



**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](http://www.pcae.de)

Mail [dte@pcae.de](mailto:dte@pcae.de)



**4H-EC3BL**

Beulnachweise n. Eurocode 3

August 2022



# 4H-EC3BL

## Beulnachweise n. Eurocode 3

Copyright 2016-2022

3. aktualisierte Auflage, August 2022

**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](http://www.pcae.de)**.

Von dort können zudem aktualisierte Programmversionen herunter geladen werden.

S. hierzu auch *automatische Patch-Kontrolle* im DTE<sup>®</sup>-System.



# Produktbeschreibung

Das Programm *##EC3BL*, Beulnachweise, führt die Nachweise für Platten-, Schub- und Querlastbeulen für rechteckige Einzelbeulfelder oder ausgewählte typisierte Profile (Q-Klasse 4) unter einachsiger Beanspruchung nach Eurocode 3.

Die Normalspannungen an den seitlichen Rändern des Beulfelds werden aus einer einwirkenden Normalkraft mit zugehörigem Biegemoment berechnet, die im Schwerpunkt des Beulfelds wirken. Links und rechts des Beulfelds sind die Spannungen gleich und wirken linear veränderlich über die gesamte Beulfeldhöhe.

Die Schubspannungen werden aus der zugehörigen Querkraft berechnet und als konstant vorausgesetzt.

Die Querspannungen am oberen bzw. unteren Rand des Beulfelds resultieren aus einer oder zwei einwirkenden Einzellasten. Aufgrund der Lasteinleitungslänge ergeben sich lokal begrenzte, konstante Querspannungen.

## Spezielle Leistungsmerkmale

- der Beulnachweis wird entweder nach dem Verfahren der wirksamen Fläche (EC 3-1-5, 4-7) oder der Methode der reduzierten Spannungen (EC 3-1-5, 10) geführt
- ein Nachweis nach dem Verfahren der wirksamen Fläche entspricht dem Spannungsnachweis für Querschnitte der Klasse 4
- es kann ausgewählt werden, ob ein Einzelbeulfeld oder ein Trägerprofil nachgewiesen werden soll
- als Trägerprofil werden Doppel-T-Profil, Rechteck- oder Quadratrohr, Flachstahl (entspricht dem Einzelbeulfeld) oder Hohlkasten mit überstehenden Flanschen unterstützt. Bei Hohlkästen können die Stege leicht geneigt sein.
- das Beulfeld kann seitlich von Quersteifen eingefasst sein, die als starre Auflager dienen. Die Voraussetzungen hierzu werden bei Bedarf überprüft.
- es können bis zu fünf Längssteifen äquidistant angeordnet werden. Als Quer- oder Längssteifen kommen U-, T-, L- oder Trapezprofile in Frage. Die Bedingungen an deren Steifigkeit werden bei Bedarf überprüft.
- Profil- und Materialparameter können sowohl **pcae**-eigenen Tabellen (Doppel-T-Profil, Rechteck-, Quadratrohr, U-, T-, L-Profil) entnommen als auch parametrisiert eingegeben werden
- je nach Lasteingabe wird Platten-, Schub- und Querlastbeulen untersucht
- zur Beuluntersuchung können das Verfahren der wirksamen Fläche nach EC 3-1-5, Kap. 4-7, oder die Methode der reduzierten Spannungen nach EC 3-1-5 Kap. 10 herangezogen werden
- die Beulwerte können für das Einzel- und das Gesamtfeld entweder nach EC 3-1-5 oder mit einem **pcae**-eigenen Werkzeug berechnet werden. Alternativ kann für das Gesamtfeld ein globaler Beulwert vorgegeben werden.
- der Beulnachweis kann optional als Stabilitätsnachweis geführt werden
- 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.
- Schnittgrößenimport aus **pcae**-Stabwerksprogramm und über Text-Importschnittstelle
- Export der Konstruktionszeichnung im DXF-Format zur Weiterbearbeitung in einem CAD-System

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 *##EC3BL* 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.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg mit #/-EC3BL.

pcae GmbH

Hannover, im August 2022

## 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	Geometrie und Material.....	11
3.1.1	Materialsicherheitsbeiwerte.....	11
3.1.2	Stahlsorte .....	11
3.1.3	Geometrie.....	11
3.2	Rechenlaufsteuerung .....	13
3.2.1	Beispiel 3 - Platten-/Schubbeulen .....	13
3.2.1.1	System .....	13
3.2.1.2	Rechenparameter .....	14
3.2.1.3	Berechnung.....	15
3.2.1.3.1	Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche .....	16
3.2.1.3.2	Methode der reduzierten Spannungen.....	20
3.2.2	Beispiel 4 - Querlastbeulen .....	22
3.2.2.1	System .....	22
3.2.2.2	Rechenparameter .....	22
3.2.2.3	Berechnung: Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche - Querlastbeulen.....	22
3.2.3	Nachweisergebnisse .....	24
3.2.4	Vorgehensweise bei drei und mehr Steifen .....	24
3.3	Schnittgrößen .....	25
3.3.1	Schnittgrößen importieren.....	25
3.3.2	Nachweisergebnisse .....	27
4	allgemeine Erläuterungen zur Theorie Blechbeulen EC 3-1-5.....	28
4.1	Einleitung.....	28
4.2	Schubverzerrungen .....	29
4.3	Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche .....	30
4.3.1	Voraussetzungen .....	30
4.3.2	Plattenbeulen .....	30
4.3.3	Einzelblechfelder ohne Längssteifen .....	30
4.3.4	Plattenartiges Verhalten .....	30
4.3.5	Knickstabähnliches Verhalten .....	32
4.3.6	Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten.....	32
4.3.7	Längs ausgesteifte Blechfelder .....	32
4.3.8	Plattenartiges Verhalten .....	33
4.3.9	Knickstabähnliches Verhalten .....	34
4.3.10	Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten.....	34
4.3.11	Nachweis.....	35
4.4	Schubbeulen.....	35
4.4.1	Voraussetzungen .....	35
4.4.2	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit .....	35
4.4.3	Beitrag der Flansche .....	36
4.4.4	Nachweis.....	36
4.5	Querlastbeulen .....	37
4.5.1	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit .....	37
4.5.2	Nachweis.....	38
4.6	Interaktionen.....	38
4.6.1	Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft .....	38
4.6.2	Interaktion zw. Querbelastrung an Längsrändern, Biegemoment u. Normalkraft.....	38
4.6.3	Interaktion zw. Querbelastrung an Längsrändern u. Querkraft (nur NA-DE).....	38
4.7	Methode der reduzierten Spannungen.....	39
4.7.1	Voraussetzungen .....	39
4.7.2	Traglast .....	39
4.8	Flanschinduziertes Stegbeulen .....	40
4.9	Steifen .....	40
4.9.1	Längssteifen.....	40
4.9.2	Quersteifen.....	40
4.10	Querschnittsklasse .....	41

5	pcae-Werkzeug zur Berechnung von Beulfaktoren.....	44
5.1	Berechnungsverfahren .....	44
5.2	Lösung des Eigenwertproblems .....	45
5.3	Literatur zur Beulwertberechnung .....	45
5.4	Implementierung in <i>##</i> -EC3BL .....	45
6	Allgemeines .....	47
6.1	Stahlsorten .....	47
6.2	Ausdrucksteuerung .....	47
6.3	nationale Anhänge zu den Eurocodes .....	48
7	Literaturverzeichnis .....	49
8	Index .....	52



# 1 Programminstallation und DTE®-Schreibtisch einrichten

Die Installation des DTE®-Systems und das Überspielen des Programms *##-EC3BL* 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.

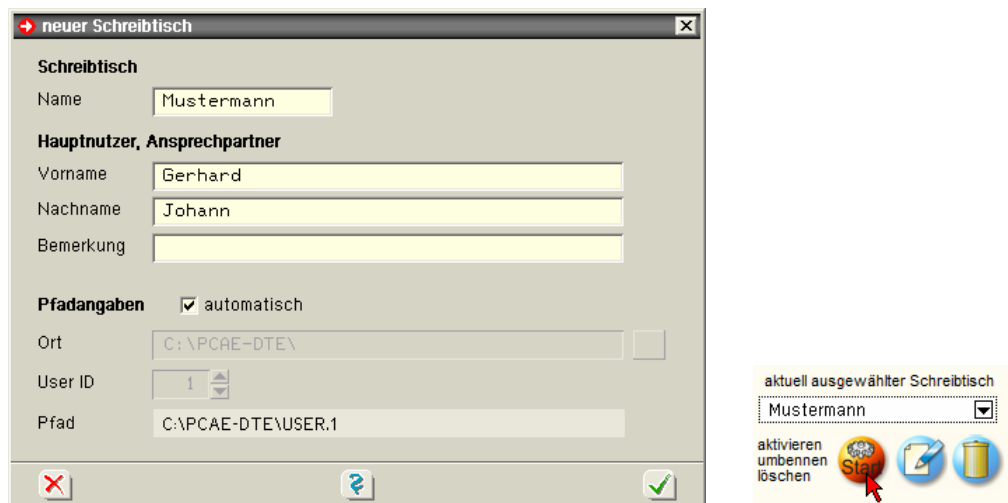


Nach erfolgreicher Installation befindet sich das DTE®-**Startsymbol** auf Ihrer Windowsoberfläche. Führen Sie bitte darauf den Doppelclick aus.

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.

