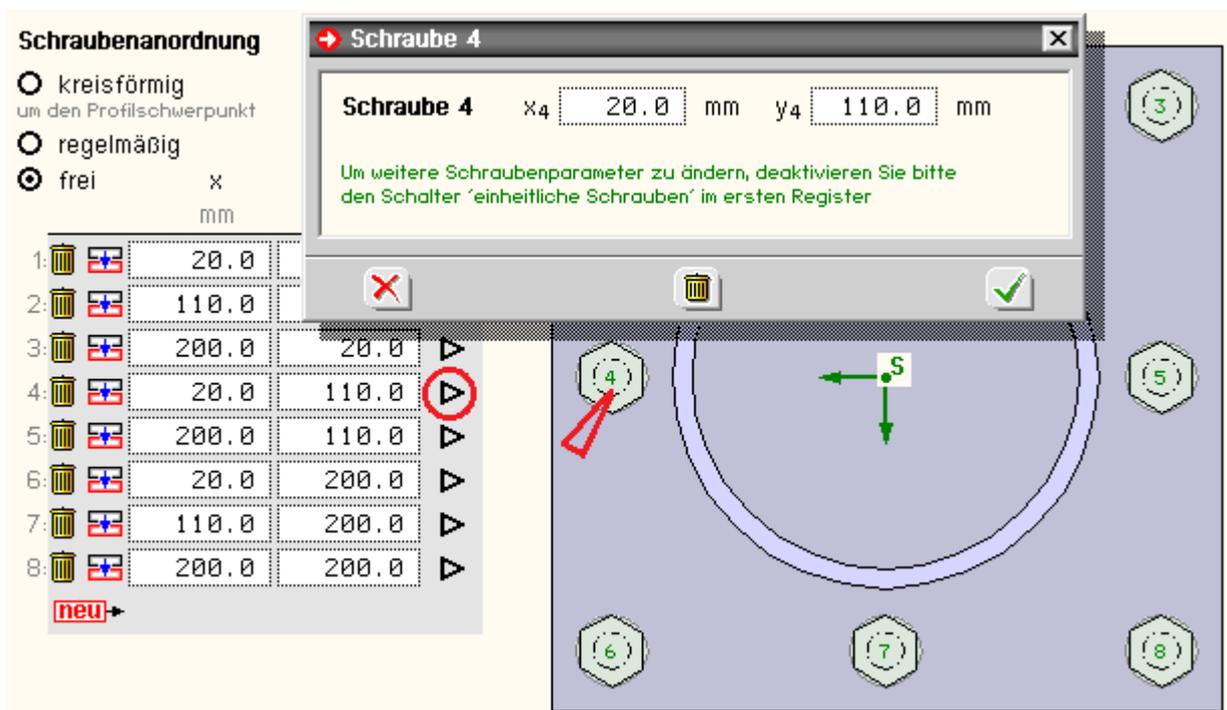
frei



Die dritte Variante ermöglicht eine variable Schraubenanordnung bei der sowohl die Lage als auch ggf. die Größe und die Festigkeit jeder einzelnen Schraube beliebig festgelegt werden können.

Zunächst werden die Schraubenkoordinaten bezogen auf das x-/y-System der Stirnplatte tabellarisch aufgeführt.

Eine Koordinatenänderung wird ebenso wie eine hinzugefügte oder entfernte Schraube sofort in der nebenstehenden Grafik berücksichtigt.



Ein Extramenü für jede Schraube kann entweder über den zugehörigen **Aktions**-Button oder durch Anpicken in der Bildschirmgrafik aufgerufen werden.

Sind **einheitliche Schrauben** (s. **Register 1**) vereinbart, können in dem Menü nur die Schraubenkoordinaten geändert werden. Um weitere Schraubenparameter angeboten zu bekommen, muss der entsprechende Schalter deaktiviert werden. Nun können auch Schraubengröße und -festigkeit (Beschr. s. **Register 1**) sowie Federsteifigkeit und Vorspannkraft (Beschr. s. **Register 3**) modifiziert werden.

Schraube 4 x4 20.0 mm y4 110.0 mm

Schraubengröße M12 Vorgabe
 Festigkeitsklasse 8.8 Vorgabe
 normale Schlüsselweite große Schlüsselweite
 Passschraube FK 8.8 oder 10.9: HV-Schraube planmäßig vorgespannt
 Senkschraube
 Ersatzfeder der Schrauben (FE-Berechnung):
 automatisch
 Federsteifigkeit c_f 6129.1 kN/cm
 automatisch
 Vorspannkraft $F_{p,C}$ 37.8 kN



Die maßstäbliche Darstellung der Verbindung vermittelt einen Eindruck von der Anschlussgeometrie. Sie sollte stets genutzt werden, die Lage des Trägerprofils und der Schrauben auf der Stirnplatte und gegeneinander (Abstände!) zu überprüfen. Innerhalb von Hohlprofilen oder Aussparungen dürfen keine Schrauben angeordnet sein!

FEM-Parameter - Ausgabeoptionen zu den FE-Ergebnissen



Register 3 enthält Angaben zu den Berechnungsparametern für die FE-Methode und zur Gestaltung der Druckliste bzgl. der FE-Ergebnisse

4H-EC3 - freier Stirnplattenstoß [Position 57: Freier Stirnplattenstoß]

Parameter für die FE-Berechnung

automatisch Federsteifigkeit c_f 4066.8 kN/cm
 automatisch Vorspannkraft $F_{p,C}$ 0.0 kN
 für den FEM-Profil

Ausgabe der FEM-Ergebnisse als	Konturenplot	Tabelle
<input checked="" type="checkbox"/> Verformungen u_z	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Biegemomente m_{xx}, m_{yy}, m_{xy}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Querkräfte q_x, q_y	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Hauptmomente m_1, m_2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Hauptquerkräfte q_1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Kontaktpressungen b_z	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> elast. Spannungen $\sigma_z, \sigma_x, \tau, \sigma_v$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> plast. Randdehnung ϵ_{pl}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> plast. Querschnittsausnutzung ξ_{pl}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Ausnutzungen U_p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Schraubenkräfte F_t	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Konturenplot im Großformat		

Bild vergrößern

FEM-Parameter

Die Stirnplatte wird als gebettete FE-Platte berechnet, worin die Schrauben als lokal verteilte Federlager mit der Federsteifigkeit c_f modelliert sind.

Parameter für die FE-Berechnung

- automatisch Federsteifigkeit c_f kN/cm
- automatisch Vorspannkraft $F_{p,C}$ kN

Die Federsteifigkeit kann vom Anwender vorgegeben oder **automatisch** aus den Parametern der Schraube berechnet werden, wobei gilt

$$c_f = E_{sc} \cdot A / L$$

E_{sc} E-Modul der Schraube, i.A. $E_{sc} \equiv 210.000 \text{ N/mm}^2$

A Schaftquerschnittsfläche der Schraube

L Dehnlänge der Schraube $L \equiv t_{ges} + t_p + 0.5 \cdot (t_k + t_m)$

t_{ges} Klemmlänge

t_p Dicke der Unterlegscheiben

t_k Kopfhöhe

t_m Mutterhöhe

Die Schraubenfedern wirken nur bei Zugbelastung entweder elastisch bis zum Versagen bei ihrer Grenzzugkraft

$$F_{t,Rd} = k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2} \dots \text{ mit } \dots$$

k_2 0.9

A_s Spannungsquerschnittsfläche

oder plastisch, wobei sie nach Erreichen der plastischen Tragfähigkeit

$$F_{t,pl,Rd} = f_{t,f} \cdot F_{t,Rd} \dots \text{ mit } \dots \quad 0 < f_{t,f} < 1$$

ohne weitere Zugkraftaufnahme bis zur Bruchdehnung ϵ_{ub} hin gedehnt werden können.

Zur Bestimmung von $f_{t,f}$ und ϵ_{ub} s. FEM-Profi.

Liegen Schrauben der Größen M12 bis M30 mit großer Schlüsselweite vor, ist eine Vorspannkraft $F_{p,C}$ anzusetzen.

Die Vorspannkraft wird als zusätzliche Zuglast auf die Schrauben aufgebracht und kann entweder vom Anwender vorgegeben oder **automatisch** aus den Parametern der Schraube berechnet werden, wobei für planmäßig vorgespannte Schrauben die Regelvorspannkraft ist

$$F_{p,C}^* = 0.7 \cdot f_{yb} \cdot A_s \dots \text{ mit } \dots$$

A_s Spannungsquerschnittsfläche der Schraube

FEM-Profi

Die Finite-Elemente-Methode ist ein Näherungsverfahren zur Berechnung komplexer mathematischer Fragestellungen. Da die Steuerung der Berechnungsiteration von der jeweiligen Systemkonfiguration abhängt, können hier einige Parameter vom Anwender manipuliert werden.

 für den FEM-Profi

Schrauben plastisch:

automatisch Auslastungsfaktor $f_{t,f}$

Dehnungsfaktor $f_{t,\epsilon}$

Stirnplatte plastisch:

automatisch Auslastungsfaktor $f_{y,f}$

max. Randdehnung $\max \epsilon_{y,pl}$ %

rechnerische Bettung der Stirnplatte:

automatisch Bettungsmodul c_b kN/cm³

Elementierung:

automatisch Anzahl / Größe n_x Δx mm

n_y Δy mm

Toleranzgrenze %

maximal Iterationsschritte

Die plastische Zugtragfähigkeit der Schrauben wird aus der elastischen Zugtragfähigkeit ermittelt (s.o.), wobei der Auslastungsfaktor programmintern (**automatisch**) angenommen wird mit $f_{t,f} = 0.95$.

Die plastische Schraubendehnung ergibt sich aus der elastischen Bruchdehnung $\epsilon_{ub,pl} = f_{t,el} \cdot \epsilon_{ub}$. Der Auslastungsfaktor wird programmintern (**automatisch**) n. EC 3-1-14 angenommen mit $f_{t,el} = 0.25$.

Die plastische Grenzspannung der Stirnplatte wird aus der elastischen Grenzspannung ermittelt $f_{y,pl} = f_{y,f} \cdot f_{y,d}$, wobei der Auslastungsfaktor programmintern (**automatisch**) angenommen wird mit $f_{y,f} = 0.95$.

Die max. plastische Randdehnung wird programmintern (**automatisch**) n. EC 3-1-14 angenommen mit $\epsilon_{ly,pl} = 5\%$. Bei benutzerdefinierter Eingabe kann dieser Wert nicht überschritten werden.

Die rechnerische Bettung der Stirnplatte wirkt nur bei Druckbelastung und wird programmintern (**automatisch**) angenommen mit

$$c_b = E_{pl} / t_{pl} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

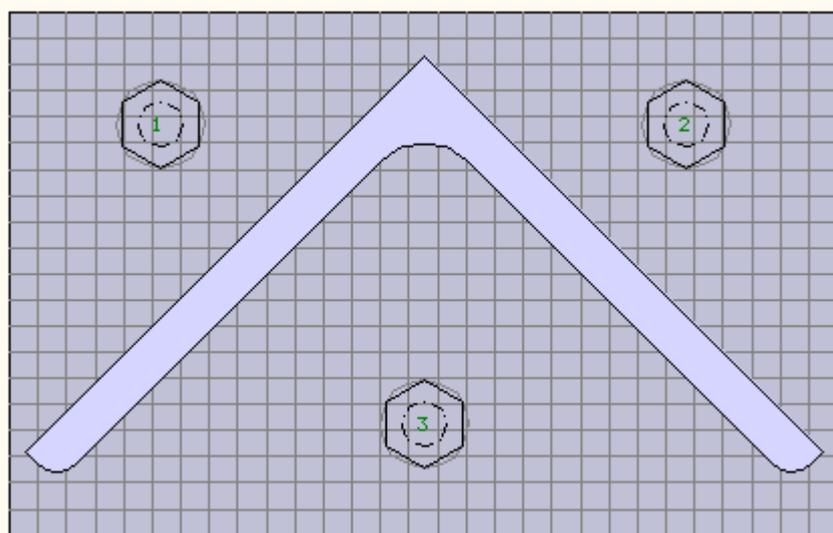
E_{pl} E-Modul
 t_{pl} Dicke der Stirnplatte

Die Elementierung beeinflusst ebenso wie die Toleranzgrenze die Rechengenauigkeit und -zeit, d.h. je feiner das FE-Gitter und je geringer die Toleranzgrenze gewählt werden, desto höher ist die Genauigkeit, aber auch die Rechenzeit länger.

Das FE-Gitter wird mit einer einheitlichen Elementgröße ausgeführt, die sich bei **automatischer** Einstellung an den Profilabmessungen und Schraubenabständen orientiert.

pcae empfiehlt, die vom Programm vorgeschlagenen FEM-Einstellungen nur mit Bedacht zu ändern.

Das Finite-Elemente-Gitter des Stirnblechstoßes wird in einer maßstäblichen Skizze am Bildschirm dargestellt.



FEM-Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der FE-Berechnung können als Konturenplot und/oder tabellarisch ausgegeben werden.

Stirnplatte

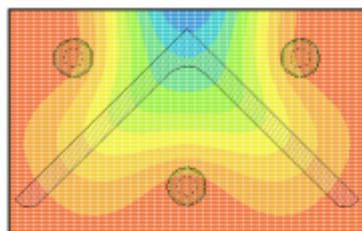
Die Ergebnisse der Stirnplatte sind als Konturenplot oder Tabelle verfügbar.

Ausgabe der FEM-Ergebnisse als	Konturenplot	Tabelle
<input checked="" type="checkbox"/> Verformungen u_z	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Biegemomente m_{xx}, m_{yy}, m_{xy}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Querkräfte q_x, q_y	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Hauptmomente m_1, m_2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Hauptquerkräfte q_1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Kontaktpressungen b_z	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> elast. Spannungen $\sigma_z, \sigma_x, \tau, \sigma_v$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> plast. Randdehnung ϵ_{pl}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> plast. Querschnittsausnutzung ξ_{pl}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Ausnutzungen U_p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Für jeden Ergebnissatz wird ein eigener Konturenplot ausgegeben, wohingegen die Tabelle um die gewählten Ergebnisspalten erweitert wird.

Verformungen u_z [mm]

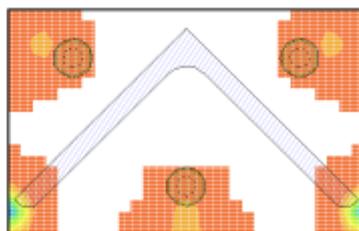
min $u_z = -0.0155$ mm, max $u_z = 0.4805$ mm



Verformungen abhebend positiv

Kontaktpressungen b_z [N/mm²]

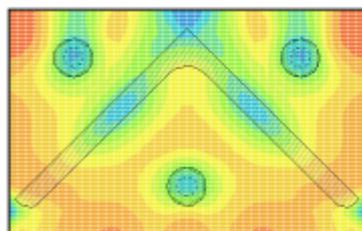
min $b_z = 0.00$ N/mm², max $b_z = 253.53$ N/mm²



Kontaktpressungen Druck positiv

Ausnutzung der Stirnplatte U_p

min $U_p = 0.007$, max $U_p = 0.723$



Ausnutzung der Stirnplatte

Kno	x mm	y mm	u_z mm	b_z N/mm ²	m_{xx} kNm/m	m_{yy} kNm/m	m_{xy} kNm/m	q_x kN/m	q_y kN/m	U_p
19	0.0	126.0	-0.015	253.53	-0.22	2.61	-0.22	733.55	-203.06	0.714
110	37.9	28.0	0.013	1.64	6.57	4.89	0.27	144.86	56.08	0.672
199	68.3	63.0	0.232	0.00	-3.95	-4.23	-2.15	-22.58	-17.25	0.623
295	106.2	0.0	0.480	0.00	-6.54	-0.37	-0.23	-103.84	-130.28	0.723
296	106.2	7.0	0.454	0.00	-6.55	-1.55	-0.41	-97.91	-78.49	0.675
298	106.2	21.0	0.399	0.00	-3.95	0.53	-0.31	35.20	336.69	0.509
311	106.2	112.0	0.006	6.31	4.47	5.70	0.17	122.43	-177.93	0.596
312	106.2	119.0	-0.003	27.73	3.21	3.73	0.32	67.77	-385.07	0.442
316	113.8	0.0	0.480	0.00	-6.54	-0.37	0.23	103.84	-130.28	0.723
430	151.7	63.0	0.232	0.00	-3.95	-4.23	2.15	22.58	-17.25	0.623
628	220.0	126.0	-0.015	253.53	-0.22	2.61	0.22	-733.55	-203.06	0.714

x,y: Knotenkoordinaten; u_z : Verformungen (abhebend positiv); b_z : Kontaktpressungen (Druck positiv); m_{xx}, m_{yy}, m_{xy} : Momente q_x, q_y : Querkräfte; U_p : Ausnutzung der Stirnplatte

In den Tabellen können entweder sämtliche Knotenergebnisse (nicht empfehlenswert) oder die je Ergebnisspalte maßgebenden Ergebnissätze (s. [Ausdrucksteuerung](#), [optimierte Tabelle](#)) zeilenweise dargestellt werden. Die Extremalwerte sind markiert.

Sind Zwischenergebnisse aktiviert (s. [Ausdrucksteuerung](#), [Zwischenergebnisse](#)), werden zusätzlich Teilausnutzungen, die ggf. zur Gesamtausnutzung führen, dargestellt.

Schrauben

Die Ergebnisse der Schrauben werden tabellarisch angezeigt.

Ausgabe der FEM-Ergebnisse als Konturenplot **Tabelle**

Schraubenkräfte F_t

Im Anschluss an die FE-Berechnung wird die Ausnutzung aus der Federdehnung der Schrauben ermittelt. Ist die zulässige Dehnung überschritten ($U_{wt} > 1$), werden keine Nachweise geführt (s. [Register 1](#)).

Zugkraft in den Schrauben

	x mm	y mm	w _t mm	F _t kN	ε _{w,t} %	U _{w,t}
1	40.0	30.0	0.031	45.04	0.528	0.176
2	180.0	30.0	0.031	45.04	0.528	0.176
3	110.0	110.0	0.019	43.91	0.399	0.133

x,y: Schraubenkoordinaten; w_t: Verformung (Zug positiv); F_t: Schraubenkraft; ε_{w,t}: Dehnung
U_{w,t}: Ausnutzung aus Dehnung

Nachweise im Brandfall



im Register 4 werden Parameter zur Berechnung der Stahltemperatur der Verbindung im Brandfall abgefragt.

4H-EC3 - freier Stirnplattenstoß [Position 57: Freier Stirnplattenstoß]

vereinfachte Berechnung der Anschlussstemperatur aus der Querschnittstemperatur des Trägers

Anschlussstemperatur $\Theta = 0.880 \cdot T_a = 733.2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Träger

Berechnung der Stahltemperatur

Feuerwiderstandsdauer t = 30.0 min

Emissivität der Profilloberfläche unbehandelter Stahl

Profilfaktor $A_n/V = 0.0 \text{ 1/m}$ =0: wird berechnet

beflammte Oberfläche $A_n = 0.0 \text{ mm}$ =0: allseitig beflammt

Profil ungeschützt
 profilfolgende Bekleidung
 Kastenbekleidung

Querschnittstemperatur $T_a = 833.2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Bild vergrößern

Es wird davon ausgegangen, dass die Verbindung mit ihren einzelnen Verbindungselementen eine einheitliche Temperatur aufweist. Daher wird die Anschlussstemperatur vereinfacht mittels eines Reduktionsfaktors (s. *J.-M. Franssen, P. Vila Real: Fire Design of Steel Structures, 2nd Edition, ECCS 2015*) aus der Querschnittstemperatur des Trägers (s. [Temperaturberechnung](#)) ermittelt.

vereinfachte Berechnung der Anschlussstemperatur aus der Querschnittstemperatur des Trägers

Anschlussstemperatur $\Theta = 0.880 \cdot T_a = 394.9 \text{ } ^\circ\text{C}$

Alternativ kann die Anschlussstemperatur auch direkt eingegeben werden.

