



4H- STATIKPROGRAMME
AUS HANNOVER

DTE Desktop®
Engineering



pcae GmbH

Kopernikusstr. 4A

30167 Hannover

Tel 0511/70083-0

Fax 0511/70083-99

Internet www.pcae.de

Mail dte@pcae.de



4H-EC3FS

biegesteifer Stirnplattenstoß
mit freiem Schraubenbild

Februar 2025

4H-EC3FS

biegesteifer Stirnplattenstoß
mit freiem Schraubenbild

Copyright 2017-2025

5. erweiterte Auflage, Februar 2025

pcae GmbH, Kopernikusstr. 4 A, 30167 Hannover

pcae versichert, dass Handbuch und Programm nach bestem Wissen und Gewissen erstellt wurden. Für absolute Fehlerfreiheit kann jedoch infolge der komplexen Materie keine Gewähr übernommen werden.

Änderungen an Programm und Beschreibung vorbehalten.

Korrekturen und Ergänzungen zum vorliegenden Handbuch sind ggf. auf der aktuellen Installations-CD enthalten. Ergeben sich Abweichungen zur Online-Hilfe, ist diese aktualisiert.

Ferner finden Sie **Verbesserungen und Tipps im Internet unter www.pcae.de**.

Von dort können zudem aktualisierte Programmversionen herunter geladen werden.

S. hierzu auch *automatische Patch-Kontrolle* im DTE[®]-System.

Produktbeschreibung

Das Programm `##EC3FS`, biegesteifer Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild, weist die Tragfähigkeit eines Stirnplattenstoßes unter zweiachsiger Beanspruchung entspr. Eurocode 3 nach.

Dazu wird der Anschluss mit Hilfe der ebenen FEM abgebildet, d.h. die Stirnplatte wird als gebettete FE-Platte modelliert, wobei die Schrauben als Einzelfedern berücksichtigt werden.

Spezielle Leistungsmerkmale

- Berechnung und Nachweis eines Stirnblechstoßes mit freiem Schraubenbild unter zweiachsiger Belastung
- die Nachweise der Schrauben unter Zug- und Abscherbeanspruchung sowie der Schweißnähte werden nach EC 3-1-8 geführt, die Stirnplatte und das Trägerprofil werden nach EC 3-1-1 nachgewiesen
- alternativ zur Kaltbemessung kann eine Heißbemessung n. EC 3-1-2, 4.2, durchgeführt werden
- die Materialsicherheit kann entweder normenkonform vorgelegt oder vom Anwender eingegeben werden
- die Stirnplatte kann entweder rechteckig, rund oder polygonal umrandet sein
- Stirnplatte und Trägerprofil können verschiedene Stahlgüten haben
- die Schrauben können entweder einheitlich in Größe und Klasse festgelegt oder vom Anwender einzeln bearbeitet werden
- der Trägerquerschnitt ist ein beliebiges typisiertes Profil der `pcae`-Reihe (Flachstahl, Doppel-T-Profil, L-Profil, C-Profil, Rechteckrohr, Kreisrohr, U-, Z-, T-Profil, Quadratrohr)
- ist das Programm `##QUER`, Flächenwerte dünn- und dickwandiger Querschnitte, installiert, kann der Trägerquerschnitt alternativ als dünnwandiger Querschnitt in `##QUER` frei definiert und in das Programm `##EC3FS` importiert werden
- die Stirnplatte kann bei Hohlprofilen (Rechteckrohr, Kreisrohr) innerhalb der Profilwandung ausgeschnitten werden
- bei `##QUER`-Querschnitten kann eine Aussparung beliebig in der Stirnplatte definiert werden; sie kann rund oder polygonal umrandet sein
- Profil- und Materialparameter können sowohl `pcae`-eigenen Tabellen entnommen als auch parametrisiert eingegeben werden
- das Profil kann beliebig auf der Stirnplatte angeordnet sein, muss sich aber komplett auf dem Blech befinden
- Schweißnähte werden als umlaufende Kehlnaht oder Stumpfnah nachgewiesen
- die Schweißnähte können mit dem richtungsbezogenen oder vereinfachten Verfahren nachgewiesen werden
- die FE-Berechnung der Stirnplatte kann elastisch-elastisch, elastisch-plastisch oder plastisch-plastisch erfolgen, d.h. bei elastischer FE-Berechnung können die Spannungsnachweise von Stirnplatte elastisch oder plastisch durchgeführt werden
- der Träger wird für die vorliegende Schnittgrößenkombination elastisch oder plastisch nachgewiesen
- die Spannungsnachweise von Stirnplatte und Träger können elastisch oder plastisch durchgeführt werden
- Import- / Exportfunktionen
- Import aus den Programmen `##EC3BT`, biegesteifer Trägeranschluss, und `##EC3IH`, typisierter IH-Anschluss
- FE-Modellierung der Stirnplatte: Die Elementierung kann automatisch oder benutzerdefiniert erfolgen. Der Bettungsmodul kann automatisch oder benutzerdefiniert eingehen.
- FE-Modellierung der Schrauben: Die Federn können elastisch oder plastisch implementiert werden. Der Ansatz der Federsteifigkeit kann automatisch oder benutzerdefiniert erfolgen. Bei vorgespannten Schrauben wird die Vorspannkraft berücksichtigt.
- Schnittgrößenimport aus `pcae`-Stabwerksprogrammen und über Text-Importschnittstelle
- im Ausgabeprotokoll wird bei Bedarf der Rechenweg in ausführlicher Form dargestellt, so dass jeder Zahlenwert nachvollzogen werden kann. Natürlich kann das Statikdokument auch wesentlich reduziert werden.
- Export der Konstruktionszeichnung im DXF-Format zur Weiterbearbeitung in einem CAD-System
- englischsprachige Druckdokumentenausgabe

Die Programmentwicklung erfolgt nahezu ausschließlich durch Bauingenieure.

Die interaktiven Steuermechanismen des Programms sind aus anderen Windows- Anwendungen bekannt. Wir haben darüber hinaus versucht, weitestgehend in der Terminologie des Bauingenieurs zu bleiben und *##-EC3FS* von detailliertem Computerwissen unabhängig zu halten.



Das vorliegende Handbuch beschreibt die Handhabung des Programms. Informationen zu dem jeweiligen Eigenschaftsblatt finden Sie zusätzlich über den lokalen Hilfebutton.

Zur *##-EC3FS*-Dokumentation gehört neben diesem Manual das Handbuch

DTE®-DeskTopEngineering.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg mit *##-EC3FS*.

pcae GmbH

Hannover, im Februar 2025

Abkürzungen und Begriffe

Um die Texte zu straffen, werden folgende Abkürzungen benutzt:

RMT	rechte Maustaste drücken
LMT	linke Maustaste drücken
LF	Lastfall (Teileinwirkung)
Nwtyp	Nachweistyp
Gk	Grundkomponente
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit



signalisiert Anmerkungen

Buttons

Das Betätigen von Buttons wird durch Setzen des Buttoninhalts in **blaue Farbe** und die Auswahl eines Begriffs in einer Listbox durch diese **Farbe** symbolisiert.



Rot markierte Buttons bzw. Mauszeiger kennzeichnen erforderliche Eingaben bzw. anzuklickende Buttons.

Index

Indexstichworte werden im Text zum schnelleren Auffinden **grün markiert**.

Beim Verweis auf Eigenschaftsblätter wird deren *Bezeichnung kursiv gedruckt*.

Doppelklick

zweimaliges schnelles Betätigen der LMT

blank

Leerzeichen

Cursor

Schreibmarke in Texten, Zeigesymbol bei Mausbedienung

icon

oder Ikon, Piktogramm, Bildsymbol

Zur Definition der Begriffe **Lastbild**, **Lastfall**, **Einwirkung**, **Lastkollektiv** und **Extremalbildungsvorschrift** s. Handbuch *das pcae-Nachweiskonzept*, Theoretischer Teil.

Die in der Interaktion mit **pcae**-Programmen stehenden **Buttons** besitzen folgende Funktionen:



Bricht Eigenschaftsblätter ohne Änderung der Eingabewerte ab.



Lädt abgespeicherte Werte in das Eigenschaftsblatt bzw. speichert die aktuellen Werte zum späteren Abruf in anderen Eigenschaftsblättern.



Ruft das Online-Hilfesystem.



Bestätigt die Eingaben und schließt das Eigenschaftsblatt.



Löschen-Button vernichtet Eingaben mit Nachfrage.



Datenzustand
überprüfen

Wenn der Mauszeiger einen Moment auf einem Button verweilt, erscheint ein Fähnchen, das den zugehörigen Aufruf beschreibt.

Inhaltsverzeichnis

1	Programminstallation und DTE®-Schreibtisch einrichten	5
2	Bauteil erzeugen.....	7
3	Eingabeoberfläche.....	9
3.1	Allgemeines zum Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild.....	11
3.2	Rechenlaufsteuerung / Material	14
3.3	Stirnplatte / Trägerprofil / Schraubenanordnung.....	16
3.3.1	Stirnplatte	16
3.3.2	Trägerprofil	17
3.3.3	Schraubenanordnung.....	20
3.4	FEM-Parameter - Ausgabeoptionen	22
3.5	Nachweise im Brandfall.....	25
3.5.1	Temperaturberechnung.....	26
3.6	Schnittgrößen	29
3.6.1	Schnittgrößen importieren.....	29
3.6.2	Import von einem Einzelschnitt bei Trägerstößen.....	30
3.7	Ergebnisübersicht.....	32
3.8	Nachweis der Schrauben	33
3.9	Spannungsnachweis für Platten n. EC 3.....	35
3.10	Schweißnahtnachweis n. EC 3.....	36
3.11	Querschnittsnachweis n. EC 3	38
3.12	Theorie dünnwandiger, mehrteiliger Querschnitte	39
3.13	Beschreibung der Ergebnisse / Verifikation	41
3.13.1	Vergleiche zwischen ##EC3FS, ##EC3BT und ETH-Versuchen.....	41
3.13.1.1	Beispiel 1: IPE500,S355, 3x2 Schrauben M20,10.9 (ETH-Versuch 8.1K1)	42
3.13.1.2	Beispiel 2: HEB300, S355, 4x2 Schrauben M20, 10.9 (ETH 15K1).....	49
3.13.1.3	Beispiel 3: HEB200, S355, 2x2 Schrauben M20, 10.9 (ETH 10K1).....	50
3.13.2	Vergleiche zwischen ##EC3FS und ##ALFA	51
3.13.2.1	Beispiel 4: HEB500 auf rechteckiger Stirnplatte, S355, 4x2 Schr. M20, 10.9, $M_{Ed} = 160$ kNm.....	51
3.13.2.2	Beispiel 5: Kreisrohr, S355, 6 Schrauben M12, 10.9, $M_{Ed} = 30$ kNm.....	52
3.13.3	Zusammenfassung.....	52
3.14	Tragfähigkeit von Schweißverbindungen (Basics).....	53
3.14.1	Kehlnähte	53
3.14.2	Stumpfnähte	54
3.15	Schrauben (Basics).....	56
3.16	Schraubenverbindungen (Basics)	57
3.16.1	Berechnung der Tragfähigkeiten von Schrauben	58
3.17	Anschlussbleche	61
4	Allgemeines	62
4.1	Stahlsorten	62
4.2	Ausdrucksteuerung	62
4.3	nationale Anhänge zu den Eurocodes	63
5	Literaturverzeichnis	64
6	Index	67

1 Programminstallation und DTE®-Schreibtisch einrichten

Die Installation des DTE®-Systems und das Überspielen des Programms *##-EC3FS* auf Ihren Computer erfolgt über einen selbsterläuternden Installationsdialog.

Sofern Sie bereits im Besitz anderer *##*-Programme sind und diese auf Ihrem Rechner installiert sind, lesen Sie bitte Abs. 2, Bauteil erzeugen, auf S. 7 weiter.

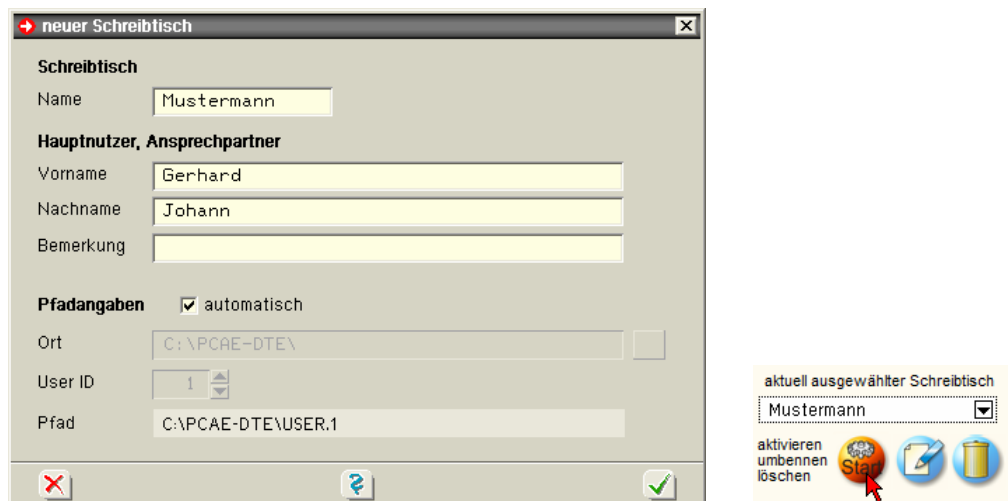


Nach erfolgreicher Installation befindet sich das DTE®-**Startsymbol** auf Ihrer Windowsoberfläche. Führen Sie bitte darauf den Doppelclick aus.

Daraufhin erscheint das Eigenschaftsblatt zur **Schreibtischauswahl**. Da noch kein Schreibtisch vorhanden ist, wollen wir einen neuen einrichten. Klicken Sie hierzu bitte auf den Button **neu**.



Schreibtischname Dem neuen Schreibtisch kann ein beliebiger Name zur Identifikation zugewiesen werden. Klicken Sie hierzu mit der LMT in das Eingabefeld. Hier ist *Mustermann* gewählt worden.

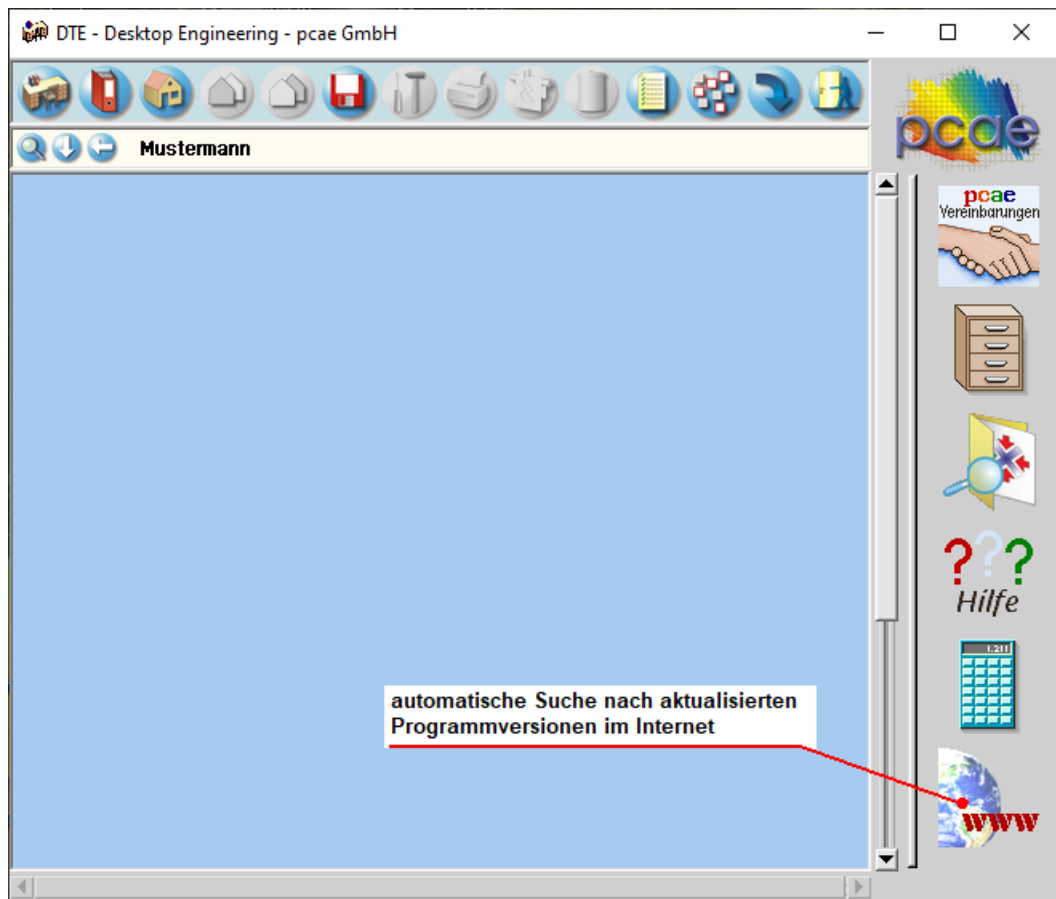


Nach Bestätigen über das **Hakensymbol** erscheint wieder die Schreibtischauswahl, in die der neue Name bereits eingetragen ist. Drücken Sie auf **Start** und die DTE®-Schreibtischoberfläche erscheint auf dem Bildschirm.

DTE® steht für *DeskTopEngineering* und stellt das "Betriebssystem" für *pcae*-Programme und die Verwaltungsoberfläche für die mit *pcae*-Programmen berechneten Bauteile dar.



Zur Beschreibung des DTE®-Systems und der zugehörigen Funktionen s. Handbuch *DTE®-DeskTopEngineering*.


















Steuerbuttons

Im oberen Bereich des Schreibtisches sind Interaktionsbuttons lokalisiert.

Die Funktion eines Steuerbuttons ergibt sich aus dem Fähnchen, das sich öffnet, wenn sich der Mauscursor über dem Button befindet.

Auf Grund der **Kontextsensitivität** des DTE®-Systems sind manche Buttons solange abgedunkelt und nicht aktiv bis ein Bauteil aktiviert wird.