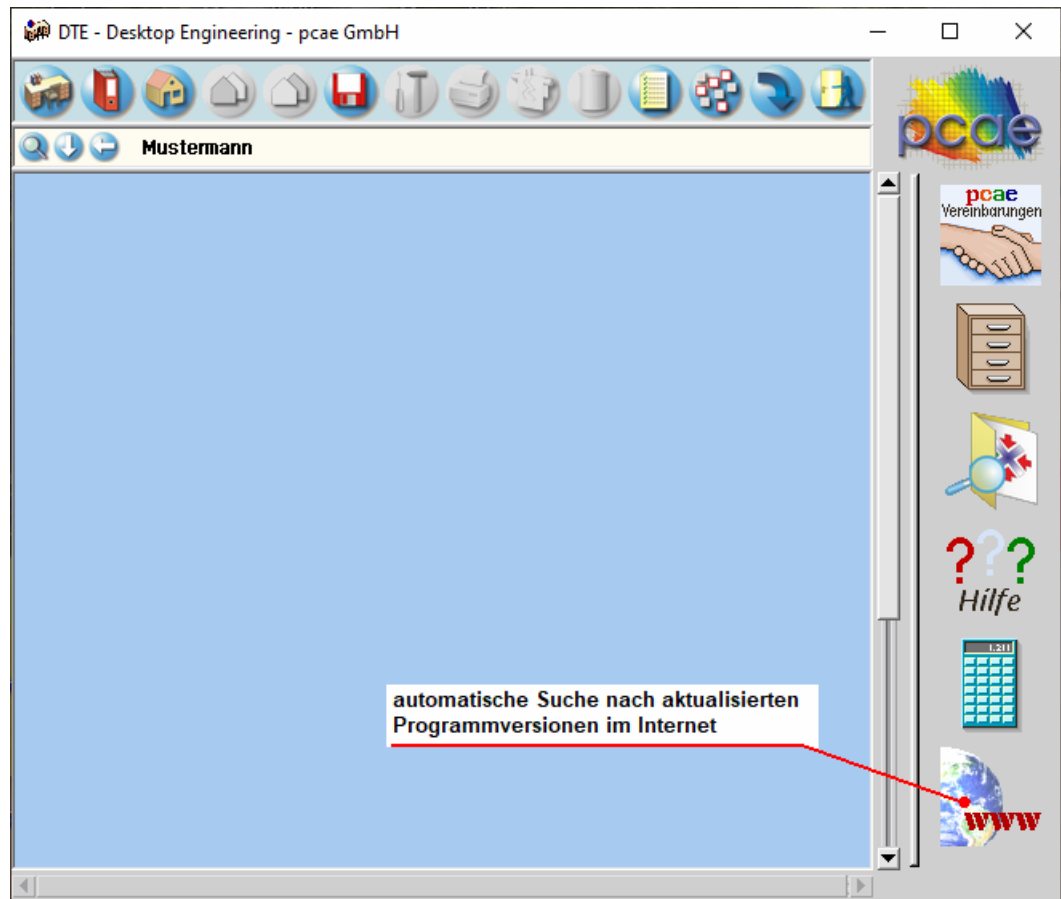


Nach Bestätigen über das **Hakensymbol** erscheint wieder die Schreibtischauswahl, in die der neue Name bereits eingetragen ist. Drücken Sie auf **Start** und die DTE®-Schreibtischoberfläche erscheint auf dem Bildschirm.

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 Schreibtischs 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 <b>e-Mail-Dienst</b> . |
|  | menügesteuerte Bearbeitung des aktivierten Bauteils                       |
|  | druckt die Datenkategorien des aktivierten Bauteils                       |
|  | ruft das Planerstellungsmodul 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.



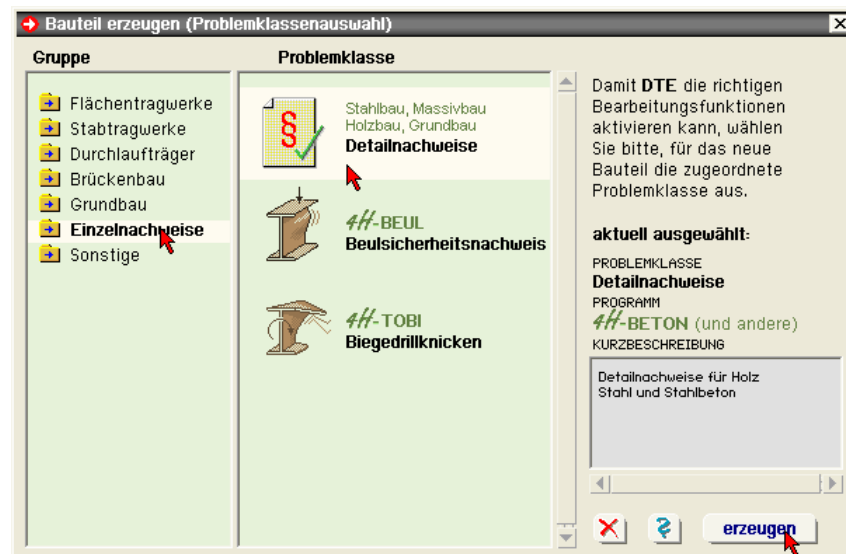
Aus dem Eintrag in der Schreibtischkopfzeile ist zu erkennen, in welchem Ordner sich die Aktion aktuell befindet.



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.

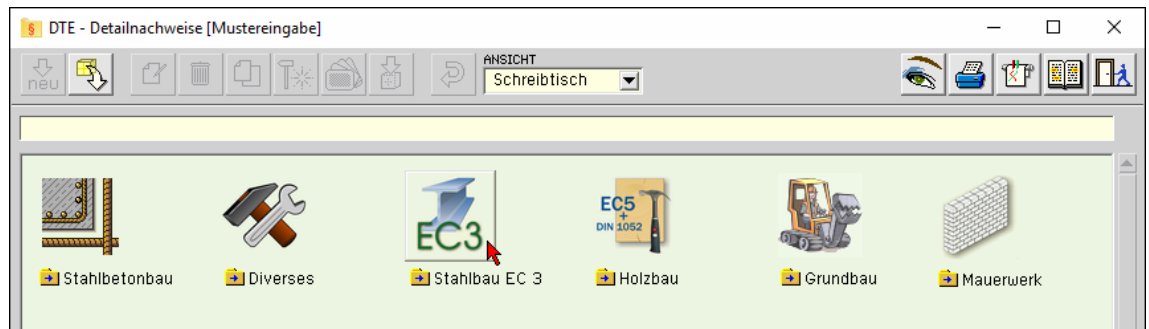


Nach Doppelklicken des neuen Bauteilicons erscheint die Übersicht der installierten Detailnachweisprogramme.

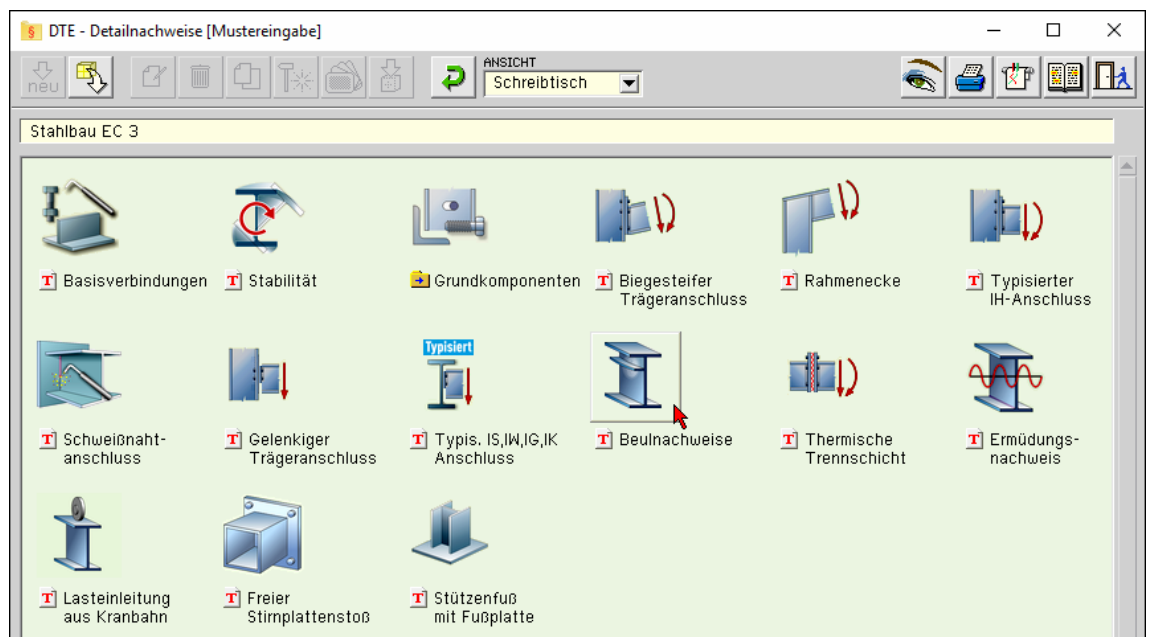


Überschreiben Sie den Begriff "Detailnachweise" zur Identifikation durch einen sinnvollen Text. Nach **Bestätigen** ist das Bauteil mit dem neuen Namen eingerichtet. Durch Doppelklicken des neuen Symbols wird die Verwaltung der DTE®-Detailnachweise geöffnet.

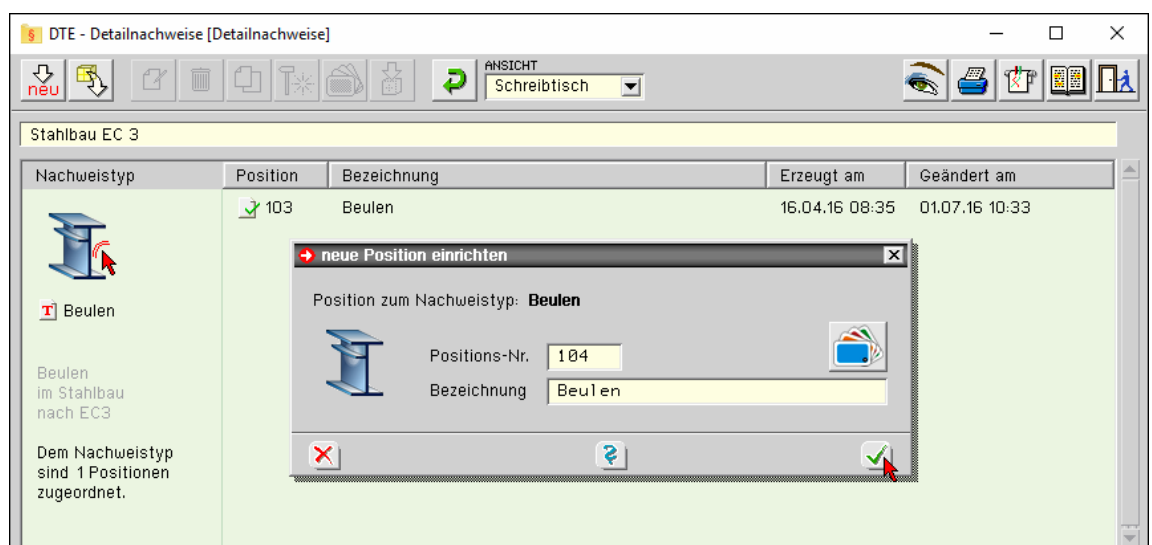
## Übersicht Detailnachweise



## Übersicht EC 3- Programme



## Beulnachweise



Nach Bestätigen des Eigenschaftsblatts *neue Position einrichten* erscheint die Eingabeoberfläche des Programms *Beulnachweise*.