Für die Temperatur Θ ergeben sich reduzierte Festigkeiten, die der Bemessung der Verbindung zu Grunde gelegt werden.

Träger

Bei dünnwandigen Profilen wird davon ausgegangen, dass die thermische Beanspruchung durch den Brand eine

gleichmäßige Temperatur im Material erzeugt.

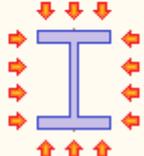
Die Festigkeit des Stahls wird dadurch z.T. stark herabgesetzt, sodass durch einen Spannungsnachweis die Standfestigkeit nach einer Mindestzeit (Feuerwiderstandsdauer) nachgewiesen werden muss.

Es wird die Einheits-Temperaturzeitkurve n. EC 1-1-2, 3.2.1 verwendet.

Die Berechnung der Stahltemperatur erfolgt nach EC 1-1-2 unter Berücksichtigung des Profilkfaktors (Formfaktor des Querschnitts) sowie einer ggf. vorhandenen Profilmantelung.

Es werden Eingabefelder für die erforderlichen Werte angeboten. Sind sie nicht belegt, kann das Programm diese Werte berechnen.

<input checked="" type="checkbox"/>	Berechnung der Stahltemperatur		
Feuerwiderstandsdauer	t	<input type="text" value="30"/>	min
Emissivität der Profiloberfläche		<input type="text" value="unbehandelter Stahl"/>	
Profilfaktor	A_m/V	<input type="text" value="0.000"/>	1/m =0: wird berechnet
Abschattung (durch Wand, Decke)		<input type="text" value="keine"/>	
<input checked="" type="radio"/>	Profil ungeschützt		
<input type="radio"/>	profilfolgende Bekleidung		
<input type="radio"/>	Kastenbekleidung		

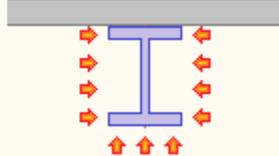


Bei ungeschützten Profilen entwickelt sich die Temperatur abhängig von der Absorptivität (Emissivität) der Bauteiloberfläche. Es besteht die Möglichkeit, diese anzugeben. Programmintern wird sie für **unbehandelten Stahl** und **feuerverzinkten Stahl** vorgelegt. Alternativ kann ein Wert vorgegeben werden.

Emissivität der Profiloberfläche		<input type="text" value="Vorgabe"/>	
	ϵ_m	<input type="text" value="0.60"/>	=0: Stahl

Das Profil kann durch angrenzende Bauteile teilweise vor der Hitze geschützt sein. Diese Abschattungseffekte durch eine Wand oder aufliegende Deckenplatte können berücksichtigt werden. Sie werden grafisch verdeutlicht.

Abschattung (durch Wand, Decke)		<input type="text" value="oben"/>	
---------------------------------	--	-----------------------------------	--



Ist das Profil ungeschützt, werden Abschattungseffekte durch das Profil selbst über einen Korrekturfaktor berücksichtigt. Der entsprechende Beiwert kann vorgegeben oder vom Programm berechnet werden.

Korrekturfaktor für Abschattungseffekte (durch Profil)	k_{sh}	<input type="text" value="0.000"/>	=0: wird berechnet
Oberfläche d. umschließ. Kastens A_b		<input type="text" value="0"/>	mm ² /mm =0: wird berechnet

Andernfalls sind die Materialparameter der Bekleidung vorzugeben. Im deutschen Anhang des EC 3-1-2, Anhang AA, sind Werte für Putz- und Plattenbekleidung dokumentiert, die hier angewählt werden können.

<input checked="" type="radio"/>	Kastenbekleidung		
Brandschutzmaterial:		<input type="text" value="Plattenbekleidung EC"/>	
Wärmeleitfähigkeit	λ_p	<input type="text" value="0.20"/>	W/(m K)
spezifische Wärmekapazität	c_p	<input type="text" value="1700"/>	J/(kg K)
Rohdichte	ρ_p	<input type="text" value="945"/>	kg/m ³

Alternativ können die Parameter frei belegt und ein Name vergeben werden kann.

Feuchtigkeit und Dicke des Dämmmaterials sind ebenfalls anzugeben.

Feuchtigkeitsgehalt	p_p	0.0	%
Dicke	d_p	25.0	mm

Die Querschnittstemperatur wird online ermittelt und am Bildschirm ausgegeben.

Querschnittstemperatur T_a 941.1 °C

Schnittgrößen



das fünfte Register beinhaltet die Masken zur Eingabe der Bemessungsschnittgrößen

4H-EC3 - freier Stirnplattenstoß [Position 57: Freier Stirnplattenstoß]

Schnittgrößen bezogen auf die Querschnittsachsen (Brandfall, außergewöhnliche Bemessungssituation) Kräfte / Momente in kN / kNm

Schnittgrößen aus Bauteil importieren Schnittgrößen aus Text-Datei einlesen Tabelle löschen

	N_{Ed} kN	$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	$M_{z,Ed}$ kNm	$V_{y,Ed}$ kN	$M_{x,Ed}$ kNm	Bezeichnung
1	-87.75	-0.52	-22.47	0.22	-0.13	0.00	Import Lk 1
2	74.51	9.79	-8.40	-5.97	-4.92	0.02	Import Lk 2
3	65.75	8.83	-8.15	-6.24	-8.20	0.20	Import Lk 3
4	28.05	3.31	-1.86	0.34	5.28	-0.38	Import Lk 4
5	-59.24	3.34	-26.08	-2.86	-4.17	0.18	Import Lk 5
6	13.44	1.71	-1.45	-0.18	-0.20	0.01	Import Lk 6
7	31.64	4.08	-3.72	1.28	2.90	-0.14	Import Lk 7

Zelle löschen
Zelle duplizieren
neue Zeile anhängen

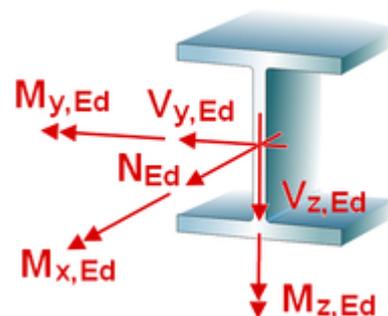
Bild vergrößern

Die Schnittgrößen werden als Bemessungsgrößen mit der Vorzeichendefinition der Statik eingegeben, wobei das x,y,z-Koordinatensystem dem l,m,n-System der **pcae**-Tragwerksprogramme entspricht.

Es können bis zu 10.000 Schnittgrößenkombinationen eingegeben werden.



Bei Übernahme der Schnittgrößen aus einem Tragwerksprogramm ist zu beachten, dass sie sich auch bei unsymmetrischen Querschnittsprofilen (z.B. L-Profil) auf das Stab-Koordinatensystem und **nicht** auf das Hauptachsensystem (**pcae**-Bezeichnung: ξ, η, ζ) beziehen!



Die Schnittgrößen können wahlweise in folgenden Einheiten vorliegen

Kräfte / Momente in

kN / kNm 

kN / kNm

kN / kNcm

	N_{Ed} kN	M_{y,Ed} kNm	V_{z,Ed} kN	M_{z,Ed} kNm	V_{y,Ed} kNm	M_{x,Ed} kNm	Bezeichnung
 	0.21	0.00	3.16	-0.60	-7.05	48.64	

Im Standardfall

- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N, M_y, V_z eine Biegung um die starke Achse des Querschnitts
- bewirken die Schnittgrößenkombinationen N, M_z, V_y eine Biegung um die schwache Achse des Querschnitts
- wird das Torsionsmoment M_x häufig nur für doppelt-symmetrische Querschnitte relevant

Schnittgrößen importieren

Detailnachweisprogramme zur Bemessung von Anschlüssen (Träger/Stütze, Träger/Träger), Fußpunkten (Stütze/Fundament) etc. benötigen Schnittgrößenkombinationen, die häufig von einem Tragwerksprogramm zur Verfügung gestellt werden.

Dabei handelt es sich i.d.R. um eine Vielzahl von Kombinationen, die im betrachteten Bemessungsschnitt des übergeordneten Tragwerkprogramms vorliegen und in das Anschlussprogramm übernommen werden sollen.

pcae stellt neben der 'per Hand'-Eingabe zwei verschiedene Mechanismen zur Verfügung, um Schnittgrößen in das vorliegende Programm zu integrieren.

Schnittgrößen aus **4H**-Programm importieren



Schnittgrößen aus Text-Datei einlesen



• Import aus einer Text-Datei

Die Schnittgrößenkombinationen können aus einer Text-Datei im ASCII-Format eingelesen werden.

Die Datensätze müssen in der Text-Datei in einer bestimmten Form vorliegen; der entsprechende Hinweis wird bei Betätigen des **Einlese**-Buttons gegeben.

Anschließend wird der Dateiname einschl. Pfad der entsprechenden Datei abgefragt.

Es werden sämtliche vorhandenen Datensätze eingelesen und in die Tabelle übernommen. Bereits bestehende Tabellenzeilen bleiben erhalten.

Wenn keine Daten gelesen werden können, erfolgt eine entsprechende Meldung am Bildschirm.

• Import aus einem 4H-Programm

Voraussetzung zur Anwendung des DTE[®]-Import-Werkzeugs ist, dass sich ein **pcae**-Programm auf dem Rechner befindet, das Ergebnisdaten exportieren kann.

Die statische Berechnung eines Bauteils beinhaltet i.A. die Modellbildung mit anschließender Berechnung des Tragsystems sowie nachfolgender Einzelnachweise von Detailpunkten.

Bei der Beschreibung eines Details sind die zugehörigen Schnittgrößen aus den Berechnungsergebnissen des Tragsystems zu extrahieren und dem Detailnachweis zuzuführen.

In der 4H-Programmorganisation gibt es hierzu verschiedene Vorgehensweisen

- zum einen können Tragwerks- und Detailprogramm fest miteinander verbunden sein, d.h. die Schnittgrößenübergabe erfolgt intern. Es sind i.A. keine weiteren Eingaben (z.B. Geometrie) notwendig, aber auch möglich (z.B. weitere Belastungen), die Programme bilden eine Einheit.

Dies ist z.B. bei dem 4H-Programm *Stütze mit Fundament* der Fall.

- zum anderen können Detailprogramme Schnittgrößen von in Tragwerksprogrammen speziell festgelegten Exportpunkten über ein zwischengeschaltetes Export/Import-Tool einlesen

Das folgende Beispiel eines einfachen Rahmens erläutert diesen 4H-Schnittgrößen-Export/Import.

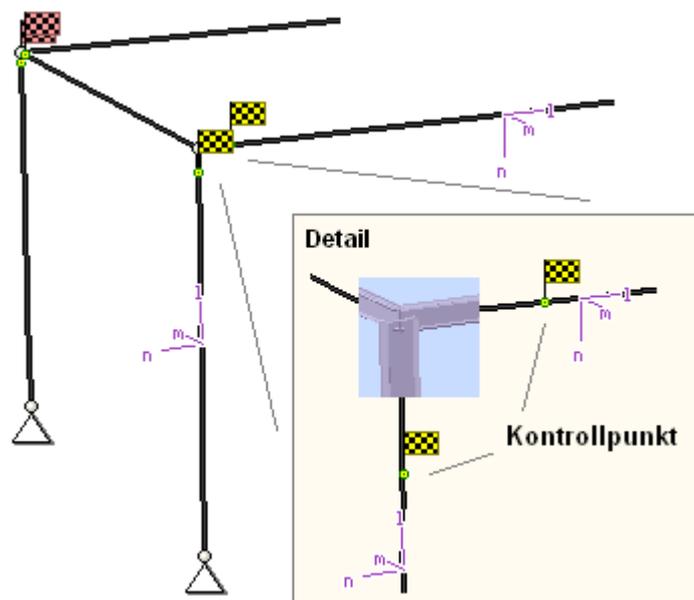
Zunächst sind im exportierenden *4H*-Programm (z.B. **4H-FRAP**) die Stellen zu kennzeichnen, deren Schnittgrößen beim nächsten Rechenlauf exportiert, d.h. für den Import bereitgestellt, werden sollen.

In diesem Beispiel sollen die Schnittgrößen für eine Querschnittsbemessung übergeben werden.

Dazu ist an der entsprechenden Stelle ein Kontrollpunkt zu setzen.

Ausführliche Informationen zum Export entnehmen Sie bitte dem DTE[®]-**Schnittgrößenexport**.

Nach einer Neuberechnung des Rahmens stehen die Exportschnittgrößen dem aufnehmenden *4H*-Programm (z.B. *4H-BETON*, *4H-EC3SA*, *4H-EC3BT*, *4H-EC3RE*, *4H-EC3GT*, *4H-EC3TT* etc.) zum Import zur Verfügung.



aus dem aufnehmenden *4H*-Programm wird nun über den **Import**-Button das Fenster zur DTE[®]-**Bauteilauswahl** aufgerufen. Hier werden alle berechneten Bauteile dargestellt, wobei diejenigen, die Schnittgrößen exportiert haben, dunkel gekennzeichnet sind.

Das gewünschte Bauteil kann nun markiert und über den **bestätigen**-Button ausgewählt werden. Alternativ kann durch Doppelklicken des Bauteils direkt in die DTE[®]-**Schnittgrößenauswahl** verzweigt werden.

Schnitt	Stab	bei s =	Material
+	Schnitt 1: Stab 3	bei s = 0.18 m	Stahlriegel, Anschnitt, Anschluss 1
+	Schnitt 2: Stab 5	bei s = 0.00 m	Stahlriegel, Anschluss 2
+	Schnitt 3: Stab 7	bei s = 2.00 m	Stahlbetonriegel
+	Schnitt 4: Stab 9	bei s = 4.00 m	Stahlstütze, Anschluss 2
+	Schnitt 5: Stab 10	bei s = 3.88 m	Stahlstütze, Anschnitt, Anschluss 1
+	Schnitt 6: Stab 11	bei s = 0.00 m	Stahlbetonstütze

In der Schnittgrößenauswahl werden die verfügbaren Schnittgrößenkombinationen aller im übergebenden Programm gekennzeichneten Schnitte angeboten. Dabei sind diejenigen Schnitte deaktiviert, deren Material nicht kompatibel mit dem Detailprogramm ist.

Es wird nun der Schnitt angeklickt und damit geöffnet, dessen Schnittgrößen eingelesen werden sollen.

Schnitt 1: Stab 3 bei s = 0.18 m							
Stahlriegel, Anschnitt, Anschluss 1 Material: Stahl, Querschnitt: Profil: IPE240							
	N kN	V _m kN	V _n kN	T kNm	M _m kNm	M _n kNm	
⊕ Lastfallergebnisse							
⊕ Nachweis 2: Schnittgrößenermittlung (Th. I. Ord.)							
⊖ Nachweis 3: EC 3 Tragfähigkeit (Th. I. Ord.)							
⊕ Lastkollektive							
⊖ Zusammenfassung Nachweis 3							
	min N	-18.34	15.66	-14.44	0.00	-2.76	13.43
	max N	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
	min V _n	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
	max V _n	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
	min V _z	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
	max V _z	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
	min T	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
	max T	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
	min M _n	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
	max M _n	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
	min M _z	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
	max M _z	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
⊕ Schnitt 2: Stab 5 bei s = 0.00 m Stahlriegel, Anschluss 2							
⊕ Schnitt 3: Stab 7 bei s = 2.00 m Stahlbetonriegel							
⊕ Schnitt 4: Stab 9 bei s = 4.00 m Stahlstütze, Anschluss 2							
⊕ Schnitt 5: Stab 10 bei s = 3.88 m Stahlstütze, Anschnitt, Anschluss 1							
⊕ Schnitt 6: Stab 11 bei s = 0.00 m Stahlbetonstütze							

In 4H-EC3SA ist der komplette verfügbare Schnittgrößensatz importierbar, was durch gelbe Hinterlegung der Spalten angezeigt wird.

Die Schnittgrößenkombinationen können beliebig zusammengestellt werden; **pcae** empfiehlt jedoch, nur diejenigen auszuwählen, die als Bemessungsgrößen für den zu führenden Detailnachweis relevant sind.

ein nützliches Hilfsmittel bietet dabei der dargestellte Button, mit dem die Anzahl zu übertragender Lastkombinationen durch Eliminierung doppelter Zeilen stark reduziert werden kann.

Wird nun die DTE[®]-Schnittgrößenauswahl bestätigt, bestückt das Importprogramm die Schnittgrößentabelle, wobei ggf. vorhandene Kombinationen erhalten bleiben.