- | | |
|---|---|
|  | Die Buttons bewirken im Einzelnen |
|  | öffnet die Schreibtischauswahl |
|  | legt einen neuen Projektordner an |
|  | erzeugt ein neues Bauteil |
|  | kopiert das aktivierte Bauteil |
|  | fügt die Bauteilkopie ein |
|  | lädt/sichert Bauteile. Hier befindet sich auch der e-Mail-Dienst . |
|  | menügesteuerte Bearbeitung des aktivierten Bauteils |
|  | druckt die Datenkategorien des aktivierten Bauteils |
|  | ruft das Planerstellungsmodule des aktivierten Bauteils |
|  | löscht das aktivierte Bauteil/Ordner |
|  | öffnet die Bearbeitung der Auftragsliste |
|  | öffnet die Mehrfachauswahl zur gleichzeitigen Bearbeitung von Bauteilen |
|  | eröffnet Verwaltungsfunktionen |
|  | schließt den geöffneten Ordner/beendet die DTE®-Sitzung |

Bauteil erzeugen



Durch Erzeugung eines **Ordners** besteht die Möglichkeit, Bauteile einem bestimmten Projekt zuzuordnen. Ein Ordner wird durch Anklicken des nebenstehenden Symbols erzeugt. Der Ordner erscheint auf dem DTE®-Desktop und kann, nachdem ihm eine Bezeichnung und eine Farbe zugeordnet wurden, per Doppelklick aktiviert (geöffnet) werden.



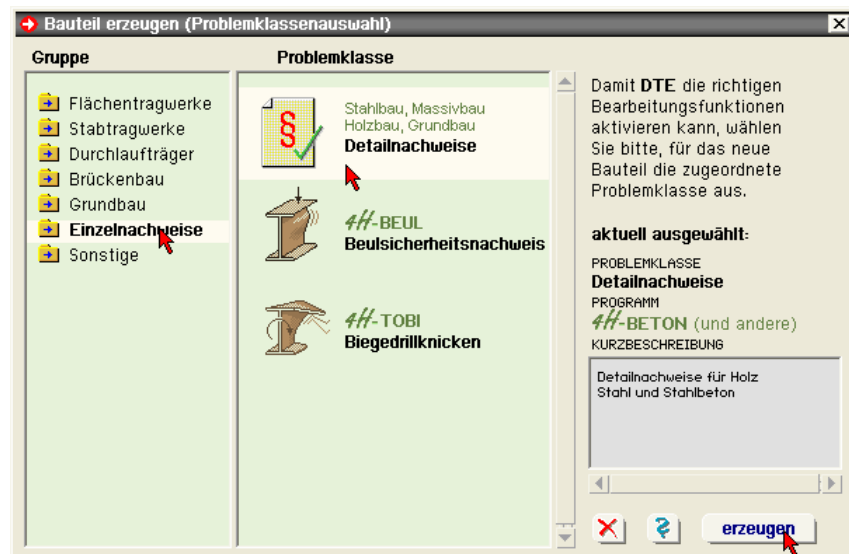
Aus dem Eintrag in der Schreibtischkopfzeile ist zu erkennen, in welchem Ordner sich die Aktion aktuell befindet.



Der Ordner kann durch das **beenden**-Symbol wieder geschlossen werden.



Zur Erzeugung eines neuen Bauteils wird das Schnellstartsymbol in der Kopfleiste des DTE®-Schreibtisches angeklickt. Klicken Sie in dem folgenden Eigenschaftsblatt bitte mit der LMT auf die Gruppe **Einzelnachweise**, dann auf die Problemklasse **Detailnachweise** und abschließend auf den **erzeugen-Button**.



Der schwarze Rahmen der neuen Bauteilkone lässt sich mit der Maus über den Schreibtisch bewegen. Klicken Sie die LMT an der Stelle, an der das Bauteil auf dem Schreibtisch platziert werden soll. Das Eigenschaftsblatt *Name und Bezeichnung* erscheint.

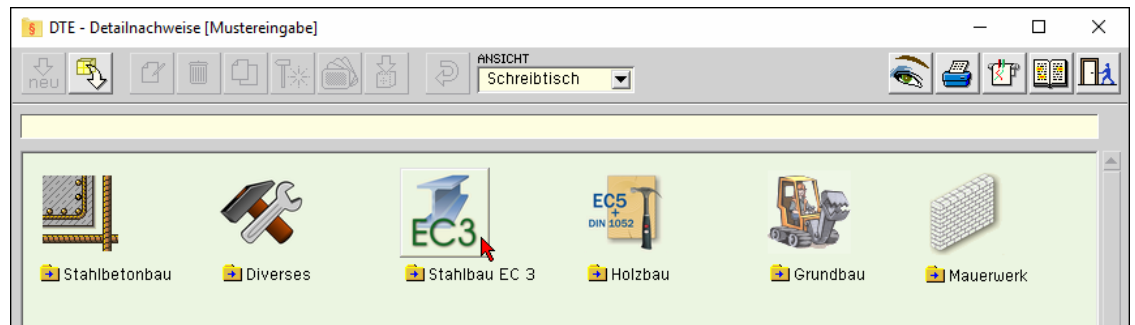


Nach Doppelklicken des neuen Bauteilicons erscheint die Übersicht der installierten Detailnachweisprogramme.

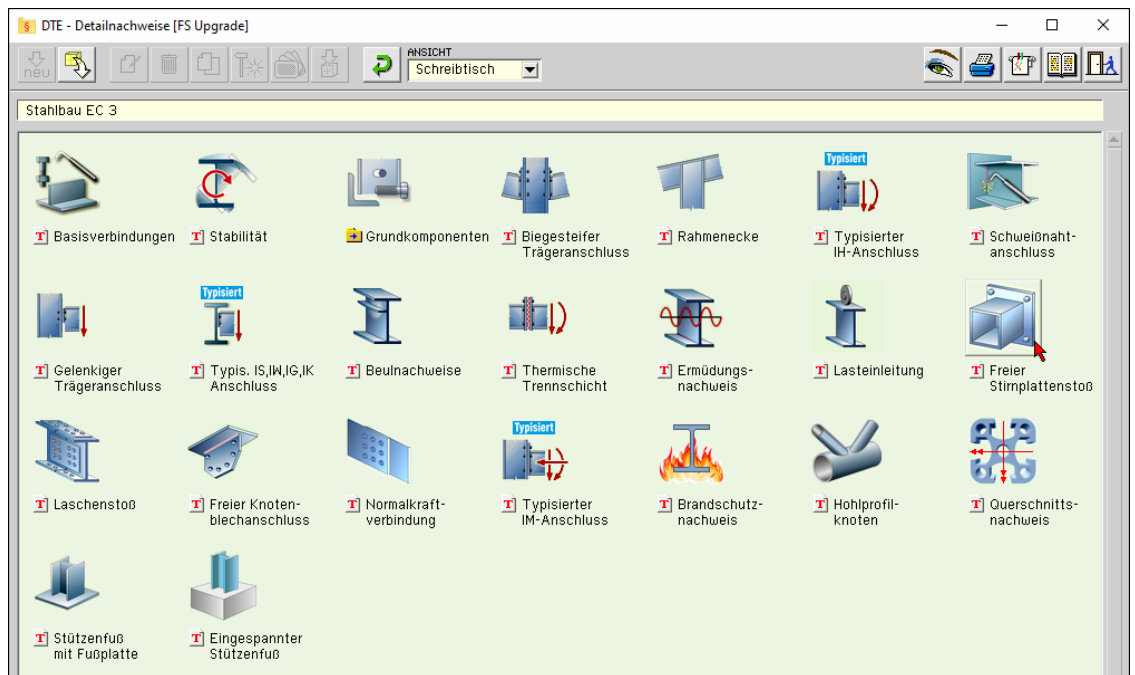


Überschreiben Sie den Begriff "Detailnachweise" zur Identifikation durch einen sinnvollen Text. Nach **Bestätigen** ist das Bauteil mit dem neuen Namen eingerichtet. Durch Doppelklicken des neuen Symbols wird die Verwaltung der DTE®-Detailnachweise geöffnet.

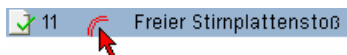
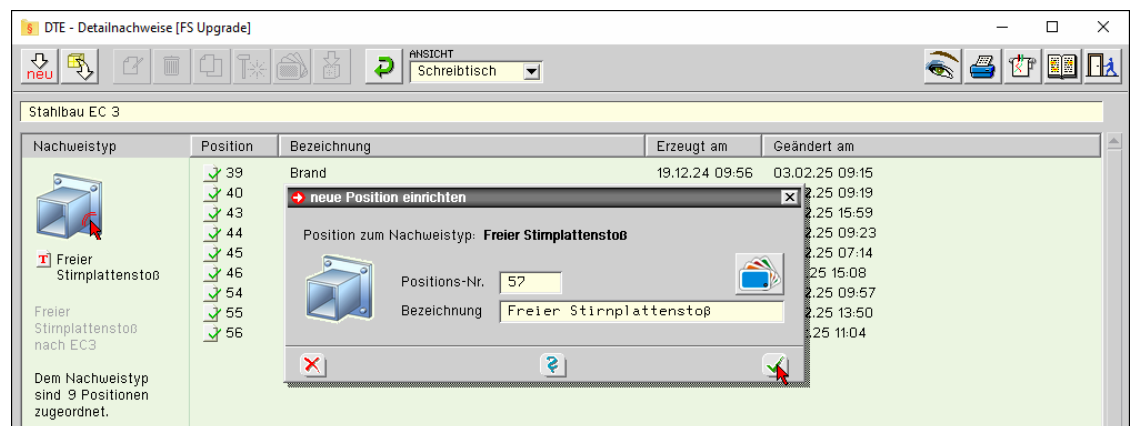
Übersicht Detailnachweise



Übersicht EC 3- Programme



Freier Stirnplattenstoß



Im rechten Bereich des Eigenschaftsblatts erscheint die neue Position in einem Verzeichnis. Klicken Sie hier bitte doppelt auf den neuen Schriftzug. Daraufhin erscheint die Eingabeoberfläche des Nachweistyps *Freier Stirnplattenstoß*.

Eingabeoberfläche



Mit dem Programm **4H-EC3FS**, wird ein biegesteifer Stirnplattenstoß mit freiem Schraubenbild unter ein- oder zweiachsiger Belastung nach EC 3 nachgewiesen. Nachfolgend ist das Haupteingabefenster von **4H-EC3FS** dargestellt.

The screenshot shows the main input window of the 4H-EC3FS program. The title bar reads "4H-EC3 - freier Stirnplattenstoß [Position 56: Freier Stirnplattenstoß]". The interface includes a toolbar with icons for file operations, calculation, and help. The main area is divided into several sections:

- Standard EN 1993-1-1, 6.2** (selected) and **Brandfall EN 1993-1-2, 4.2** (deselected).
- Materialisicherheit** (checked, genormt) with input fields for **Beanspruchbarkeit von Querschnitten** (1.00) and **Beanspruchbarkeit von Verbindungsmitteln** (1.25).
- einheitliche Stahlsorte** (checked) with a dropdown for **Stahlsorte** (S235) and a checkbox for **Vorgabe**.
- umlaufende Schweißnaht** (checked) with options for **Kehlnaht** (selected) or **Stumpfnäht**, and a field for **wirksame Nahtdicke a** (4.0 mm).
- einheitliche Schrauben** (checked) with dropdowns for **Schraubengröße** (M10) and **Festigkeitsklasse** (8.8), and checkboxes for **Passschraube**, **Senkschraube**, **Schraubengewinde in der Scherfuge**, and **Schraubenschaft in der Scherfuge**.
- Nachweise** section with checkboxes for:
 - nur Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch** (deselected)
 - Schnittgrößenermittlung (FEM) elastisch und Tragfähigkeitsnachweise** (selected)
 - Schnittgrößenermittlung (FEM) und Tragfähigkeitsnachweise plastisch** (deselected)
 - Spannungsnachweis der Stirnplatte** (checked) with sub-options for **Verfahren** (elastisch, plastisch) and **Nachweis der Kontaktpressungen** (checked).
 - Querschnittsnachweis des Trägers** (checked) with sub-options for **Verfahren** (elastisch, plastisch).
 - Nachweis der Schweißnähte** (checked) with sub-options for **Nachweis mit dem richtungsbezogenen Verfahren** (selected) and **Nachweis mit dem vereinfachten Verfahren** (deselected).
 - Nachweis der Schrauben** (checked) with sub-option **Schraubenabstände überprüfen** (checked).

A central diagram shows a square end plate with four bolts at the corners and a central square hole, representing the connection geometry.

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



Rechenlaufsteuerung / Material (s. Abs. 3.2, S. 14)

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 (s. Abs. 3.3, S. 16)

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 (s. Abs. 3.4, S. 22)

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 (s. Abs. 3.5, S. 25)

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



Bemessungsschnittgrößen (s. Abs. 3.6, S. 29)

Die Schnittgrößen werden im fünften Registerblatt festgelegt und können entweder 'per Hand'

eingegeben oder aus einem *##*-Stabwerksprogramm importiert werden. Die Schnittgrößen beziehen sich auf den Schwerpunkt und das Koordinatensystem des Trägerprofils (x-y-z bzw. l-m-n).



Ergebnisübersicht (s. Abs. 3.7, S. 32)

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



nationaler Anhang (s. Abs. 4.3, S. 63)

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 (s. Abs. 4.2, S. 62)

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 Anschluss 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.

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.

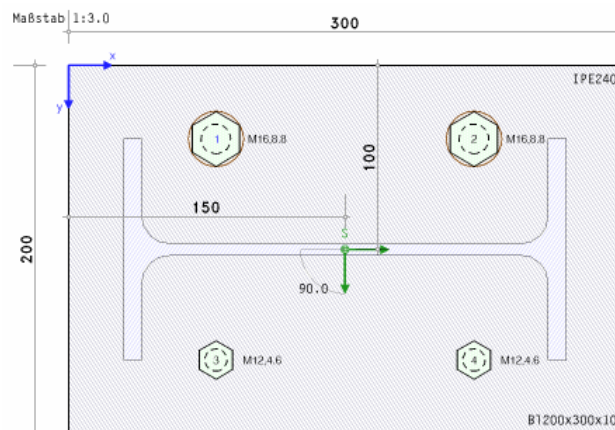
Die Komponentenmethode ist Grundlage des Programms *##-EC3BT*, biegesteifer Trägeranschluss, das auch Trägerstöße bemisst (s. Handbuch zu *##-EC3BT*).

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 *##-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 beliebiges 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.

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

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 $\varepsilon_{y,pl}$ 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.

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

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.

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

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 $\varepsilon_{t,f}$ 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 *##-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 $\varepsilon_{t,f}$ 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 #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 Standard-elemente 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_r , 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 Elementdicke für die Approximationsgenauigkeit nicht zu groß 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_{ub} nicht überschreiten dürfen, ist der Anschluss nicht nachweisbar, wenn die entsprechende Ausnutzung $U_{wt} > 1$ ist.

Ist ein zulässiger Spannungszustand der Verbindung erreicht, werden die Zugkräfte in den Schrauben in Kombination mit den einwirkenden Querkraften 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



Im Register 1 (s. S. 9) befinden sich die Angaben zur Rechenlaufsteuerung und der allgemeinen Materialbeschreibung.

Allgemeines

Im Programm *##-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 *##-EC3BT*, Biegesteifer Trägeranschluss, in das aktuelle Programm zu übertragen. Die Daten können **nicht** zurücktransportiert werden.

► Daten aus *##-EC3BT* importieren

► Daten nach *##-EC3SA* exportieren

Umgekehrt können die aktuellen Eingabedaten zur detaillierten Untersuchung der Schweißnähte in das *pcae*-Programm *##-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 *##-EC3FS* werden für den Nachweis von Trägerstößen n. EC 3-1-1 und EC 3-1-8 folgende Materialsicherheitsbeiwerte herangezogen

Materialsicherheitsbeiwerte (☒ genormte Werte)

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, Abs. 4.3, S. 63) entnommen oder vom Anwender vorgegeben werden.

Stahlsorte

Stirblech 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 S 235

☐ Vorgabe

Da die Beschreibung der Stahlparameter für Verbindungen nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der Stahlsorten verwiesen (Abs. 4.1, S. 62).

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, Abs. 3.2, S. 14) übersteuert werden. Schrauben der Größen M12 bis M30 und der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 mit großer Schlüsselweite werden planmäßig vorgespannt (s. FEM, Abs. 3.4, S. 22).

☒ einheitliche Schrauben

Schraubengröße M12

☐ Vorgabe

Festigkeitsklasse 8.8

☒ Vorgabe

char. Streckgrenze f_{yb} 640.0 N/mm²

char. Zugfestigkeit f_{ub} 800.0 N/mm²

Bruchdehnung ϵ_{ub} 12.0 %

☐ normale Schlüsselweite

☒ große Schlüsselweite

☐ Passschraube

$f_{ub} > 700$ N/mm²: HU-Schraube

☐ Senkschraube

planmäßig vorgespannt

☐ Schraubengewinde in der Scherfuge

☒ Schraubenschaft in der Scherfuge

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.

Da die Beschreibung der weiteren Schraubenparameter für Verbindungen nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der Schrauben (Abs. 3.15, S. 56) verwiesen.

Schweißnähte

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

umlaufende Schweißnaht

- ☐ Kehlnaht
☒ Stumpfnäht ☐ durchgeschweißt ☒ nicht durchgeschweißt
 wirksame Nahtdicke a 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 (s. Abs. 3.14, S. 53).

Nachweise

Das Programm #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, Abs. 3.4, S. 22) modelliert.

Die Schnittgrößenermittlung kann elastisch oder plastisch erfolgen. Bei elastischer Schnittgrößenermittlung kann der Spannungsnachweis (Abs. 3.9, S. 35) der Stirnplatte entweder elastisch oder plastisch durchgeführt werden.

Die plastische Schnittgrößenermittlung beinhaltet den plastischen Spannungsnachweis der Stirnplatte.

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

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

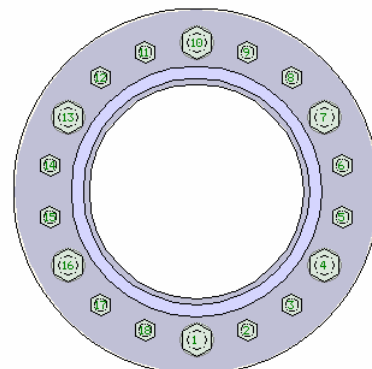
Optional kann ein elastischer oder plastischer Querschnittsnachweis (Abs. 3.11, S. 38) des Trägers für die eingegebenen Schnittgrößenkombinationen durchgeführt werden.

Das Profil wird umlaufend auf die Stirnplatte geschweißt. Die Schweißnähte (Abs. 0, S. 36) werden entweder mit dem richtungsbezogenen oder vereinfachten Verfahren nachgewiesen.

Bei umlaufender Kehlnaht können kurze Nähte vernachlässigt werden.

Optional kann die Tragfähigkeit der Schrauben (Abs. 3.8, S. 33) 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.