## Eingabeoberfläche

Nachfolgend ist das Hauptfenster von *4H-EC3BL* dargestellt.



### Geometrie und Material (s. Abs. 3.1, S. 11)

Im ersten Registerblatt werden das Beulprofil beschrieben und die Stahlgüte festgelegt. Der Querschnitt wird zur visuellen Kontrolle maßstäblich am Bildschirm dargestellt.



### Rechenlaufsteuerung (s. Abs. 3.2, S. 13)

Im zweiten Registerblatt werden die nachweisrelevanten Parameter zur Steuerung des Rechenlaufs angegeben.



### Bemessungsschnittgrößen (s. Abs. 3.3, S. 25)

Die Schnittgrößen werden im dritten Registerblatt festgelegt und können entweder 'per Hand' eingegeben oder aus einem *pcae*-Programm importiert werden. Um Schnittgrößen importieren zu können, muss das entsprechende *4H*-Programm in der exportfähigen Version installiert sein.

Die Schnittgrößen beziehen sich auf den Schwerpunkt des ggf. ausgesteiften Profils und das Koordinatensystem der Statik (x-y-z bzw. l-m-n).



### automatische Onlineberechnung

Dieser Schalter kann *an* oder *aus* sein. Ist er *an*, wird während der Eingabe online das Berechnungsergebnis aktualisiert und am Bildschirm protokolliert.



### nationaler Anhang (s. Abs. 6.3, S. 48)

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. 6.2, S. 47)

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



### **Druckliste einsehen**

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



### **Ausdruck**

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



### **Planbearbeitung**

Über den **Pläne**-Button wird das **pcae**-Programm zur Planbearbeitung aufgerufen. Der aktuelle Querschnitt wird im **pcae**-Planerstellungsmodul 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.

## 3.1

## Geometrie und Material



Im Register 1 (s. S. 9) werden die Material- und Geometrie-Parameter festgelegt.

### 3.1.1

#### Materialsicherheitsbeiwerte

Im Programm *##-EC3BL* werden nach EC 3-1-8 folgende Materialsicherheitsbeiwerte herangezogen.

Materialsicherheitsbeiwerte		( <input checked="" type="checkbox"/> genommene Werte)
Beanspruchbarkeit von Querschnitten	$\gamma_{M0}$	1.00
Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen	$\gamma_{M1}$	1.10

Die Werte können entweder den entsprechenden Normen (s. Nationaler Anhang Abs. 6.3, S. 48) entnommen oder vom Anwender vorgegeben werden.

### 3.1.2

#### Stahlsorte

Grundsätzlich kann jedem Tragelement ein eigenes Material zugeordnet werden. Der Übersichtlichkeit halber kann an dieser Stelle eine einheitliche Stahlgüte für die Einzelelemente (Beulfeld, Quersteifen, Längssteifen, ggf. Kranbahnschiene) gewählt werden.

<input checked="" type="checkbox"/> einheitliche Stahlsorte
Stahlsorte <input type="text" value="S 235"/> <input type="button" value="Vorgabe"/>

Da die Beschreibung der Stahlparameter nach EC 3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der Stahlsorten verwiesen, s. Abs. 6.1, S. 47.

### 3.1.3

#### Geometrie

Das Programm *##-EC3BL* weist die Tragfähigkeit eines typisierten Querschnittsprofils oder auch nur eines Beulfelds nach. Dazu sind entweder die Abmessungen des Beulfelds

<input checked="" type="radio"/> Beulfeld	
Blechdicke t	<input type="text" value="15.0"/> mm
Blechbreite b	<input type="text" value="3000.0"/> mm

oder das Trägerprofil einzugeben. Die Parameter des Trägerprofils können dabei entweder über den *pcae*-eigenen **Profilmanager** in das Programm importiert werden oder als **typisiertes Stahlprofil** parametrisiert eingegeben werden.

<input checked="" type="radio"/> Träger	
<input checked="" type="radio"/> Profil aus Profilmanager <i>neu</i>	
<input type="radio"/> parametrisiertes Stahlprofil	
Profilname <input type="text" value="IPE600"/>	

Um ein Profil aus dem Angebot des Profilmanagers zu wählen, ist der grün unterlegte Pfeil zu betätigen. Das externe Programm wird aufgerufen und ein Profil kann aktiviert werden. Bei Verlassen des Profilmanagers werden die benötigten Daten übernommen und der Profilname protokolliert.

Zur Definition eines parametrisierten Profils wird zunächst seine Klasse über eine Listbox festgelegt, anhand derer bestimmt wird, welche weiteren Parameter freigelegt werden. Das Programm berechnet Träger mit Doppel-T-Profilen (I, H-, DIL-, S-, W-Profile), Rechteck- sowie Hohlkastenprofile und Flachstähle, wobei Hohlkasten und Flachstahl nur parametrisiert zur Verfügung stehen.

Andere Profilklassen sind in der Listbox farblich gekennzeichnet und können nicht verwendet werden.

☐ Profil aus Profilmanager **neu**  
☒ parametrisiertes Stahlprofil

Profilkategorie I-Profil

Profilhöhe	$h$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3000.0</span>	mm
Stegdicke	$t_w$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">15.0</span>	mm
Flanschbreite oben	$b_{fo}$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">800.0</span>	mm
Flanschdicke oben	$t_{fo}$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">40.0</span>	mm
Flanschbreite unten	$b_{fu}$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">800.0</span>	mm
Flanschdicke unten	$t_{fu}$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">40.0</span>	mm

☐ gewalztes Profil  
☒ geschweißtes Profil

Schweißnahtdicke	$a_o$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">6.0</span>	mm
	$a_u$	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">6.0</span>	mm

Bei gewalzten Profilen werden die Ausrundungsradien zwischen Flansch und Steg geometrisch berücksichtigt, während geschweißte Blechprofile mit Schweißnähten zusammengefügt sind. Diese Schweißnähte werden **nicht** nachgewiesen.

Das Beulfeld wird seitlich durch Quersteifen gehalten, die als starre Auflagerung dienen. Die Steifen können ebenso entweder aus dem Profilmanager ausgewählt oder parametrisiert eingegeben werden.

Als **Quersteifen** stehen Winkel-, U- bzw. C-, T- bzw. 1/2I-, Trapez-Profile und Flachstäbe zur Verfügung, wobei Trapezprofil und Flachstahl nur parametrisiert eingegeben werden können.

☒ **Quersteifen**

☒ Profil aus Profilmanager **neu**  
☐ parametrisiertes Stahlprofil

Profilname L 120 X 80 X 10

Das Beulfeld kann längs ausgesteift sein. Dazu können bis zu fünf **Längssteifen** mit äquidistantem Abstand voneinander möglichst in der Druckzone des Beulfelds angeordnet werden.

Zunächst ist die Anzahl an Steifen festzulegen, anschließend der Abstand der ersten Steife von Oberkante Träger bzw. vom oberen Blechrand sowie der Abstand der Steifen voneinander. Es ist darauf zu achten, dass die Steifen sich nicht berühren bzw. überschneiden. Das Steifenprofil wird dann analog zu den Quersteifen definiert.

☒ **Längssteifen**

Anzahl  $n_{st}$  2

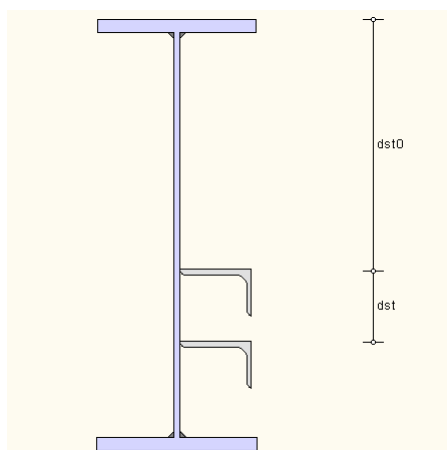
Abstand der ersten Steife  $d_{st0}$  350.0 mm  
 von Oberkante Träger

Abstand der Steifen  $d_{st}$  100.0 mm  
 voneinander

☒ Profil aus Profilmanager **neu**  
☐ parametrisiertes Stahlprofil

Profilname L 100 X 65 X 7

Zur optischen Kontrolle wird das ausgewählte Profil einschl. Längssteifen maßstäblich am Bildschirm angezeigt. Die Abstände der Längssteifen sind bezeichnet.





## 3.2

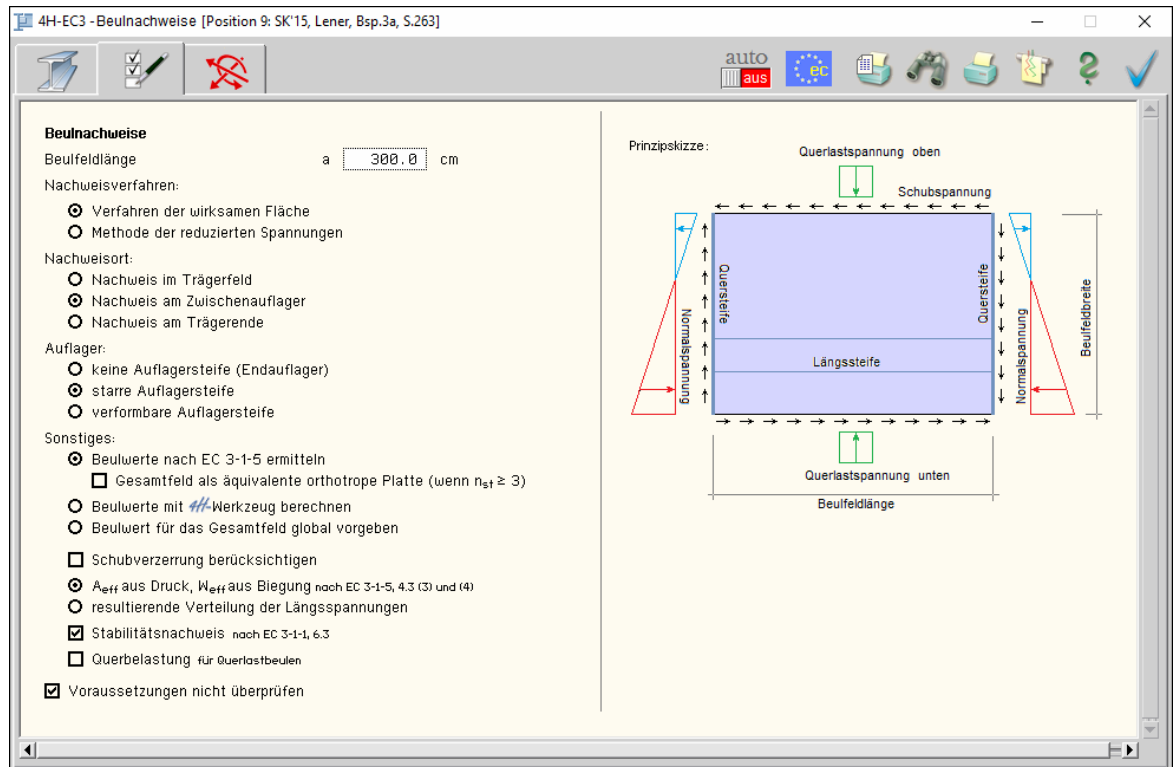
## Rechenlaufsteuerung



Im Register 2 befinden sich die Angaben zur Rechenlaufsteuerung.