	N _{Ed} kN	M _{y,Ed} kNm	V _{z,Ed} kN	M _{z,Ed} kNm	V _{y,Ed} kNm	nur für ○,□-Profile M _{x,Ed} kNm	Bezeichnung
	-18.34	-2.76	-14.44	13.43	15.66	-0.00	min N
	-15.93	34.14	-24.26	17.91	25.18	-0.01	max N
	-17.44	-28.68	-7.61	4.33	0.88	0.00	min V _n

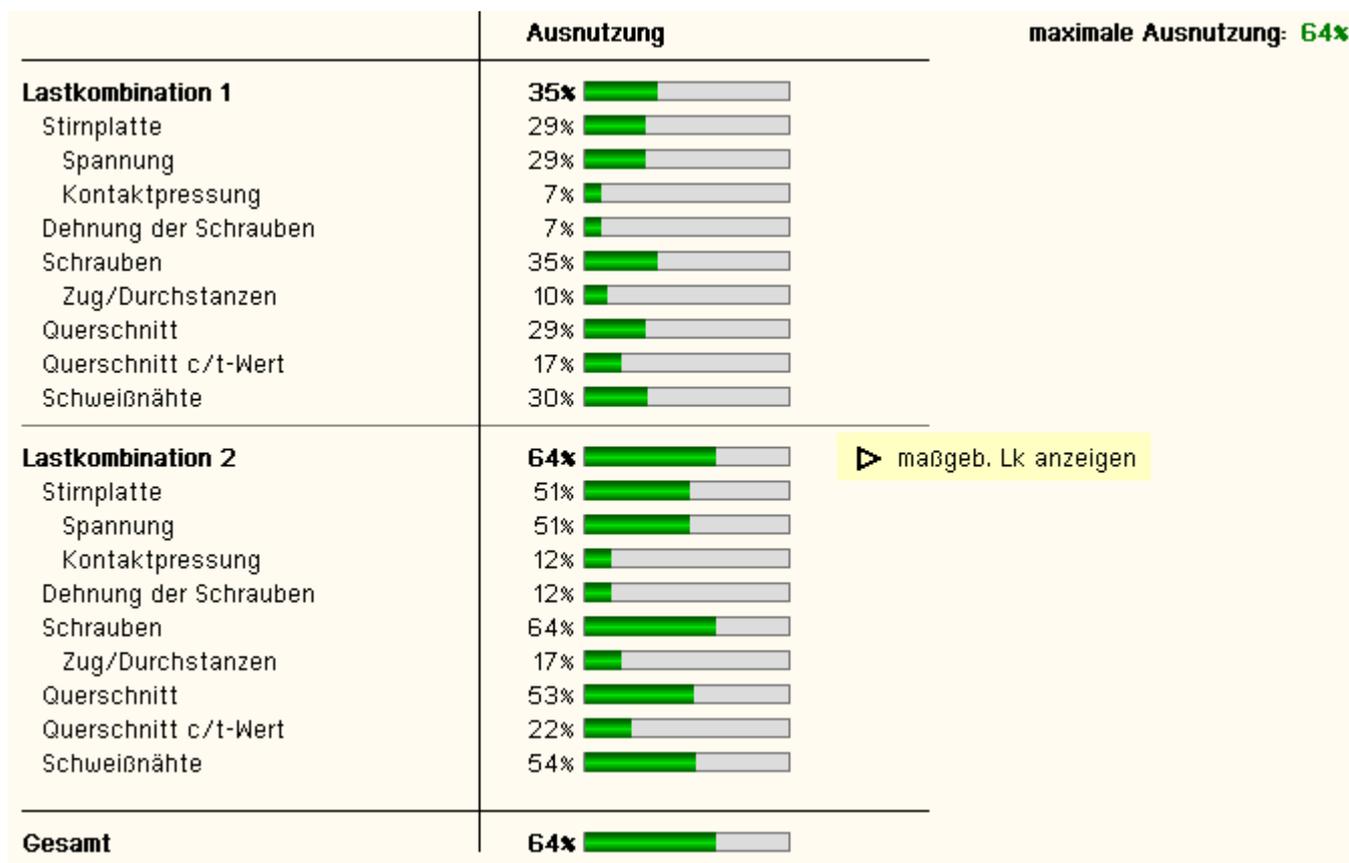
Wenn eine Reihe von Anschlüssen gleichartig ausgeführt werden soll, können in einem Rutsch weitere Schnittgrößen anderer Schnitte aktiviert und so bis zu 10.000 Kombinationen übertragen werden.

Die Kompatibilität der Querschnitts- und Nachweisparameter zwischen exportierendem und importierendem Programm ist zu gewährleisten.
 Eine Aktualisierung der importierten Schnittgrößenkombinationen, z.B. aufgrund einer Neuberechnung des exportierenden Tragwerks, erfolgt nicht!

Ergebnisübersicht



das fünfte Register gibt einen Überblick über die ermittelten Ergebnisse

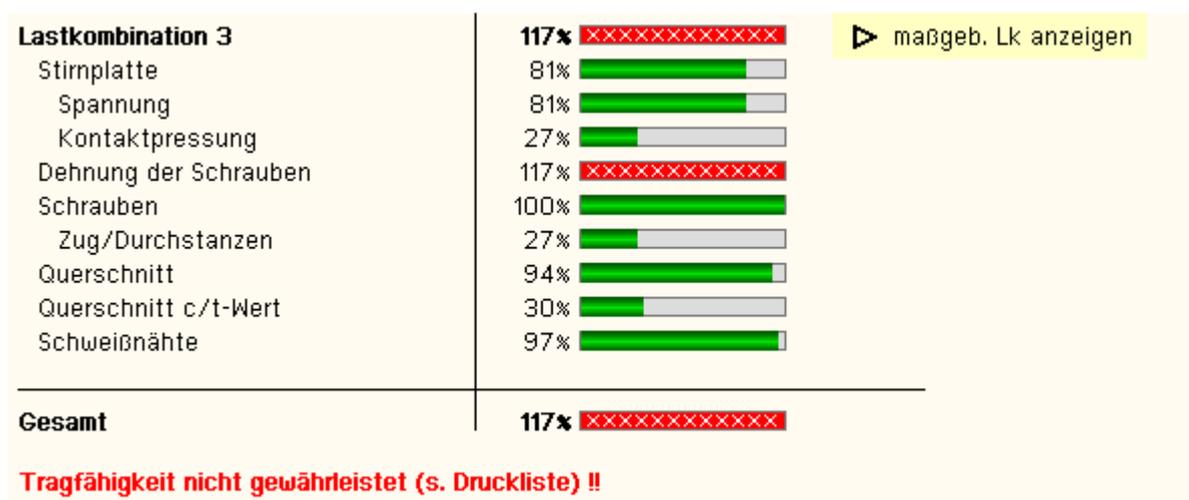


Zur sofortigen Kontrolle und des besseren Überblicks halber werden die Ergebnisse in diesem Register lastfallweise übersichtlich zusammengestellt.

Eine Box zeigt an, ob ein Lastfall die Tragfähigkeit des Anschlusses überschritten hat (rot ausgekreuzt) oder wie viel Reserve noch vorhanden ist (grüner Balken).

Die maximale Ausnutzung wird sowohl als 'Gesamt' unterhalb der Zusammenstellung als auch am oberen rechten Fensterrand angezeigt.

Ebenso wird die maßgebende Lastkombination gekennzeichnet und kann über den Aktionslink direkt in der Druckliste eingesehen werden.



Eine Meldung zeigt an, wenn ein Fehler aufgetreten oder die Tragfähigkeit überschritten ist.

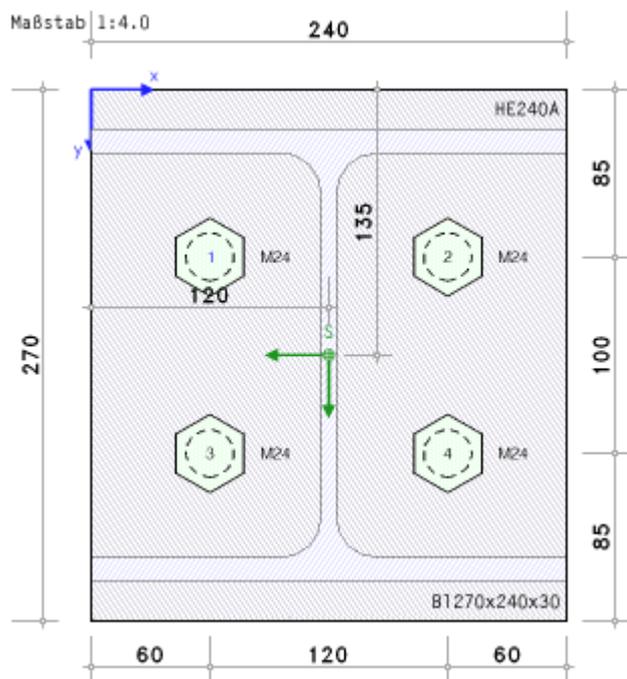
Wenn die Ursache des Fehlers nicht sofort ersichtlich ist, sollte die Druckliste in der **ausführlichen** Ergebnisdarstellung

geprüft werden.

Nachweis der Schrauben

Die Schrauben können beliebig auf dem Blech angeordnet sein und bilden einen Punktequerschnitt, dessen Schwerpunkt und Steifigkeitsparameter sowohl von der Anordnung als auch der Größe und Festigkeit der Schrauben abhängen.

Außerdem ist jeder Schraube aus der Stirnplattenberechnung eine eigene Zugkraft zugeordnet.



Die einwirkende Schubbelastung (Querkräfte und Torsionsmoment) wird auf den Punktequerschnitt der Schrauben verteilt.

Zur Berechnung vorgespannter Schraubverbindungen s. auch [pdf-Dokument](#).

Berechnung eines Punktequerschnitts

Zunächst wird das y-z-Koordinatensystem in einen beliebigen Punkt (z.B. den Lasteinleitungspunkt) gelegt. Bezogen darauf sind die Koordinaten des Punktehaufens (hier: das Schraubenfeld) gegeben.

Für jeden Punkt lassen sich zu einer einwirkenden Schnittgrößenkombination die resultierenden Kräfte in Richtung der Koordinatenachsen sowie der resultierenden Gesamtkraft berechnen.

Für einen Punktehaufen im y/z-Koordinatensystem gilt (i = Schraubenindex)

$A = \sum A_i$ Fläche des Punktequerschnitts

$y_{si} = \sum (A_i \cdot y_i) / A$... und ... $z_{si} = \sum (A_i \cdot z_i) / A$ Schwerpunkt des Punktequerschnitts

$I_p = \sum (I_{yi} + I_{zi})$... mit ... $I_{yi} = A_i \cdot z_i^2$... und ... $I_{zi} = A_i \cdot y_i^2$ polares Trägheitsmoment

Um die Unterschiede in Steifigkeit und Belastung jeder Schraube zu berücksichtigen, werden die Querschnittswerte gewichtet. Die Wichtungsfaktoren enthalten die Anteile aus der Geometrie

$f_{v,ti,geo} = A_i / A_{bez}$... mit ...

A_i Spannungs- bzw. Schaftquerschnitt der Schraube i (je nachdem ob das Gewinde oder der Schaft in der Scherfuge liegen)

A_{bez} Bezugsfläche (hier: mittlere Schraubenfläche)

und der Zugbelastung aus der FE-Berechnung, wobei den Interaktionsbedingungen für Abscheren mit Zug Rechnung getragen wird

$f_{v,ti,zug} = 1 - U_{ti} / 1.4$... mit ... $U_{ti} = F_{ti} / F_{ti,Rd}$ Zug-Ausnutzung der Schraube i

Sie werden als Produkt der Einzelkomponenten

$$f_{v,ti} = f_{v,ti,geo} \cdot f_{v,ti,zug}$$

mit der Querschnittsfläche multipliziert

$$A_i' = f_{v,ti} \cdot A_i$$

Daraus ergeben sich geänderte Schwerpunktskoordinaten sowie das polare Trägheitsmoment I_p' .

Damit ergibt sich für jeden Punkt bzw. jede Schraube i

$$T_{y,i} = f_{v,ti} \cdot \left[\frac{V_y}{A_i'} - \frac{M_x}{I_p'} \cdot z_i \right] \quad \text{und} \quad T_{z,i} = f_{v,ti} \cdot \left[\frac{V_z}{A_i'} + \frac{M_x}{I_p'} \cdot y_i \right] \quad \text{und} \quad T_i = \sqrt{T_{y,i}^2 + T_{z,i}^2}$$

$T_{y,i}, T_{z,i}$... Kräfte in den Koordinatenrichtungen

T_i resultierende Kraft der Schraube i

Die Berechnung des Punktequerschnitts wird protokolliert:

Punktequerschnitt

y_i, z_i Koordinaten bezogen auf den Lasteinleitungspunkt (Trägerschwerpunkt), $F_{t,i}$ Zugkräfte, $f_{vt,i}$ Wichtungsfaktoren

Schraube 1	$y_1 = 60.0$ mm	$z_1 = -50.0$ mm	$F_{t,1} = 51.5$ kN	$f_{vt,1} = 0.747$
Schraube 2	$y_2 = -60.0$ mm	$z_2 = -50.0$ mm	$F_{t,2} = 84.8$ kN	$f_{vt,2} = 0.583$
Schraube 3	$y_3 = 60.0$ mm	$z_3 = 50.0$ mm	$F_{t,3} = 138.3$ kN	$f_{vt,3} = 0.320$
Schraube 4	$y_4 = -60.0$ mm	$z_4 = 50.0$ mm	$F_{t,4} = 193.2$ kN	$f_{vt,4} = 0.050$

Berechnung des Punktequerschnitts

Schubkräfte

Schraube 1	$T_{y,1} = 25.08$ kN	$T_{z,1} = -81.48$ kN	$T_1 = 85.26$ kN
Schraube 2	$T_{y,2} = 19.58$ kN	$T_{z,2} = -77.01$ kN	$T_2 = 79.46$ kN
Schraube 3	$T_{y,3} = 4.62$ kN	$T_{z,3} = -34.90$ kN	$T_3 = 35.20$ kN
Schraube 4	$T_{y,4} = 0.72$ kN	$T_{z,4} = -6.61$ kN	$T_4 = 6.65$ kN

Nachweise

Abscheren mit Zug

Es liegt Schraubenkategorie A vor.

Informationen zur Berechnung der Tragfähigkeit entnehmen Sie bitte der allgemeinen Beschreibung der Schrauben mit [Abscherbeanspruchung](#).

Lochleibung

Es liegt Schraubenkategorie A vor.

Da für Anschlussblech und Trägersteg oder -flansch unterschiedliche Randabstände und Blechdicken gelten, wird die Tragfähigkeit separat ermittelt.

Informationen zur Berechnung der Tragfähigkeit entnehmen Sie bitte der allgemeinen Beschreibung der Schrauben mit [Lochleibungsbeanspruchung](#).

Die Lochleibungstragfähigkeit wird je Schraube und Lastrichtung ermittelt.

Nach ECCS wird die resultierende Lochleibungstragfähigkeit einer Schraube als Minimalwert der vektoriellen Addition der Krafrichtungen gewonnen.

Zug und Durchstanzen

Über die Verformung des Stirnblechs werden die Schrauben auf Zug, das Stirnblech auf Durchstanzen beansprucht.

Es liegt Schraubenkategorie D vor.

Nähere Informationen zur Berechnung der Tragfähigkeit entnehmen Sie bitte der allgemeinen Beschreibung der Schrauben mit [Zugbeanspruchung](#).

Gesamt

Für jede Schraube wird die maximale Ausnutzung berechnet und im Anschluss daran die Gesamtausnutzung nachgewiesen.

Nachweis der Schrauben

U_{tp} Ausnutzung aus Zug/Durchstanzen, U_{vt} Ausnutzung aus Abscheren mit Zug, U_b Ausnutzung aus Lochleibung, U Ausnutzung der Schrauben

Schraube 1	$U_{tp,1} = 0.253$	$U_{vt,1} = 0.672$	$U_{b,1} = 0.169$	$U_1 = 0.672$
Schraube 2	$U_{tp,2} = 0.417$	$U_{vt,2} = 0.755$	$U_{b,2} = 0.156$	$U_2 = 0.755$
Schraube 3	$U_{tp,3} = 0.680$	$U_{vt,3} = 0.689$	$U_{b,3} = 0.068$	$U_3 = 0.689$
Schraube 4	$U_{tp,4} = 0.950$	$U_{vt,4} = 0.717$	$U_{b,4} = 0.013$	$U_4 = 0.950$
Gesamt:	$U_{tp} = 0.950$	$U_{vt} = 0.755$	$U_b = 0.169$	$U = 0.950 < 1$ ok.

Ausnutzung der Schrauben [Schraube 4] $U_{max} = 0.950 < 1$ **ok.**

Spannungsnachweis für Platten n. EC 3

Der Tragsicherheitsnachweis der dünnwandigen Plattenquerschnitte kann nach dem Nachweisverfahren *Elastisch-Elastisch* oder nach dem Nachweisverfahren *Elastisch-Plastisch* geführt werden.

Nachweisverfahren *Elastisch-Elastisch*

Beim Nachweisverfahren *Elastisch-Elastisch* (E-E) werden die Schnittgrößen (Beanspruchungen) auf Grundlage der Elastizitätstheorie bestimmt.

Der Spannungsnachweis erfolgt mit dem Fließkriterium aus DIN EN 1993-1-1, Abs. 6.2.1(5).

elastisches Widerstandsmoment

$$w_{el} = t^2/6$$

Normalspannungen am Plattenrand

$$\sigma_x = m_{xx}/w_{el}$$

$$\sigma_y = m_{yy}/w_{el}$$

$$\tau_{xy} = m_{xy}/w_{el}$$

Schubspannungen in Plattenmitte

$$\tau_{xz} = 1.5 \cdot q_x/t \leq \tau_{Rd}$$

$$\tau_{yz} = 1.5 \cdot q_y/t \leq \tau_{Rd}$$

Vergleichsspannung

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

Die Spannungsnachweise werden über die Plattendicke extremiert, die Ausnutzungen ergeben sich zu

$$U_{\sigma x} = |\sigma_x|/\sigma_{Rd} \quad \dots \text{ mit } \dots \sigma_{Rd} = f_y/\gamma_{M0}$$

$$U_{\sigma y} = |\sigma_y|/\sigma_{Rd}$$

$$U'_\sigma = \max(U_{\sigma x}, U_{\sigma y})$$

$$U_{\tau xy} = |\tau_{xy}|/\tau_{Rd} \quad \dots \text{ mit } \dots \tau_{Rd} = f_y/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})$$

$$U_{\tau xz} = |\tau_{xz}|/\tau_{Rd}$$

$$U_{\tau yz} = |\tau_{yz}|/\tau_{Rd}$$

$$U'_\tau = \max(U_{\tau xy}, U_{\tau xz}, U_{\tau yz})$$

$$U'_{\sigma V} = \sigma_V/\sigma_{Rd}$$

Ausnutzung gesamt

$$U_\sigma = \max(U'_\sigma, U'_\tau, U'_{\sigma V})$$

Nachweisverfahren *Elastisch-Plastisch*

Beim Nachweisverfahren *Elastisch-Plastisch* (E-P) werden die Schnittgrößen (Beanspruchungen) auf Grundlage der Elastizitätstheorie bestimmt.

Der Spannungsnachweis erfolgt mit dem Fließkriterium aus DIN EN 1993-1-1, Abs. 6.2.1(5).

plastisches Widerstandsmoment

$$w_{pl} = 1.5 \cdot t^2 / 6$$

Normalspannungen

$$\sigma_x = m_{xx} / w_{pl}$$

$$\sigma_y = m_{yy} / w_{pl}$$

$$\tau_{xy} = m_{xy} / w_{pl}$$

Schubspannungen

$$\tau_{xz} = q_x / t$$

$$\tau_{yz} = q_y / t$$

Vergleichsspannung

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

Der Spannungsnachweis wird für σ_V geführt, die Ausnutzung ergibt sich zu

$$U_\sigma = \sigma_V / \sigma_{Rd}$$

Nachweisverfahren *Plastisch-Plastisch*

Beim Nachweisverfahren *Plastisch-Plastisch* (P-P) werden die Schnittgrößen (Beanspruchungen) unter Berücksichtigung der zulässigen plastischen Spannungen bestimmt.

Iterativ wird ein Gleichgewichtszustand aus äußeren Kräften und inneren Schnittgrößen ermittelt, bei dem die zulässigen plastischen Spannungen nicht überschritten werden.

Bei festgehaltener Spannung wachsen die Dehnungen an. Daher ist das maßgebende Versagenskriterium die zulässige plastische Dehnung, die n. EC 3-1-14 gesetzt werden sollte zu

$$\varepsilon_{y,pl} = 5 \%$$

Schweißnahtnachweis nach EC 3

I.A. werden die Verbindungselemente (Träger und Stirnblech, Träger und Stütze, Stütze und Fußplatte) mit Kehlnähten verbunden, deren Schweißnaht konzentriert in der Wurzellinie angenommen wird. Ebenso können (nicht durchgeschweißte) Stumpfnähte verwendet werden, die hier als HY-Nähte berücksichtigt werden.