3.3

Stirnplatte / Trägerprofil / Schraubenanordnung



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

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

Stirnplatte ☒ rechteckig ☐ rund ☐ polygonal

Blechdicke t_p 10.0 mm
 Blechbreite b_p 120.0 mm
 Blechlänge l_p 120.0 mm

Träger
☒ Profil aus Profilmanager
☐ parametrisiertes Stahlprofil
☐ Profil aus **4H-QUER**

Profilname QR 60 x 60 x 4.0(w)

☐ Stirnplatte innerhalb des Profils ausgeschnitten
☐ Stirnplatte bündig
☒ Profilschwerpunkt im Plattenmittelpunkt
☐ Profilschwerpunkt bei x_i 60.0 mm y_i 60.0 mm
☐ Profilpunkt oben links bei x_p 30.0 mm y_p 30.0 mm
☐ Profilpunkt mittig bei x_m 60.0 mm y_m 60.0 mm

Schwerpunktskoordinaten
 = Lasteinleitungsordinaten
 x_s 60.0 mm y_s 60.0 mm
 Querschnittsverdrehung β_s 0.0 °

Schraubenanordnung
☐ kreisförmig um den Profilschwerpunkt
☒ regelmäßig [Längenangaben in mm]
☒ Schrauben gleichmäßig verteilen
 Anzahl Schrauben je Richtung:
 n_x 2 n_y 2
 Abstand der Schrauben vom Blechrand:
 e_{links} 20.0 e_{oben} 20.0
 e_{rechts} 20.0 e_{unten} 20.0
 Abstand der Schrauben voneinander:
 p_{x1-2} 80.0 p_{y1-2} 80.0
☐ frei

Diagramm: Ein quadratisches Schraubenbild mit vier Schrauben an den Ecken. Ein Koordinatensystem mit y und z Achsen ist im Zentrum eingezeichnet. Die Schrauben sind als grüne Kreise dargestellt.

3.3.1

Stirnplatte

Die Stirnplatte kann rechteckig, rund oder polygonal umrandet sein. Ist die Stahlsorte nicht einheitlich vereinbart (s. Reg. 1, Abs. 3.2, S. 14) ist die Stahlsorte vorzugeben. Die rechteckige Stirnplatte wird über ihre Breite und Länge, die runde Stirnplatte über den Durchmesser beschrieben.

Stirnplatte ☒ rechteckig ☐ rund ☐ polygonal

Blechdicke t_p 20.0 mm
 Blechbreite b_p 320.0 mm
 Blechlänge l_p 320.0 mm
 Stahlsorte S355 ☐ Vorgabe
 Kennung

Stirnplatte ☐ rechteckig ☒ rund ☐ polygonal

Blechdicke t_p 20.0 mm
 Durchmesser \varnothing_p 320.0 mm
 Stahlsorte S355 ☐ Vorgabe
 Kennung

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

Stirnplatte ☐ rechteckig ☐ rund ☒ polygonal

	x mm	y mm
1.	0.0	75.0
2.	130.0	0.0
3.	260.0	75.0
4.	260.0	225.0
5.	130.0	300.0
6.	0.0	225.0

max. Breite b_p 260.0 mm
 max. Länge l_p 300.0 mm
 Stahlsorte S355 ☐ Vorgabe
 Kennung

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

Ist das **pcae**-Programm **##-QUER**, Querschnittswerte, installiert, kann alternativ ein beliebiger Querschnitt erstellt und in das Programm **##-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. Flanscbreiten 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.

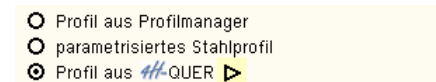
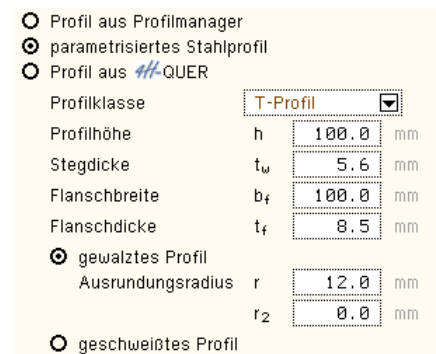
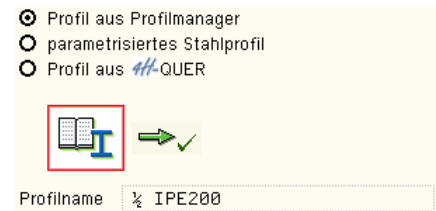
Diese Schweißnähte werden **nicht** nachgewiesen.

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

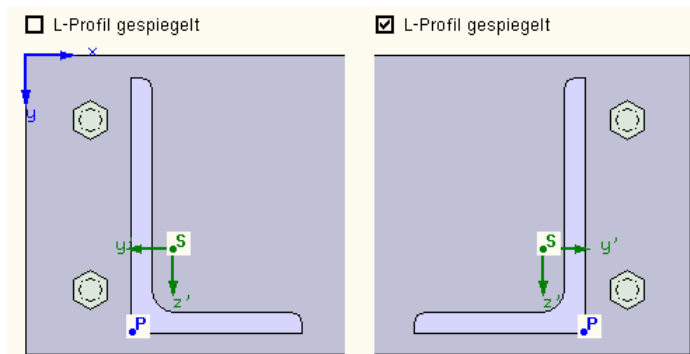
Ist das **pcae**-Programm **##-QUER** installiert, wird eine entsprechende Eingabemöglichkeit angeboten.

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 **##-EC3FS** übergeben werden.

Der **##-QUER**-Querschnitt muss den Programmvorgaben entsprechend dünnwandig sein. Weitere Informationen zur Bedienung des Programms **##-QUER** s. zugehöriges Handbuch (z.B. als pdf-Dokument auf unserer Website pcae.de).



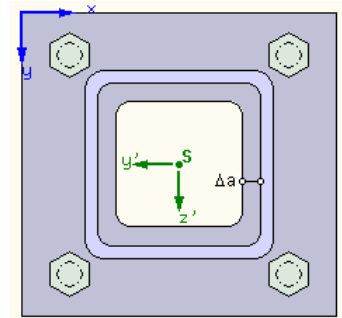
Besonderheit beim ungleichschenkligen L-Profil



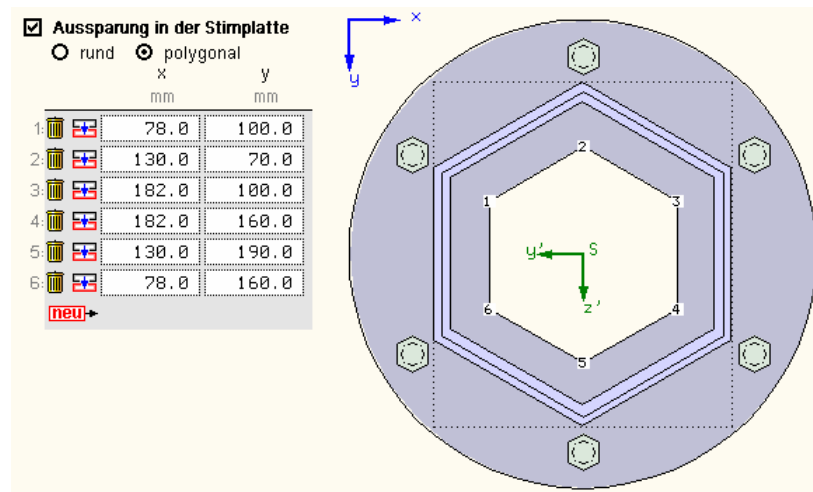
Das aus dem Profil-Manager oder parametrisiert eingegebene L-Profil ist derart orientiert, dass der kürzere Flansch nach rechts zeigt. Um das Querschnittskordinatensystem umzudrehen, kann das **L-Profil gespiegelt** werden.

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 (H-QUER)

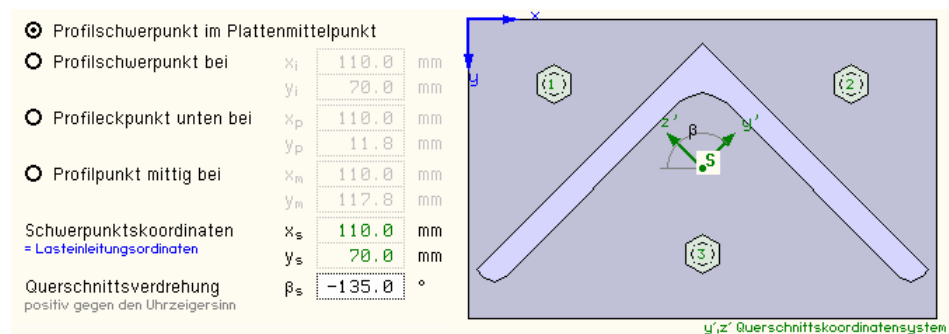


Um auch mit polygonalen Querschnitten eine durchgehende Rohrverbindung zu modellieren, kann eine **Aussparung in der Stirnplatte** angeordnet werden. Sie kann rund oder polygonal umrandet sein.

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



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.

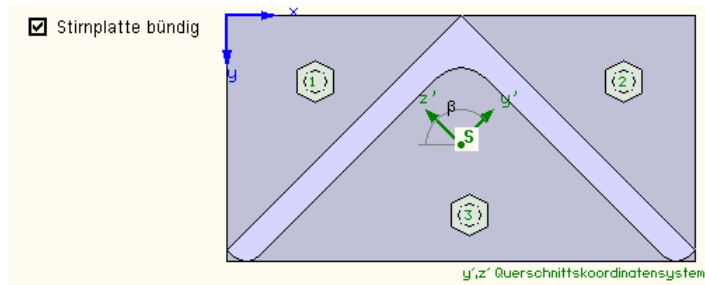
Die Optionen **Profileckpunkt unten** und **Profilpunkt mittig** sind bei einer runden Stirnplatte nicht verfügbar.

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.



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.



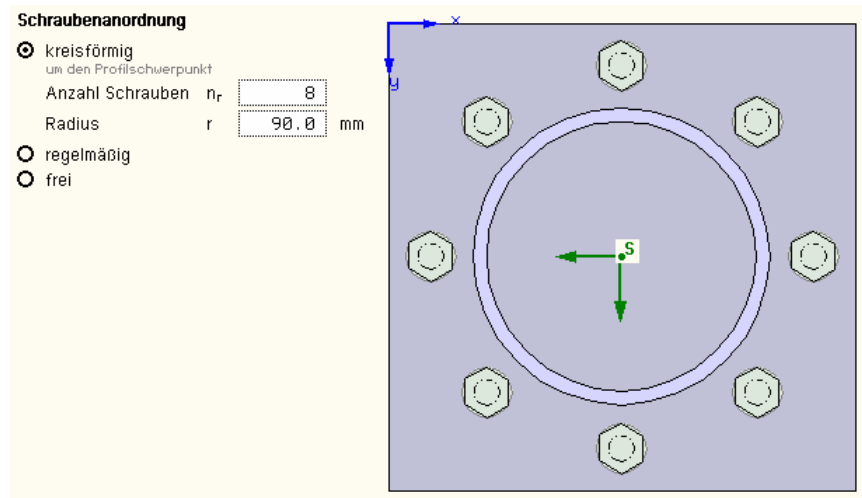
Die Schraubenanordnung ist von dieser Option ausgenommen.

3.3.3

Schraubenanordnung

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

kreisförmig

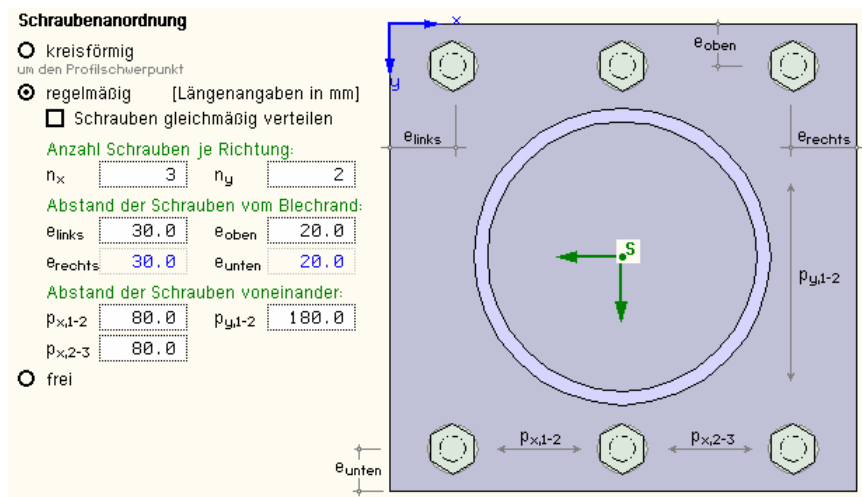


Eine kreisförmige Anordnung wird i.A. bei rotationssymmetrischen Profilen, z.B. Rohrprofilen verwendet.

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, Abs. 3.2, S. 14).

regelmäßig



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, Abs. 3.2, S. 14).

frei

Schraubenanordnung

☐ kreisförmig
um den Profilschwerpunkt
☐ regelmäßig
☒ frei

	x mm	y mm
1	20.0	20.0
2	110.0	20.0
3	200.0	20.0
4	20.0	110.0
5	200.0	110.0
6	20.0	200.0
7	110.0	200.0
8	200.0	200.0

neu ➔

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.

Schraubenanordnung

☐ kreisförmig
um den Profilschwerpunkt
☐ regelmäßig
☒ frei

	x mm	y mm
1	20.0	20.0
2	110.0	20.0
3	200.0	20.0
4	20.0	110.0
5	200.0	110.0
6	20.0	200.0
7	110.0	200.0
8	200.0	200.0

neu ➔

Schraube 4

Schraube 4 x₄ 20.0 mm y₄ 110.0 mm

Um weitere Schraubenparameter zu ändern, deaktivieren Sie bitte den Schalter 'einheitliche Schrauben' im ersten Register

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, Abs. 3.2, S. 14) 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, Abs. 3.2, S. 14) sowie Federsteifigkeit und Vorspannkraft (Beschr. s. Register 3, Abs. 3.4, S. 22) modifiziert werden.

Schraube 4 x₄ 20.0 mm y₄ 110.0 mm

Schraubengröße: M12 ☐ Vorgabe

Festigkeitsklasse: 8.8 ☐ Vorgabe

☒ normale Schlüsselweite ☒ große Schlüsselweite
FK 8.8 oder 10.9: HV-Schraube planmäßig vorgespannt

☐ Passschraube

☐ Senkschraube

Ersatzfeder der Schrauben (FE-Berechnung):

☒ automatisch

Federsteifigkeit c_f: 6129.1 kN/cm

☒ automatisch

Vorspannkraft F_{p,C}: 37.8 kN

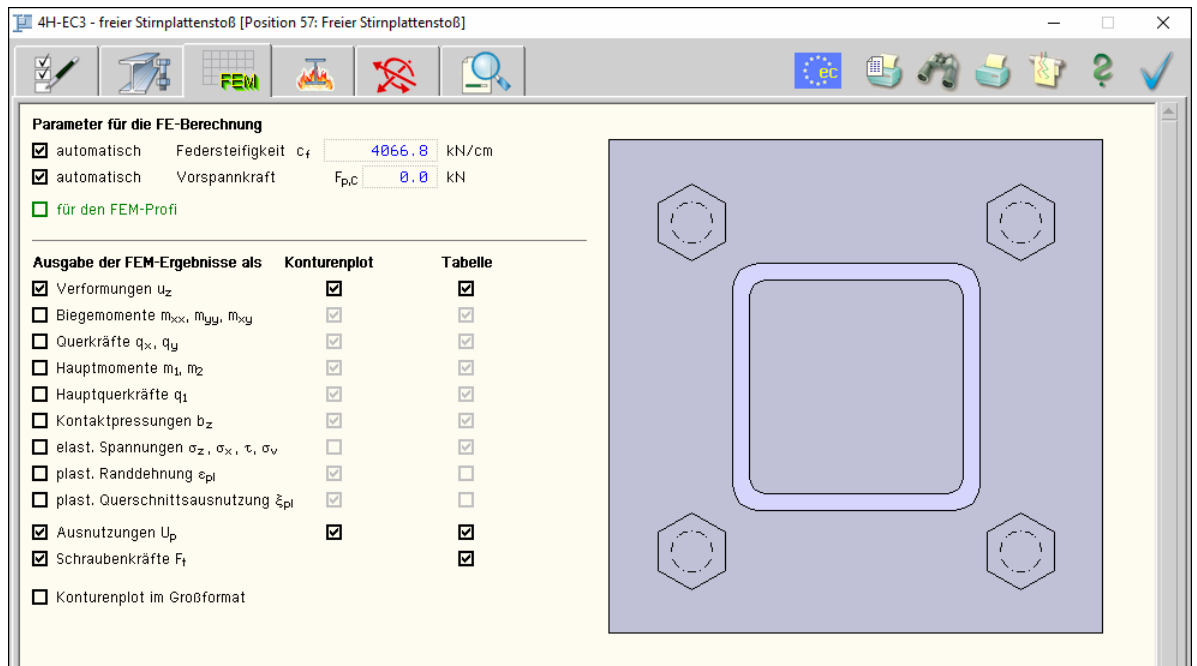


Die maßstäbliche Darstellung der Verbindung vermittelt einen Eindruck von der Anschlussgeometrie. Sie sollte stets genutzt werden, die Lage des Trägerprofils und der Schrauben auf der Stirnplatte und gegeneinander (Abstände!) zu überprüfen. Innerhalb von Hohlprofilen oder Aussparungen dürfen keine Schrauben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

3.4 FEM-Parameter - Ausgabeoptionen



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



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		
<input checked="" type="checkbox"/> automatisch	Federsteifigkeit c_f	3233.4 kN/cm
<input checked="" type="checkbox"/> automatisch	Vorspannkraft $F_{p,C}$	37.8 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. $E_{sc} \approx 210.000 \text{ N/mm}^2$
 A Schaftquerschnittsfläche der Schraube
 L Dehnlänge der Schraube $L \approx t_{ges} + t_p + 0.5 \cdot (t_k + t_m)$
 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

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

k_2 0.9
 A_s Spannungsquerschnittsfläche

oder plastisch, wobei sie nach Erreichen der plastischen Tragfähigkeit

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

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

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

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 $f_{t,e}$

Stirnplatte plastisch:

☒ automatisch Auslastungsfaktor $f_{y,f}$ max. Randdehnung $\max \epsilon_{y,pl}$ %

rechnerische Bettung der Stirnplatte:

☒ automatisch Bettungsmodul c_b kN/cm²

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 $\epsilon_{ub,pl} = f_{t,e} \cdot \epsilon_{ub}$. Der Auslastungsfaktor wird programmintern (**automatisch**) n. EC 3-1-14 angenommen mit $f_{t,e} = 0.25$.