Der Programmablauf und die Bedeutungen der Einstellungen werden in Anlehnung an zwei Literaturbeispiele erläutert aus

*Timmers, Lener et.al.: Stabilitätsnachweise nach EC 3-1-5 - Theorie und Beispiele, Stahlbaukalendar 2015.*



### 3.2.1

### Beispiel 3 - Platten-/Schubbeulen

#### 3.2.1.1

#### System

Ein geschweißter Blechträger (parametrisiertes I-Profil, Schweißnähte irrelevant) wird durch eine Längssteife verstärkt. Sämtliche Blechteile sind in einheitlicher Stahlgüte ausgeführt, die Material sicherheitsbeiwerte entsprechen den normativen Vorgaben.

Es werden zwei Lastkombinationen untersucht, die lt. Beispiel für Platten- und Schubbeulen (Lk 1) sowie M-N-V-Interaktion (Lk 2) nach dem Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche maßgebend sind. Die Beschreibung der Methode der reduzierten Spannungen erfolgt mit Lk 3.

#### Stahlsorte

Stahlgüte S 355

#### Material sicherheitsbeiwerte

Beanspruchbarkeit von Querschnitten  $\gamma_{M0} = 1.00$

Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen  $\gamma_{M1} = 1.10$

#### Querschnitt

Träger: Profilparameter (I-Profil):

Gesamthöhe  $h = 3080.0$  mm, Stegdicke  $t_w = 15.0$  mm

Flanschbreite  $b_f = 800.0$  mm, Flanschdicke  $t_f = 40.0$  mm

Längssteifen: Anzahl  $n_{st} = 1$

Profilparameter (Flachstahl):

Höhe  $h = 250.0$  mm, Dicke  $t = 25.0$  mm

Abstand der Steife von Oberkante Träger  $d_{st,0} = 2540.0$  mm

#### Belastung

Schnittgrößen bezogen auf den versteiften Querschnitt:

Lk 1: Platten- + Schubbeulen (Kap. 5.1.1-4)

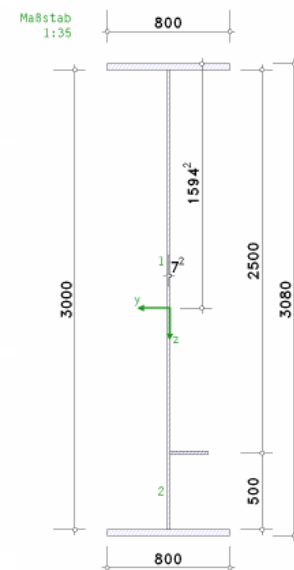
$N_{Ed} = -4000.0$  kN  $M_{Ed} = -33760.0$  kNm  $V_{Ed} = 3437.5$  kN

Lk 2: M-N-V-Interaktion (Kap. 5.1.5)

$N_{Ed} = -4000.0$  kN  $M_{Ed} = -32150.0$  kNm  $V_{Ed} = 3288.0$  kN

Lk 3: Methode der reduz. Spann. (Kap. 10)

$N_{Ed} = -4000.0$  kN  $M_{Ed} = -32750.0$  kNm  $V_{Ed} = 3290.0$  kN



Das Beulfeld im Steg wird durch starre Quersteifen begrenzt, die die Beulfeldlänge festlegen. Die Quersteifen werden in diesem Beispiel nicht überprüft.

Die **Beulnachweise** können mit zwei verschiedenen Nachweisverfahren durchgeführt werden.

Je nach Schnittgrößenkombination wird *Plattenbeulen*, *Schubbeulen* und/oder *Querlastbeulen* sowie deren Interaktion untersucht.

In diesem Beispiel wird das **Verfahren der wirksamen Fläche** vorgestellt, Platten- und Schubbeulen sind maßgebend.

Sind Plattenbeulen mit Schubverzerrung, Schubbeulen und/oder Querlastbeulen zu berücksichtigen, ist der Nachweisort, d.h. die Lage des Beulfelds im Träger, zu bestimmen.

Für den Querlastnachweis am Trägerende ist der Abstand des Lasteinleitungsbereichs zum freien Ende anzugeben.

In diesem Beispiel soll der **Nachweis am Zwischenauflager** geführt werden.

Wird der Nachweis am Zwischenauflager geführt, ist für den Schubbeulnachweis die Aussteifung des Auflagers festzulegen.

In diesem Beispiel sind die Quersteifen gleichzeitig auch starre Auflagersteifen.

Sollen Schubverzerrungen beim Nachweis für Plattenbeulen berücksichtigt werden, ist die mittragende Trägerlänge als Abstand der Momentennullpunkte abzuschätzen. In diesem Beispiel werden die Schubverzerrungen vernachlässigt.

Die Beulwerte sind sowohl für unausgesteifte Einzelfelder als auch für das gesamte Beulfeld zu ermitteln. Für unausgesteifte Beulfelder erfolgt die Berechnung nach EC 3-1-5 genau genug, für ein ausgesteiftes Gesamtfeld hingegen können die Beulwerte zwischen der Norm und spezialisierten Berechnungstools stark differieren.

Das Programm **##-EC3BL** bietet an, die Beulwerte entweder nach EC 3-1-5 zu bestimmen oder mittels eines **pcae**-eigenen Programmbausteins zu berechnen. Alternativ können die Beulwerte für die Einzelfelder nach EC 3-1-5 berechnet und für das Gesamtfeld global (d.h. für alle Lastkombinationen gültig) eingegeben werden.

Wird der Beulwert nach EC 3-1-5 berechnet und sind mehr als zwei Längssteifen vorgesehen, können diese verschmiert (entspr. einer äquivalenten orthotropen Platte) in die Berechnung des Gesamtfelds einbezogen werden.

Im vorliegenden Beispiel werden die Beulwerte nach EC 3-1-5 berechnet.

Die folgenden Einstellungen betreffen nur das Plattenbeulen nach dem Verfahren der wirksamen Fläche.

Wird der Beulwert mit dem **pcae**-eigenen **##-Werkzeug** berechnet, kann festgelegt werden, ob eine kombinierte (Normal-, Schub- und Querlastspannung wirken gleichzeitig) oder je nach Beulfall eine separierte Beanspruchung (beim Plattenbeulen nur die Normal-, beim Schubbeulen nur die Schub-, beim Querlastbeulen nur die Querlastspannung) zur Ermittlung des Beulwerts herangezogen wird.

Die wirksamen Querschnittswerte können entweder getrennt nach den Lastkomponenten, d.h. die wirksame Fläche auf Grund der Normalkraft und das wirksame Widerstandsmoment auf Grund des Biegemoments, oder aus der resultierenden Verteilung der Längsspannungen aus gleichzeitiger Wirkung von Normalkraft und Biegemoment ermittelt werden.

Die resultierende Verteilung der Längsspannungen erfordert jedoch einen iterativen Berechnungsvorgang, um die Spannungumlagerung hinreichend genau abzubilden.

**Beulnachweise**

Beulfeldlänge ..... a  cm

Nachweisverfahren:

- ☒ Verfahren der wirksamen Fläche
- ☐ Methode der reduzierten Spannungen

Nachweisort:

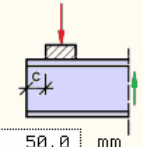
- ☐ Nachweis im Trägerfeld
- ☒ Nachweis am Zwischenauflager
- ☐ Nachweis am Trägerende ..... c  mm

Auflager:

- ☐ keine Auflagersteifen
- ☒ starre Auflagersteifen
- ☐ verformbare Auflagersteifen

Sonstiges:

- ☒ Beulwerte nach EC 3-1-5 ermitteln
  - ☒ Gesamtfeld als äquivalente orthotrope Platte
  - ☐ Beulwerte mit **##-Werkzeug** berechnen
    - ☐ unter kombinierter Beanspruchung
  - ☐ Beulwert für das Gesamtfeld global vorgeben
    - Vergrößerungsfaktor .....  $\alpha_{cr}$  
      - zum Erreichen der elastischen Verzweigungslast  $\alpha_{cr} = \alpha_{cr} \alpha_{Ed}$
- ☐ Schubverzerrung berücksichtigen
  - mittragende Trägerlänge .....  $L_e$   cm
  - Abstand der Momentennullpunkte
- ☒  $A_{eff}$  aus Druck,  $W_{eff}$  aus Biegung nach EC 3-1-5, 4.3 (3) und (4)
- ☐ resultierende Verteilung der Längsspannungen
  - ☐ keine Iteration Spannungumlagerung vernachlässigen
- ☐ Stabilitätsnachweis nach EC 3-1-1, 6.3

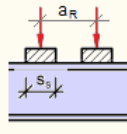


Im vorliegenden Beispiel werden die effektiven Querschnittswerte getrennt nach den Lastkomponenten ermittelt.

Der Beulnachweis kann als Querschnittsnachweis mit dem Sicherheitsbeiwert  $\gamma_{M0}$  oder als Stabilitätsnachweis für Biegeknicken und Biegedrillknicken mit  $\gamma_{M1}$  geführt werden. In diesem Beispiel ist ein Querschnittsnachweis gefordert.