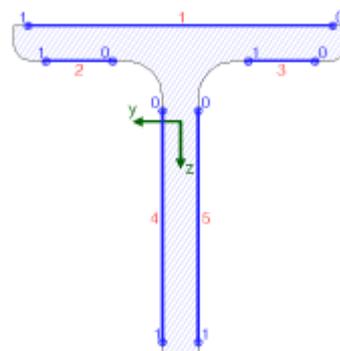
Die Wurzellinien der Einzelnähte bilden den Linienschnitt (s. G. *Wagenknecht: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 2*) zur Aufnahme bzw. Weiterleitung der Schnittgrößen.

Beispielhaft sind nebenstehend die Einzelnähte, die den Linienschnitt bilden, für einen T-Querschnitt dargestellt.

Die Nummerierung in rot kennzeichnet die Naht, die Zahlenangaben in blau bezeichnen die maßgebenden Nachweispunkte auf der jeweiligen Naht.

Für jeden Punkt einer Naht werden die Spannungen ermittelt und der Nachweis geführt.

Zur Orientierung ist das Querschnitts-Koordinatenkreuz, auf das die Schnittgrößen bezogen sind, in grün eingefügt.

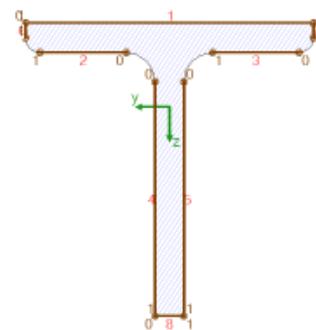


Bei umlaufenden Nähten werden an jeder gerade verlaufenden Profilkante Schweißnähte angeordnet.

Diese haben im Normalfall eine einheitliche Nahtdicke.

Es können Kehlnähte, nicht durchgeschweißte und voll durchgeschweißte Stumpfnähte angeordnet werden.

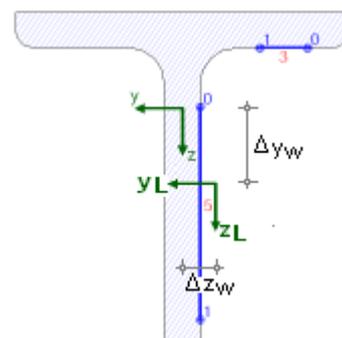
Zur Unterscheidung werden Kehlnähte in blau und Stumpfnähte in braun gezeichnet. Nebenstehend ist der Linienschnitt einer umlaufenden Stumpfnahnt dargestellt.



Es ist zu unterscheiden zwischen dem Querschnittsschwerpunkt und dem Schwerpunkt des Linienquerschnitts.

Da die Einzelnähte beliebig lang und dick sein können, kann der Schwerpunkt des Linienquerschnitts mehr oder weniger stark vom Querschnittsschwerpunkt abweichen.

Nebenstehend ist für einen Extremfall das um Δy_w und Δz_w abweichende Koordinatensystem des Linienquerschnitts dargestellt.



Bezogen auf den Schwerpunkt des Linienquerschnitts werden die Querschnittsfläche ΣA_w , ggf. die Querschnittsflächen in y- und z-Richtung $A_{w,y}$, $A_{w,z}$, die gesamte Nahtlänge Σl_w , die Trägheitsmomente $I_{w,y}$, $I_{w,z}$, $I_{w,yz}$ und die Differenzabstände zum Querschnittsschwerpunkt Δy_w , Δz_w ermittelt.

Querschnittswerte bezogen auf den Schwerpunkt des Linienquerschnitts:

$\Sigma A_w = 11.00 \text{ cm}^2$, $\Sigma l_w = 11.0 \text{ cm}$
 $I_{w,y} = 141.10 \text{ cm}^4$, $I_{w,z} = 21.46 \text{ cm}^4$, $I_{w,yz} = 40.09 \text{ cm}^4$, $\Delta y_w = -13.9 \text{ mm}$, $\Delta z_w = 31.8 \text{ mm}$

Über eine Interaktionsbeziehung (s. **Theorie**, mehrteilige Querschnitte) können den Einzelnähten Schnittgrößen zugeordnet werden, die im Schwerpunkt der Naht wirken.

Die lokalen Normalkräfte und Biegemomente werden über diese Beziehung ermittelt.

Da die Querkraftaufteilung unabhängig von der Momenten-/Normalkraftverteilung erfolgt, werden zwei Verfahren zur Verteilung der Querkräfte auf die Nähte angeboten.

- nach der *konventionellen Methode* wird die Querkraft denjenigen Nähten zugeordnet, die in Richtung der entsprechenden Querkraftkomponente verlaufen, d.h. horizontale Nähte tragen V_y , vertikale Nähte V_z .

Diese klassische Aufteilung wird beim Schweißnahtnachweis nach DIN 18800 angewandt.

Schnittgrößenverteilung auf die Einzelnähte:

Naht 3:	$N_w = -14.67 \text{ kN}$	$M_{y,w} = -0.00 \text{ kNm}$	$M_{z,w} = -0.04 \text{ kNm}$
Naht 5:	$N_w = 14.88 \text{ kN}$	$M_{y,w} = -1.03 \text{ kNm}$	$M_{z,w} = -0.04 \text{ kNm}$

Spannungen:

$\tau_{w,y} = -16.59 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 0.04 \text{ N/mm}^2$
$\tau_{w,y} = -4.15 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 3.50 \text{ N/mm}^2$

- alternativ wird die Querkraft in Abhängigkeit der *Steifigkeiten* auf die Nähte verteilt.

Dies entspricht der Theorie der Aussteifungssysteme, die jedoch im strengen Sinne nur gilt, wenn sich die Schweißnähte unabhängig voneinander verformen können.

Schnittgrößenverteilung auf die Einzelnähte:

Naht 3:	$N_w = -14.67 \text{ kN}$	$M_{y,w} = -0.00 \text{ kNm}$	$V_{z,w} = 0.01 \text{ kN}$	$M_{z,w} = -0.04 \text{ kNm}$	$V_{y,w} = -3.32 \text{ kN}$
Naht 5:	$N_w = 14.88 \text{ kN}$	$M_{y,w} = -1.03 \text{ kNm}$	$V_{z,w} = 3.15 \text{ kN}$	$M_{z,w} = -0.04 \text{ kNm}$	$V_{y,w} = -3.73 \text{ kN}$

Damit werden die Spannungen in den maßgebenden Nachweispunkten berechnet.

Spannungen in den Endpunkten der Einzelnähte:

Naht 3, Pkt. 0:	$\sigma_{w,x} = -132.81 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,y} = -16.59 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 0.04 \text{ N/mm}^2$
Pkt. 1:	$\sigma_{w,x} = -13.86 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,y} = -16.59 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 0.04 \text{ N/mm}^2$
Naht 5, Pkt. 0:	$\sigma_{w,x} = 92.58 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,y} = -4.15 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 3.50 \text{ N/mm}^2$
Pkt. 1:	$\sigma_{w,x} = -59.51 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,y} = -4.15 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 3.50 \text{ N/mm}^2$

Sowohl Druck- als auch Zugnähte werden entweder mit dem *richtungsabhängigen*

Nachweis für Naht 3, Pkt. 0:Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche ($\alpha = 45^\circ$, $\sigma_w = \sigma_{w,x}$, $\tau_w = \tau_{w,z}$):

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \cos(\alpha) - \tau_w \cdot \sin(\alpha) = -93.9 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_s = \sigma_w \cdot \sin(\alpha) + \tau_w \cdot \cos(\alpha) = -93.9 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_p = \tau_{w,y} = 16.6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1,w,Ed} = (\sigma_s^2 + 3 \cdot (\tau_s^2 + \tau_p^2))^{1/2} = 19.00 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit der Schweißnaht (Bed.1): $f_{1,w,Rd} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2}) = 36.00 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{1,w,Ed} = 19.00 \text{ kN/cm}^2 < f_{1,w,Rd} = 36.00 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow \text{Ausnutzung } U = 0.528 < 1 \text{ ok.}$$

$$\sigma_{2,w,Ed} = \sigma_s = 9.39 \text{ kN/cm}^2$$

Tragfähigkeit der Schweißnaht (Bed.2): $f_{2,w,Rd} = 0.9 \cdot f_u / \gamma_{M2} = 25.92 \text{ kN/cm}^2$

$$\sigma_{2,w,Ed} = 9.39 \text{ kN/cm}^2 < f_{2,w,Rd} = 25.92 \text{ kN/cm}^2 \Rightarrow \text{Ausnutzung } U = 0.362 < 1 \text{ ok.}$$

oder dem vereinfachten Verfahren nachgewiesen.

Nachweis für Naht 3, Pkt. 0:Spannungen auf der wirksamen Nahtfläche ($\alpha = 45^\circ$):

$$\sigma_{w,Ed} = (\sigma_{w,x}^2 + \tau_{w,y}^2 + \tau_{w,z}^2)^{1/2} = 133.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{resultierende Nahtkraft: } F_{w,Ed} = \sigma_{w,Ed} \cdot a = 13.38 \text{ kN/cm}$$

Tragfähigkeit der Schweißnaht: $F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 20.78 \text{ kN/cm}$, $a = 10.0 \text{ mm}$, $f_{vw,d} = 207.85 \text{ N/mm}^2$

$$F_{w,Ed} = 13.38 \text{ kN/cm} < F_{w,Rd} = 20.78 \text{ kN/cm} \Rightarrow \text{Ausnutzung } U = 0.644 < 1 \text{ ok.}$$

Da die Beschreibung der Schweißnahtnachweise nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung des **Schweißnahtnachweises** verwiesen.

Besonderheiten bei doppelt-symmetrischen Querschnitten mit umlaufenden Kehlnähten

Zu den doppelt-symmetrischen Querschnitten im Sinne des Schweißnahtnachweises zählen das Rohr- und Rechteckprofil sowie der Rundstahl, die umlaufend geschweißt sind.

Sie sind in der Lage, zusätzlich zu den Normal-, Querkräften und Biegemomenten auch Torsionsmomente aufzunehmen.

Querschnittsnachweis nach EC 3

Der Tragsicherheitsnachweis der offenen, dünnwandigen Querschnitte kann nach dem Nachweisverfahren *Elastisch-Elastisch* (DIN EN 1993-1-1, Abs. 6.2.1(5)) oder nach dem Nachweisverfahren *Elastisch-Plastisch* geführt werden (DIN EN 1993-1-1, Abs. 6.2.1(6)).

Nachweisverfahren *Elastisch-Elastisch*

Beim Nachweisverfahren *Elastisch-Elastisch* (E-E) werden die Schnittgrößen (Beanspruchungen) auf Grundlage der Elastizitätstheorie bestimmt. Der Spannungsnachweis erfolgt mit dem Fließkriterium aus DIN EN 1993-1-1, Abs. 6.2.1(5), Formel 6.1.

elastischer Querschnittsnachweis:Bemessungsgrößen: $N_{Ed} = 0.21 \text{ kN}$, $V_{z,Ed} = 3.16 \text{ kN}$, $M_{z,Ed} = -0.60 \text{ kNm}$, $V_{y,Ed} = -7.05 \text{ kN}$ elast. Spannungen: $\max \sigma_x = 12.8 \text{ N/mm}^2$, $\min \sigma_x = -12.7 \text{ N/mm}^2$, $\max \tau = 6.0 \text{ N/mm}^2$, $\max \sigma_v = 12.8 \text{ N/mm}^2$ zul. Spannungen: $\sigma_{Rd} = 235.0 \text{ N/mm}^2$, $\tau_{Rd} = 135.7 \text{ N/mm}^2$ Ausnutzungen: Tragfähigkeit $U_\sigma = 0.054 < 1 \text{ ok.}$, c/t -Verhältnis $U_{c/t} = 0.046 < 1 \text{ ok.}$ **Nachweisverfahren *Elastisch-Plastisch***

Beim Nachweisverfahren *Elastisch-Plastisch* (E-P) werden die Schnittgrößen (Beanspruchungen) auf Grundlage der Elastizitätstheorie bestimmt.

Anschließend wird mit Hilfe des Teilschnittgrößenverfahrens (TSV) mit Umlagerung nach R. Kindmann, J. Frickel: *Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit* überprüft, ob die Schnittgrößen vom Querschnitt unter Ausnutzung der plastischen Reserven aufgenommen werden können (plastische Querschnittstragfähigkeit).

Es können Dreiblechquerschnitte (I-, C-, U-, Z-, L-, T-Querschnitte) und Rohre als Profile oder typisierte Querschnitte unter zweiachsiger Beanspruchung einschl. St. Venant'scher Torsion und Wölbkrafttorsion nachgewiesen werden.

Dieses Berechnungsverfahren ist allgemeingültiger als die in DIN EN 1993 angegebenen Interaktionen für spezielle Schnittgrößenkombinationen.

Eine Begrenzung der Grenzbiegemomente wie in DIN 18800, El. 755, ist in DIN EN 1993 nicht erforderlich.

plastischer Querschnittsnachweis:

Bemessungsgrößen: $N_{Ed} = 0.21 \text{ kN}$, $V_{z,Ed} = 3.16 \text{ kN}$, $M_{z,Ed} = -0.60 \text{ kNm}$, $V_{y,Ed} = -7.05 \text{ kN}$

elast. Spannungen: $\max \sigma_x = 12.8 \text{ N/mm}^2$, $\min \sigma_x = -12.7 \text{ N/mm}^2$, $\max \tau = 6.0 \text{ N/mm}^2$, $\max \sigma_v = 12.8 \text{ N/mm}^2$

Ausnutzungen: Tragfähigkeit $U_{\sigma} = 0.043 < 1$ **ok.**, c/t-Verhältnis $U_{c/t} = 0.046 < 1$ **ok.**

Die Grenzwerte $\text{grenz}(c/t)$ werden je nach Nachweisverfahren aus DIN EN 1993-1-1, Abs. 5.5.2, Tab. 5.2, ermittelt.

Dies entspricht der Überprüfung der erforderlichen Klassifizierung des Querschnitts.

Läßt die Klassifizierung keinen plastischen Nachweis zu, wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

mehrteilige dünnwandige Querschnitte

Falls nicht alle Querschnittsteile miteinander verbunden sind, liegt ein mehrteiliger Querschnitt vor.

Bei einem derart gespreizten Querschnitt wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Teile durch Riegel oder Platten so miteinander gekoppelt sind, dass sie sich affin zueinander verformen.

Den Schubmittelpunkt des Gesamtquerschnitts erhält man durch gewichtete Summation der Schubmittelpunkte der Teile. Die Verwölbung mit dem Schubmittelpunkt (y_M, z_M) als Drehachse des i-ten Teils im Gesamtquerschnitt kann aus der Verwölbung des Teils mit dem i-ten Schubmittelpunkt $(y_{M,i}, z_{M,i})$ als Drehachse berechnet werden.

Die Verschiebung u in Richtung der Stabachse bzw. die Längsspannung für den linear-elastischen Fall kann dann lokal für jedes Teil formuliert werden.

$$y_M = \frac{\left(\sum_i y_{M,i} \cdot I_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot I_{mn,i} \right) \cdot \sum_i I_{n,i} + \left(\sum_i z_{M,i} \cdot I_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot I_{mn,i} \right) \cdot \sum_i I_{mn,i}}{\sum_i I_{m,i} \cdot \sum_i I_{n,i} - \left(\sum_i I_{mn,i} \right)^2}$$

$$z_M = \frac{\left(\sum_i z_{M,i} \cdot I_{n,i} - \sum_i y_{M,i} \cdot I_{mn,i} \right) \cdot \sum_i I_{m,i} + \left(\sum_i y_{M,i} \cdot I_{m,i} - \sum_i z_{M,i} \cdot I_{mn,i} \right) \cdot \sum_i I_{mn,i}}{\sum_i I_{m,i} \cdot \sum_i I_{n,i} - \left(\sum_i I_{mn,i} \right)^2}$$

$$\omega_M = \omega_{M,i} - (y - e_{y,i}) \cdot (z_{M,i} - z_M) + (z - e_{z,i}) \cdot (y_{M,i} - y_M)$$

$$u = \left(u_S + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \varphi_y - \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot \varphi_z \right) + (z - e_{z,i}) \cdot \left(\varphi_y - (y_{M,i} - y_M) \cdot \vartheta' \right) - (y - e_{y,i}) \cdot \left(\varphi_z - (z_{M,i} - z_M) \cdot \vartheta' \right) - \omega_{M,i} \cdot \vartheta'$$

$$\sigma_{x,i}(y,z) = \frac{N}{A} - \left((y - e_{y,i}) + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \right) \cdot \frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + \left((z - e_{z,i}) + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \right) \cdot \frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + \left(\omega_{M,i} - (y - e_{y,i}) \cdot (z_{M,i} - z_M) + (z - e_{z,i}) \cdot (y_{M,i} - y_M) \right) \cdot \frac{M_\omega}{C_M}$$

$$= \left(\frac{N}{A} - \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot \frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot \frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \right)$$

$$- (y - e_{y,i}) \cdot \left(\frac{I_m \cdot M_n + I_{mn} \cdot M_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + (z_{M,i} - z_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \right) + (z - e_{z,i}) \cdot \left(\frac{I_n \cdot M_m + I_{mn} \cdot M_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} + (y_{M,i} - y_M) \cdot \frac{M_\omega}{C_M} \right) + \omega_{M,i} \cdot \frac{M_\omega}{C_M}$$

Die Querschnittsteile können biegesteif oder biegeschlaff miteinander verbunden sein.

Die Verteilung der Normalkräfte hängt vom Grad α der Biegekopplung ab (biegesteif: $\alpha = 1$, biegeschlaff: $\alpha = 0$).

Der Wert von α hat über den Steiner-Anteil der Teile Einfluss auf die Trägheitsmomente des Gesamtquerschnitts.