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 $\epsilon_{y,pl} = 5$ %. Bei benutzerdefinierter Eingabe kann dieser Wert nicht überschritten werden.

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

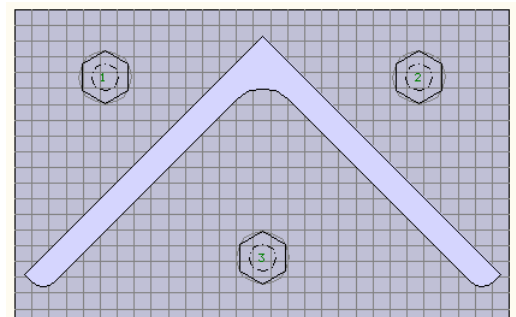
$$c_b = E_{pl} / t_{pl} \quad \dots \text{mit} \dots$$

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.

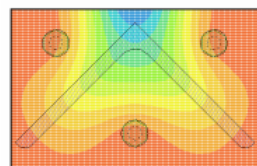
Stirnplatte

Die Ergebnisse der Stirnplatte sind als Konturenplot oder Tabelle verfügbar.

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

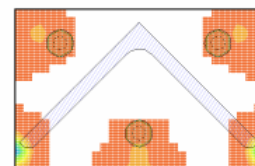
Ausgabe der FEM-Ergebnisse als	Konturenplot	Tabelle
<input checked="" type="checkbox"/> Verformungen u_z	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Biegemomente m_{xx}, m_{yy}, m_{xy}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<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 $\sigma_x, \sigma_y, \tau, \sigma_v$	<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"/>

Verformungen u_z [mm]
min $u_z = -0.0155$ mm, max $u_z = 0.4805$ mm



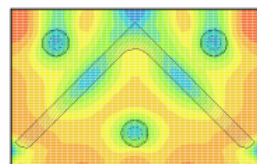
Verformungen abhebend positiv

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](#), Abs. 4.2; S. 62) 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
<input checked="" type="checkbox"/> Schraubenkräfte F_t	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

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. Reg. 1, Abs. 3.2, S. 14).

Zugkraft in den Schrauben

	x mm	y mm	wt mm	F_t kN	ε_{wt} %	U_{wt}
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; wt: Verformung (Zug positiv); F_t : Schraubenkraft; ε_{wt} : Dehnung U_{wt} : Ausnutzung aus Dehnung

3.5

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 $t = 30.0 \text{ min}$

Emissivität der Profiloberfläche

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

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

☐ Profil ungeschützt
☐ profilfolgende Bekleidung
☐ Kastenbekleidung

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

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 Abs. 3.5.1, S. 26) 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 Profilmfaktors (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.

☒ Berechnung der Stahltemperatur

Feuerwiderstandsdauer $t = 30 \text{ min}$

Emissivität der Profiloberfläche

Profilfaktor $A_m/V = 0.000 \text{ 1/m}$ =0: wird berechnet

Abschattung (durch Wand, Decke)

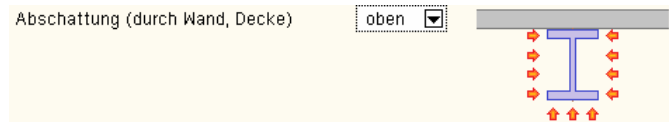
☐ Profil ungeschützt
☐ profilfolgende Bekleidung
☐ Kastenbekleidung

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

$\epsilon_m = 0.60$ =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.



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 ausgewählt werden können.

☉ 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	β_p	<input type="text" value="0.0"/>	%
Dicke	d_p	<input type="text" value="25.0"/>	mm

Die Querschnittstemperatur wird online ermittelt und am Bildschirm ausgegeben.

Querschnittstemperatur	T_o	<input type="text" value="941.1"/>	°C
------------------------	-------	------------------------------------	----

3.5.1

Temperaturberechnung

Bei brandbeanspruchten Oberflächen wird der Netto-Wärmestrom, der von dem Feuer auf die Oberfläche des Bauteils wirkt, ermittelt mit (s. EC 1-1-2, 3.1)

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

konvektiver Wärmestrom $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m)$

Wärmestrom durch Strahlung $\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot ((\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4)$... alle in [W/m²]

... mit ...

- α_c Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion [W/m²K]
- Θ_g Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils [°C]
- Θ_m Oberflächentemperatur des Bauteils [°C]
- Φ Konfigurationsfaktor
- ε_m Emissivität der Bauteiloberfläche
- ε_f Emissivität der Flamme
- σ Stephan-Boltzmann-Konstante ($= 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴)
- Θ_r wirksame Strahlungstemperatur des Brandes [°C]

Der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion richtet sich nach der verwendeten Temperaturzeitkurve (s. EC 1-1-2, 3.2).

Die Emissivität der Bauteiloberfläche von unbehandeltem Stahl beträgt $\varepsilon_m = 0.7$ (s. EC 3-1-2, 2.2(2)). Eine Feuerverzinkung bewirkt, dass bei Temperaturen bis 500°C nur 50% der Emissivi-

tät ($\epsilon_m = 0.35$) vorliegt. Die Emissivität der Flamme wird mit $\epsilon_f = 1.0$ (s. EC 1-1-2, 3.1(6), Anmerkung 2, EC 3-1-2, 4.2.5.1(3)) angenommen. Der Konfigurationsfaktor wird n. EC 1-1-2, 3.1(7) gesetzt zu $\varphi = 1.0$.

Die Strahlungstemperatur Θ_r wird durch die Gastemperatur Θ_g ausgedrückt, die sich aus den Temperaturzeitkurven ergeben. Drei nominelle **Temperaturzeitkurven** sind auswählbar (EC 1-1-2, 3.2)

- Einheits-Temperaturzeitkurve

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots \text{ mit } \dots$$

Θ_g Gastemperatur im Brandabschnitt [$^{\circ}\text{C}$]
 t Zeit [min]
 Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

- Außenbrandkurve

$$\Theta_g = 660 \cdot (1 - 0.687 \cdot e^{-0.32t} - 0.313 \cdot e^{-3.8t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots \text{ mit } \dots$$

Θ_g Gastemperatur in Bauteilnähe [$^{\circ}\text{C}$]
 t Zeit [min]
 Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

- Hydrokarbon-Brandkurve

$$\Theta_g = 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167t} - 0.675 \cdot e^{-2.5t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots \text{ mit } \dots$$

Θ_g Gastemperatur im Brandabschnitt [$^{\circ}\text{C}$]
 t Zeit [min]
 Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist $\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Naturbrandmodelle werden nicht unterstützt.

In EC 1-1-2, NA Deutschland ist festgelegt, dass bei Tragwerken im Hochbau i.d.R. die Einheits-Temperaturzeitkurve anzuwenden ist. Die Hydrokarbon-Brandkurve ist für Hochbauten nicht anzuwenden.

Die Normaltemperatur entspricht $\theta_0 = 20^{\circ}\text{C}$, die Rohdichte von Stahl ist $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ (temperaturunabhängig, s. EC 3-1-2, 3.2.2(1)).

Nach EC 3-1-2, 4.2.5 wird unterschieden zwischen innen liegenden und außen liegenden Stahlkonstruktionen. Innen liegende Bauteile können ungeschützt oder durch Brandschutzmaterial geschützt sein.

Bei außen liegenden Konstruktionen sind i.d.R. zu berücksichtigen

- der Wärmestrom durch Strahlung aus dem Brandabschnitt
- der Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion von aus Öffnungen herausschlagenden Flammen
- der Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion der Stahlkonstruktion an die Umgebung
- die Größe und Lage des Bauteils

Sie werden hier nicht behandelt.

Innen liegendes ungeschütztes Stahlbauteil (EC 3-1-2, 4.2.5.1)

Der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ berechnet sich für ein ungeschütztes Profil mit

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \quad \dots \text{ mit } \dots$$

A_m dem Brand ausgesetzte Oberfläche des Bauteils pro Längeneinheit [m^2/m]
 V Volumen des Bauteils pro Längeneinheit [m^3/m]
 k_{sh} Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt
 c_a spezifische Wärmekapazität von Stahl [J/kgK]
 $\dot{h}_{net,d}$ flächenbezogener Bemessungswert des Nettowärmestroms [W/m^2]
 Δt Zeitintervall [sec]
 ρ_a Rohdichte von Stahl [kg/m^3]

A_m/V wird als Profilmfaktor des ungeschützten Stahlbauteils bezeichnet und kann für typisierte Profile auch der Fachliteratur entnommen werden. Er sollte hier nicht kleiner als 10 1/m sein.

Der Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt durch das Profil selbst wird bestimmt mit

$$k_{sh} = (A_m/V)_b / (A_m/V) \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$(A_m/V)_b$ Profilmfaktor für den das Profil umschließenden Kasten

Die Schrittweite Δt sollte 5 sec nicht überschreiten.

Innen liegendes durch Brandschutzmaterialien geschütztes Stahlbauteil (EC 3-1-2, 4.2.5.2)

Der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ berechnet sich für ein geschütztes Profil mit

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot A_p/V}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \Phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad \dots \text{ aber } \Delta\theta_{a,t} \geq 0, \text{ wenn } \Delta\theta_{g,t} > 0 \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$\Phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot A_p/V \quad \dots \text{ und } \dots$$

A_p Fläche des Brandschutzmaterials bezogen auf die Bauteillänge [m²/m]

V Bauteilvolumen bezogen auf die Bauteillänge [m³/m]

c_a temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität von Stahl [J/kgK]

c_p temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität des Brandschutzmaterials [J/kgK]

d_p Dicke des Brandschutzmaterials [m]

Δt Zeitintervall [sec]

$\theta_{a,t}$ Stahitemperatur zum Zeitpunkt t [°C]

$\theta_{g,t}$ Temperatur der umgebenden Luft zum Zeitpunkt t [°C]

$\Delta\theta_{g,t}$ Anstieg der Umgebungstemperatur während des Zeitintervalls Δt [K]

λ_p Wärmeleitfähigkeit des Brandschutzsystems [W/mK]

ρ_a Rohdichte von Stahl [kg/m³]

ρ_p Rohdichte des Brandschutzmaterials [kg/m³]

Für die Fläche A_p wird die innere Fläche des umgebenden Kastens angesetzt.

A_p/V wird als Profilmfaktor des wärmegegedämmten Stahlbauteils bezeichnet und kann für typisierte Profile auch der Fachliteratur entnommen werden.

Die Schrittweite Δt sollte 30 sec nicht überschreiten.

Bei feuchten Brandschutzmaterialien wird der Temperaturanstieg im Stahl verzögert. Die Zeitverzögerung ergibt sich für den Feuchtigkeitsanteil p [in %] zu (s. J.-M. Franssen, P Vila Real: *Fire design of steel structures, 2nd Edition, ECCS 2015*)

$$t_v = \frac{p \cdot \rho_p \cdot d_p^2}{5 \cdot \lambda_p} \quad [\text{min}]$$

3.6

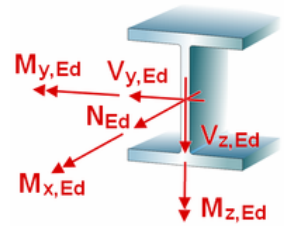
Schnittgrößen



Das fünfte Register beinhaltet die Masken zur Eingabe der **Bemessungsschnittgrößen**.

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 Stabkoordinatensystem und nicht auf das Hauptachsensystem (**pcae**-Bezeichnung: ξ, η, ζ) beziehen!

Die Schnittgrößen können wahlweise in folgenden Einheiten vorliegen

Kräfte / Momente in	<input type="radio"/> kN / kNm
	<input type="radio"/> kN / kNm
	<input type="radio"/> 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

3.6.1

Schnittgrößen importieren

Detailnachweisprogramme zur Bemessung von Anschlüssen (Träger/Stütze, Trägerstöße), 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 **##**-Programm importieren



Schnittgrößen aus Text-Datei einlesen



Import aus einem ##-Programm

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

Eine ausführliche, allgemeine Beschreibung zum Schnittgrößenimport aus einem **pcae**- Programm finden Sie im DTE®-Handbuch.

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 von einem Einzelschnitt bei Trägerstößen

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 *##*-Programmorganisation gibt es hierzu verschiedene Vorgehensweisen

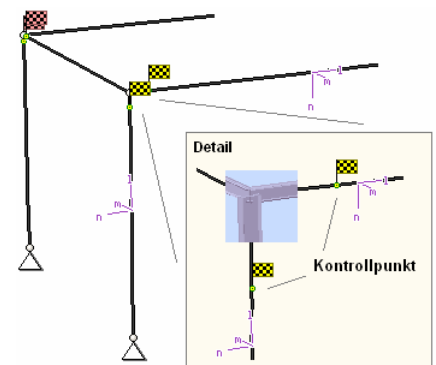
- zum einen können Tragwerks- und Detailprogramm fest miteinander verbunden sein, d.h. die Schnittgrößenübergabe erfolgt intern. Es sind i.A. keine weiteren Eingaben (z.B. Geometrie) notwendig, aber doch möglich (z.B. weitere Belastungen); die Programme bilden eine Einheit. Dies ist z.B. bei dem *##*-Programm *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 *##*-Schnittgrößen-Export/Import.

Zunächst sind in dem exportierenden *##*-Programm (z.B. *##*-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 im DTE[®]-Handbuch.



Nach einer Neuberechnung des Rahmens stehen die Exportschnittgrößen dem aufnehmenden *##*-Programm (z.B. *##*-EC3FS, *##*-EC3SA, *##*-EC3IH, *##*-EC3BT usw.) zum Import zur Verfügung.



Aus dem aufnehmenden *##*-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 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, Anschl. Anschluss 1 Material: Stahl, Querschnitt: Profil: IPE240						
	N kN	Vm kN	Vn kN	T kNm	Mm kNm	Mn 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 Vn	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Vn	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
min V _ζ	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
max V _ζ	-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 Mn	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Mn	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
min M _ζ	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max M _ζ	-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, Anschl. Anschluss 1						
Schnitt 6: Stab 11 bei s = 0.00 m Stahlbetonstütze						

In #EC3FS ist der komplette verfügbare Schnittgrößensatz importierbar. Die anderen Programme #EC3TT, #EC3BT, #EC3RE, #EC3IH und #EC3IS importieren dagegen nur einen auf ebene Beanspruchung reduzierten Satz, was jeweils 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.

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.

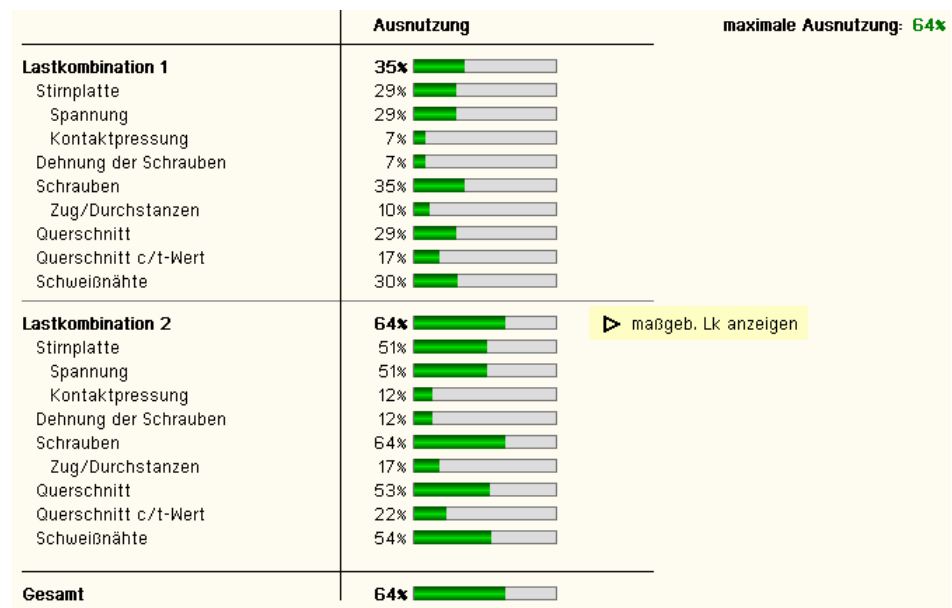


Die Kompatibilität der Querschnitts- und Nachweisparameter zwischen exportierendem und importierendem Programm ist zu gewährleisten.

Eine Aktualisierung der importierten Schnittgrößenkombinationen, z.B. aufgrund einer Neuberechnung des exportierenden Tragwerks, erfolgt **nicht!**



Das sechste Register gibt einen sofortigen Überblick über die ermittelten Ergebnisse.

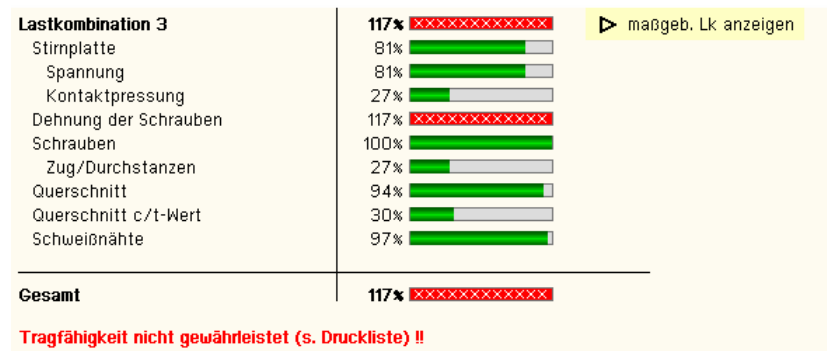


Zur sofortigen Kontrolle und des besseren Überblicks halber werden die Ergebnisse in diesem Register lastfallweise übersichtlich zusammengestellt.

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.

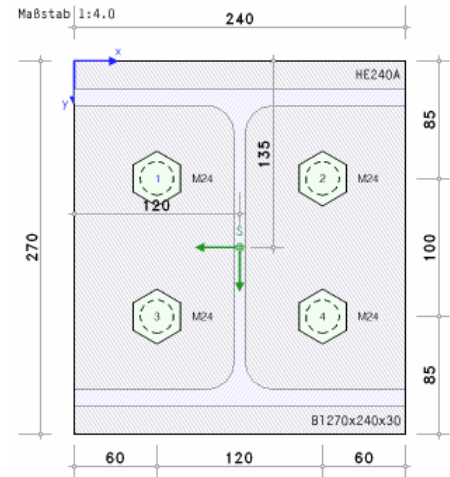
Wenn die Ursache des Fehlers nicht sofort ersichtlich ist, sollte die Druckliste in der **ausführlichen** Ergebnisdarstellung (s. Abs. 4.2, S. 62) geprüft werden.