**Querlastbeulen** ist nachzuweisen, wenn senkrecht zum Beulfeld eine lokal begrenzte Last eingeleitet wird. Dies können eine oder zwei Einzellasten am Obergurt (z.B. Radlasten aus einer Kranbahn) oder eine Einzellast am Untergurt (z.B. eine Auflagerlast) des Trägers sein. In diesem Beispiel wird Querlastbeulen nicht untersucht.

☑ Querbelastung für Querlastbeulen		
Einzellast oben	$F_{z,Ed}$	113.7 kN
starre Lasteinleitungslänge auf Außenkante des Obergurts	$s_s$	69.0 mm
Abstand zweier Einzellasten <small>=0: nur eine Einzellast</small>	$a_R$	360.0 cm



Die Voraussetzungen zur Anwendung der Verfahren sind zu überprüfen (kann unterdrückt werden). In diesem Beispiel ist die Einhaltung der Voraussetzungen nicht relevant.

☑ Voraussetzungen nicht überprüfen

### 3.2.1.3

### Berechnung

Zunächst wird überprüft, ob eine Schubverzerrung zu berücksichtigen ist. In diesem Beispiel ist dies zwar nicht gefordert, der Rechenweg soll hier jedoch aufgezeigt werden.

Z.B. ergibt sich bei einer mittragenden Trägerlänge von  $L_e = 10$  m eine Verringerung der Flanschbreiten. Diese Ersatzbreiten sind bei der weiteren Berechnung vorauszusetzen. Im vorliegenden Beispiel werden keine Ersatzbreiten verwendet.

#### Schubverzerrung

Flansch oben = Flansch unten:

$$b_0 = b_f/2 = 400.0 \text{ mm} \geq L_e/50 = 200.0 \text{ mm};$$

$$\text{Schubverzerrung: } \alpha_0 = (1 + A_{sl}/(b_0 \cdot t))^{1/2} = 1.000, \quad A_{sl} = 0.00 \text{ cm}^2 \Rightarrow$$

$$\dots \kappa = \alpha_0 \cdot b_0 / L_e = 0.040$$

$$\text{für } 0.02 < \kappa \leq 0.70: \beta_1 = 1/(1 + 6.4 \cdot \kappa^2) = 0.990,$$

$$\dots \beta_2 = 1/(1 + 6 \cdot (\kappa - 1)/(2500 \cdot \kappa) + 1.6 \cdot \kappa^2) = 0.837; \quad \beta = \beta_2 = 0.837$$

$$\text{Faktor } \beta_{ult} = \beta^\kappa = 0.993, \quad \beta = 0.84$$

$$\text{wirksame Breite } b_{eff} = 2 \cdot \beta_{ult} \cdot b_0 = 794.3 \text{ mm}$$

$$\text{Ersatzbreiten aus Schubverzerrung } b_{fo} = 794.3 \text{ mm}, \quad b_{fu} = 794.3 \text{ mm}$$

Die Querschnittswerte des Profils einschl. Steifen werden bestimmt, wobei bei geschweißten Profilen die Schweißnähte nicht zu berücksichtigen sind. Zur Information werden die am äußeren Querschnittsrand wirkenden Spannungen protokolliert sowie die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts aufgeführt.

#### Querschnittswerte

$$A = 1152.50 \text{ cm}^2, \quad z_s = 1594.2 \text{ mm}, \quad I_y = 18753552.18 \text{ cm}^4,$$

$$y_s = 7.2 \text{ mm}, \quad I_z = 355050.53 \text{ cm}^4$$

#### Extremale Querschnittsspannungen

$$\sigma_o = -252.3 \text{ N/mm}^2, \quad \sigma_u = 302.2 \text{ N/mm}^2, \quad \tau = 76.4 \text{ N/mm}^2$$

#### Querschnittsklasse

Flansch oben: Querschnittsklasse 1 (überzogen)

Flansch unten: Querschnittsklasse 3 für  $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$

Steg: Querschnittsklasse 4 für  $37.50 < c/t = 200.00$

Gesamt: Querschnittsklasse 4  $\Rightarrow$  Beulnachweis erforderlich !!

### 3.2.1.3.1

## Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche

### 3.2.1.3.1.1

## Plattenbeulen

Der Nachweis für Plattenbeulen wird anhand des ersten Lastkollektivs (s.o.) erläutert. Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen Erläuterungen (Abs. 4.3.2, S. 30) beschrieben.

### Nachweis getrennt nach den Lastkomponenten

Der Querschnitt wird zunächst mit der einwirkenden Druckkraft  $N_{Ed}$  belastet.

#### Plattenbeulen

Effektive Querschnittsfläche für  $N_{Ed} = 4000.0$  kN,  $M_{Ed} = 0$

Spannungen in den Gurtblechen  $\sigma_o = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_u = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>

In diesem Beispiel sind die Flansche nicht beulgefährdet (Q-Klasse 3). Die wirksame Breite der Flansche entspricht der Bruttobreite.

Flansch oben = Flansch unten:

Beulfeld:  $b = 392.5$  mm,  $t = 40.0$  mm,  $\sigma_1 = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_2 = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>

Querschnittsklasse 3 für  $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$

keine Abminderung:  $\rho = 1$

wirksame Breite  $b_{c,eff} = b = 392.5$  mm

Sind die Flansche jedoch beulgefährdet (z.B. bei  $t_f = 20$  mm) wird die wirksame Breite der Flansche infolge Plattenbeulens berechnet. Der Beulwert wird bei dreiseitig gelagerten Beulfeldern unabhängig vom Eingabemodus stets nach EC 3-1-5 berechnet. Knickstabähnliches Verhalten ist bei dreiseitig gelagerten Beulfeldern stets ausgeschlossen.

Flansch oben = Flansch unten:

Beulfeld:  $b = 392.5$  mm,  $t = 20.0$  mm,  $\sigma_1 = 47.7$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_2 = 47.7$  N/mm<sup>2</sup>

Querschnittsklasse 4 für  $11.20 < c/t = 19.63$

Plattenbeulen:

einseitig gestütztes Blechfeld: Beulwert  $k_\sigma = 0.43$ ,  $\psi = 1.000$

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 212.6$  N/mm<sup>2</sup>

..... mit  $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 492.8$  N/mm<sup>2</sup>,  $b' = 392.5$  mm

Beulschlankheitsgrad  $\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 1.292$

Abminderungsfaktor  $\rho = (\lambda_p - 0.188) / \lambda_{p^2} = 0.661 \leq 1$  für  $\lambda_p > 0.748$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten

..... nicht erforderlich

wirksame Breite aus Plattenbeulen  $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 259.5$  mm

Nun werden die Spannungen unter Berücksichtigung der wirksamen Flanschbreiten erneut ermittelt. Der Steg wird durch die Längssteifen in Einzelbeulfelder aufgeteilt, deren Nummerierung von oben nach unten läuft. Der Ablauf zur Berechnung der wirksamen Breiten entspricht demjenigen der Flansche. Hier kann allerdings eine Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten erfolgen, wenn die Beulfeldbreite  $b$  größer als die Beulfeldlänge  $a$  ist.

Steg:

Spannungen am Blechrand  $\sigma_o = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_u = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>

Beulfeld 1:

Spannungen am Beulfeld  $\sigma_o = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_u = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>

Beulfeld:  $b = 2487.5$  mm,  $t = 15.0$  mm,  $\sigma_1 = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_2 = 34.7$  N/mm<sup>2</sup>

Querschnittsklasse 4 für  $109.29 < c/t = 165.83$

Plattenbeulen:

zweiseitig gestütztes Blechfeld: Beulwert  $k_\sigma = 4.00$ ,  $\psi = 1.000$

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 27.6$  N/mm<sup>2</sup>

..... mit  $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 6.9$  N/mm<sup>2</sup>,  $b' = 2487.5$  mm

Beulschlankheitsgrad  $\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 3.586$

Abminderungsfaktor  $\rho = (\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)) / \lambda_{p^2} = 0.262 \leq 1$

..... für  $\lambda_p > 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.673$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten

..... nicht erforderlich

wirksame Breite  $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 651.1$  mm

..... ( $b_{e1} = 325.6$  mm,  $b_{e2} = 325.6$  mm)

Für eine Beulfeldlänge von  $a = 2.000$  mm  $< b = 2.487,5$  mm ist demnach knickstabähnliches Verhalten zu untersuchen. Es ergibt sich jedoch keine weitere Abminderung.

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten:

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,c} = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 10.7$  N/mm<sup>2</sup>,

.....  $b' = 2000.0$  mm

Beulschlankheitsgrad  $\lambda_c = (f_y / \sigma_{cr,c})^{1/2} = 5.766$

Abminderungsfaktor  $\chi_c = 1 / (\Phi + (\Phi^2 - \lambda_c^2)^{1/2}) = 0.029 \leq 1$  für  $\lambda_c > 0.2$

..... mit  $\Phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 17.710$ ,  $\alpha = 0.21$  für Knicklinie 'a'

endgültiger Abminderungsfaktor  $\rho = (\rho \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.262$

..... mit  $\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} = 2.724 > 1 \Rightarrow \xi = 1$

wirksame Breite  $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 651.1$  mm

..... ( $b_{e1} = 325.6$  mm,  $b_{e2} = 325.6$  mm)

Beulfeld 2 wird Q-Klasse 3 zugeordnet und erfährt damit keine Reduktion.