Die Querschnittswerte des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Querschnittswerte der Teile.

$$A = \sum_i A_i \dots e_y = \frac{\sum_i e_{y,i} \cdot A_i}{A} \dots e_z = \frac{\sum_i e_{z,i} \cdot A_i}{A}$$

$$I_m = \sum_i \left(I_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i \right) \dots I_n = \sum_i \left(I_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i \right)$$

$$I_{mn} = \sum_i \left(I_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i \right) \dots I_T = \sum_i I_{T,i}$$

$$C_M = \sum_i \left(C_{M,i} + (y_{M,i} - y_M)^2 \cdot I_{m,i} + (z_{M,i} - z_M)^2 \cdot I_{n,i} - 2 \cdot (y_{M,i} - y_M) \cdot (z_{M,i} - z_M) \cdot I_{mn,i} \right)$$

Die Normalkräfte verteilen sich im Verhältnis der Teilflächen.

$$N_i = \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot dA = \frac{A_i}{A} \cdot N + \alpha \cdot A_i \cdot \left(\frac{(e_{z,i} - e_z) \cdot I_n - (e_{y,i} - e_y) \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{(e_{z,i} - e_z) \cdot I_{mn} - (e_{y,i} - e_y) \cdot I_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_n \right)$$

Wenn die Krümmungen der Querschnittsteile identisch sind, lassen sich die (linear elastischen) Momente $M_{m,i}$ und $M_{n,i}$ der Teile bzgl. ihrer Schwerpunkte aus den Momenten M_m und M_n des Gesamtquerschnitts berechnen.

$$M_{m,i} = \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (z - e_{z,i}) \cdot dA = \frac{I_{m,i} \cdot I_n - I_{mn,i} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{I_{m,i} \cdot I_{mn} - I_{mn,i} \cdot I_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot I_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega$$

$$M_{n,i} = - \int_{A_i} \sigma_{x,i} \cdot (y - e_{y,i}) \cdot dA = \frac{I_{n,i} \cdot I_{mn} - I_{mn,i} \cdot I_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_m + \frac{I_{n,i} \cdot I_m - I_{mn,i} \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot M_n + \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot I_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot M_\omega$$

Für die Aufteilung der Querkräfte ergeben sich dann ähnliche Beziehungen.

$$V_m = -M'_n = \int_A (y - e_y) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left((y - e_{y,i}) + (e_{y,i} - e_y) \right) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(-M'_{n,i} + (e_{y,i} - e_y) \cdot N'_i \right)$$

$$V_n = M'_m = \int_A (z - e_z) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left((z - e_{z,i}) + (e_{z,i} - e_z) \right) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(M'_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N'_i \right)$$

$$V_{m,i} = \frac{I_{n,i}^+ \cdot I_m - I_{mn,i}^+ \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_m - \frac{I_{n,i}^+ \cdot I_{mn} - I_{mn,i}^+ \cdot I_n}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_n - \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot I_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega$$

$$V_{n,i} = - \frac{I_{m,i}^+ \cdot I_{mn} - I_{mn,i}^+ \cdot I_m}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_m + \frac{I_{m,i}^+ \cdot I_n - I_{mn,i}^+ \cdot I_{mn}}{I_m \cdot I_n - I_{mn}^2} \cdot V_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot I_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot I_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega$$

$$\dots \text{mit} \dots I_{m,i}^+ = I_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i \dots \text{und} \dots I_{n,i}^+ = I_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i$$

$$\dots \text{und} \dots I_{mn,i}^+ = I_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i$$

Die Torsionsmomente und das Wölbmoment verteilen sich im Verhältnis der Querschnittswerte auf die einzelnen Teile.

$$T_{t,i} = \frac{I_{T,i}}{I_T} \cdot T_t \dots T_{w,i} = \frac{C_{M,i}}{C_M} \cdot T_w \dots M_{\omega,i} = \frac{C_{M,i}}{C_M} \cdot M_\omega$$

Die Schnittgrößen des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Teilschnittgrößen.

$$N_i = \sum_i N_i \dots M_m = \sum_i \left(M_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N_i \right) \dots M_n = \sum_i \left(M_{n,i} - (e_{y,i} - e_y) \cdot N_i \right)$$

$$M_\omega = \sum_i \left(M_{\omega,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot M_{m,i} + (z_{M,i} - z_M) \cdot M_{n,i} \right)$$

$$V_m = \sum_i V_{m,i} \dots V_n = \sum_i V_{n,i} \dots T_t = \sum_i T_{t,i}$$

$$T_w = M'_\omega = \sum_i \left(T_{w,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot V_{m,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot V_{n,i} \right)$$

Beschreibung der Ergebnisse / Verifikation

Für typisierte Verbindungen gibt es hinreichend Versuchsergebnisse, die die Richtigkeit der bekannten Bemessungs-

regeln (s. Komponentenmethode, EC 3-1-8) belegen.

Hier soll anhand einiger ausgewählter Beispiele gezeigt werden, dass das vorliegende Programm *4H-EC3FS* die Tragfähigkeit hinreichend genau erfasst und damit zur Bemessung von Verbindungen mit variabler Schraubenqualität und -anordnung geeignet ist.

Die Vergleiche werden für eine reine Biegebelastung geführt mit

- Programm **4H-EC3BT**, biegesteifer Trägeranschluss, zur Berechnung von typisierten IH-Stößen mit 2 oder 4 Schrauben in einer Reihe mit der Komponentenmethode nach EC 3-1-8
- Versuche an der ETH-Zürich, *Das Tragverhalten und Rotationsvermögen geschraubter Stirnplattenverbindungen* (s. Literatur)

Eine Einschätzung der Modellierungsgenauigkeit erfolgt mit dem

- Programm *4H-ALFA-Faltwerk*, Finite-Elemente-Programm zur Berechnung von räumlichen Faltwerken

Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisausgabe erfolgt anhand von Beispiel 1 (s.u.).

Vergleiche zwischen 4H-EC3FS, 4H-EC3BT und ETH-Versuchen

Die Stirnplatte wird in S235, das Trägerprofil in S355 ausgeführt. Die Schrauben haben eine Festigkeit von 10.9, die i.A. mit großer Schlüsselweite (d.h. planmäßig vorgespannt) verwendet werden.

Die Stirnplatte wird *elastisch-plastisch* (d.h. FEM-Berechnung elastisch, Spannungsnachweis plastisch) berechnet.

Zusätzlich erfolgt eine *plastisch-plastische* Berechnung.

Die Schrauben werden in der FEM-Berechnung plastisch berücksichtigt, ihr Auslastungsfaktor wird mit $f_{t,f} = 1.0$ angenommen.

Die wirksame plastische Bruchdehnung der Schraube ist nach den Bestimmungen des neuen EC 3-1-14 auf 25% der maximalen Bruchdehnung ϵ_{ub} gesetzt.

Die Schrauben sind vorgespannt, d.h. sie erhalten die Regelvorspannkraft von $F_{p,C} = 154.3$ kN.

Bei der Anschlussbemessung mit der Komponentenmethode nach EC 3-1-8 wird die planmäßige Vorspannung hochfester Schrauben nicht berücksichtigt.

Bei plastisch-plastischer Berechnung wird in der FEM-Berechnung analog zu den Schrauben der Auslastungsfaktor der Stirnplatte mit $f_{y,f} = 1.0$ angenommen.

Die maximale Randdehnung der Stirnplatte ist nach den Bestimmungen des neuen EC 3-1-14 auf $\epsilon_{y,pl} = 5\%$ gesetzt.

Es wird vereinfachend mit einer einheitlichen Stahlsorte S355 gerechnet.

Die notwendige Umrechnung erfolgt für die Rotationssteifigkeit der Verbindung unter der Belastung $S_j = M_{j,Ed} / \varphi$.

In den *ETH*-Versuchen wird eine *volle* Vorspannung mit 0.7-facher Zugfestigkeit der Schraube vorausgesetzt. Dies entspricht der Regelvorspannkraft nach EC 3-1-8, die in den **pcae**-Programmen bei hochfesten Schrauben mit großer Schlüsselweite Verwendung findet.

Bei den Vergleichen der *ETH*-Versuche mit *4H-EC3FS* werden die unterschiedlichen Stahlsorten berücksichtigt.

Die notwendigen Umrechnungen betreffen

- das Bruchmoment $M_u = M_{Rd} \cdot \gamma_{M2}$ mit $\gamma_{M2} = 1.25$
- die Anfangsfedersteifigkeit der Anschlussverdrehung $c_{M,0} = M_0 / \varphi_0$ mit $M_0 = 0.5 \cdot M_{Rd}$

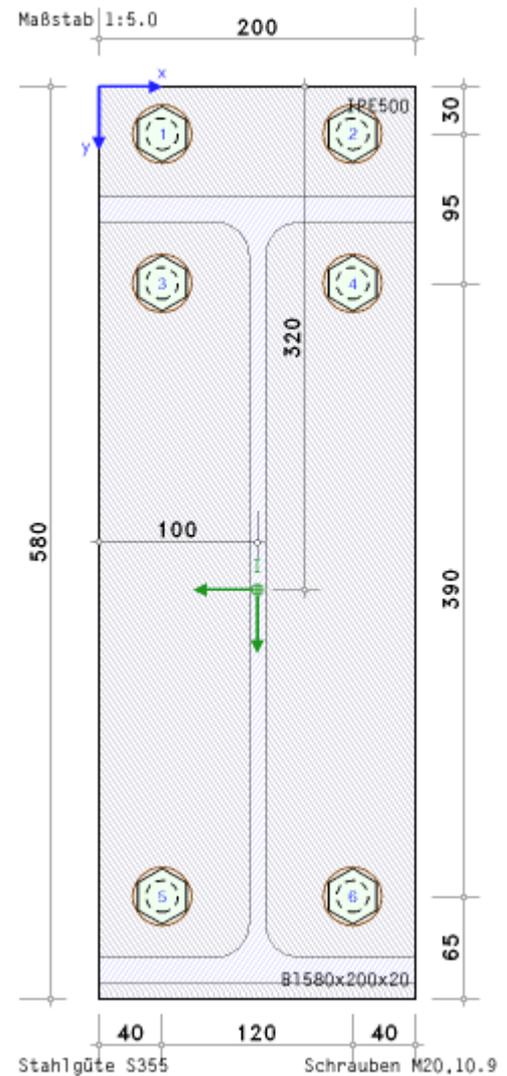
Beispiel 1: IPE500,S355, 3x2 Schrauben M20,10.9 (ETH-Versuch 8.1K1)

Die wesentlichen Abmessungen der Verbindung sind in der maßstäblichen Bildschirmgrafik angegeben.

Ebenso werden Schraubennummern vergeben, auf die sich in der Ergebnisdarstellung bezogen wird.

Das Stirnplattenkoordinatensystem ist in blau, das Querschnittskoordinatensystem in grün eingezeichnet.

Stirnplatte und das typisierte Trägerprofil werden mit Stahlsorte und Schraubenfestigkeit in der Grafik vermerkt.



Minimale Abstände der Schrauben auf der Stirnplatte

Schraube 1: $e_1 = 30.0 \text{ mm} > 1.2 \cdot d_0 = 26.4 \text{ mm}$, $e_1 = 30.0 \text{ mm} < 4 \cdot t + 40 \text{ mm} = 120.0 \text{ mm}$

Schraube 1: $p_1 = 95.0 \text{ mm} > 2.2 \cdot d_0 = 48.4 \text{ mm}$, $p_1 = 95.0 \text{ mm} < \min(14 \cdot t, 200 \text{ mm}) = 200.0 \text{ mm}$

Schraube 2: ***

Für jede Schraube werden die minimalen Abstände zu den Rändern und zwischen den Löchern überprüft und protokolliert. Es wird stets der Abstand 'in Krafrichtung' angenommen. Tritt ein Fehler auf, d.h. ist ein Abstand zu gering, erfolgt die Beendigung der Berechnung mit einer entsprechenden Meldung.

Die Stirnplatte wird zunächst **elastisch-plastisch** berechnet.

Die Schrauben werden plastisch berechnet, Federkonstante der Schrauben $c_f = 8265.1 \text{ kN/cm}$
 plastische Grenzkraft $F_{t,f} = f_{t,f} \cdot F_{t,Rd} = 176.4 \text{ kN}$, $f_{t,f} = 1.000$, $F_{t,Rd} = (k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s) / \gamma_{M2} = 176.40 \text{ kN}$, $k_2 = 0.90$
 wirksame Bruchdehnung $\epsilon_{t,f} = f_{t,e} \cdot \epsilon_{sub} = 2.3\%$, $f_{t,e} = 0.250$, $\epsilon_{sub} = 9.0\%$
 Vorspannkraft der Schrauben $F_{p,C} = 154.3 \text{ kN} < F_{t,f}$ **ok**, $f_{t,f}$, $f_{t,e}$ benutzerdefiniert
 rechnerischer Bettungsmodul der Stirnplatte $c_b = 10500.0 \text{ kN/cm}^3$
 Anzahl / Größe der finiten Elemente je Richtung $n_x / \Delta x = 26 / 7.7 \text{ mm}$, $n_y / \Delta y = 77 / 7.5 \text{ mm}$
 max. 50 Iterationsschritte bei einer Toleranzgrenze von 5‰

Die Schrauben werden durch Zugfedern mit der Federsteifigkeit c_f modelliert; bei Druckbelastung sind die Schraubenfedern wirkungslos.

Die Stirnbleche sind gegenseitig auf Druck gebettet (rechnerischer Bettungsmodul c_b) gelagert; bei Zug ist die Bettung wirkungslos.

Anzahl und Größe der Finiten Elemente können vom Programm in Abhängigkeit der geometrischen Vorgaben (Stirnblechgröße, Schraubenabstände, Profildicken) berechnet werden.

Die Elemente im Bereich der Lastlinien (Profilmittellinien) werden verstärkt, um die Steifigkeit des angeschweißten Trägers auf der Stirnplatte zu simulieren.

Bemessungsgrößen: $M_y = -306.00 \text{ kNm}$

Belastung der Stirnplatte:

Aus der Belastung des Trägers wird die elastische Spannungsverteilung über das Profil ermittelt. Diese Querschnittsspannungen werden als Linienlasten auf die Stirnplatte aufgebracht.

Spannungen in den Querschnittspunkten:

Lin. 1:	$x_a = 0.0 \text{ mm}, y_a = 78.0 \text{ mm}:$	$\sigma_{xa} = -157.16 \text{ N/mm}^2$
	$x_e = 200.0 \text{ mm}, y_e = 78.0 \text{ mm}:$	$\sigma_{xe} = -157.16 \text{ N/mm}^2$
Lin. 2:	$x_a = 0.0 \text{ mm}, y_a = 562.0 \text{ mm}:$	$\sigma_{xa} = 157.16 \text{ N/mm}^2$
	$x_e = 200.0 \text{ mm}, y_e = 562.0 \text{ mm}:$	$\sigma_{xe} = 157.16 \text{ N/mm}^2$
Lin. 3:	$x_a = 100.0 \text{ mm}, y_a = 78.0 \text{ mm}:$	$\sigma_{xa} = -157.16 \text{ N/mm}^2$
	$x_e = 100.0 \text{ mm}, y_e = 562.0 \text{ mm}:$	$\sigma_{xe} = 157.16 \text{ N/mm}^2$

Linienlasten auf der Stirnplatte:

Lin. 1:	$x_a = 0.0 \text{ mm}, y_a = 78.0 \text{ mm}:$	$q_a = -2514.59 \text{ kN/m}$
	$x_e = 200.0 \text{ mm}, y_e = 78.0 \text{ mm}:$	$q_e = -2514.59 \text{ kN/m}$
Lin. 2:	$x_a = 0.0 \text{ mm}, y_a = 562.0 \text{ mm}:$	$q_a = 2514.59 \text{ kN/m}$
	$x_e = 200.0 \text{ mm}, y_e = 562.0 \text{ mm}:$	$q_e = 2514.59 \text{ kN/m}$
Lin. 3:	$x_a = 100.0 \text{ mm}, y_a = 78.0 \text{ mm}:$	$q_a = -1603.05 \text{ kN/m}$
	$x_e = 100.0 \text{ mm}, y_e = 562.0 \text{ mm}:$	$q_e = 1603.05 \text{ kN/m}$

Die Einwirkung wird im Schwerpunkt des Trägerprofils übertragen. Die elastische Spannungsverteilung infolge der Einwirkung wird ermittelt und als Linienlast auf das Stirnblech aufgebracht.

Die Spannungen werden am dünnwandigen Querschnitt ohne Ausrundung und Linieneigung berechnet. Es wird eine konstante Liniendicke angesetzt.

Mit σ_x werden die Normalspannungen, mit τ die Schubspannungen bezeichnet. q_a und q_e sind die resultierenden Linienlasten am Anfang und Ende der Lastlinie. Für ein reines Biegemoment ergeben sich nur Normalspannungen.

Verformungen u_z [mm]

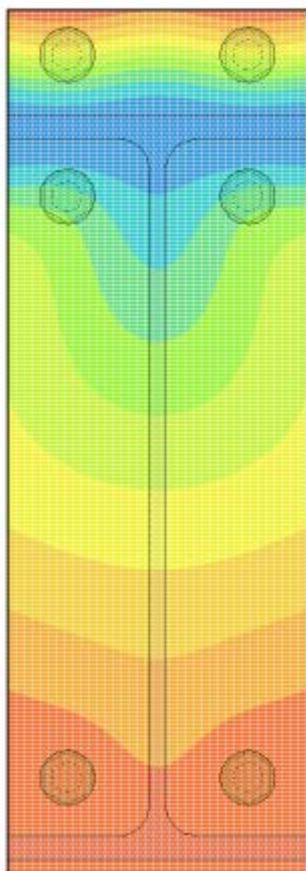
min $u_z = -0.0356 \text{ mm}$, max $u_z = 0.5401 \text{ mm}$

Kontaktpressungen b_z [N/mm²]

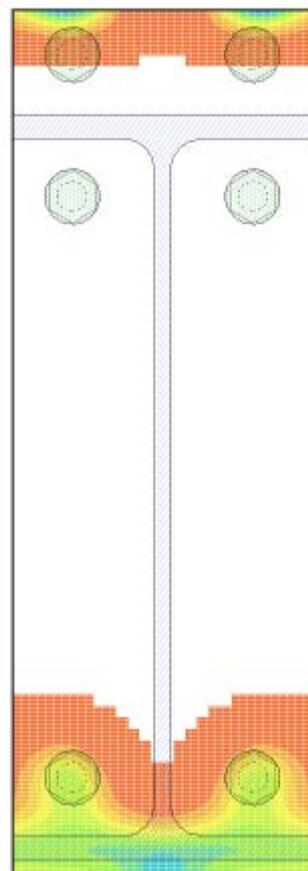
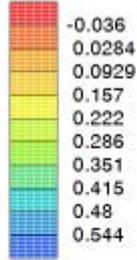
min $b_z = 0.00 \text{ N/mm}^2$, max $b_z = 148.62 \text{ N/mm}^2$

Momente m_{xx} [kNm/m]

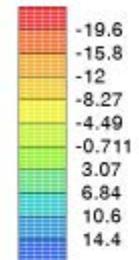
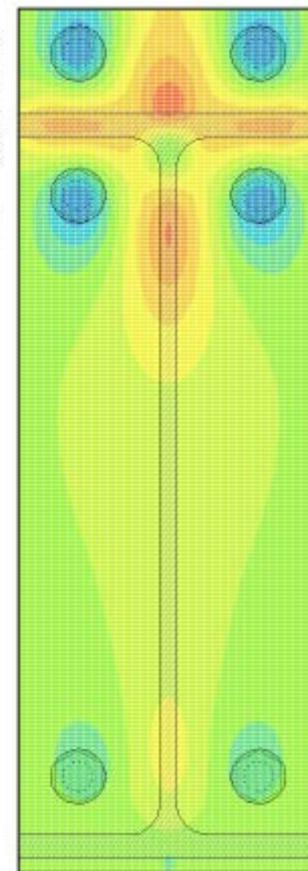
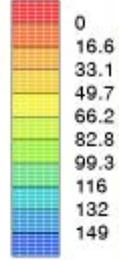
min $m_{xx} = -19.56 \text{ kNm/m}$, max $m_{xx} = 14.28 \text{ kNm/m}$



Verformungen abhebend positiv

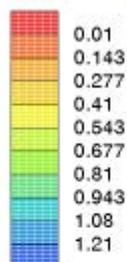
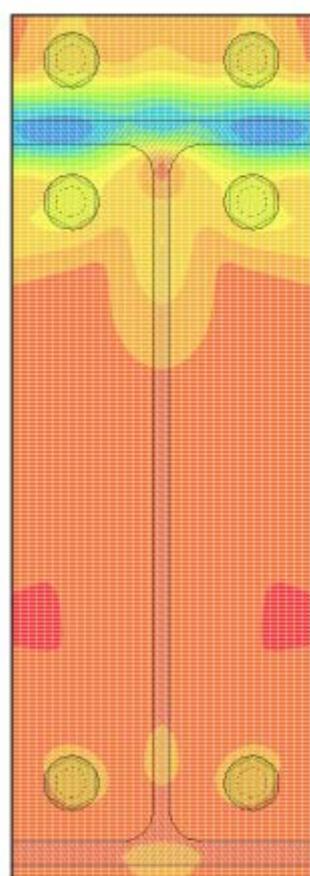


Kontaktpressungen Druck positiv

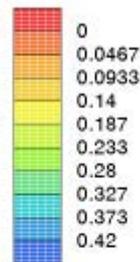
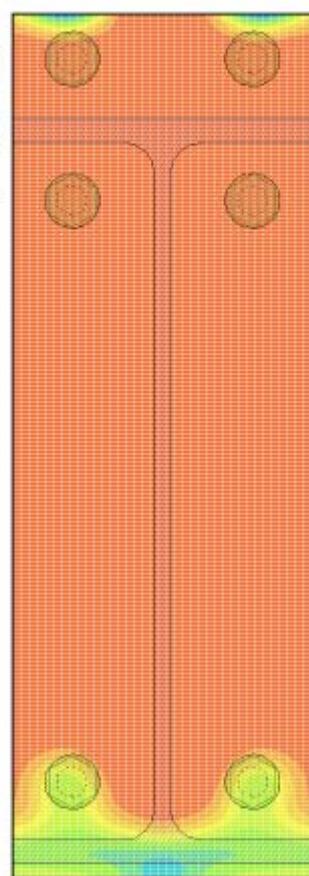


etc.