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 (Querkraft und Torsionsmoment) wird auf den Punktequerschnitt der Schrauben verteilt.



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)

$$\begin{aligned}
 A &= \sum A_i \quad \text{Fläche des Punktequerschnitts} \\
 y_{si} &= \sum (A_i \cdot y_i) / A \quad \text{und} \quad z_{si} = \sum (A_i \cdot z_i) / A \quad \text{Schwerpunkt des Punktequerschnitts} \\
 I_p &= \sum (I_{yi} + I_{zi}) \quad \text{mit} \quad I_{yi} = A_i \cdot z_i^2 \quad \text{und} \quad I_{zi} = A_i \cdot y_i^2 \quad \text{polares Trägheitsmoment}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 f_{v,ti,geo} &= A_i / A_{bez} \quad \text{mit} \quad \dots \\
 A_i & \quad \text{Spannungs- bzw. Schaftquerschnitt der Schraube } i \text{ (je nachdem ob das Gewinde oder der Schaft in der Scherfuge liegen)} \\
 A_{bez} & \quad \text{Bezugsfläche (hier: mittlere Schraubenfläche)}
 \end{aligned}$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
 T_{y,i} &= f_{v,ti} \cdot \left[\frac{V_y}{A'} - \frac{M_x}{I_p'} \cdot z_i \right] \quad \text{und} \quad T_{z,i} = f_{v,ti} \cdot \left[\frac{V_z}{A'} + \frac{M_x}{I_p'} \cdot y_i \right] \quad \text{und} \quad T_i = \sqrt{T_{y,i}^2 + T_{z,i}^2} \\
 T_{y,i}, T_{z,i} & \quad \text{Kräfte in den Koordinatenrichtungen} \\
 T_i & \quad \text{resultierende Kraft der Schraube } i
 \end{aligned}$$

Die Berechnung des Punktequerschnitts wird protokolliert.

Punktequerschnitt				
y _i , z _i Koordinaten bezogen auf den Lasteinleitungspunkt (Trägerschwerpunkt), F _{ti} Zugkräfte, f _{v,ti} Wichtungsfaktoren				
Schraube 1	y ₁ = 60.0 mm	z ₁ = -50.0 mm	F _{t,1} = 51.5 kN	f _{v,1} = 0.747
Schraube 2	y ₂ = -60.0 mm	z ₂ = -50.0 mm	F _{t,2} = 84.8 kN	f _{v,2} = 0.583
Schraube 3	y ₃ = 60.0 mm	z ₃ = 50.0 mm	F _{t,3} = 138.3 kN	f _{v,3} = 0.320
Schraube 4	y ₄ = -60.0 mm	z ₄ = 50.0 mm	F _{t,4} = 193.2 kN	f _{v,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 (Abs. 3.16, S. 57).

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 (Abs. 3.16.1, S. 58).

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 (Abs. 3.16.1, S. 58).

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.**

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

$$\begin{aligned}\sigma_x &= m_{xx}/w_{el} \\ \sigma_y &= m_{yy}/w_{el} \\ \tau_{xy} &= m_{xy}/w_{el}\end{aligned}$$

Schubspannungen in Plattenmitte

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= 1.5 \cdot q_x/t \leq \tau_{Rd} \\ \tau_{yz} &= 1.5 \cdot q_y/t \leq \tau_{Rd}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}U_{\sigma x} &= |\sigma_x|/\sigma_{Rd} \quad \dots \text{mit} \quad \dots \quad \sigma_{Rd} = f_y/\gamma_{M0} \\ U_{\sigma y} &= |\sigma_y|/\sigma_{Rd} \\ U'_\sigma &= \max(U_{\sigma x}, U_{\sigma y}) \\ U_{\tau xy} &= |\tau_{xy}|/\tau_{Rd} \quad \dots \text{mit} \quad \dots \quad \tau_{Rd} = f_y/(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}) \\ U_{\tau xz} &= |\tau_{xz}|/\tau_{Rd} \\ U_{\tau yz} &= |\tau_{yz}|/\tau_{Rd} \\ U'_\tau &= \max(U_{\tau xy}, U_{\tau xz}, U_{\tau yz}) \\ U'_{\sigma V} &= \sigma_V/\sigma_{Rd}\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\sigma_x &= m_{xx}/w_{pl} \\ \sigma_y &= m_{yy}/w_{pl} \\ \tau_{xy} &= m_{xy}/w_{pl}\end{aligned}$$

Schubspannungen

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= q_x/t \\ \tau_{yz} &= q_y/t\end{aligned}$$

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

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

3.10

Schweißnahtnachweis n. 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 Linienquerschnitt (s. *G. Wagenknecht: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 2*) zur Aufnahme bzw. Weiterleitung der Schnittgrößen.

Beispielhaft sind nebenstehend die Einzelnähte, die den Linienquerschnitt 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, die im Normalfall eine einheitliche Nahtdicke haben.

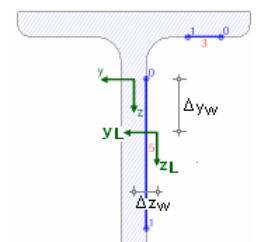
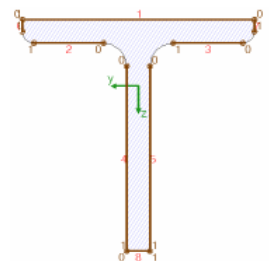
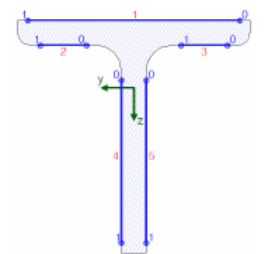
Es können Kehlnähte, nicht durchgeschweißte und voll durchgeschweißte Stumpfnähte angeordnet werden.

Zur Unterscheidung werden Kehlnähte in blau und Stumpfnähte in braun gezeichnet. Nebenstehend ist der Linienquerschnitt 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.



Querschnittswerte bezogen auf den Schwerpunkt des Linienquerschnitts:

$$\Sigma A_w = 11.00 \text{ cm}^2, \quad \Sigma l_w = 11.0 \text{ cm}$$

$$I_{w,y} = 141.10 \text{ cm}^4, \quad I_{w,z} = 21.46 \text{ cm}^4, \quad I_{w,yz} = 40.09 \text{ cm}^4, \quad \Delta y_w = -13.9 \text{ mm}, \quad \Delta z_w = 31.8 \text{ mm}$$

Über eine Interaktionsbeziehung (s. Theorie, mehrteilige Querschnitte, Abs. 3.12, S. 39) 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 Querkkräfte 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:				Spannungen:	
Naht 3:	$N_w = -14.67 \text{ kN}$	$M_{y,w} = -0.00 \text{ kNm}$	$M_{z,w} = -0.04 \text{ kNm}$	$\tau_{w,y} = -16.59 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 0.04 \text{ N/mm}^2$
Naht 5:	$N_w = 14.88 \text{ kN}$	$M_{y,w} = -1.03 \text{ kNm}$	$M_{z,w} = -0.04 \text{ kNm}$	$\tau_{w,y} = -4.15 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{w,z} = 3.50 \text{ N/mm}^2$

- 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 ($\alpha = 45^\circ$):	
$\sigma_{w,Ed} = (\sigma_{w,x}^2 + \tau_{w,y}^2 + \tau_{w,z}^2)^{1/2} = 133.8 \text{ N/mm}^2$	
resultierende Nahtkraft: $F_{w,Ed} = \sigma_{w,Ed} \cdot a = 13.38 \text{ kN/cm}$	
Tragfähigkeit der Schweißnaht: $F_{w,Rd} = f_{w,d} \cdot a = 20.78 \text{ kN/cm}$, $a = 10.0 \text{ mm}$, $f_{w,d} = 207.85 \text{ N/mm}^2$	
$F_{w,Ed} = 13.38 \text{ kN/cm} < F_{w,Rd} = 20.78 \text{ kN/cm} \Rightarrow \text{Ausnutzung } U = 0.644 < 1 \text{ ok.}$	

Da die Beschreibung der Schweißnahtnachweise nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung des Schweißnahtnachweises verwiesen (Abs. 3.14, S. 53).

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-, Querkraften und Biegemomenten auch Torsionsmomente aufzunehmen.

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 $U_o = 0.054 < 1$ **ok.**, c/t-Verhältnis $U_{c/t} = 0.046 < 1$ **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, EI. 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 $U_o = 0.043 < 1$ **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.

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.

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

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

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

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

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

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

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.

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

$$l_m = \sum_i \left(l_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i\right) \quad \dots \quad l_n = \sum_i \left(l_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i\right)$$

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

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

Die Normalkräfte verteilen sich im Verhältnis der Teilflächen.

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

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.

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

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

Für die Aufteilung der Querkkräfte ergeben sich dann ähnliche Beziehungen.

$$\begin{aligned}
 V_m &= -M'_n = \int_A (y - e_y) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left[(y - e_{y,i}) + (e_{y,i} - e_y) \right] \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(-M'_{n,i} + (e_{y,i} - e_y) \cdot N'_i \right) \\
 V_n &= M'_m = \int_A (z - e_z) \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \int_{A_i} \left[(z - e_{z,i}) + (e_{z,i} - e_z) \right] \cdot \sigma'_x \cdot dA = \sum_i \left(M'_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N'_i \right) \\
 V_{m,i} &= \frac{l_{n,i}^+ \cdot l_m - l_{mn,i}^+ \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_m - \frac{l_{n,i}^+ \cdot l_{mn} - l_{mn,i}^+ \cdot l_n}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_n - \frac{(z_{M,i} - z_M) \cdot l_{n,i} - (y_{M,i} - y_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega \\
 V_{n,i} &= -\frac{l_{m,i}^+ \cdot l_{mn} - l_{mn,i}^+ \cdot l_m}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_m + \frac{l_{m,i}^+ \cdot l_n - l_{mn,i}^+ \cdot l_{mn}}{l_m \cdot l_n - l_{mn}^2} \cdot V_n + \frac{(y_{M,i} - y_M) \cdot l_{m,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot l_{mn,i}}{C_M} \cdot T_\omega \\
 &\dots \text{ mit } \dots l_{m,i}^+ = l_{m,i} + \alpha \cdot (e_{z,i} - e_z)^2 \cdot A_i \dots \text{ und } \dots l_{n,i}^+ = l_{n,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y)^2 \cdot A_i \\
 &\dots \text{ und } \dots l_{mn,i}^+ = l_{mn,i} + \alpha \cdot (e_{y,i} - e_y) \cdot (e_{z,i} - e_z) \cdot A_i
 \end{aligned}$$

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

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

Die Schnittgrößen des Gesamtquerschnitts erhält man durch Summation der Teilschnittgrößen.

$$\begin{aligned}
 N_i &= \sum_i N_i \dots M_m = \sum_i \left(M_{m,i} + (e_{z,i} - e_z) \cdot N_i \right) \dots M_n = \sum_i \left(M_{n,i} - (e_{y,i} - e_y) \cdot N_i \right) \\
 M_\omega &= \sum_i \left(M_{\omega,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot M_{m,i} + (z_{M,i} - z_M) \cdot M_{n,i} \right) \\
 V_m &= \sum_i V_{m,i} \dots V_n = \sum_i V_{n,i} \dots T_t = \sum_i T_{t,i} \\
 T_w &= M'_\omega = \sum_i \left(T_{w,i} - (z_{M,i} - z_M) \cdot V_{m,i} + (y_{M,i} - y_M) \cdot V_{n,i} \right)
 \end{aligned}$$

3.13

Beschreibung der Ergebnisse / Verifikation

Für typisierte Verbindungen gibt es hinreichend Versuchsergebnisse, die die Richtigkeit der bekannten Bemessungsregeln (s. Komponentenmethode, EC 3-1-8) belegen.

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

Die Vergleiche werden für reine Biegebelastung geführt mit

- Programm *##EC3BT*, biegesteifer Trägeranschluss, zur Berechnung von typisierten IH-Stößen mit 2 oder 4 Schrauben in einer Reihe mit der Komponentenmethode n. 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 *##ALFA-Faltwerk*, Finite-Elemente-Programm zur Berechnung von räumlichen Faltwerken

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

3.13.1

Vergleiche zwischen *##EC3FS*, *##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 ist bei der elastischen Berechnung auf 25% der maximalen Bruchdehnung ϵ_{bu} . 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 *##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 $M_0 = 0.5 \cdot M_{Rd}$

3.13.1.1

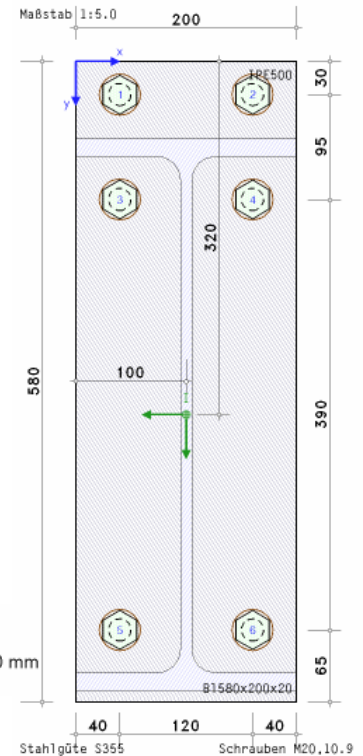
Beispiel 1: IPE500, S355, 3x2 Schrauben M20, 10.9 (ETH-Versuch 8.1K1)

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 Kraftrichtung' 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 $s_{t,f} = f_{t,e} \cdot s_{ub} = 2.3\%$, $f_{t,e} = 0.250$, $s_{ub} = 9.0\%$
 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 Steifheit 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:	$x_a = 100.0 \text{ mm}$, $y_a = 78.0 \text{ mm}$:	$\sigma_{xa} = -157.16 \text{ N/mm}^2$
	$x_e = 100.0 \text{ mm}$, $y_e = 562.0 \text{ mm}$:	$\sigma_{xe} = 157.16 \text{ N/mm}^2$

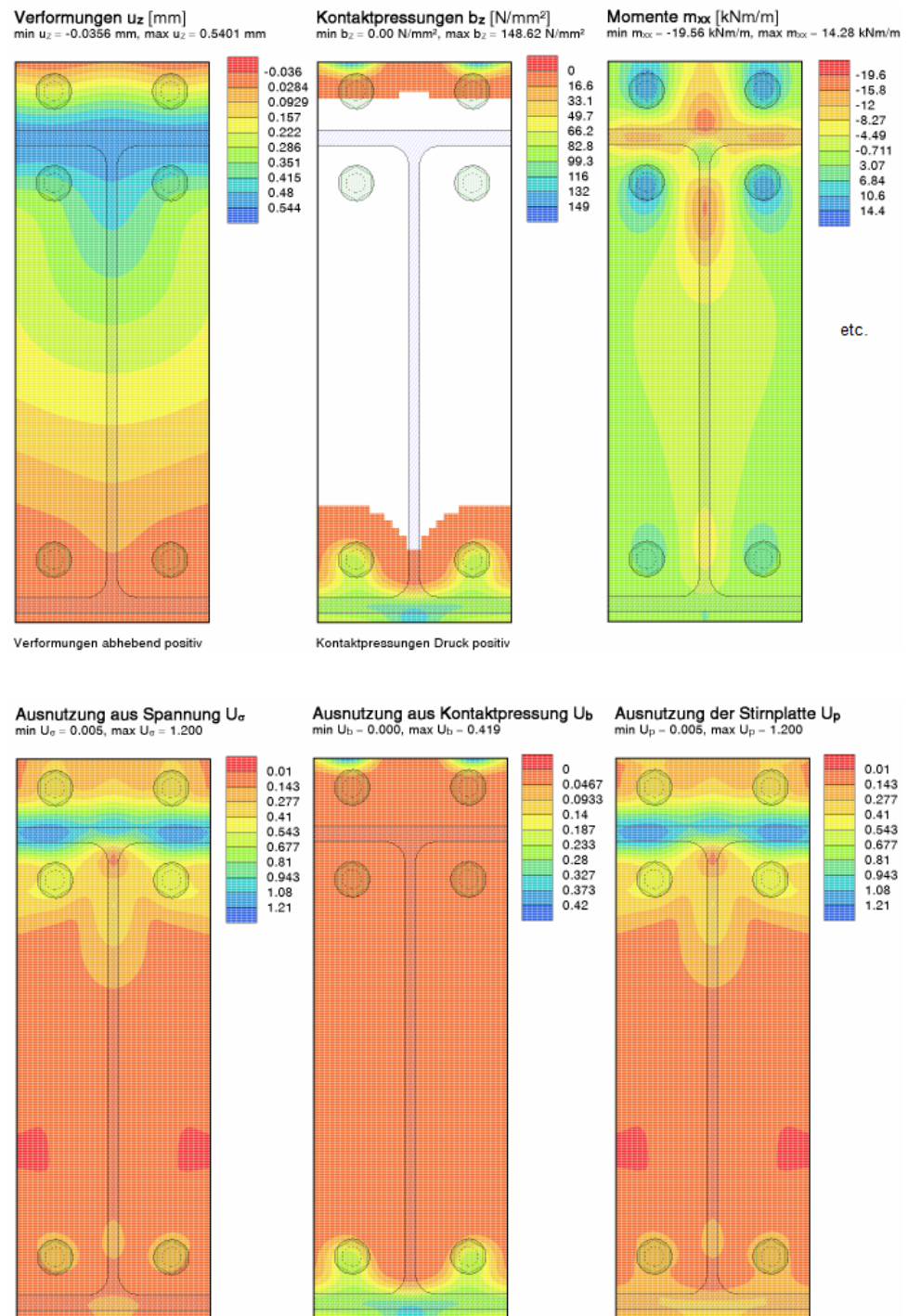
Linienlasten auf der Stirnplatte:

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 Linienneigung 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.



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 _a	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 (abheben positiv); b_z: Kontaktpressungen (Druck positiv); m_{xx},m_{yy},m_{xy}: Momente
q_x,q_y: Querkraften; U_a: 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	e _{wt} %	U _{wt}
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; e_{wt}: Dehnung
U_{wt}: 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 plastisierten Schrauben nur noch eine Dehnungsänderung. Die Zulässigkeit der Schraubendehnung wird mittels der Ausnutzung U_{wt} 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, q_y = -0.065°, q_z = -0.000°

Rotationswinkel des Stirnplattenstoßes 2·q_y = -0.130°, 2·q_z = -0.000°

untere Grenze der plastischen Ausnutzung der Schrauben U_{p1,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, $f_{v,i}$ Wichtungsfaktoren

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

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:	$U_{tp} = 0.356$	$U_{vt} = 0.824$	$U_b = 0.078$	$U = 0.824 < 1 \text{ ok}$

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 $f_{v,i}$ 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.