Beulfeld 2:

Spannungen am Beulfeld  $\sigma_0 = 34.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_u = 34.7 \text{ N/mm}^2$

Beulfeld:  $b = 487.5 \text{ mm}$ ,  $t = 15.0 \text{ mm}$ ,  $\sigma_1 = 34.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_2 = 34.7 \text{ N/mm}^2$

Querschnittsklasse 3 für  $30.92 < c/t = 32.50$

keine Abminderung:  $\rho = 1$

wirksame Breite  $b_{c,eff} = b = 487.5 \text{ mm}$  ( $b_{e1} = 243.8 \text{ mm}$ ,  $b_{e2} = 243.8 \text{ mm}$ )

Gesamtfeld, Steife 1:

Spannung in der Steife  $\sigma_{sl} = 34.7 \text{ N/mm}^2$

Steifendicke in der Stegachse  $t_{w,sl} = 25.0 \text{ mm}$ , anteilige wirksame Breiten  $b_{1,e2} = 325.6 \text{ mm}$ ,  $b_{2,e1} = 243.8 \text{ mm}$

Plattenbeulen:

EC 3-1-5, Anhang A.2.2 (Ersatzstab mit elastischer Bettung):

mitwirkende Breite der Steife  $b_{sl} = 1512.5 \text{ mm}$ , angrenzende Beulfelder  $b_1 = 2500.0 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 500.0 \text{ mm}$

kritische Beulspannung für  $a = 3000.0 \text{ mm} < a_c = 4.33 \cdot ((I_{sl} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2) / (t^3 \cdot (b_1 + b_2)))^{1/4} = 8963.7 \text{ mm}$ :

$\sigma_{cr,p,sl} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{sl} / (A_{sl} \cdot a^2) + E \cdot t^3 \cdot (b_1 + b_2) \cdot a^2 / (4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot A_{sl} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2) = 958.8 \text{ N/mm}^2$ ,  $I_{sl} = 11900.5 \text{ cm}^4$ ,  $A_{sl} = 289.4 \text{ cm}^2$

$\Rightarrow \sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,p,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 958.8 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_1 = 34.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{sl} = 34.7 \text{ N/mm}^2$

Beulslankheitsgrad  $\lambda_p = (\beta_A \cdot I_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.440$ ,  $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 0.524$ ,  $A_{sl,eff} = 151.6 \text{ N/mm}^2$

Abminderungsfaktor  $\rho = 1$  für  $\lambda_p < 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.673$ ,  $\psi = 1.000$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten:

mitwirkende Breite der Steife  $b_{sl} = 1512.5 \text{ mm}$  (s. Plattenbeulen)

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,c,sl} = (\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl}) / (A_{sl} \cdot a^2) = 947.1 \text{ N/mm}^2$ ,  $I_{sl} = 11900.5 \text{ cm}^4$ ,  $A_{sl} = 289.4 \text{ cm}^2$

$\Rightarrow \sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,c,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 947.1 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_1 = 34.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{sl} = 34.7 \text{ N/mm}^2$

Beulslankheitsgrad  $\lambda_c = (\beta_A \cdot I_y / \sigma_{cr,c})^{1/2} = 0.443$ ,  $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 0.524$ ,  $A_{sl,eff} = 151.6 \text{ N/mm}^2$

Abminderungsfaktor  $\chi_c = 1 / (\Phi + (\Phi^2 - \lambda_c^2)^{1/2}) = 0.844 \leq 1$  für  $\lambda_c > 0.2$

mit  $\Phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.676$ ,  $\alpha = \alpha' + 0.09 / (i/e) = 0.636$ ,  $\alpha' = 0.49$  für Knicklinie 'c',

$e = 103.9 \text{ mm}$ ,  $i = (I_{sl} / A_{sl})^{1/2} = 64.1 \text{ mm}$ ,  $I_{sl} = 11900.5 \text{ cm}^4$ ,  $A_{sl} = 289.4 \text{ cm}^2$

endgültiger Abminderungsfaktor  $\rho = (\rho \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.848$  mit  $\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} = 1.012$ ,  $0 \leq \xi \leq 1$

wirksame Breiten der angrenzenden Beulfelder  $b_{1,e2,eff} = \rho \cdot b_{1,e2} = 275.9 \text{ mm}$ ,  $b_{2,e1,eff} = \rho \cdot b_{2,e1} = 206.6 \text{ mm}$

wirksame Fläche der Steife  $A_{sl,eff} = \rho \cdot A_{sl} = 52.97 \text{ cm}^2$

Zur Untersuchung des **Gesamtfeldbeulens** werden bei ausgesteiften Beulfeldern die Bereiche um die Steifen herum untersucht, d.h. es wird Steife  $i$  mit den wirksamen Breiten  $b_{i,e2}$  und  $b_{i+1,e1}$  der angrenzenden Beulfelder  $b_i$  und  $b_{i+1}$  betrachtet.

Die Querschnittswerte des Ersatzdruckstabs  $A_{sl}$  und  $I_{sl}$  ergeben sich also aus der mitwirkenden Breite der Steife  $b_{sl} = b_{i,e2} + b_{i+1,e1} + t_{w,sl}$ .

Es werden Brutto-Querschnittswerte verwendet. Bei Steifen, deren angrenzende Beulfelder voll gedrückt sind (z.B. Druckflansch,  $\psi = 1$ ), ergeben sich die mitwirkenden Breiten  $b_{i,e2} = b_{i,b}/2$  und  $b_{i+1,e1} = b_{i+1,b}/2$ .

Die Extrapolation der kritischen Beulspannung der Steife auf den am meisten gedrückten Blechrand erfolgt über die einwirkenden Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_{sl}$ .

Der Beulslankheitsgrad wird um den Wirksamkeitsfaktor  $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl}$  reduziert, wobei sich die wirksame Querschnittsfläche der Steife aus der Einzelbeulfeldberechnung ergibt (s. wirksame Breiten  $b_{i,e2}$  und  $b_{i+1,e1}$ ).

Aus der Berechnung des endgültigen Abminderungsfaktors  $\rho$  ergeben sich die wirksamen Breiten der angrenzenden Beulfelder  $b_{i,e2,eff}$  und  $b_{i+1,e1,eff}$  sowie die wirksame Fläche der Steife  $A_{sl,eff}$  der Steife  $i$ .

Anschließend wird für offene Querschnitte der Nachweis der Drillknicksteifigkeit geführt. Ebenso wird überprüft, ob die Voraussetzung, dass flanschinduziertes Stegbeulen ausgeschlossen ist, erfüllt ist.

Auf Grund der Querschnittsreduktion ergibt sich aus der Verschiebung des Schwerpunkts ein Zusatzmoment, das bei der Ermittlung des Widerstandsmoments zu berücksichtigen ist.

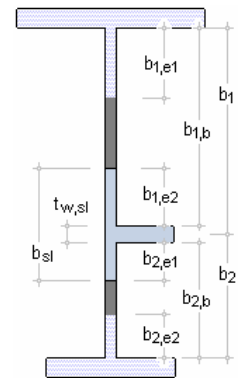
Traglasten bezogen auf den reduzierten Querschnitt:

Schwerpunktstand von oben  $z_{s,eff} = 1670.5 \text{ mm}$

Zusatzmoment aus  $\Delta z_s = 76.3 \text{ mm}$ :  $\Delta M_{Ed} = 305.22 \text{ kNm}$

Querschnittsfläche  $A_{eff} = 854.49 \text{ cm}^2$

Traglasten  $N_{Rd} = (f_y \cdot A_{eff}) / \gamma_{M0} = 30334.34 \text{ kN}$



Nun wird der Querschnitt mit dem reinen einwirkenden Biegemoment  $M_{Ed}$  (ohne Zusatzmoment) belastet. Treten Zugspannungen ( $\sigma < 0$ ) in den Mittelachsen der Gurtbleche auf, ist das Blech (hier der obere Flansch) nicht beulgefährdet.





Der Nachweis gegen Schubbeulen wird anhand des ersten Lastkollektivs (s.o.) erläutert. Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen Erläuterungen (Abs. 4.4, S. 35) beschrieben.

Die Einzelfelder und das Gesamtfeld werden untersucht.

#### Schubbeulen

##### Beulfeld 1:

Schubbeulen:  $h_w/t_w = 166.67 > 72 \cdot \varepsilon / \eta = 48.82$ ,  $h_w = 2500.0$  mm,  $t_w = 15.0$  mm  $\Rightarrow$  genauer Nachweis !!  
 EC 3-1-5, Anhang A.3 (Schubbeulwert):  
 Schubbeulwert für  $a/h_w = 1.20 > 1$ :  $k_\tau = 5.34 + 4/(a/h_w)^2 = 8.12$ ,  $a = 3000.0$  mm,  $h_w = 2500.0$  mm  
 kritische Schubbeulspannung  $\tau_{cr,p} = k_\tau \cdot \sigma_E = 55.5$  N/mm<sup>2</sup> mit  $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 6.8$  N/mm<sup>2</sup>,  $b' = h_w$   
 modifizierte Schlankheit  $\lambda_w = 0.76 \cdot (f_y / \tau_{cr,p}) = 1.923$   
 Abminderungsfaktor  $\chi_w = 1.37 / (0.7 + \lambda_w) = 0.522$  für  $\lambda_w \geq 1.08$  (starre Auflagersteife)  
 Beanspruchbarkeit  $V_{bw,Rd} = (\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 4379.87$  kN  
 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit  $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = 4379.9$  kN <  $\lim V_{b,Rd} \Rightarrow V_{b,Rd} = 4379.9$  kN  
 mit  $\lim V_{b,Rd} = 1 \cdot (\eta \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 10061.64$  kN

##### Beulfeld 2:

Schubbeulen:  $h_w/t_w = 33.33 \leq 72 \cdot \varepsilon / \eta = 48.82$ ,  $h_w = 500.0$  mm,  $t_w = 15.0$  mm **ok**.

Zunächst wird überprüft, ob das Beulfeld schubbeulgefährdet ist. Ist ein genauer Nachweis erforderlich, wird der Schubwiderstand des Beulfelds (Stegs) bestimmt.

##### Gesamtfeld:

Schubbeulen:  $h_w/t_w = 200.00 > 31 \cdot \varepsilon \cdot k_\tau^{1/2} / \eta = 85.14$ ,  $k_\tau = 16.41$ ,  $h_w = 3000.0$  mm  $\Rightarrow$  genauer Nachweis !  
 wirksame Fläche der Flansche ohne durch angrenzende Plattenbauteile gestützte Querschnittsteile  
 $A_{f1} = 320.00$  cm<sup>2</sup> mit  $b_{f1} = 800.0$  mm,  $A_{f2} = 320.00$  cm<sup>2</sup> mit  $b_{f2} = 800.0$  mm  
 Beitrag der Flansche:  
 aufnehmbares Moment alleine der wirksamen Flächen der Flansche:  
 $M_{f,Rd} = f_{N,t} \cdot M_{f,k} / \gamma_{M0} = 28454.4$  kNm  
 mit  $M_{f,k} = \min(A_{f1}, A_{f2}) \cdot (h_w + (t_{f1} + t_{f2}) / 2) \cdot f_y = 34534.4$  kNm  
 $N_{Ed} > 0$ :  $f_{N,t} = 1 - N_{Ed} / ((A_{f1} + A_{f2}) \cdot f_y / \gamma_{M0}) = 0.824$   
 $M_{Ed} \geq M_{f,Rd}$ : Flansche voll ausgenutzt, Beanspruchbarkeit  $V_{bf,Rd} = 0$

Bei der Betrachtung des Gesamtfelds darf bei Zweipunktquerschnitten (z.B. I-Profil) der Traganteil der Flansche berücksichtigt werden. Sind die Flansche durch die BiegeNormalspannungen nicht voll ausgenutzt, dürfen sie die Tragwirkung des Stegs unterstützen. Im vorliegenden Beispiel sind die Flansche voll ausgenutzt.