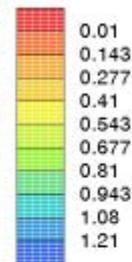
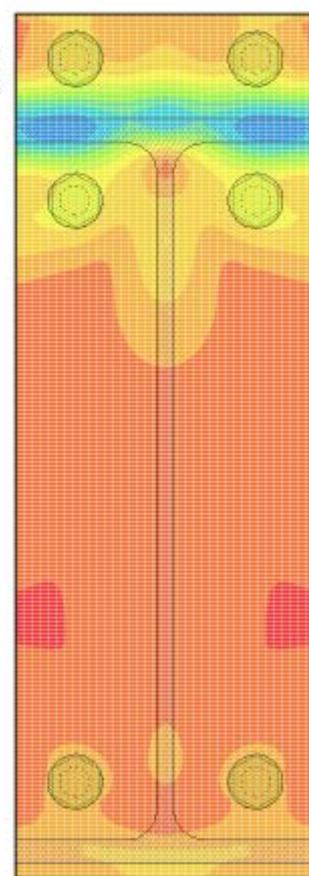
Ausnutzung aus Spannung U_σ
 min $U_\sigma = 0.005$, max $U_\sigma = 1.200$



Ausnutzung aus Kontaktpressung U_b
 min $U_b = 0.000$, max $U_b = 0.419$



Ausnutzung der Stirnplatte U_p
 min $U_p = 0.005$, max $U_p = 1.200$



Die FEM-Ergebnisse liegen in grafischer Form als Konturenplot oder Tabelle vor. Die Grafiken vermitteln einen Gesamteindruck des Tragverhaltens der Stirnplatte. Besonders die Verformung u_z und die Pressungen b_z zeigen die häufig sehr lokale Belastung der Platte.

Ausnutzung der Stirnplatte

Kno	x mm	y mm	u_z mm	b_z N/mm ²	m_{xx} kNm/m	m_{yy} kNm/m	m_{xy} kNm/m	q_x kN/m	q_y kN/m	U_σ	U_b	U_p
313	30.8	0.0	-0.035	148.62	8.01	2.56	-0.46	199.39	624.37	0.257	0.419	0.419
323	30.8	75.3	0.531	0.00	-13.16	-47.52	0.55	-7.25	-316.53	1.200	---	1.200 > 1
394	38.5	22.6	0.139	3.63	14.28	10.68	0.08	12.65	101.47	0.363	0.010	0.363
398	38.5	52.7	0.401	0.00	1.01	-18.58	-0.73	-2.59	-1804.57	0.696	---	0.696
402	38.5	82.9	0.539	0.00	-12.58	-44.53	0.69	130.93	832.31	1.139	---	1.139 > 1
408	38.5	128.1	0.376	0.00	13.98	17.61	3.38	-2.89	310.83	0.489	---	0.489
629	61.5	30.1	0.231	0.09	2.39	1.43	-0.62	-894.83	-531.90	0.262	0.000	0.262
718	69.2	113.0	0.476	0.00	-4.25	-0.31	6.28	-342.05	685.11	0.377	---	0.377
1024	100.0	67.8	0.528	0.00	-19.56	-42.93	-0.00	0.00	309.95	1.051	---	1.051 > 1
1026	100.0	82.9	0.531	0.00	-4.85	-21.02	-0.00	0.00	2246.70	0.767	---	0.767
1342	130.8	113.0	0.476	0.00	-4.25	-0.31	-6.28	342.05	685.11	0.377	---	0.377
1409	138.5	30.1	0.231	0.09	2.39	1.43	0.62	894.83	-531.90	0.262	0.000	0.262
1727	169.2	75.3	0.531	0.00	-13.16	-47.52	-0.55	7.25	-316.53	1.200	---	1.200 > 1

x,y: Knotenkoordinaten; u_z : Verformungen (abhebend positiv); b_z : Kontaktpressungen (Druck positiv); m_{xx}, m_{yy}, m_{xy} : Momente q_x, q_y : Querkräfte; U_σ : Ausnutzung aus Moment mit Querkraft; U_b : Ausnutzung aus Kontaktpressung; U_p : Ausnutzung der Stirnplatte

In den Tabellen werden die extremalen (minimalen und maximalen) Ergebnisse gelb unterlegt.

Ist die zulässige Ausnutzung überschritten ($U_p > 1$), wird der Zahlenwert entsprechend markiert.

Bei elastischer Berechnung der Stirnplatte werden zusätzlich die Normal-, Schub- und Vergleichsspannungen, die der Spannungsausnutzung zu Grunde liegen, protokolliert.

Die Ausnutzung aus Kontaktpressung ergibt sich nur an den gedrückten Stellen mit $U_b = b_z / \sigma_{Rd}$, $\sigma_{Rd} = f_y / \gamma_{M0}$.

Ausnutzung der Schrauben

	x mm	y mm	w _t mm	F _t kN	ε _{w_t} %	U _{w_t}
1	40.0	30.0	0.207	176.40	1.337	0.594
2	160.0	30.0	0.207	176.40	1.337	0.594
3	40.0	125.0	0.396	176.40	2.280	1.013 > 1
4	160.0	125.0	0.396	176.40	2.280	1.013 > 1
5	40.0	515.0	-0.007	154.40	0.300	0.133
6	160.0	515.0	-0.007	154.40	0.300	0.133

x,y: Schraubenkoordinaten; w_t: Verformung (Zug positiv); F_t: Schraubenkraft; ε_{w_t}: Dehnung
U_{w_t}: Ausnutzung aus Dehnung

Der Verformung der Stirnplatte u_z an der Verbindungsstelle mit einer Schraube steht die Verformung dieser Schraube w_t gegenüber, wobei die Schraubenverformung dem Integral der Stirnplattenverformungen im Bereich der Schraubeneinflussfläche (Durchmesser der Unterlegscheibe) entspricht. Die Dehnung wird um den Anteil aus Vorspannung erhöht.

Bei plastischer Schraubenberechnung wird die Schraube bis zu ihrer plastischen Tragfähigkeit F_t = belastet, bei weiter ansteigender Belastung erfahren die plastizierten Schrauben nur noch eine Dehnungsänderung.

Die Zulässigkeit der Schraubendehnung wird mittels der Ausnutzung U_{w_t} überprüft. Ist die plastische Bruchdehnung überschritten, wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

Ist die plastische Bruchdehnung einer Schraube überschritten, ist sie rechnerisch nicht mehr tragfähig und für das System nicht vorhanden. Der Anschluss muss ohne diese Schraube modelliert und berechnet werden.

Bei elastischer Berechnung wird die Schraubenkraft unabhängig von der Zugtragfähigkeit ermittelt, die Ausgabe der Dehnungen dient lediglich zur Information.

FEM-Berechnung

Anzahl Iterationsschritte 12 von 50, Genauigkeit 5.0‰

6 Schrauben vorgespannt, 4 Schrauben plastiziert

Summe der Kräfte aus äußeren Lasten 0.0 kN

Summe der Schraubenkräfte 1014.4 kN

Summe der Bettungsreaktionen 1014.4 kN

Pressungsfläche 137.6 cm² = 11.86% der Stirnplattenfläche

Rotationsebene bzgl. des Profilschwerpunkts u_{z,m} = 0.251 mm, φ_y = -0.065°, φ_z = -0.000°

Rotationswinkel des Stirnplattenstoßes 2·φ_y = -0.130°, 2·φ_z = -0.000°

untere Grenze der plastischen Ausnutzung der Schrauben U_{pl,min} = 0.854

Im Anschluss an die FEM-Berechnung werden Informationen zur FEM-Berechnung protokolliert.

Der Anschluss ist sinnvoll und tragfähig, wenn

- ◆ die Anzahl an Iterationsschritten nicht die maximale Anzahl erreicht (ansonsten Fehlermeldung)
- ◆ nicht sämtliche Schrauben durchplastiziert sind (ansonsten Fehlermeldung)
- ◆ die Genauigkeit innerhalb der geforderten Toleranz bleibt (ansonsten Meldung)
- ◆ die zul. Platten- und Schraubendehnung nicht überschritten ist (ansonsten Fehlermeldung)
- ◆ die Summe der äußeren Kräfte mit den inneren im Gleichgewicht steht (ansonsten Fehlermeldung)

Außerdem wird die Pressungsfläche auch als prozentualer Anteil der Stirnplattenfläche ausgewiesen.

Die Rotationsebene wird bzgl. ihres Mittelpunkts und zweier Verdrehwinkel berechnet. Sie kann in die Rotationssteifigkeit S_j unter der Belastung M_{j,Ed} umgerechnet werden. Bei einachsiger Lastkombination ergibt sich

$$S_j = M_{j,Ed} / \varphi.$$

Bei plastischer Berechnung der Schrauben wird eine untere Grenze der plastischen Ausnutzung ermittelt, die einen Anhaltspunkt für die Tragfähigkeit des Anschlusses liefert.

Nachweis der Schrauben

Bemessungsgrößen: $\min F_t = 154.86 \text{ kN}$, $\max F_t = 176.40 \text{ kN}$, $V_z = 60.00 \text{ kN}$

Punktequerschnitt

y_i, z_i Koordinaten bezogen auf den Lasteinleitungspunkt (Trägerschwerpunkt), $F_{t,i}$ Zugkräfte, $f_{vt,i}$ Wichtungsfaktoren

Schraube 1	$y_1 = 60.0 \text{ mm}$	$z_1 = -290.0 \text{ mm}$	$F_{t,1} = 176.4 \text{ kN}$	$f_{vt,1} = 0.000$
Schraube 2	$y_2 = -60.0 \text{ mm}$	$z_2 = -290.0 \text{ mm}$	$F_{t,2} = 176.4 \text{ kN}$	$f_{vt,2} = 0.000$
Schraube 3	$y_3 = 60.0 \text{ mm}$	$z_3 = -195.0 \text{ mm}$	$F_{t,3} = 176.4 \text{ kN}$	$f_{vt,3} = 0.000$
Schraube 4	$y_4 = -60.0 \text{ mm}$	$z_4 = -195.0 \text{ mm}$	$F_{t,4} = 176.4 \text{ kN}$	$f_{vt,4} = 0.000$
Schraube 5	$y_5 = 60.0 \text{ mm}$	$z_5 = 195.0 \text{ mm}$	$F_{t,5} = 154.4 \text{ kN}$	$f_{vt,5} = 0.125$
Schraube 6	$y_6 = -60.0 \text{ mm}$	$z_6 = 195.0 \text{ mm}$	$F_{t,6} = 154.4 \text{ kN}$	$f_{vt,6} = 0.125$

Berechnung des Punktequerschnitts

Schubkräfte

Punkt 1:	$y_1' = 60.0 \text{ mm}$	$z_1' = -485.0 \text{ mm}$	$T_1 = T_{z,1} = 0.00 \text{ kN}$
Punkt 2:	$y_2' = -60.0 \text{ mm}$	$z_2' = -485.0 \text{ mm}$	$T_2 = T_{z,2} = 0.00 \text{ kN}$
Punkt 3:	$y_3' = 60.0 \text{ mm}$	$z_3' = -390.0 \text{ mm}$	$T_3 = T_{z,3} = 0.00 \text{ kN}$
Punkt 4:	$y_4' = -60.0 \text{ mm}$	$z_4' = -390.0 \text{ mm}$	$T_4 = T_{z,4} = 0.00 \text{ kN}$
Punkt 5:	$y_5' = 60.0 \text{ mm}$	$z_5' = 0.0 \text{ mm}$	$T_5 = T_{z,5} = 30.00 \text{ kN}$
Punkt 6:	$y_6' = -60.0 \text{ mm}$	$z_6' = 0.0 \text{ mm}$	$T_6 = T_{z,6} = 30.00 \text{ kN}$

Nachweis der Schrauben

U_{tp} Ausnutzung aus Durchstanzen, U_{vt} Ausnutzung aus Abscheren mit Zug, U_b Ausnutzung aus Lochleibung, U Ausnutzung der Schrauben

Schraube 1	$U_{tp,1} = 0.356$	$U_{vt,1} = 0.000$	$U_{b,1} = 0.000$	$U_1 = 0.356$
Schraube 2	$U_{tp,2} = 0.356$	$U_{vt,2} = 0.000$	$U_{b,2} = 0.000$	$U_2 = 0.356$
Schraube 3	$U_{tp,3} = 0.356$	$U_{vt,3} = 0.000$	$U_{b,3} = 0.000$	$U_3 = 0.356$
Schraube 4	$U_{tp,4} = 0.356$	$U_{vt,4} = 0.000$	$U_{b,4} = 0.000$	$U_4 = 0.356$
Schraube 5	$U_{tp,5} = 0.312$	$U_{vt,5} = 0.824$	$U_{b,5} = 0.078$	$U_5 = 0.824$
Schraube 6	$U_{tp,6} = 0.312$	$U_{vt,6} = 0.824$	$U_{b,6} = 0.078$	$U_6 = 0.824$
Gesamt:	$U_{tp} = 0.356$	$U_{vt} = 0.824$	$U_b = 0.078$	$U = 0.824 < 1$ ok

Die Schrauben werden auf Zug und Durchstanzen für die Zugkraft aus der FEM-Berechnung sowie auf Abscheren mit Zug und Lochleibung für die einwirkenden Querkräfte und das Torsionsmoment nachgewiesen.

Der Wichtungsfaktor $f_{vt,i}$ bezeichnet bei einer Schraube, die durch Schub und Zug beansprucht wird, den für den Schubnachweis zur Verfügung stehenden Anteil.

Sind Schrauben vollständig plastiziert, d.h. ist ihre Tragfähigkeit bis $F_{t,Rd}$ ausgeschöpft, stehen sie für eine weitere Lastaufnahme aus Schub nicht mehr zur Verfügung. Daher ist der Wichtungsfaktor bei diesen Schrauben Null.

Für den Punktequerschnitt ergeben sich die Schraubenschubkräfte T_i , die mit den Zugkräften $F_{t,i}$ zur Berechnung der Ausnutzung je Schraube herangezogen werden.

Die **plastisch-plastische** Berechnung der Stirnplatte gelingt nicht.

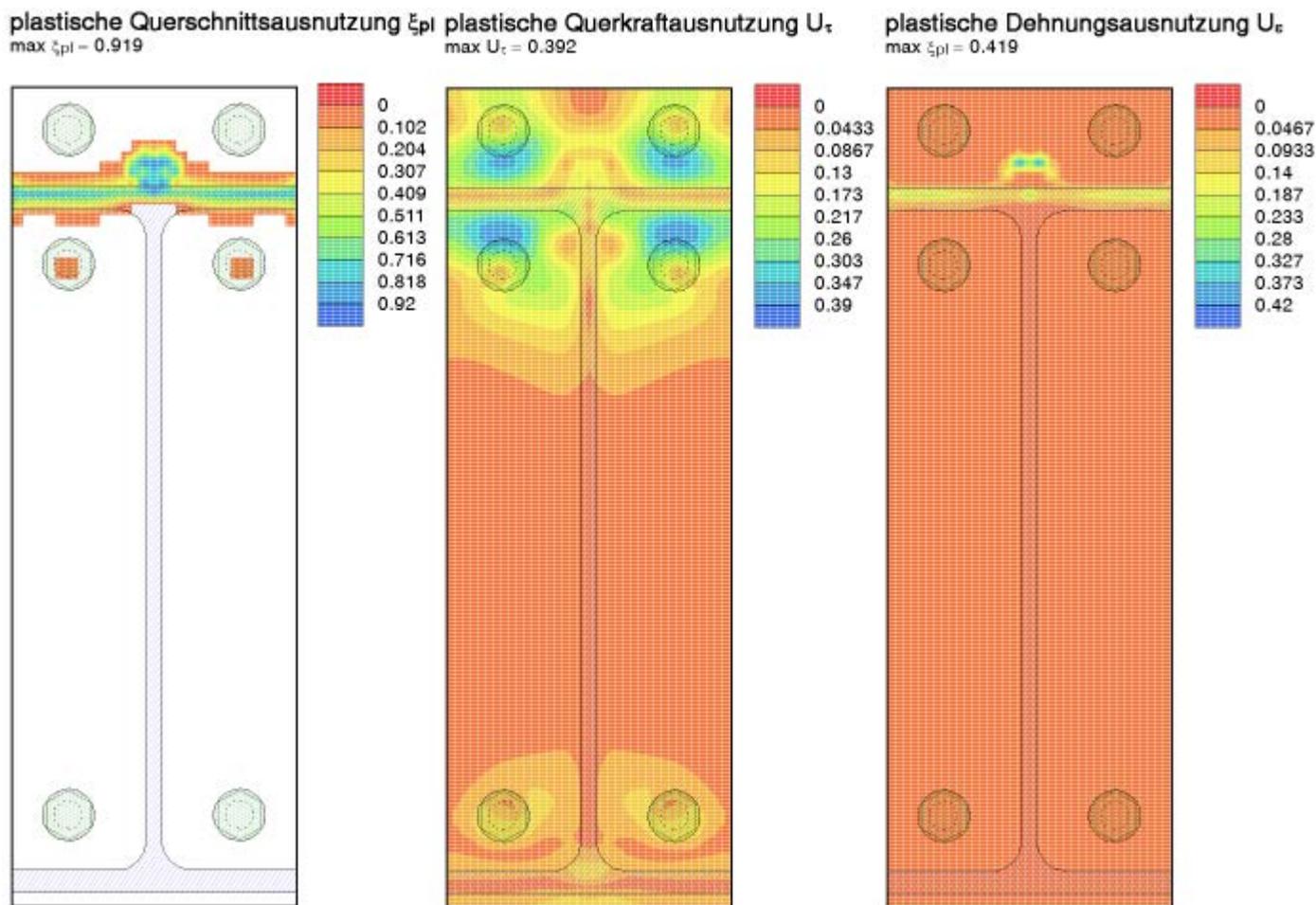
Fehler bei der FE-Berechnung !!