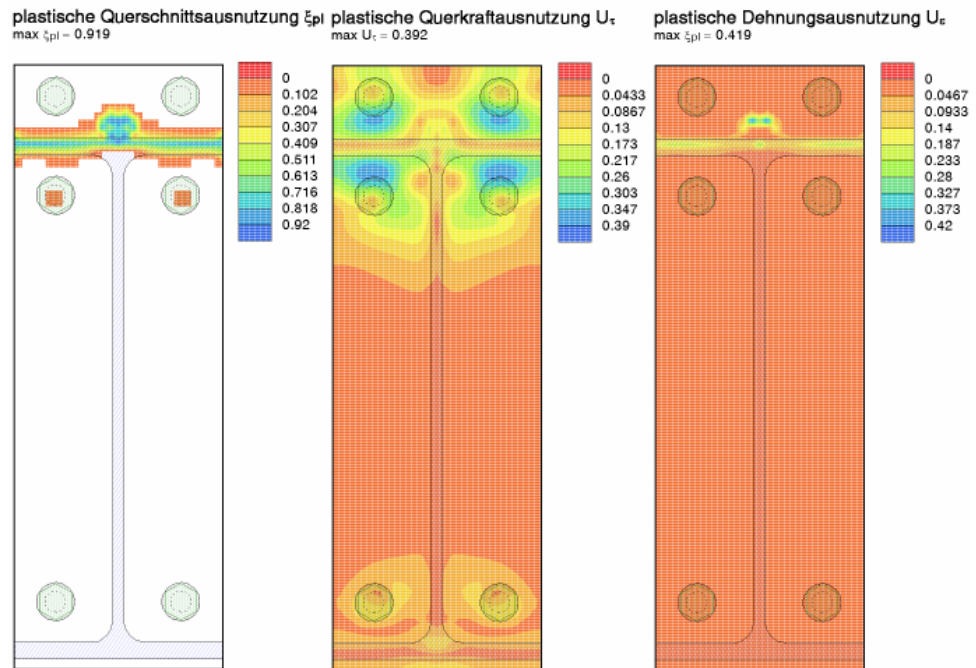
Fehler bei der FE-Berechnung !!

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 Stirnplatte

Kno	x mm	y mm	u _z mm	b _z N/mm ²	ϵ_{pl} ‰	ξ_{pl}	U _t	U _ε	U _m	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_m: Ausnutzung aus Moment mit Querkraft
U_b: Ausnutzung aus Kontaktpressung; U_p: Ausnutzung der Stirnplatte

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 Stirnplatte führt zu einer Umlagerung der Schraubenkräfte gegenüber der elastisch-plastischen Berechnung.

Ausnutzung der Schrauben

	x mm	y mm	w _t 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; w_t: 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 $M_y = -306.00 \text{ kNm}$, $V_z = 60.00 \text{ kN}$
 elastische Spannungen: $\max |\sigma_x| = 158.71 \text{ N/mm}^2$, $\max \tau = 13.40 \text{ N/mm}^2$, $\max \sigma_v = 158.80 \text{ N/mm}^2$
 $\max \sigma_x$ bei $y = 100.0 \text{ mm}$, $z = -250.0 \text{ mm}$: $\sigma_x = 158.71 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 0.00 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 158.71 \text{ N/mm}^2$
 $\min \sigma_x$ bei $y = 100.0 \text{ mm}$, $z = 250.0 \text{ mm}$: $\sigma_x = -158.71 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 0.00 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 158.71 \text{ N/mm}^2$
 $\max \tau$ bei $y = 0.0 \text{ mm}$, $z = 0.0 \text{ mm}$: $\sigma_x = -0.00 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 13.40 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 23.20 \text{ N/mm}^2$
 $\max \sigma_v$ bei $y = 0.0 \text{ mm}$, $z = -250.0 \text{ mm}$: $\sigma_x = 158.71 \text{ N/mm}^2$, $\tau = 3.08 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_v = 158.80 \text{ N/mm}^2$
 zul. Vergleichsspannung: $\sigma_{v,Rd} = 355.0 \text{ N/mm}^2$
 Nachweis: $\sigma_v = 158.80 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{v,Rd} = 355.00 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow U_\sigma = 0.447 < 1$ **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 $M_y = -306.00 \text{ kNm}$, $V_z = 60.00 \text{ kN}$
 Linien des Querschnitts:
 1: $y_a = 100.0 \text{ mm}$, $z_a = -242.0 \text{ mm}$, $y_e = 100.0 \text{ mm}$, $z_e = -234.0 \text{ mm}$
 2: $y_a = -100.0 \text{ mm}$, $z_a = -242.0 \text{ mm}$, $y_e = -100.0 \text{ mm}$, $z_e = -250.0 \text{ mm}$
 3: $y_a = 0.0 \text{ mm}$, $z_a = -242.0 \text{ mm}$, $y_e = 11.3 \text{ mm}$, $z_e = -227.8 \text{ mm}$
 4: $y_a = 100.0 \text{ mm}$, $z_a = 242.0 \text{ mm}$, $y_e = 100.0 \text{ mm}$, $z_e = 250.0 \text{ mm}$
 5: $y_a = -100.0 \text{ mm}$, $z_a = 242.0 \text{ mm}$, $y_e = -100.0 \text{ mm}$, $z_e = 234.0 \text{ mm}$
 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]	$\max U_{wt,a} = 1.013 > 1$ 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]	$\max U_r = 1.076 > 1$ 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 ~~EC~~EC3FS und ~~EC~~EC3BT

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

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

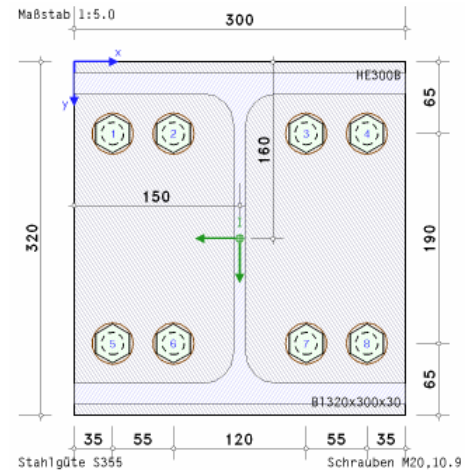
Wenn möglich erfolgt eine *plastisch-plastische* Berechnung. Um ein Vorzeitiges Versagen der Schrauben zu vermeiden, wird deren Dehnungsfaktor mit $f_{t,\epsilon} = 1$ angenommen.

- Ergebnisse ~~EC~~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 ~~EC~~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 ~~EC~~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 ~~EC~~EC3FS und ETH-Versuch

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

- Ergebnisse ~~EC~~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 ~~EC~~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.



In $\#$ -EC3BT erfolgt die Berechnung für vier Schrauben je Reihe mit dem AIF-Bericht 15059.

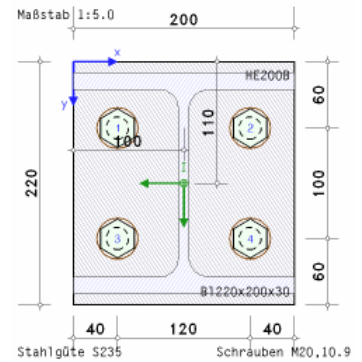
Vergleich zwischen $\#$ -EC3FS und $\#$ -EC3BT

- Ergebnisse $\#$ -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 $\#$ -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 $\#$ -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 $\#$ -EC3FS und ETH-Versuch

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

- Ergebnisse $\#$ -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 $\#$ -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.



Vergleich zwischen ##EC3FS und ##EC3BT

- Ergebnisse ##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 ##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 ##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 ##EC3FS und ETH-Versuch

Die Berechnung wird mit planmäßiger Vorspannung und unterschiedlichen Stahlsorten durchgeführt.

- Ergebnisse ##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 ##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.

3.13.2

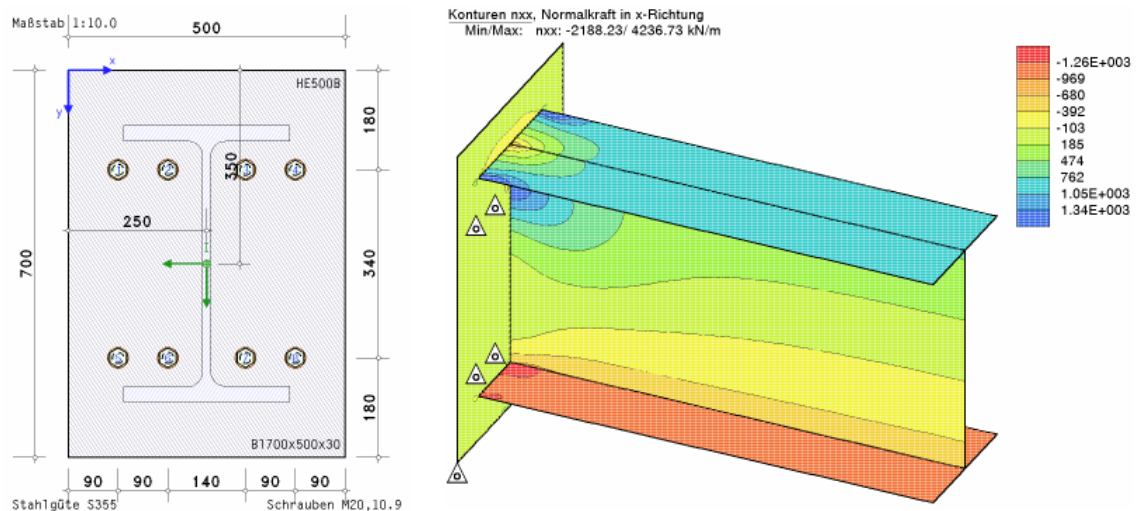
Vergleiche zwischen #EC3FS und #ALFA

Ein Stirnplattenanschluss wird mit dem 3D-FEM-Programm #ALFA abgebildet. Der Träger wird dabei als Kragarm modelliert, auf den die einwirkenden Schnittgrößen als Spannungen wirken. Die Spannungen, Federsteifigkeiten der Bettungsmodul sind der Berechnung des #EC3FS entnommen. Hinweis: Die Federsteifigkeiten der Schraubenlager wirken nur mit der halben Klemmlänge und sind daher in #ALFA zu verdoppeln.

Die Berechnungen im Programm #EC3FS erfolgen elastisch-plastisch, die Schrauben werden elastisch angenommen. Vorspannung wird nicht berücksichtigt.

3.13.2.1

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

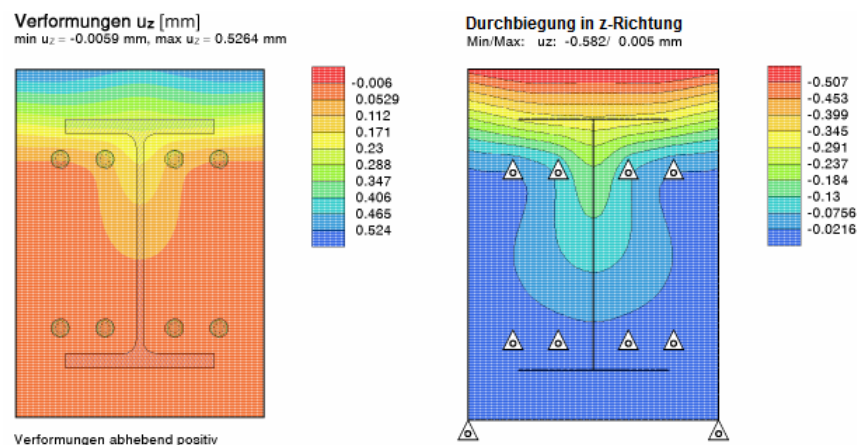


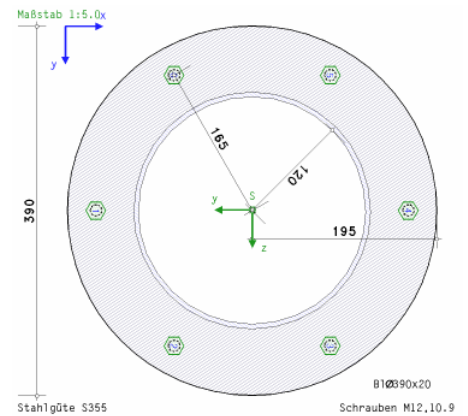
Unter der Annahme, dass Träger und Stirnplatte monolithisch miteinander verbunden sind, ergeben sich bei der Modellierung Spannungsstörungen, die jedoch im Verlauf des Trägers schnell abklingen (s. n_{xx}).

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.

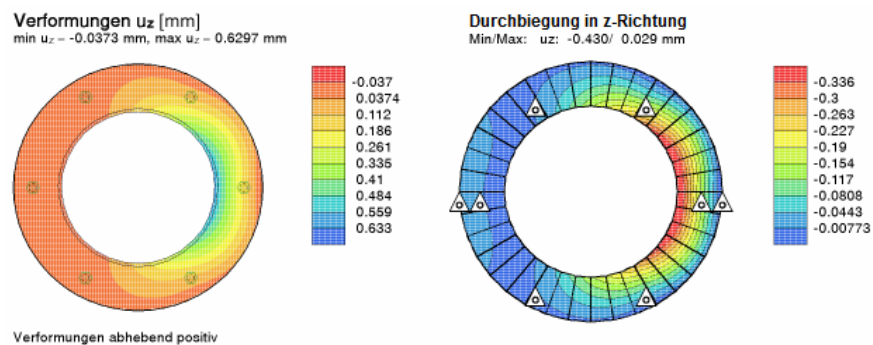
- Ergebnisse #EC3FS Schraubenkräfte 3.8, 2 x 2.8, 2 x 64.4, 109.0 kN
- Ergebnisse #ALFA Schraubenkräfte 6.7, 2 x 6.3, 2 x 61.6, 94.5 kN

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





- Ergebnisse *##*-EC3FS Schraubenkräfte 08, 5.7, 75.2, 130.7 kN
- Ergebnisse *##*-ALFA Schraubenkräfte 3.6, 11.3, 72.0, 142.4 kN



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

3.13.3

Zusammenfassung

Die Komponentenmethode nach EC 3-1-8, die der Berechnung der Biegetragfähigkeit im Programm *##*-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 *##*-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 *##*-EC3FS ermittelt die Schraubenkräfte und Plattenspannungen gut genug, so dass eine Übertragbarkeit auf allgemeine Schraubenbilder und Steifigkeiten gewährleistet ist.

3.14

Tragfähigkeit von Schweißverbindungen (Basics)



Schweißverbindungen können nach EC 3-1-8, 4, bemessen werden, wenn die zu verschweißenden Blechdicken 4 mm bzw. bei Hohlprofilen 2.5 mm oder mehr aufweisen.

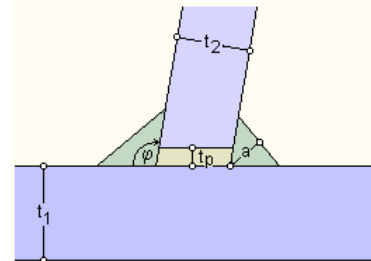
Die Norm behandelt Kehlnähte, Schlitznähte, Stumpfnähte und Lochschweißungen.

Die Anschlussbleche (s. Abs. 3.17, S. 61) werden hier nicht bemessen.

3.14.1

Kehlnähte

☉ Kehlnaht / Hohlkehlnaht	
Nahtlänge	l_w 400.0 mm
<input checked="" type="checkbox"/> Schweißnaht voll ausgeführt ($l_{eff} = l_w$)	
wirksame Nahtdicke	a 4.0 mm
Einbrandtiefe	e 0.0 mm $\leq e_{max}$
Öffnungswinkel	φ 100°



Wird keine Nahtlänge vorgegeben, werden die Ergebnisse auf den lfd. m bezogen.

Bei vorgegebener Länge kann die Schweißnaht voll ausgeführt sein, d.h. die wirksame Nahtlänge entspricht dem eingegebenen Wert oder die Länge ist um den 2-fachen Betrag der Kehlnahtdicke zu reduzieren.

Eine Länge von weniger als 30 mm oder des 6-fachen der Nahtdicke sollte zur Übertragung von Kräften nicht in Betracht gezogen werden (EC 3-1-8, 4.5.1).

Die wirksame Nahtdicke einer Kehlnaht sollte größer als 3 mm sein (EC 3-1-8, 4.5.2).

Nach NA-DE ist zusätzlich bei einer Blechdicke von 3 mm und mehr eine Mindestdicke von

$$a \geq \sqrt{\max t} - 0.5$$

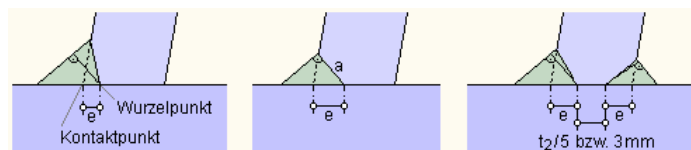
vorgeschrieben.

In Anlehnung an DIN 18800 wird auch nach NA-DE die maximale Schweißnahtdicke überprüft

$$a \leq 0.7 \cdot \min t$$

Ist kein Futterblech angeordnet, kann die Kehlnaht tief eingebrannt sein, d.h. die Naht trägt gegenüber einer nicht eingebrannten Kehlnaht nicht so stark auf. Der Eingabewert der wirksamen Nahtdicke wird davon nicht beeinflusst!

Die maximale Einbrandtiefe ist an geometrische Gegebenheiten geknüpft (s.a. T-Stöße in EC 3-1-8, 4.7.3).

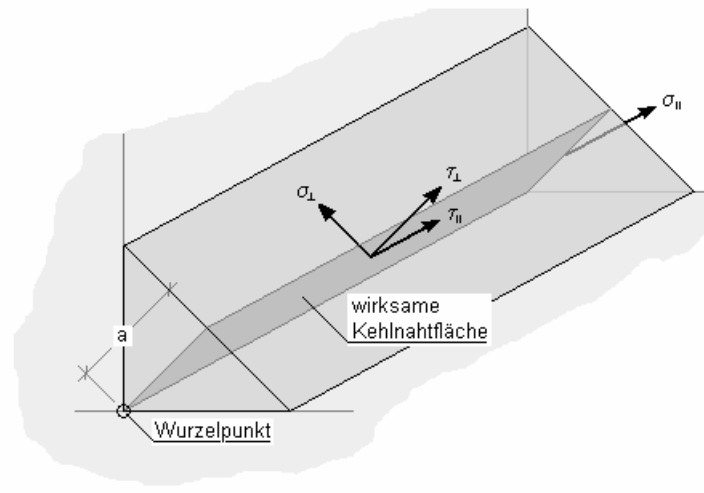


Der Öffnungswinkel bezeichnet den Winkel zwischen den zu verschweißenden Anschlussblechen und sollte bei Kehlnähten zwischen 60° und 120° liegen. Kleinere Winkel sind zugelassen, werden aber wie nicht durchgeschweißte Stumpfnähte behandelt (EC 3-1-8, 4.3.2.1).