Nachfolgend wird gezeigt, wie die Beanspruchbarkeit der Flansche berechnet wird, wenn beispielsweise ein Biegemoment von nur 20.000 kNm wirkt.

$M_{Ed} = 20000.00$  kNm <  $M_{f,Rd} = 28454.40$  kNm:  
 Flansch 1:  $t_f = 40.0$  mm,  $b_f = 800.0$  mm  $\leq 2 \cdot 15 \cdot t_f \cdot \varepsilon = 991.3$  mm  
 $c = a \cdot (0.25 + (1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (t_w \cdot h_w^2 \cdot f_y)) = 795.5$  mm  
 Flansch 2:  $t_f = 40.0$  mm,  $b_f = 800.0$  mm  $\leq 2 \cdot 15 \cdot t_f \cdot \varepsilon = 991.3$  mm  
 $c = a \cdot (0.25 + (1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (t_w \cdot h_w^2 \cdot f_y)) = 795.5$  mm  
 Beanspruchbarkeit  $V_{bf,Rd} = (b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (c \cdot \gamma_{M1}) \cdot (1 - (M_{Ed} / M_{f,Rd})^2) = 262.73$  kN

##### Beitrag des Stegs:

EC 3-1-5, Anhang A.3 (Schubbeulwert):  
 mitwirkende Breite der Steife  $b_{sl} = 391.1$  mm, angrenzende Beulfelder  $b_1 = 2500.0$  mm,  $b_2 = 500.0$  mm  
 Schubbeulwert für  $a/h_w = 1.00 < 3$ :  $k_\tau = 4.1 + (6.3 + 0.18 \cdot |a| / (h_w \cdot t_w^3)) / (a/h_w)^2 + 2.2 \cdot (|a| / (h_w \cdot t_w^3))^{1/3} = 16.41$ ,  
 $a = 3000.0$  mm,  $h_w = 3000.0$  mm,  $|a| = 8579.1$  cm<sup>4</sup>  
 kritische Schubbeulspannung  $\tau_{cr,p} = k_\tau \cdot \sigma_E = 77.9$  N/mm<sup>2</sup> mit  $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 4.7$  N/mm<sup>2</sup>,  $b' = h_w$   
 modifizierte Schlankheit  $\lambda_w = 0.76 \cdot (f_y / \tau_{cr,p}) = 1.623$   
 Abminderungsfaktor  $\chi_w = 1.37 / (0.7 + \lambda_w) = 0.590$  für  $\lambda_w \geq 1.08$  (starre Auflagersteife)  
 Beanspruchbarkeit  $V_{bw,Rd} = (\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 4945.45$  kN

Die mitwirkende Breite wird unter Beachtung der angrenzenden Beulfeldbreiten bei offenen Steifen mit  $b_{sl} = 2 \cdot 15 \cdot \varepsilon \cdot t_p + t_{st}$ , bei geschlossenen Steifen mit  $b_{sl} = 4 \cdot 15 \cdot \varepsilon \cdot t_p$  berechnet.

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit  $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 4945.4$  kN <  $\lim V_{b,Rd}$   
 mit  $\lim V_{b,Rd} = 1 \cdot (\eta \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 10061.64$  kN  
 Traglasten  $V_{b,Rd,min} = 4379.9$  kN,  $V_{bw,Rd,min} = 4379.9$  kN  
 Nachweis:  $V_{Ed} / V_{b,Rd,min} = 0.785 < 1$  **ok**.

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit für das Gesamtfeld ist größer als für Beulfeld 1, so dass sich die maßgebende Traglast ergibt zu  $V_{b,Rd,min} = V_{b,Rd,1}$ .

### 3.2.1.3.1.3

### Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft

Der Nachweis der M-N-V-Interaktion wird anhand des zweiten Lastkollektivs (s.o.) erläutert. Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen Erläuterungen (Abs. 4.6, S. 38) beschrieben.

#### Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft

Ausnutzung aus Schubbeulen des Stegs  $\eta_3 = V_{Ed}/V_{bW,Rd,min} = 0.751 > 0.5$ ,  $V_{bW,Rd,min} = 4379.9 \text{ kN}$

Ausnutzung aus Plattenbeulen:

$$M_{pl,Rd} = f_{N,pl} \cdot W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 48493.1 \text{ kNm}, \quad W_{pl} = 136600.3 \text{ cm}^3$$

$$\text{mit } N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 40913.75 \text{ kN}, \quad N_{c,lim} = \min(0.25 \cdot N_{pl,Rd}, 0.5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0}) = 7987.50 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq N_{c,lim}: \quad f_{N,pl} = 1$$

$$M_{f,Rd} = f_{N,t} \cdot M_{f,k} / \gamma_{M0} = 28454.4 \text{ kNm}$$

$$\text{mit } M_{f,k} = \min(A_{f1}, A_{f2}) \cdot (h_w + (t_{f1} + t_{f2})/2) \cdot f_y = 34534.4 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} > 0: \quad f_{N,t} = 1 - N_{Ed} / ((A_{f1} + A_{f2}) \cdot f_y / \gamma_{M0}) = 0.824$$

$$\text{Ausnutzung aus Plattenbeulen } \eta_1 = M_{Ed}/M_{pl,Rd} = 0.663 > \eta_{1,lim} = M_{f,Rd}/M_{pl,Rd} = 0.587$$

$$\text{Nachweis: } \eta_1 + (1 - \eta_{1,lim}) \cdot (2 \cdot \eta_3 - 1)^2 = 0.767 < 1 \quad \text{ok.}$$

Zunächst wird die nur auf den Steg bezogene Tragfähigkeit aus Schubbeulen  $\eta_3$  berechnet. Ist diese  $> 0.5$ , muss die gleichzeitige Wirkung von Schub, Biegemoment und Normalkraft berücksichtigt werden.

Das plastische Widerstandsmoment wird mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche und der vollen Querschnittsfläche des Stegs ermittelt.

### 3.2.1.3.2

### Methode der reduzierten Spannungen

Der Nachweis wird anhand des dritten Lastkollektivs (s.o.) erläutert. Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen Erläuterungen (Abs. 4.7, S. 39) beschrieben.

Hier soll - in Ergänzung zum o.a. Beispiel - der Berechnungsablauf dargestellt werden, wenn Schubverzerrung zu berücksichtigen ist. Für eine mittragende Trägerlänge von 10 m ergibt sich analog

#### Schubverzerrung

Flansch oben = Flansch unten:

$$b_0 = b_f/2 = 400.0 \text{ mm} \geq L_e/50 = 200.0 \text{ mm};$$

$$\text{Schubverzerrung: } \alpha_0 = (1 + A_{sl}/(b_0 \cdot t))^2 = 1.000, \quad A_{sl} = 0.00 \text{ cm}^2 \Rightarrow$$

$$\dots \kappa = \alpha_0 \cdot b_0 / L_e = 0.040$$

$$\text{für } 0.02 < \kappa \leq 0.70: \quad \beta_1 = 1 / (1 + 6.4 \cdot \kappa^2) = 0.990,$$

$$\dots \beta_2 = 1 / (1 + 6 \cdot (\kappa - 1 / (2500 \cdot \kappa) + 1.6 \cdot \kappa^2)) = 0.837: \quad \beta = \beta_2 = 0.837$$

$$\text{Faktor } \beta_{ult} = \beta^\kappa = 0.993, \quad \beta = 0.84$$

$$\text{wirksame Breite } b_{eff} = 2 \cdot \beta_{ult} \cdot b_0 = 794.3 \text{ mm}$$

$$\text{Ersatzbreiten aus Schubverzerrung } b_{f0} = 794.3 \text{ mm}, \quad b_{fu} = 794.3 \text{ mm}$$

**Schubverzerrung** ist sowohl für den Zug- als auch den Druckflansch zu berechnen und liefert wirksame Breiten, die beim Nachweis der Beulsicherheit zu Grunde zu legen sind. Aus Kompatibilitätsgründen wird im Folgenden nicht mit Ersatzbreiten gerechnet.

Da die Beulwerte mit dem **pcae**-eigenen **#H**-Werkzeug ermittelt werden und bei der **Methode der reduzierten Spannungen** grundsätzlich eine kombinierte Beanspruchung vorliegt, können die Beulwerte vorab berechnet werden

#### Beulwerte (#H-Werkzeug)

$$\text{Gesamtfeld: } \alpha_{cr} = 0.817$$

$$\text{Einzelfelder: } \alpha_{cr,1} = 0.619, \quad \alpha_{cr,2} = 2.660$$

Der Beulnachweis wird für die Flansche und den Steg getrennt geführt, da das schwächste Bauteil die Gesamttragfähigkeit bestimmt. Für den gedrückten Flansch werden die Laststeigerungsfaktoren für Spannungen und Stabilität n. EC 3-1-5 berechnet und der Nachweis geführt. Schubspannungen werden nicht angesetzt.