Maximale Randdehnung bei der plastischen Berechnung überschritten !!

Schraubenkräfte nicht ermittelbar !!

Die Stirnplatte plastiziert im Bereich des oberen Trägerflanschs infolge der hohen Zugbelastung und bildet ein Fließgelenk aus. Das System zerbricht quasi, Ergebnisse können nicht ermittelt werden.

Das Bemessungsmoment wird reduziert auf 286.8 kNm , so dass die zusätzlichen Ergebnisse der plastischen Berechnung dargestellt werden können.



Die plastische Querschnittsausnutzung zeigt, dass der Plattenquerschnitt im Bereich des Zugflanschs hoch ausgenutzt ist ($\xi_{pl} = 91.9\%$). Bei einer höheren Belastung wird sich über die gesamte Breite der Platte ein Fließgelenk ausbilden.

Die plastische Querkraftausnutzung ist ebenso wie die plastische Dehnungsausnutzung nachzuweisen.

Ausnutzung der Stirplatte

Kno	x mm	y mm	u_z mm	b_z N/mm ²	ϵ_{pl} %	ξ_{pl}	U_t	U_ϵ	U_a	U_b	U_p
11	0.0	75.3	0.571	0.00	7.870	0.788	0.057	0.157	0.831	---	0.831
13	0.0	90.4	0.541	0.00	1.892	0.153	0.258	0.038	0.680	---	0.680
78	0.0	580.0	-0.005	68.32	0.007	0.000	0.083	0.000	0.095	0.192	0.192
391	38.5	0.0	-0.039	184.01	0.157	0.000	0.200	0.003	0.284	0.518	0.518
1025	100.0	75.3	0.579	0.00	12.622	0.871	0.129	0.252	0.218	---	0.252
2039	200.0	75.3	0.571	0.00	7.870	0.788	0.057	0.157	0.831	---	0.831

x,y: Knotenkoordinaten; u_z : Verformungen (abhebend positiv); b_z : Kontaktpressungen (Druck positiv); ϵ_{pl} : plast. Randdehnung
 ξ_{pl} : plast. Querschnittsausnutzung; U_t : plast. Querkraftausnutzung; U_ϵ : plast. Dehnungsausnutzung; U_a : Ausnutzung aus Moment mit Querkraft
 U_b : Ausnutzung aus Kontaktpressung; U_p : Ausnutzung der Stirplatte

Die maximale Ausnutzung ist gekennzeichnet, so dass sich sogleich die Ursache erschließt. In diesem Beispiel ergibt die Ausnutzung aus Moment mit Querkraft die maximale Tragfähigkeit.

Die Teilplastizierung der Stirplatte führt zu einer Umlagerung der Schraubenkräfte gegenüber der elastisch-plastischen Berechnung.

Ausnutzung der Schrauben

	x mm	y mm	wt mm	F_t kN	ϵ_{wt} %	U_{wt}
1	40.0	30.0	0.198	176.40	1.291	0.574
2	160.0	30.0	0.198	176.40	1.291	0.574
3	40.0	125.0	0.390	176.40	2.249	1.000
4	160.0	125.0	0.390	176.40	2.249	1.000
5	40.0	515.0	-0.007	154.43	0.300	0.133
6	160.0	515.0	-0.007	154.43	0.300	0.133

x,y: Schraubenkoordinaten; wt: Verformung (Zug positiv); F_t : Schraubenkraft; ϵ_{wt} : Dehnung
 U_{wt} : Ausnutzung aus Dehnung

Die nicht plastizierten Schrauben 5 und 6 erhalten aus Gleichgewichtsgründen eine höhere Belastung F_t . Ebenso vergrößert sich die Ausnutzung aus Kontaktpressung, da sich die Pressungsfläche verkleinert.

Nachweis des Trägerquerschnitts

Der Trägerquerschnitt kann elastisch oder plastisch nachgewiesen werden.

elastischer Spannungsnachweis für $M_y = -306.00$ kNm, $V_z = 60.00$ kN

elastische Spannungen: $\max |\sigma_x| = 158.71$ N/mm², $\max \tau = 13.40$ N/mm², $\max \sigma_v = 158.80$ N/mm²

$\max \sigma_x$ bei $y = 100.0$ mm, $z = -250.0$ mm: $\sigma_x = 158.71$ N/mm², $\tau = 0.00$ N/mm², $\sigma_v = 158.71$ N/mm²

$\min \sigma_x$ bei $y = 100.0$ mm, $z = 250.0$ mm: $\sigma_x = -158.71$ N/mm², $\tau = 0.00$ N/mm², $\sigma_v = 158.71$ N/mm²

$\max \tau$ bei $y = 0.0$ mm, $z = 0.0$ mm: $\sigma_x = -0.00$ N/mm², $\tau = 13.40$ N/mm², $\sigma_v = 23.20$ N/mm²

$\max \sigma_v$ bei $y = 0.0$ mm, $z = -250.0$ mm: $\sigma_x = 158.71$ N/mm², $\tau = 3.08$ N/mm², $\sigma_v = 158.80$ N/mm²

zul. Vergleichsspannung: $\sigma_{v,Rd} = 355.0$ N/mm²

Nachweis: $\sigma_v = 158.80$ N/mm² < $\sigma_{v,Rd} = 355.00$ N/mm² $\Rightarrow U_\sigma = 0.447 < 1$ ok

Querschnitt in Klasse 1, Materialbeiwert $\epsilon = (235/355)^{0.5} = 0.814$

c/t-Nachweis: einseitig gestützt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.271 < 1$ ok

beidseitig gestützt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.256 < 1$ ok

gesamt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.271 < 1$ ok (bzgl. Querschnittsklasse 3)

Beim elastischen Nachweis werden die Vergleichsspannungen aus den elastischen Normal- und Schubspannungen berechnet und mit der zulässigen Spannung verglichen.

Über den c/t-Wert des Querschnitts erfolgt ein vereinfachter Beulnachweis des Querschnitts. Die max. zulässige Querschnittsklasse 3 gilt für den elastischen Nachweis.

plastischer Spannungsnachweis für $M_y = -306.00$ kNm, $V_z = 60.00$ kN

Linien des Querschnitts:

1: $y_a = 100.0$ mm, $z_a = -242.0$ mm, $y_e = 100.0$ mm, $z_e = -234.0$ mm

2: $y_a = -100.0$ mm, $z_a = -242.0$ mm, $y_e = -100.0$ mm, $z_e = -250.0$ mm

3: $y_a = 0.0$ mm, $z_a = -242.0$ mm, $y_e = 11.3$ mm, $z_e = -227.8$ mm

4: $y_a = 100.0$ mm, $z_a = 242.0$ mm, $y_e = 100.0$ mm, $z_e = 250.0$ mm

5: $y_a = -100.0$ mm, $z_a = 242.0$ mm, $y_e = -100.0$ mm, $z_e = 234.0$ mm

Schnittgrößen bzgl. yz-Richtung in kN, m: $M_y = -306.00$, $M_z = 0.00$, $V_y = 0.00$, $V_z = 60.00$

Teilschnittgrößen der Linien des Querschnitts in kN, m:

1: $N = 229.06$, $M_y = -0.00$, $M_z = -0.00$, $V_y = -2.47$, $V_z = 0.00$, $T = 0.00$

2: $N = 229.06$, $M_y = 0.00$, $M_z = -0.00$, $V_y = 2.47$, $V_z = 0.00$, $T = 0.00$

3: $N = 0.00$, $M_y = -84.44$, $M_z = 0.00$, $V_y = 0.00$, $V_z = 60.00$, $T = 0.00$

4: $N = -229.06$, $M_y = -0.00$, $M_z = -0.00$, $V_y = 2.47$, $V_z = 0.00$, $T = 0.00$

5: $N = -229.06$, $M_y = -0.00$, $M_z = 0.00$, $V_y = -2.47$, $V_z = 0.00$, $T = 0.00$

Ausnutzungen der Linien des Querschnitts

1: $U_\sigma = 0.399$, $U_\tau = 0.007$, $U = 0.399$

2: $U_\sigma = 0.399$, $U_\tau = 0.007$, $U = 0.399$

3: $U_\sigma = 0.387$, $U_\tau = 0.058$, $U = 0.391$

4: $U_\sigma = 0.399$, $U_\tau = 0.007$, $U = 0.399$

5: $U_\sigma = 0.399$, $U_\tau = 0.007$, $U = 0.399$

max. Lastfaktor (plast.): $f_{pl} = 2.507$

Ausnutzung: $U_{pl} = 0.399$

Nachweis: $U_{pl} = 0.399 < 1$ ok

Querschnitt in Klasse 1, Materialbeiwert $\epsilon = (235/355)^{0.5} = 0.814$

c/t-Nachweis: einseitig gestützt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.568 < 1$ ok

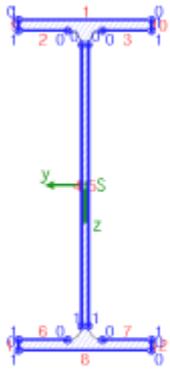
beidseitig gestützt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.619 < 1$ ok

gesamt: Ausnutzung $U_{c/t} = 0.619 < 1$ ok (bzgl. Querschnittsklasse 2)

Der plastische Nachweis wird mit dem erweiterten TSV n. Kindmann geführt. Je Querschnittsline werden die Teilschnittgrößen bestimmt und damit die Ausnutzung aus Last ermittelt.

Über den c/t-Wert des Querschnitts erfolgt ein vereinfachter Beulnachweis des Querschnitts. Die max. zulässige Querschnittsklasse 2 gilt für den plastischen Nachweis.

Nachweis der umlaufenden Schweißnaht

Bemessungsgrößen: $M_y = -306.00 \text{ kNm}$, $V_z = 60.00 \text{ kN}$ 

Naht 1:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 200.0 \text{ mm}$
Naht 2:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 73.9 \text{ mm}$
Naht 3:	siehe Naht 2	
Naht 4:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 426.0 \text{ mm}$
Naht 5:	siehe Naht 4	
Naht 6:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 73.9 \text{ mm}$
Naht 7:	siehe Naht 6	
Naht 8:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 200.0 \text{ mm}$
Naht 9:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 16.0 \text{ mm}$
Naht 10:	siehe Naht 9	
Naht 11:	$a_w = 5.0 \text{ mm}$	$l_w = 16.0 \text{ mm}$
Naht 12:	siehe Naht 11	

Max: $\sigma_{1,w,Ed} = 374.22 \text{ N/mm}^2 < f_{1w,d} = 435.56 \text{ N/mm}^2$,
 $\sigma_{2,w,Ed} = 187.11 \text{ N/mm}^2 < f_{2w,d} = 352.80 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_w = 0.859 < 1$ **ok**

Die umlaufende Schweißnaht wird in gerade Teilstücke zerlegt und als Linienquerschnitt am Trägerprofil nachgewiesen.

Ergebnis

Maximale Ausnutzung der Stirnplatte [Lk 1]	$\max U_p = 1.200 > 1$ nicht ok !!
Maximale Ausnutzung der Schrauben aus Dehnung [Lk 1]	$\max U_{wt,s} = 1.013 > 1$ nicht ok !!
Maximale Ausnutzung der Schrauben [Lk 1]	$\max U_s = 1.000 \leq 1$ ok
Maximale Ausnutzung des Trägers [Lk 2]	$\max (U_q, U_{ct}) = 0.619 < 1$ ok
Maximale Ausnutzung [Lk 1]	$\max U = 1.200 > 1$ nicht ok !!
Ausnutzung aus Laststeigerung [Lk 1]	$\max U_f = 1.076 > 1$ nicht ok !!

Tragfähigkeit nicht gewährleistet !!

zul. Schraubendehnung überschritten: Versagen der Schraube, System instabil !!

Abschließend erfolgt die Ergebniszusammenstellung unter Angabe der maximalen Ausnutzung. Ist die maximale Ausnutzung ≤ 1 , ist die Tragfähigkeit gewährleistet.

Vergleich zwischen 4H-EC3FS und 4H-EC3BT

Die Berechnung wird mit einheitlicher Stahlorte (S355) für eine reine Momentenbeanspruchung durchgeführt.

Im Programm 4H-EC3FS wird die Stirnplatte *elastisch-plastisch* nachgewiesen, die Schrauben sind plastisch in der FEM-Berechnung berücksichtigt. Das aufnehmbare Moment wird durch Laststeigerung ermittelt.

Wenn möglich erfolgt eine *plastisch-plastische* Berechnung. Um ein Vorzeitiges Versagen der Schrauben zu vermeiden, wird deren Dehnungsfaktor mit $f_{t,\epsilon} = 1$ angenommen.

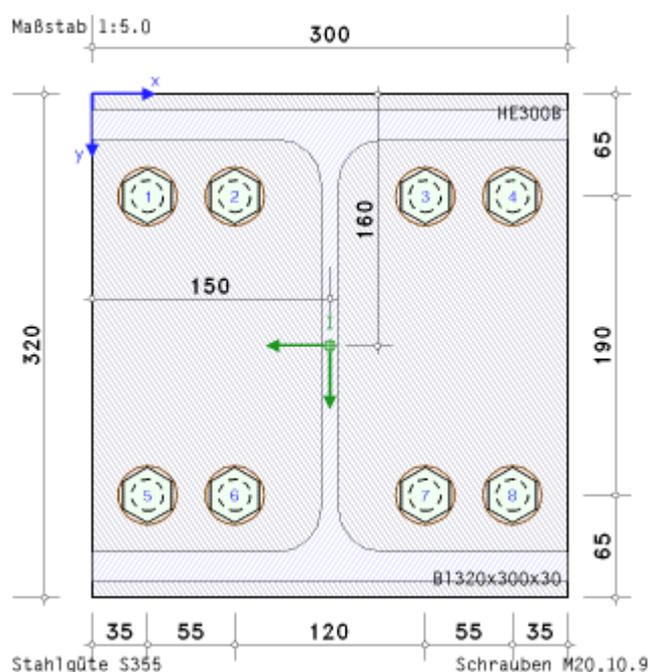
- Ergebnisse 4H-EC3FS *elastisch-plastisch* $M_{Rd} = -285.5 \text{ kNm}$, $\varphi = 0.039^\circ \rightarrow S = 419 \text{ MNm/rad}$ (Versagen: Stirnblech bei $M_{Ed} = -285.6 \text{ kNm}$)
Schrauben 3 und 4 (Schraubenreihe 2) plastizieren; der Spannungsnachweis des Stirnblechs führt zum Versagen
- Ergebnisse 4H-EC3FS *plastisch-plastisch* $M_{Rd} = -286.8 \text{ kNm}$, $\varphi = 0.068^\circ \rightarrow S = 242 \text{ MNm/rad}$ (Versagen: Schraubendehnung bei $M_{Ed} = -286.9 \text{ kNm}$)
Schrauben 1 bis 4 (Schraubenreihen 1 und 2) plastizieren; die Überschreitung der zul. Schraubendehnung führt zum Systemversagen!
- Ergebnisse 4H-EC3BT $M_{j,Rd} = -302.2 \text{ kNm}$, $S_{j,ini} = 366 \text{ MNm/rad}$, $S_{j,Rd} = 122 \text{ MNm/rad}$, $\varphi = 0.142^\circ$
(Versagen: Schraubenreihe 2 plastiziert \rightarrow elastische Schraubenkraftverteilung)
Die Tragfähigkeit der Schraubenreihe 2 überschreitet 95% der maximalen Tragfähigkeit einer Schraubenreihe, daher wird die Tragfähigkeit der nachfolgenden Schraubenreihen elastisch angepasst.
- **Fazit:** Das Tragmoment wird ebenso wie die Rotation im Bruchzustand unterschätzt.

Vergleich zwischen 4H-EC3FS und ETH-Versuch

Die Berechnung wird mit unterschiedlichen Stahlsorten durchgeführt (Stirnplatte S235, Träger S355).

- Ergebnisse *4H-EC3FS elastisch-plastisch* $M_{Rd} = -227.6 \text{ kNm} \rightarrow M_u = -284.5 \text{ kNm}$ (Versagen: Stirnblech bei $M_{Ed} = -227.7 \text{ kNm}$)
für $M_0 = -113.8 \text{ kNm}$: $\varphi_0 = 0.005^\circ \rightarrow c_{M,0} = 1304 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,1}$
für $M_{Rd} = -227.6 \text{ kNm}$: $\varphi = 0.016^\circ \rightarrow c_M = 815 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,2}$
keine Schraube plastiziert; der Spannungsnachweis des Stirnblechs führt zum Versagen.
- Ergebnisse *4H-EC3FS plastisch-plastisch* Das Bruchmoment kann nicht berechnet werden, da die plastische Berechnung schon bei $M_{Rd} = -212.9 \text{ kNm}$ abbricht. Die max. erreichte Ausnutzung bei $M_{Rd} = -212.8 \text{ kNm}$ beträgt 76% (Spannungsnachweis des Stirnblechs).
Sie kann nur berechnet werden, indem die Toleranzgrenze auf 1% hochgesetzt wird.
- Erg. *ETH-Versuch* $M_{A,u} = -420 \text{ kNm}$, $c_{A,1} = 160 \text{ MNm/rad}$, $c_{A,2} = 48 \text{ MNm/rad}$, $\varphi_{A,u} = 0.0057 \text{ rad} = 0.327^\circ$
- **Fazit:** Das Bruchmoment wird nicht erreicht, die Anfangsrotationssteifigkeiten werden stark überschätzt.

Beispiel 2: HEB300, S355, 4x2 Schrauben M20, 10.9 (ETH 15K1)



In *4H-EC3BT* erfolgt die Berechnung für vier Schrauben je Reihe mit dem AIF-Bericht 15059.

Vergleich zwischen *4H-EC3FS* und *4H-EC3BT*

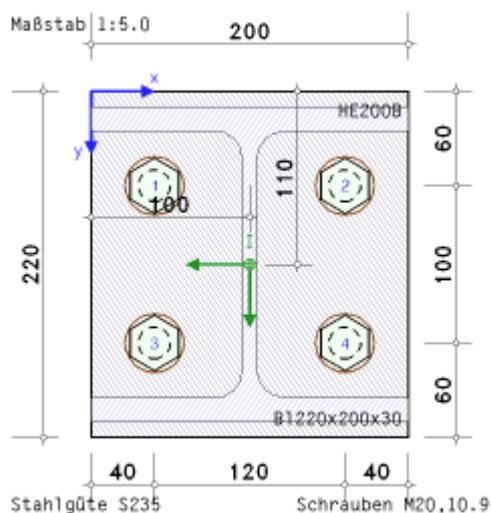
- Ergebnisse *4H-EC3FS elastisch-plastisch* $M_{Rd} = 181.8 \text{ kNm}$, $\varphi = 0.185^\circ \rightarrow S = 56 \text{ MNm/rad}$ (Versagen: Schraubendehnung bei $M_{Ed} = 181.9 \text{ kNm}$)
Schrauben 5 bis 8 plastizieren; die Überschreitung der zul. Schraubendehnung führt zum Systemversagen!
- Ergebnisse *4H-EC3FS plastisch-plastisch* $M_{Rd} = 181.8 \text{ kNm}$, $\varphi = 0.186^\circ \rightarrow S = 56 \text{ MNm/rad}$ (Versagen: Schraubendehnung bei $M_{Ed} = 181.9 \text{ kNm}$)
Schrauben 5 bis 8 plastizieren; die Überschreitung der zul. Schraubendehnung führt zum Systemversagen!
- Ergebnisse *4H-EC3BT* $M_{j,Rd} = 178.6 \text{ kNm}$, $S_{j,ini} = 91.7 \text{ MNm/rad}$, $S_{j,Rd} = 30.6 \text{ MNm/rad}$, $\varphi = 0.334^\circ$ (Versagen: Schraubenversagen in Gk 5)
- **Fazit:** Das Tragmoment wird ebenso wie die Rotation im Bruchzustand leicht überschätzt.