Die Tragfähigkeit von Kehlnähten kann mit Hilfe des richtungsbezogenen Verfahrens oder des vereinfachten Verfahrens ermittelt werden.

richtungsbezogenes Verfahren

Die Kräfte werden aufgeteilt in Anteile parallel und rechtwinklig zur Längsachse der Schweißnaht und normal und orthogonal zur Lage der wirksamen Kehlnahtfläche. Die Lage der wirksamen Kehlnahtfläche wird im Wurzelpunkt konzentriert angenommen.



Die auf die Kehlnaht einwirkenden Spannungen ergeben sich zu

$$\begin{aligned}\sigma_{\perp} &= \frac{F_{Ed}(\sigma_{\perp})}{a} && \text{Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse} \\ \sigma_{\parallel} &= 0 && \text{Normalspannung parallel zur Schweißnahtachse} \\ \tau_{\parallel} &= \frac{F_{Ed}(\tau_{\parallel})}{a} && \text{Schubspannung in der Ebene der Kehlnahtfläche senkrecht zur Schweißnahtachse} \\ \tau_{\perp} &= \frac{F_{Ed}(\tau_{\perp})}{a} && \text{Schubspannung in der Ebene der Kehlnahtfläche parallel zur Schweißnahtachse}\end{aligned}$$

Die Tragfähigkeit einer Kehlnaht ist ausreichend, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_{wv} \cdot \gamma_{M2}} \quad \text{... und ...} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{... mit ...} \quad f_u = \min(f_u(\text{Blech 1}), f_u(\text{Blech 2}))$$

vereinfachtes Verfahren

Die Resultierende aller auf die Kehlnaht einwirkenden Kräfte muss die folgende Bedingung erfüllen

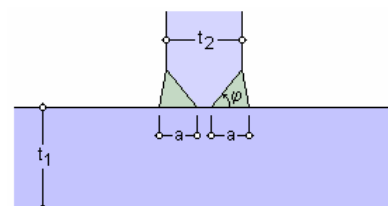
$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad \text{... mit ...} \quad F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad \text{... und ...} \quad \text{Scherfestigkeit } f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_{wv} \cdot \gamma_{M2}} \quad \text{... mit ...} \quad f_u \text{ s.o.}$$

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{Ed}^2(\sigma_{\perp}) + F_{Ed}^2(\tau_{\perp}) + F_{Ed}^2(\tau_{\parallel})}$$

3.14.2

Stumpfnähte

⊗ Stumpfnah		
○ durchgeschweißt		
⊗ nicht durchgeschweißt		
Nahtlänge	l_w	400,0 mm
wirksame Nahtdicke	a	4,0 mm
Öffnungswinkel	φ	90°
$\varphi = 0^\circ$: geschweißter Stoß		
⊗ einseitige Schweißnaht		
○ beidseitige Schweißnaht		



Stumpfnähte können durchgeschweißt oder nicht durchgeschweißt ausgeführt werden.

Eine durchgeschweißte Stumpfnah ist eine Schweißnaht mit vollständigem Einbrand und vollständiger Verschmelzung des Schweißwerkstoffs mit dem Grundmaterial über die gesamte Di-

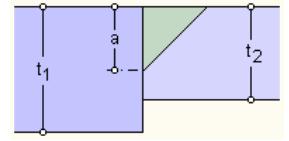
cke der Verbindung (EC 3-1-8, 4.3.4(1)), d.h. $a = t_2/2$ bei beidseitiger Schweißung bzw. $a = t_2$ bei einseitiger Schweißung.

Bei einer nicht durchgeschweißten Stumpfnäht ist die Durchschweißung daher kleiner als die volle Dicke des Grundmaterials (EC 3-1-8, 4.3.4(2)).

Die Tragfähigkeit von durchgeschweißten Stumpfnähten ist mit der Tragfähigkeit des schwächeren der verbundenen Bauteile gleichzusetzen, während die Tragfähigkeit von nicht durchgeschweißten Stumpfnähten wie für Kehlnähte zu ermitteln ist (EC 3-1-8, 4.7.1+2).

Bei einem Öffnungswinkel von 0° wird ein Stoß verschweißt.

Die maximale Schweißnahtdicke ist auf die Dicke des dünnsten Anschlussblechs beschränkt.





Für geschraubte Verbindungen werden folgende Verbindungsmittel angeboten

Schrauben-, Niet- oder Bolzenverbindung:

Verbindungsmittel

- Schrauben ☒
- Schrauben ☐
- Niete ☐
- Injektionsschrauben ☐
- Bolzen ☐

Die Berechnung der Tragfähigkeit erfolgt mit den Parametern der genormten Größen oder mit den vom Anwender eingegebenen Werten. Durch Betätigen des Buttons **Vorgabe** werden die im Programm verwendeten Parameter freigegeben und können verändert werden.

Die Rechenparameter für die gängigen Schraubengrößen M12, M16, M20, M22, M24, M27, M30, M36 und die nach EC 3-1-8, 3.1(2), zugelassenen Festigkeitsklassen 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8, 10.9 sind im Programm hinterlegt.

Die in Deutschland nicht vorgesehenen **Festigkeitsklassen** (s. NA-DE) sind gekennzeichnet; bei Anwahl des deutschen Nationalen Anhangs können diese nicht verwendet werden.

Schraubenverbindungen sind auf Abscheren, Gleiten, Lochleibung zwischen Schaft und Anschlussblechen und Zug zu bemessen.

Verbindungsmittel: Schraube

Schraubengröße: M20 ☒ Vorgabe

Schaftdurchmesser	d	20.0	mm
Nennlochspiel	Δd	2.0	mm
Bruttofläche	A	3.142	cm ²
Spannungsfläche	A _s	2.450	cm ²
Schraubenkopf - Schlüsselweite	d _s	32.0	mm
Schraubenkopf - Eckenmaß	d _e	35.03	mm
Schraubenkopfhöhe	t _k	12.5	mm
Höhe der Mutter	t _m	16.0	mm
Durchmesser der Unterlegscheibe	d _p	37.0	mm
Blechdicke der Unterlegscheibe	t _p	4.0	mm

Festigkeitsklasse: 8.8 ☐ Vorgabe

☐ normale Schlüsselweite ☒ große Schlüsselweite
FK 8.8 oder 10.9: HV-Schraube planmäßig vorgespannt

☐ gleitfeste Verbindung (kontrolliert voll vorgespannt)

☐ normales Lochspiel ☐ übergroßes Loch

☐ kurzes Langloch \perp Kraftrichtung ☐ kurzes Langloch \parallel Kraftrichtung

☒ großes Langloch \perp Kraftrichtung ☐ großes Langloch \parallel Kraftrichtung

großes Lochspiel $\Delta d_{\text{groß}}$ 5.0 mm

☒ Senkschraube t_{k,s} 12.5 mm t_{m,s} 0.0 mm

Bei den gängigen Schraubengrößen kann zwischen normaler und großer Schlüsselweite (Schraubenkopfgröße) unterschieden werden. Die Auswirkungen betreffen die Schraubengeometrie in Eckenmaß/Schlüsselweite/Höhe des Schraubenkopfs, Höhe der Mutter und Blechdicke/Durchmesser der Unterlegscheiben.

Bei normaler Schlüsselweite wird nur eine Unterlegscheibe, bei großer Schlüsselweite werden zwei Unterlegscheiben angeordnet.

Hochfeste Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 oder 10.9 mit großer Schlüsselweite und normalem Lochspiel werden programmintern als planmäßig vorgespannt, in einer gleitfesten Verbindung als kontrolliert voll vorgespannt angesehen (EC 3-1-8, 3.1.2).

Wird die Schraube als **Senkschraube** verwendet, reduzieren sich der Lochleibungswiderstand und die Zugtragfähigkeit infolge der um die Versenkung des Kopfs t_{k,s} und/oder der Mutter t_{m,s} verringerten Blechdicke.

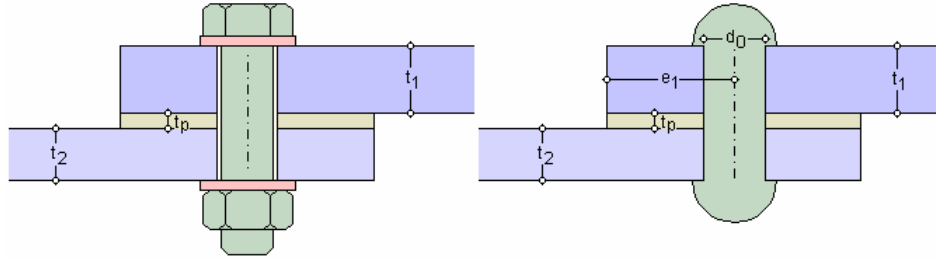
Das Nennlochspiel bestimmt die Lochleibungstragfähigkeit und den Gleitwiderstand.

Im EC 3-1-8 werden die im Bild oben angegebenen Locharten unterschieden.



Schrauben (einschl. Injektionsschrauben) und Niete können auf Abscheren (EC 3-1-8, 3.6+3.7+3.9) und Zug (EC 3-1-8, 3.6) beansprucht werden, wohingegen Bolzenverbindungen auf Abscheren und Biegung (EC 3-1-8, 3.13.2) bemessen werden.

Die Anschlussbleche (s. Abs. 3.17, S. 61) werden hier nicht bemessen.



Zur Ermittlung der Tragfähigkeit sind Schraubenverbindungen in Kategorien einzuteilen (Niete sind nicht vorgespannt und können demnach nur nach Kategorie A und/oder D bemessen werden).

Scherbeanspruchung

- Kategorie A: Scher-/Lochleibungsverbindung für Schrauben aller Festigkeitsklassen ohne Vorspannung
 - Bemessungswert der Schertragfähigkeit
 - Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit
- Kategorie B: Gleitfeste Verbindung (GZG) für hochfeste vorgespannte Schrauben
 - Bemessungswert des Gleitwiderstands im GZG
 - Bemessungswert der Schertragfähigkeit
 - Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit
 - Injektionsschrauben: Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit des Injektionsharzes
- Kategorie C: Gleitfeste Verbindung (GZT) für hochfeste vorgespannte Schrauben
 - Bemessungswert des Gleitwiderstands im GZT
 - Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit
 - Injektionsschrauben: Bemessungswert der Lochleibungstragfähigkeit des Injektionsharzes
 - bei Zugverbindungen: Bemessungswert des plastischen Widerstands des Nettoquerschnitts im kritischen Schnitt durch die Schraubenlöcher

Zugbeanspruchung

- Kategorie D: Zugbeanspruchung für Schrauben aller Festigkeitsklassen ohne Vorspannung
 - Bemessungswert der Zugtragfähigkeit
 - Bemessungswert der Durchstanztragfähigkeit
- Kategorie E: Zugbeanspruchung für hochfeste vorgespannte Schrauben
 - Bemessungswert der Zugtragfähigkeit
 - Bemessungswert der Durchstanztragfähigkeit

3.16.1

Berechnung der Tragfähigkeiten von Schrauben

Beispielhaft ist hier das Eingabeblatt zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Schraube dargestellt.

☒ einschnittiger Anschluss
☐ mehrschnittiger Anschluss

Kategorie der Scherverbindungen C

☐ Gewinde liegt in der Scherfuge
☒ Schaft liegt in der Scherfuge

In Kraftrichtung:

Randabstand e_1 50.0 mm
 Lochabstand p_1 70.0 mm

☒ innen liegende Schraube
☐ am Rand liegende Schraube

Quer zur Kraftrichtung:

Randabstand e_2 30.0 mm
 Lochabstand p_2 55.0 mm

☐ innen liegende Schraube
☒ am Rand liegende Schraube

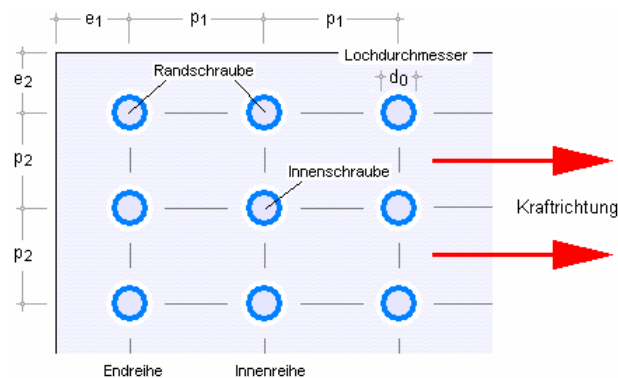
☒ einschnittiger Anschluss
☐ mehrschnittiger Anschluss

Gleitflächenklasse A

Nettoquerschnitt im kritischen Schnitt A_{net} 11.250 cm²

Kategorie der Zugverbindungen E

Die Abstände sind folgendermaßen definiert



Rand- und Lochabstände werden nach EC 3-1-8, Tab.3.3, überprüft.

Ist der Lochabstand $p_1 = 0$, besteht der Anschluss nur aus einer Schraubenreihe (s. bes. Regel zur Lochleibungstragfähigkeit für einschnittige Schraubenverbindungen).

Ist auch $p_2 = 0$, besteht die Verbindung nur aus einer Schraube / einem Niet.



Verbindungen mit nur einem Niet sind nicht zu verwenden (EC 3-1-8, 3.6.1(10))!

Abscheren je Scherfuge

Schraube

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot \bar{A}}{\gamma_{M2}} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} \text{Gewinde in der Scherfuge} & \left\{ \begin{array}{l} \alpha_v = 0.6 \text{ für } \dots \text{FK 4.6, 5.6, 8.8} \\ \alpha_v = 0.5 \text{ für } \dots \text{FK 4.8, 5.8, 6.8, 10.9} \end{array} \right\} \text{ und } \bar{A} = A_s \\ \text{Schaft in der Scherfuge} & \alpha_v = 0.6 \text{ und } \bar{A} = A \end{cases}$$

Niet

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}}$$

Die Abschertragfähigkeit wird nur angesetzt, wenn die Schraubenlöcher ein normales Lochspiel haben (EC 3-1-8, 3.6.1(4)).

Übertragen Schrauben oder Niete Scherkräfte über Futterbleche, ist die Schertragfähigkeit abzumindern mit

$$\beta_p = \frac{9 \cdot d}{8 \cdot d + 3 \cdot t_p} \leq 1.0 \quad \dots \text{ (EC 3-1-8, 3.6.1(12))}$$

Lochleibung

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad \dots \text{ mit } \alpha_b = \min \left(\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0 \right)$$

Beiwert α_d in Kraftrichtung

- in der Endreihe liegende Schrauben/Niete $\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0}$
- in der Innenreihe liegende Schrauben/Niete $\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}$

Beiwert k_1 quer zur Kraftrichtung

- am seitlichen Rand liegende Schrauben/Niete $k_1 = \min \left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right)$
- innen liegende Schrauben/Niete $k_1 = \min \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right)$

Die Lochleibungstragfähigkeit wird bei Schraubenverbindungen mit großem Lochspiel auf 80%, mit Langlöchern, deren Längsachse quer zur Kraftrichtung verläuft, auf 60% abgemindert (EC 3-1-8, Tab.3.4, 1)).

Bei Senkschrauben wird bei der Berechnung der Lochleibungstragfähigkeit die Blechdicke t abzüglich der Hälfte der Senkung angesetzt (EC 3-1-8, Tab.3.4, 2)).

In einschnittigen Anschlüssen mit nur einer Schraubenreihe ($p_1 = 0$ und $n = 1$) ist die Lochleibungstragfähigkeit zu begrenzen

$$\Rightarrow k_1 \cdot \alpha_b \leq 1.5.$$



Verbindungen mit nur einem Niet sollten nicht verwendet werden (EC 3-1-8, 3.6.1(10))!

Bei Injektionsschrauben ist die Lochleibungstragfähigkeit des Injektionsharzes zu ermitteln (EC 3-1-8, 3.6.2.2(5)):

$$F_{b,Rd,resin} = \frac{k_t \cdot k_s \cdot d \cdot t_{b,resin} \cdot \beta \cdot f_{b,resin}}{\gamma_{M4}} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$k_t = \begin{cases} 1.0 & \text{im GZG (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)} \\ 1.2 & \text{im GZT (Grenzzustand der Tragfähigkeit)} \end{cases}$$

$$k_s = 1.0 - 0.1 \cdot m \quad \dots \text{ mit } \dots \quad m = \Delta d_{\text{groß}} - \Delta d \quad (\text{s. Parameter einer Schraube})$$

$$\beta = 1.66 - 0.33 \cdot (t_1/t_2) \begin{cases} \leq 1.33 \\ \geq 1.0 \end{cases}$$

$$t_{b,resin} = 2 \cdot t_2 \leq 1.5 \cdot d \quad \dots \text{ für } \dots \quad t_1/t_2 \geq 2.0$$

$$t_{b,resin} = t_1 \leq 1.5 \cdot d \quad \dots \text{ für } \dots \quad 1.0 < t_1/t_2 < 2.0$$

$$t_{b,resin} = t_1 \leq 1.5 \cdot d \quad \dots \text{ für } \dots \quad t_1/t_2 < 1.0$$

Zug

Schraube

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad \dots \text{ mit } \dots \begin{cases} k_2 = 0.63 & \text{bei Senkschrauben} \\ k_2 = 0.9 & \text{sonst} \end{cases}$$

Niet

$$F_{t,Rd} = \frac{0.6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}}$$

Durchstanzen

Schraube (bei Niet nicht erforderlich)

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

Kombination von Scher-/Lochleibung und Zug

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

Gleiten

im GZT

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C}$$

im GZG

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3,ser}} \cdot F_{p,C}$$

$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ Vorspannkraft bei Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9

$k_s = 1,0$ für Schrauben in Löchern mit normalem Lochspiel

$k_s = 0,85$ übergroßen Löchern

$k_s = 0,85$ kurzen Langlöchern \perp Krafrichtung

$k_s = 0,7$ großen Langlöchern \perp Krafrichtung

$k_s = 0,76$ kurzen Langlöchern \parallel Krafrichtung

$k_s = 0,63$ großen Langlöchern \parallel Krafrichtung

n Anzahl Reiboberflächen (=1 bei einschnittigen Verbindungen)

μ Reibungszahl für vorgespannte Schrauben nach Gleitflächenklassen (s. EC 3-1-8, 3.9.1, Tab.3.7)

Bei kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung ist der Gleitwiderstand je Schraube wie folgt anzunehmen (EC 3-1-8, 3.9.2)

im GZT

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot (F_{p,C} - 0,8 \cdot F_{t,Ed})$$

im GZG

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3,ser}} \cdot (F_{p,C} - 0,8 \cdot F_{t,Ed,ser})$$

Querschnittsversagen bei Zugverbindungen

Bemessungswert des plastischen Widerstands des Nettoquerschnitts im kritischen Schnitt durch die Schraubenlöcher (EC 3-1-1, 6.2)

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Mit dem Programm Basisverbindungen können u.A. Schrauben- und Schweißverbindungen nachgewiesen werden.