Vergleich zwischen 4H-EC3FS und ETH-Versuch

Die Berechnung wird mit unterschiedlichen Stahlsorten durchgeführt (Stirnplatte S235, Träger S355).

- Ergebnisse 4H-EC3FS *elastisch-plastisch* $M_{Rd} = 165.8 \text{ kNm} \rightarrow M_u = 207 \text{ kNm}$ (Versagen: Stirnblech bei $M_{Ed} = 165.9 \text{ kNm}$)
 für $M_0 = 82.9 \text{ kNm}$: $\varphi_0 = 0.014^\circ \rightarrow c_{M,0} = 339 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,1}$
 für $M_{Rd} = 165.9 \text{ kNm}$: $\varphi = 0.099^\circ \rightarrow c_M = 96 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,2}$
 Schrauben 5 bis 8 plastizieren, der Spannungsnachweis des Stirnblechs führt zum Versagen.
- Ergebnisse 4H-EC3FS *plastisch-plastisch* $M_{Rd} = 181.7 \text{ kNm} \rightarrow M_u = 227 \text{ kNm}$ (Versagen: Schraubendehnung bei $M_{Ed} = 181.8 \text{ kNm}$)
 für $M_0 = 90.9 \text{ kNm}$: $\varphi_0 = 0.016^\circ \rightarrow c_{M,0} = 326 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,1}$
 für $M_{Rd} = 181.7 \text{ kNm}$: $\varphi = 0.190^\circ \rightarrow c_M = 55 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,2}$
 Schrauben 5 bis 8 plastizieren; die Überschreitung der zul. Schraubendehnung führt zum Systemversagen!
- Erg. ETH-Versuch $M_{A,u} = 245 \text{ kNm}$, $c_{A,1} = 52 \text{ MNm/rad}$, $c_{A,2} = 12 \text{ MNm/rad}$, $\varphi_{A,u} = 0.0129 \text{ rad} = 0.739^\circ$
- **Fazit:** Das Bruchmoment wird nicht erreicht, die Anfangsrotationssteifigkeiten werden stark überschätzt.

Beispiel 3: HEB200, S355, 2x2 Schrauben M20, 10.9 (ETH 10K1)



Vergleich zwischen 4H-EC3FS und 4H-EC3BT

- Ergebnisse 4H-EC3FS *elastisch-plastisch* $M_{Rd} = 68.9 \text{ kNm}$, $\varphi = 0.298^\circ \rightarrow S = 13 \text{ MNm/rad}$ (Versagen: Schraubendehnung bei $M_{Rd} = 69.0 \text{ kNm}$)
 Schrauben 3 und 4 plastizieren; die Überschreitung der zul. Schraubendehnung führt zum Systemversagen!
- Ergebnisse 4H-EC3FS *plastisch-plastisch* $M_{Rd} = 68.9 \text{ kNm}$, $\varphi = 0.299^\circ \rightarrow S = 13 \text{ MNm/rad}$ (Versagen: Schraubendehnung bei $M_{Rd} = 69.0 \text{ kNm}$)
 Schrauben 3 und 4 plastizieren; die Überschreitung der zul. Schraubendehnung führt zum Systemversagen!
- Ergebnisse 4H-EC3BT $M_{j,Rd} = 54.7 \text{ kNm}$, $S_{j,ini} = 18.7 \text{ MNm/rad}$, $S_{j,Rd} = 6.3 \text{ MNm/rad}$, $\varphi = 0.500^\circ$ (Versagen: Schraubenreihe 1 plastiziert \rightarrow elastische Schraubenkraftverteilung)
 Die Tragfähigkeit der Schraubenreihe 1 überschreitet 95% der maximalen Tragfähigkeit einer Schraubenreihe, daher wird die Tragfähigkeit der nachfolgenden Schraubenreihen elastisch angepasst.
- **Fazit:** Das Tragmoment wird ebenso wie die Rotation im Bruchzustand überschätzt.

Vergleich zwischen 4H-EC3FS und ETH-Versuch

Die Berechnung wird mit planmäßiger Vorspannung und unterschiedlichen Stahlsorten durchgeführt.

- Ergebnisse 4H-EC3FS *elastisch-plastisch* $M_{Rd} = 64.3 \text{ kNm} \rightarrow M_u = 80.4 \text{ kNm}$ (Versagen: Stirnblech bei $M_{Ed} = 64.4 \text{ kNm}$)
 für $M_0 = 32.2 \text{ kNm}$: $\varphi_0 = 0.019^\circ \rightarrow c_{M,0} = 97 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,1}$
 für $M_{Rd} = 64.3 \text{ kNm}$: $\varphi = 0.208^\circ \rightarrow c_M = 18 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,2}$
 Schrauben 3 und 4 plastizieren; der Spannungsnachweis des Stirnblechs führt zum Versagen.
- Ergebnisse 4H-EC3FS *plastisch-plastisch* $M_{Rd} = 64.4 \text{ kNm} \rightarrow M_u = 80.5 \text{ kNm}$ (Versagen: Stirnblech bei $M_{Ed} = 64.5 \text{ kNm}$)
 für $M_0 = 31.8 \text{ kNm}$: $\varphi_0 = 0.019^\circ \rightarrow c_{M,0} = 96 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,1}$
 für $M_{Rd} = 64.4 \text{ kNm}$: $\varphi = 0.210^\circ \rightarrow c_M = 18 \text{ MNm/rad} \gg c_{A,2}$
 Schrauben 3 und 4 plastizieren; der Spannungsnachweis des Stirnblechs führt zum Versagen.
- Erg. ETH-Versuch $M_{A,u} = 93 \text{ kNm}$, $c_{A,1} = 15.1 \text{ MNm/rad}$, $c_{A,2} = 3.1 \text{ MNm/rad}$, $\varphi_{A,u} = 0.0180 \text{ rad} = 1.031^\circ$
- **Fazit:** Das Bruchmoment wird nicht erreicht, die Anfangsrotationssteifigkeiten werden stark überschätzt.

Vergleiche zwischen 4H-EC3FS und 4H-ALFA

Ein Stirnplattenanschluss wird mit dem 3D-FEM-Programm 4H-ALFA abgebildet.

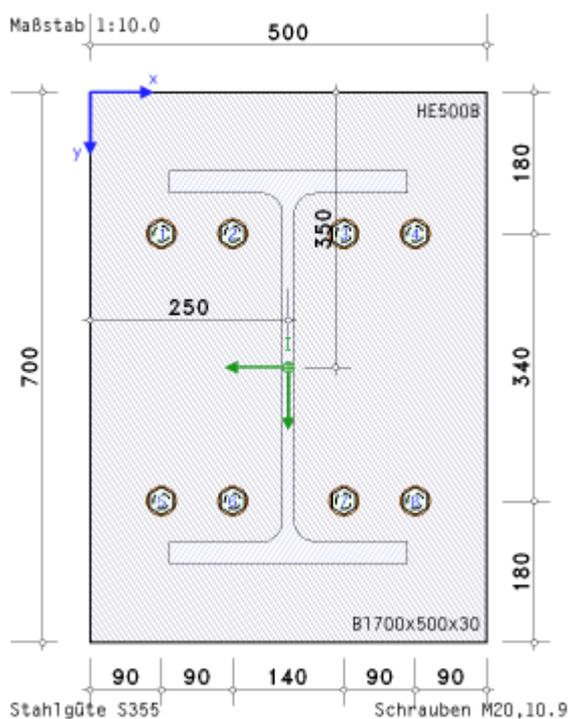
Der Träger wird dabei als Kragarm modelliert, auf den die einwirkenden Schnittgrößen als Spannungen wirken.

Die Spannungen, Federsteifigkeiten, der Bettungsmodul und die Elementgröße sind der Berechnung des 4H-EC3FS entnommen.

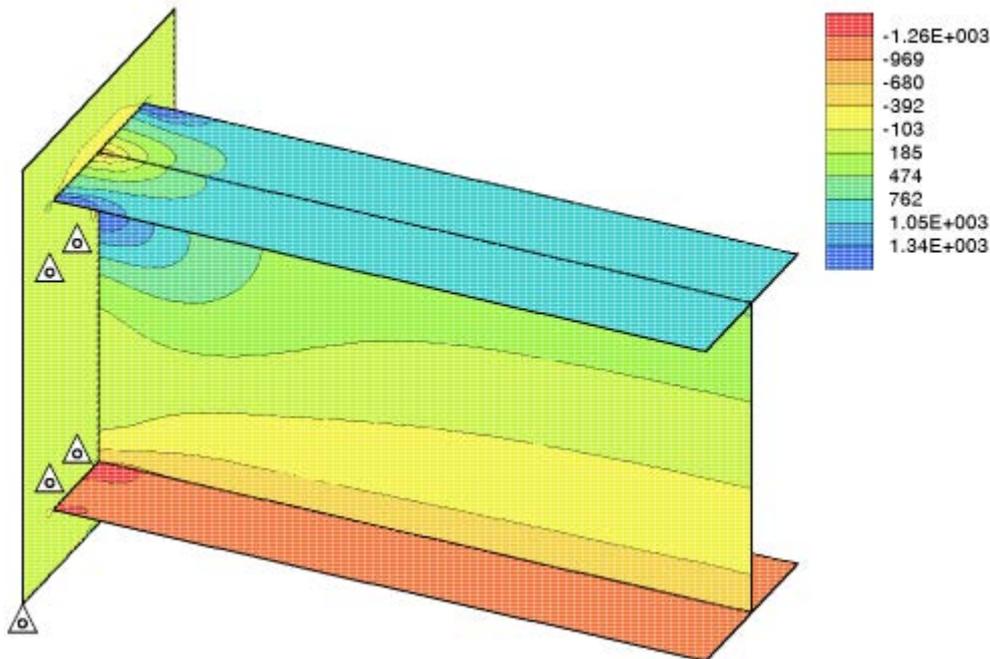
Hinweis: Die Federsteifigkeiten der Schraubenlager wirken nur mit der halben Klemmlänge und sind daher in 4H-ALFA zu verdoppeln.

Die Berechnungen im Programm 4H-EC3FS erfolgen für die Stirnplatte elastisch-plastisch, die Schrauben werden elastisch angenommen. Vorspannung wird nicht berücksichtigt.

Beispiel 4: HEB500 auf rechteckiger Stirnplatte, S355, 4x2 Schrauben M20, 10.9, $M_{Ed} = 160 \text{ kNm}$



Konturen n_{xx} , Normalkraft in x-Richtung
 Min/Max: n_{xx} : -2188.23/ 4236.73 kN/m



Unter der Annahme, dass Träger und Stirnplatte monolithisch miteinander verbunden sind, ergeben sich bei der Modellierung Spannungsstörungen, die jedoch im Verlauf des Trägers schnell abklingen (s. n_{xx}).

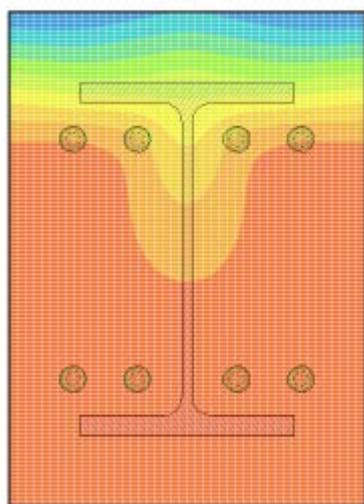
Da davon ausgegangen wird, dass sich die Schweißnähte zwischen Träger und Stirnplatte plastisch verhalten, werden die Störungen ausgeglichen. Die am Trägerende einwirkenden Spannungen wirken daher auch auf der Stirnplatte.

- Ergebnisse 4H-EC3FS Schraubenkräfte 0.8, 5.7, 75.2, 130.7 kN
- Ergebnisse 4H-ALFA Schraubenkräfte 3.6, 11.3, 72.0, 142.4 kN

Schraubenkräfte und Durchbiegungen (links: 4H-EC3FS, rechts: 4H-ALFA) können mit dem Programm 4H-EC3FS hinreichend approximiert werden.

Verformungen u_z [mm]

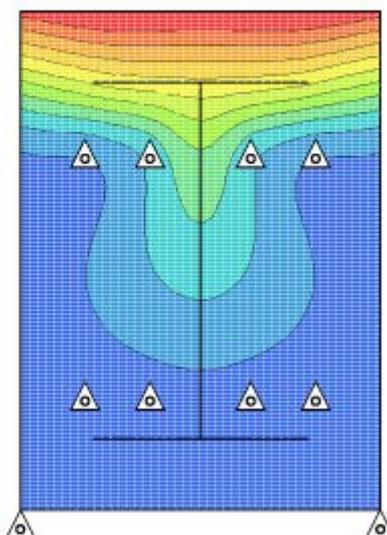
min u_z = -0.0059 mm, max u_z = 0.5264 mm



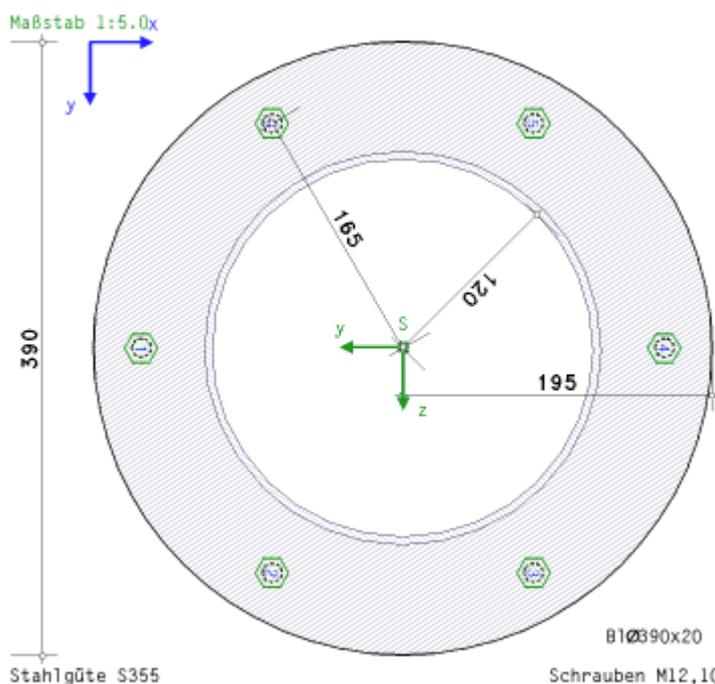
Verformungen abhebend positiv

Durchbiegung in z-Richtung

Min/Max: u_z : -0.582/ 0.005 mm



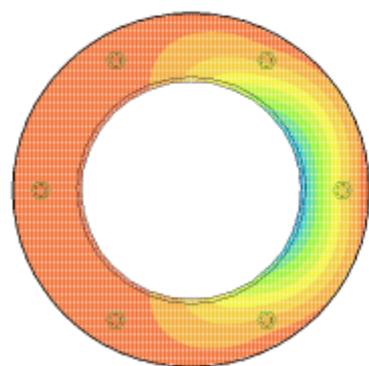
Beispiel 5: Kreisrohr, S355, 6 Schrauben M12, 10.9, $M_{Ed} = 30$ kNm



- Ergebnisse 4H-EC3FS Schraubenkräfte 3.8, 2 x 2.8, 2 x 64.4, 109.0 kN
- Ergebnisse 4H-ALFA Schraubenkräfte 6.7, 2 x 6.3, 2 x 61.6, 94.5 kN

Verformungen u_z [mm]

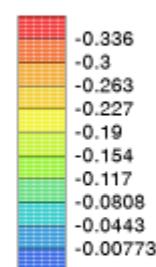
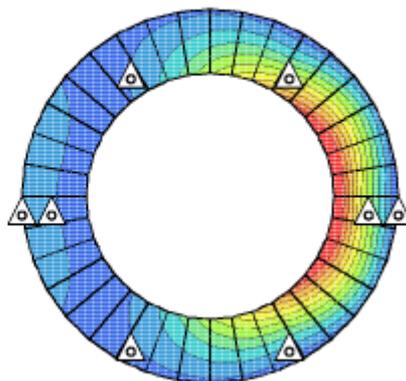
min u_z - -0.0373 mm, max u_z - 0.6297 mm



Verformungen abhebend positiv

Durchbiegung in z-Richtung

Min/Max: u_z : -0.430/ 0.029 mm



Auch bei Hohlprofilen können Schraubenkräfte und Durchbiegungen (links: 4H-EC3FS, rechts: 4H-ALFA) mit dem Programm 4H-EC3FS hinreichend approximiert werden.

Zusammenfassung

Die Komponentenmethode nach EC 3-1-8, die der Berechnung der Biegetragfähigkeit im Programm 4H-EC3BT zu Grunde liegt, berücksichtigt keine Vorspannung. Das komplexe Tragverhalten von Stirnplatte mit Schraube wird über ein äquivalentes T-Stummel-Modell abgebildet. Dies kann jedoch nur unter Einhaltung strenger Randbedingungen zuverlässige Ergebnisse liefern. Daher sind hinreichend Sicherheiten bei der Modellierung implementiert, die zu verhältnismäßig konservativen Ergebnissen führen.

Das Programm 4H-EC3FS berechnet eine Stirnplattenverbindung mit beliebigem Schraubenbild. Bei elastisch-plastischer Stirnplatten- und plastischer Schraubenberechnung wird die Tragfähigkeit der Verbindung gegenüber der Komponentenmethode leicht überschätzt, liegt jedoch weit unterhalb der durch Versuche ermittelten Traglasten.

Mittels der plastisch-plastischen Berechnung der Stirnplattenverbindung können für die Stirnplatte höhere Tragfähigkeiten erzielt werden, die ebenfalls weit unterhalb der durch Versuche ermittelten Traglasten liegen. Durch die plastische Umlagerung der Schnittgrößen kann es jedoch zu größeren Schraubenkräften kommen.

Das 2D-Modell des Programms 4H-EC3FS ermittelt die Schraubenkräfte und Plattenspannungen gut genug, so dass eine Übertragbarkeit auf allgemeine Schraubenbilder und Steifigkeiten gewährleistet ist.

zur Hauptseite [4H-EC3FS](#), Freier Stirnplattenstoß



© [pcae](#) GmbH Kopernikusstr. 4A 30167 Hannover Tel. 0511/70083-0 Fax 70083-99 Mail dte@pcae.de