Es wird jeweils ein Verbindungsmittel (eine Schraube, ein Niet, ein Bolzen oder eine Schweißnaht) hinsichtlich seiner wesentlichen Belastungsarten untersucht.

Die Anschlussbleche werden nur betrachtet, soweit sie die Bemessung des Verbindungsmittels betreffen.

Blech 1:	Blehdicke	t	<input type="text" value="26.0"/>	mm	
	Stahlsorte		<input type="text" value="S 235"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Vorgabe
Blech 2:	Blehdicke	t	<input type="text" value="20.0"/>	mm	<input type="checkbox"/> ohne Nachweis
	Stahlsorte		<input type="text" value="S 275"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Vorgabe
<input checked="" type="checkbox"/> Futterblech mit Blehdicke t <input type="text" value="6.0"/> mm					

Die Blech 1 betreffenden Nachweise werden grundsätzlich durchgeführt, während Blech 2 über die Aktivierung des Buttons **ohne Nachweis** ausgeschlossen werden kann.

Jedem Anschlussblech kann eine andere Stahlsorte zugeordnet werden, die wiederum über den **Vorgabe-Button** vom Anwender manipuliert werden kann.

Häufig wird bei Anschlüssen ein Futterblech angeordnet, das bei der Bemessung berücksichtigt werden muss.

Bei zweischnittigen Verbindungen mit Futterblechen auf beiden Seiten des Stoßes ist die Dicke des dickeren Futterblechs anzusetzen (EC 3-1-8, 3.6.1(13)).

4 Allgemeines

4.1 Stahlsorten

In **pcae**-Programmen werden folgende typisierten Stahlsorten vorgehalten (s. EC3-1-1, 3.2.1, Tab.3.1)

- S 235 (auch W und H)
- S 275 (auch N/NL, M/ML, H, NH/NLH und MH/MLH)
- S 355 (auch N/NL, M/ML, W, H, NH/NLH und MH/MLH)
- S 450, S 460 (auch N/NL, M/ML, Q/QL/QL1, H, NH/NLH und MH/MLH)

Natürlich können die zur Bemessung in diesem Programm verwendeten Parameter verändert und an geeignete Produktnormen angepasst werden.

Stahlsorte	S 275	<input checked="" type="checkbox"/> Vorgabe
char. Streckgrenze	f_y	275.0 N/mm ²
char. Zugfestigkeit	f_u	430.0 N/mm ²
E-Modul	E	210000 N/mm ²
Korrelationsbeiwert	β_w	0.85

Der E-Modul wird nur bei der Bemessung einer Schraubverbindung mit Bolzen, der Korrelationsbeiwert nur bei der Bemessung einer Schweißverbindung mit Kehlnähten oder einer Lochschweißung relevant.

4.2 Ausdrucksteuerung

Eingabeparameter und Ergebnisse werden in einer **Druckliste** ausgegeben, deren Umfang über die folgenden Optionen beeinflusst werden kann.

Zunächst kann eine maßstäbliche **grafische Darstellung** der Basisverbindung in die Liste eingefügt werden.

Der Maßstab kann entweder vorgegeben werden oder die Zeichnung wird im Falle einer Eingabe von 0 größtmöglich in den dafür vorgesehenen Platz gesetzt.

Anschließend werden die **Eingabeparameter** und die **Materialsicherheitsbeiwerte** ausgedruckt.

I.A. reicht die Ausgabe der Typbezeichnungen der Schrauben, Niete, Bolzen sowie der Stahlgüten aus; bei Aktivierung der **zusätzlichen Infos** werden zudem die Rechenparameter ausgegeben.

Im Anschluss an die Ergebnisse sind die zur Bemessung der Basisverbindungen maßgebenden **Parameter des nationalen Anhangs** angeordnet.

Zum Schluss kann eine Liste der verwendeten Vorschriften (Normen) abgedruckt werden.

Ergebnisse
<input type="radio"/> ausführlich
<input checked="" type="radio"/> standard
<input type="radio"/> minimal

Der Umfang der Ergebnisdarstellung kann **ausführlich**, **standard** oder **minimal** sein.

- eine ausführliche Ergebnisausgabe beinhaltet die Ausgabe sämtlicher verwendeter Formeln, um Schritt für Schritt den Lösungswert nachzuvollziehen
- ist dagegen die Ergebnisausgabe minimal, wird nur das Endergebnis ohne weiteren Kommentar ausgedruckt

- im Normalfall reicht die Standardausgabe, bei der nur die wichtigsten Zwischenwerte zusätzlich zum Endergebnis ausgegeben werden

☒ tabellarisch
☐ maßgebendes Lastkollektiv detailliert
☒ Lastkollektiv detailliert: Nr.
☐ keine detaillierte Ausgabe

Bei einer großen Anzahl an Lastkombinationen ist es sinnvoll, die Ergebnisse in sehr kompakter Form **tabellarisch** auszugeben. Optional kann das **maßgebende Lastkollektiv**, das zur maximalen Ausnutzung geführt hat, in der Standard-Form angefügt werden. Alternativ kann es sinnvoll sein, den Berechnungsablauf eines frei wählbaren Lastkollektivs ausgeben zu lassen. Es kann auch **keine detaillierte Ausgabe** erfolgen.

☒ maßgebendes Lastkollektiv

Neben der tabellarischen Ausgabe kann auch nur das **maßgebende Lastkollektiv** protokolliert werden.

☒ optimierte Tabelle (FEM-Ergebnisse) nur 4H-EC3FS
☒ Zwischenergebnisse
☒ Erläuterungsskizzen

Um den Umfang des Berechnungsprotokolls zu reduzieren, kann die Ausgabe von **Zwischenergebnissen** und/oder **Erläuterungsskizzen** unterdrückt werden. Das Abschalten der Erläuterungsskizzen betrifft nicht die Ausgabe der Übersichtsgrafik (s.o.).

Im Programm 4H-EC3FS, freier Stirnplattenstoß, können die FEM-Ergebnisse in einer optimierten Tabelle ausgegeben werden.



Zum Druckmanager und den dortigen Interaktionsmöglichkeiten sowie zu der zum Lieferumfang gehörenden **englischsprachigen** Druckdokumentenausgabe s. DTE®-Handbuch.

4.3 nationale Anhänge zu den Eurocodes

Die Eurocode-Normen gelten nur in Verbindung mit ihren nationalen Anhängen in dem jeweiligen Land, in dem das Bauwerk erstellt werden soll.

Für ausgewählte Parameter können abweichend von den Eurocode-Empfehlungen (im Eurocode-Dokument mit 'ANMERKUNG' gekennzeichnet) landeseigene Werte bzw. Vorgehensweisen angegeben werden.

In **pcae**-Programmen können die veränderbaren Parameter in einem separaten Eigenschaftsblatt eingesehen und ggf. modifiziert werden.

Dieses Eigenschaftsblatt dient dazu, dem nach Eurocode zu bemessenden Bauteil ein nationales Anwendungsdokument (NA) zuzuordnen.

NAe enthalten die Parameter der nationalen Anhänge der verschiedenen Eurocodes (EC 0, EC 1, EC 2 ...) und ermöglichen den **pcae**-Programmen das Führen normengerechter Nachweise, obwohl sie von Land zu Land unterschiedlich gehandhabt werden.



Die EC-Standardparameter (Empfehlungen ohne nationalen Bezug) wie auch die Parameter des deutschen nationalen Anhangs (NA-DE) sind grundsätzlich Teil der **pcae**-Software.

Darüber hinaus stellt **pcae** ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem weitere NAe aus Kopien der bestehenden NAe erstellt werden können. Dieses Werkzeug, das über ein eigenes Hilfedokument verfügt, wird normalerweise aus der Schublade des DTE®-Schreibtischs heraus aufgerufen (Beschreibung s. Handbuch DTE®-DeskTopEngineering). Einen direkten Zugang zu diesem Werkzeug liefert die kleine Schaltfläche hinter dem **Schraubenziehersymbol**.

Normen

- /1/ DIN EN 1990, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /2/ DIN EN 1990/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /3/ DIN EN 1991-1-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /4/ DIN EN 1991-1-2/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe September 2015
- /5/ DIN EN 1993-1-1, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dez. 2010
- /6/ DIN EN 1993-1-1/A1, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005/A1:2014, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Juli 2014
- /7/ DIN EN 1993-1-1/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dez. 2018
- /8/ DIN EN 1993-1-2, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1993-1-2, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /9/ DIN EN 1993-1-2/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /10/ DIN EN 1993-1-3, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche; Deutsche Fassung EN 1993-1-3:2006 + AC:2009, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /11/ DIN EN 1993-1-3/NA, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /12/ DIN EN 1993-1-5, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 + A1:2017 + A2:2019, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Oktober 2019
- /13/ DIN EN 1993-1-5 Berichtigung 1, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 + A1:2017 + A2:2019, Berichtigung 1, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Juli 2020
- /14/ DIN EN 1993-1-5/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /15/ DIN EN 1993-1-8, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /16/ DIN EN 1993-1-8/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe November 2020
- /17/ DIN EN 1993-1-9, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009, Deutsches Institut für Nor-

mung e.V., Ausgabe Dezember 2010

- /18/ DIN EN 1993-1-9/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /19/ DIN EN 1993-6, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Deutsche Fassung EN 1993-6:2007 + AC:2009, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /20/ DIN EN 1993-6/NA, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /21/ DIN EN 1999-1-1, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Deutsche Fassung EN 1999-1-1:2007 + A1:2009 + A2:2013, Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe März 2014
- /22/ DIN EN 1999-1-1/NA, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Dezember 2010
- /23/ DIN 18800-1, Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion; Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe November 2008

Bemessung

- /24/ E. Kahlmeyer, K. Hebestreit, W. Vogt: Stahlbau nach EC3, Bemessung und Konstruktion, Träger - Stützen - Verbindungen, 6. Auflage, Werner-Verlag, 2012
- /25/ R. Kindmann, M. Stracke: Verbindungen im Stahl- und Verbundbau, 3. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, 2012
- /26/ R. Kindmann, M. Krüger: Stahlbau Teil 1: Grundlagen, 5. Aufl., Verl. Ernst & Sohn, 2013
- /27/ R. Kindmann: Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung, 4. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, 2008
- /28/ R. Kindmann, J. Frickel: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit, Grundlagen, Methoden, Berechnungsverfahren, Beispiele, Verlag Ernst & Sohn, 2002
- /29/ G. Wagenknecht: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 1: Tragwerksplanung, Grundlagen, 5. Auflage, Bauwerk BBB, Beuth Verlag GmbH, 2014
- /30/ G. Wagenknecht: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 2: Verbindungen und Konstruktionen, 3. Auflage, Bauwerk BBB, Beuth Verlag GmbH, 2011
- /31/ G. Wagenknecht: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3, Band 3: Komponentenmethode, Bauwerk BBB, Beuth Verlag GmbH, 2014
- /32/ D. Ungermann, K. Weynand, J.-P. Jaspart, B. Schmidt: Momententragfähige Anschlüsse mit und ohne Steifen, Stahlbau Kalender 2005, Verlag Ernst & Sohn, 2005
- /33/ D. Ungermann, S. Schneider: Stahlbaunormen DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen, Stahlbau Kalender 2013, Verlag Ernst & Sohn, 2013
- /34/ D. Ungermann, M. Feldmann, O. Oberegge et.al.: Entwicklung eines Bemessungsmodells für geschraubte, momententragfähige Kopfplattenverbindungen mit 4 Schrauben in einer Schraubenreihe auf der Grundlage der prEN 1993-1-8:2003: Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben AiF Nr. 15059, Deutscher Ausschuss für Stahlbau (DASt), Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2009
- /35/ Björn Schmidt: Zum Tragverhalten von geschraubten momententragfähigen Stirnplattenverbindungen mit 4 Schrauben in jeder Schraubenreihe, Dissertation, TU Dortmund, 2008
- /36/ Beispiele zur Bemessung von Stahltragwerken nach DIN EN 1993 Eurocode 3, bauforumstahl e.V., Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG
- /37/ K. Weynand, R. Oerder: Typisierte Anschlüsse im Stahlnhochbau nach DIN EN 1993-1-8, Stahlbau Verlag- und Service GmbH, Gesamtausgabe 2013
- /38/ L. Nasdala, B. Hohn, R. Rühl: Bemessung von Stirnplattenanschlüssen mit elastomerer Zwischenschicht, Bauingenieur, Bd. 80, Dezember 2005
- /39/ Y. Ciupack, H. Pasternak: Thermisch getrennte Stirnplattenstöße, Bauingenieur, Bd. 88,

- /40/ Druckschrift Kerncompactlager, Calenberg Ingenieure GmbH, Salzhemmendorf, www.calenberg-ingenieure.de
- /41/ ECCS Document No. 126: European Recommendations for the Design of Simple Joints in Steel Structures. ECCS TC10 - Structural Connections, 2009. J.P. Jaspart, J.F. Démonceau, S. Renkin, M.L. Guillaume
- /42/ D. Ungermann, R. Puthli, Th. Ummenhofer, K. Weynand: Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Band 2: Anschlüsse, DIN EN 1993-1-8 mit Nationalem Anhang, Kommentar und Beispiele, 2015
- /43/ B. Braun, U. Kuhlmann: Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen nach DIN EN 1993-1-5, Stahlbau-Kalender 2009, Verlag Ernst & Sohn, 2009
- /44/ U. Kuhlmann, A. Zizza, B. Braun: Stahlbaunormen DIN EN 1993-1-5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Plattenförmige Bauteile, Stahlbau Kalender 2012, Verlag Ernst & Sohn, 2012
- /45/ R. Timmers, G. Lener, F. Sinur, B. Kövesdi, R. Chacon: Stabilitätsnachweise nach EN 1993-1-5 - Theorie und Beispiele, Stahlbau-Kalender 2015, Verlag Ernst & Sohn, 2015
- /46/ M. Feldmann, U. Kuhlmann, M. Mensinger: Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblechen im Hoch- und Brückenbau: Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben AiF Nr. 14771, Deutscher Ausschuss für Stahlbau (DASt), Stahlbau Verlag GmbH, 2008
- /47/ C. Seeßelberg: Kranbahnen, 4. Auflage, Bauwerk BBB, Beuth Verlag GmbH, 2014
- /48/ A. Steurer: Das Tragverhalten und Rotationsvermögen geschraubter Stirnplattenverbindungen, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Zürich, Dezember 1999
- /49/ T. Laufs, C. Radlbeck: Aluminiumbau-Praxis nach Eurocode 9, Berechnung und Konstruktion, Bauwerk, Bauwerk, Beuth-Verlag GmbH, 2015
- /50/ J.-M. Franssen, P. Vila Real: Fire Design of Steel Structures, 2nd Edition, ECCS - European Convention for Constructional Steelwork, 2015
- /51/ DASt-Richtlinie 027: Ermittlung der Bauteiltemperatur feuerverzinkter Stahlbauteile im Brandfall, Ausgabe Nov. 2020
- /52/ M. Mensinger, M. Stadler: Brandschutznachweise, Workshop Eurocode 3 - Rechenbeispiele, 8. November 2008, München
- /53/ Berechnungsrichtlinie für die Querschnitts- und Stabbemessung nach Eurocode 3 mit Schwerpunkt auf semi-kompakten Querschnitten; TU Graz Institut für Stahlbau, Lessingstr. 25/38010 Graz
- /54/ W. Martin: ζ -Werte für den Biegedrillknicknachweis von I-Profilen
- /55/ J. Lindner, J. Scheer, H. Schmidt: Stahlbauten, Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4, Beuth-Kommentare
- /56/ J. Lindner: Stabilisierung von Trägern durch Trapezbleche, Stahlbau 56 (1987), S. 9-15
- /57/ R. Puthli: Hohlprofilkonstruktionen im Geschossbau - Ausblick auf die europäische Normung, Stahlbau-Kalender 2002, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2002
- /58/ R. Puthli, R. Ummenhofer, J. Wardenier, I. Pertermann: Anschlüsse mit Hohlprofilen nach DIN EN 1993-1-8, Stahlbau-Kalender 2011, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2011
- /59/ J. Wardenier, Y. Kurobane, J.A. Packer, G.J. van der Vegte, X.-L. Zhao: Berechnung + Bemessung von Verbindungen aus Rundhohlprofilen unter vorwiegend ruhender Belastung, CIDECT 1, 2. Aufl. 2008/2011
- /60/ J.A. Packer, J. Wardenier, X.-L. Zhao, G.J. van der Vegte, Y. Kurobane: Anschlüsse mit rechteckigen Hohlprofilen unter vorwiegend ruhender Belastung, CIDECT 3, 2. Aufl. 2009/2012

6 Index

Abkürzungen.....	2	mehrteilige Querschnitte	39
Anhang nationaler.....	63	Ordner	7
Anschlussblech	61	Plattenspannungsnachweis	35
Bauteil erzeugen	7	Punktequerschnitt	33
Bemessungsschnittgrößen	29	Querkraftaufteilung	36
blank	2	Querschnitte mehrteilige	39
Brandfall	14	Querschnittsnachweis EC 3.....	38
Buttons	2	Schnittgrößen.....	29
Cursor	2	Schnittgrößenimport.....	29
Druckliste	62	Schraube.....	14, 56
Einwirkung	2	Schraubenfeder	22
e-Mail	6	Schraubennachweis.....	33
Englisch	63	Schreibtisch	6
Ergebnisübersicht	32	Schreibtischauswahl	5
Extremalbildungsvorschrift.....	2	Schweißnaht	15
FE-Methode	13, 22	Schweißnahtnachweis EC 3	36
Festigkeitsklasse.....	56	Schweißverbindung	53
Fremdsprache.....	63	Senkschraube	56
Injektionsschraube	56	Stahlsorte.....	14, 62
Installation	5	Startsymbol	5
Kehlnaht.....	53	Steuerbutton	6
Kontextsensitivität	6	Stirnplatte	16
Lastbild.....	2	Stumpfnah.....	54
Lastfall.....	2	Temperaturzeitkurven	27
Lastkollektiv	2	Tragfähigkeit Niet.....	58
Materialsicherheitsbeiwerte	14	Tragfähigkeit Schraube.....	58