#### Reduzierte Spannungen

$$\text{Spannungen in den Gurtblechen } \sigma_o = -240.2 \text{ N/mm}^2, \quad \sigma_u = 290.7 \text{ N/mm}^2$$

Flansch oben:

$$\text{Beulspannungen } \sigma_{Ed} \leq 0 \Rightarrow \text{Nachweis nicht erforderlich}$$

Flansch unten:

$$\text{Beulspannungen } \sigma_{Ed} = \sigma_{Ed}' = 290.7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Laststeigerungsfaktor für Spannungen } \alpha_{ult} = 1 / ((\sigma_{Ed}'/f_y)^2)^{1/2} = 1.221$$

$$\text{einseitig gestütztes Blechfeld: Beulwert } k_\sigma = 0.43, \quad \psi = 1.000$$

$$\text{kritische Beulspannung } \sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 850.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{mit } \sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 1971.2 \text{ N/mm}^2, \quad b' = 392.5 \text{ mm}$$

$$\text{Laststeigerungsfaktor für Stabilität } \alpha_{cr} = 1 / ((1 + \psi) / (4 \cdot \alpha_{cr,x}) + \dots)$$

$$\dots + (((1 + \psi) / (4 \cdot \alpha_{cr,x}))^2 + (1 - \psi) / (2 \cdot \alpha_{cr,x}^2) + 1 / \alpha_{cr,x}^2)^{1/2} = 2.925$$

$$\text{mit } \alpha_{cr,x} = \sigma_{cr,p} / \sigma_{Ed}' = 2.925, \quad \alpha_{cr,z} = 0$$

$$\text{bezogener Schlankheitsgrad } \lambda_p = \lambda_c = \lambda_w = (\alpha_{ult} / \alpha_{cr})^{1/2} = 0.646$$

Plattenbeulen:

$$\text{Abminderungsfaktor } \rho = 1 \quad \text{für } \lambda_p < 0.748, \quad \psi = 1.000$$

$$\text{Grenzbeulspannung } \sigma_{Rd} = \rho \cdot f_y / \gamma_{M1} = 322.7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Nachweis: } \sigma_{Ed} / \sigma_{Rd} = 0.901 < 1 \quad \text{ok.}$$



Steg:

Spannungen am Blechrand  $\sigma_o = -236.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_u = 287.2 \text{ N/mm}^2$ ,  $\tau = 73.1 \text{ N/mm}^2$

Beulfeld 1:

Spannungen am Beulfeld  $\sigma_o = -236.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_u = 199.9 \text{ N/mm}^2$ ,  $\tau = 73.1 \text{ N/mm}^2$

Beulspannungen  $\sigma_{Ed} = -236.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{Ed'} = 236.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\tau_{Ed} = 73.1 \text{ N/mm}^2$

Laststeigerungsfaktor für Spannungen  $\alpha_{ult} = 1 / ((\sigma_{Ed}/f_y)^2 + 3 \cdot (\tau_{Ed}/f_y)^2)^{1/2} = 1.322$

Laststeigerungsfaktor für Stabilität  $\alpha_{cr} = 0.619$  (4H-Werkzeug)

bezogener Schlankheitsgrad  $\lambda_p = \lambda_c = \lambda_w = (\alpha_{ult}/\alpha_{cr})^{1/2} = 1.462$

Plattenbeulen:

Abminderungsfaktor  $\rho = (\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)) / \lambda_p^2 = 0.637 \leq 1$  für  $\lambda_p > 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.887$ ,  $\psi = -1.184$

Schubbeulen:

Abminderungsfaktor  $\chi_w = 1.37 / (0.7 + \lambda_w) = 0.634$  für  $\lambda_w \geq 1.08$  (starre Auflagersteife)

Grenzbeulspannungen  $\sigma_{Rd} = \rho \cdot f_y / \gamma_{M1} = 205.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\tau_{Rd} = \chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1} = 204.5 \text{ N/mm}^2$

Nachweis:  $((\sigma_{Ed}/\sigma_{Rd})^2 + 3 \cdot (\tau_{Ed}/\tau_{Rd})^2)^{1/2} = 1.708^{1/2} = 1.307 > 1$  **nicht ok. !!**

Der Steg erfährt Spannungen aus Normalkraft, Biegemoment, Querkraft und ggf. Querlast. Der Laststeigerungsfaktor für Stabilität wird mit Hilfe des 4H-Werkzeugs für ein unausgesteiftes Beulfeld ermittelt. Für Beulfeld 2 erfolgt der Berechnungsablauf analog.

Gesamtfeld:

Spannungen am Beulfeld  $\sigma_o = -236.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_u = 287.2 \text{ N/mm}^2$ ,  $\tau = 73.1 \text{ N/mm}^2$

maßgebende Steife 1 mit  $b_1 = 2500.0 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 500.0 \text{ mm}$

Beulspannungen  $\sigma_{Ed} = \sigma_{Ed'} = 287.2 \text{ N/mm}^2$ ,  $\tau_{Ed} = 73.1 \text{ N/mm}^2$

Laststeigerungsfaktor für Spannungen  $\alpha_{ult} = 1 / ((\sigma_{Ed}/f_y)^2 + 3 \cdot (\tau_{Ed}/f_y)^2)^{1/2} = 1.131$

Laststeigerungsfaktor für Stabilität  $\alpha_{cr} = 0.817$  (4H-Werkzeug)

bezogener Schlankheitsgrad  $\lambda_p = \lambda_c = \lambda_w = (\alpha_{ult}/\alpha_{cr})^{1/2} = 1.177$

Plattenbeulen:

Abminderungsfaktor  $\rho = (\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)) / \lambda_p^2 = 0.763 \leq 1$  für  $\lambda_p > 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.861$ ,  $\psi = -0.824$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten:

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{Ed'} = 234.6 \text{ N/mm}^2$

mitwirkende Breite der Steife  $b_{sl} = 750.5 \text{ mm}$

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,c,sl} = (\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl}) / (A_{sl} \cdot a^2) = 1359.1 \text{ N/mm}^2$ ,  $I_{sl} = 10331.7 \text{ cm}^4$ ,  $A_{sl} = 175.1 \text{ cm}^2$

$\Rightarrow \sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,c,sl} \cdot \sigma_1 / \sigma_{sl} = 1952.8 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_1 = 287.2 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{sl} = 199.9 \text{ N/mm}^2$

Abminderungsfaktor  $\chi_c = 1 / (\Phi + (\Phi^2 - \lambda^2)^{1/2}) = 0.420 \leq 1$  für  $\lambda_c > 0.2$

mit  $\Phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 1.480$ ,  $\alpha = \alpha' + 0.09 / (i/e) = 0.590$ ,  $\alpha' = 0.49$  für Knicklinie 'c',

$e = 85.2 \text{ mm}$ ,  $i = (I_{sl}/A_{sl})^{1/2} = 76.8 \text{ mm}$ ,  $I_{sl} = 10331.7 \text{ cm}^4$ ,  $A_{sl} = 175.1 \text{ cm}^2$

endgültiger Abminderungsfaktor  $\rho = (\rho \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.420$  mit  $\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} - 1 = -0.880 < 0 \Rightarrow \xi = 0$

Schubbeulen:

Abminderungsfaktor  $\chi_w = 1.37 / (0.7 + \lambda_w) = 0.730$  für  $\lambda_w \geq 1.08$  (starre Auflagersteife)

Grenzbeulspannungen  $\sigma_{Rd} = \rho \cdot f_y / \gamma_{M1} = 135.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\tau_{Rd} = \chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1} = 235.6 \text{ N/mm}^2$

Nachweis:  $((\sigma_{Ed}/\sigma_{Rd})^2 + 3 \cdot (\tau_{Ed}/\tau_{Rd})^2)^{1/2} = 4.770^{1/2} = 2.184 > 1$  **nicht ok. !!**

Der Nachweis für das Gesamtfeld wird an der maßgebenden dem Druckrand am nächsten gelegenen Steife geführt. Der Laststeigerungsfaktor wird mit Hilfe des 4H-Werkzeugs für ein ausgesteiftes Beulfeld ermittelt.

Der gleiche Wert ergibt sich auch unter Anwendung des Programms EBPlate, Centre Technique Industriel de la Construction Metallique (CTICM), [www.cticm.com](http://www.cticm.com).

Der in der Literatur angegebene Wert kann nicht nachvollzogen werden.

Die Berechnung der mitwirkenden Breite der Steife, die bei der Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten herangezogen wird, erfolgt analog dem Verfahren der wirksamen Fläche, Gesamtfeldbeulen (s.o.).

Der Nachweis des Gesamtfelds führt zur höchsten Ausnutzung; das Gesamtfeld ist damit ausschlaggebend für die Tragfähigkeit des Querschnitts. Die Literaturquelle hingegen weist auf Grund des hohen Laststeigerungsfaktors für das Gesamtfeld das große Einzelbeulfeld als maßgebend aus.

Anschließend wird für offene Querschnitte der Nachweis der Drillknicksteifigkeit für die maßgebende Steife geführt. Ebenso wird überprüft, ob die Voraussetzung, dass flanschinduziertes Stegbeulen ausgeschlossen ist, erfüllt ist.

### 3.2.2

## Beispiel 4 - Querlastbeulen

#### 3.2.2.1

### System

Ein einzelnes Feld wird gegenüber Querbelastung aus Auflagerung bemessen. Es handelt sich um einen geschweißten Blechträger (parametrisiertes I-Profil), der durch eine Längssteife verstärkt ist. Sämtliche Blechteile sind in einheitlicher Stahlgüte ausgeführt, die Materialsicherheitsbeiwerte entsprechen den normativen Vorgaben.

#### Stahlsorte

Stahlgüte S 355

#### Materialsicherheitsbeiwerte

Beanspruchbarkeit von Querschnitten  $\gamma_{M0} = 1.00$

Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen  $\gamma_{M1} = 1.10$

#### Querschnitt

Träger: Profilparameter (I-Profil):

Gesamthöhe  $h = 3080.0$  mm, Stegdicke  $t_w = 15.0$  mm

Flanschbreite  $b_f = 800.0$  mm, Flanschdicke  $t_f = 40.0$  mm

Längssteifen: Anzahl  $n_{st} = 1$

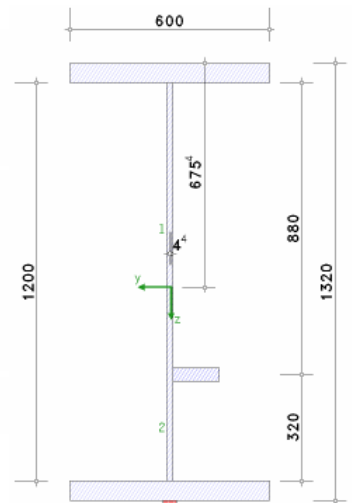
Profilparameter (Flachstahl):

Höhe  $h = 250.0$  mm, Dicke  $t = 25.0$  mm

Abstand der Steife von Oberkante Träger  $d_{st,0} = 2540.0$  mm

#### Belastung

Bemessungswert der vertikalen Einzellast  $F_{z,Ed} = 4000.0$  kN,



#### 3.2.2.2

### Rechenparameter

Das Beulfeld im Steg wird durch starre Quersteifen begrenzt, die die Beulfeldlänge festlegen und in diesem Beispiel nicht überprüft werden.

**Beulnachweise**

Beulfeldlänge  $a$   cm

Nachweisverfahren:

☒ Verfahren der wirksamen Fläche

☐ Methode der reduzierten Spannungen

Nachweisort:

☐ Schubverzerrung / Schubbeulen / Querlastbeulen

☒ Nachweis im Trägerfeld

☐ Nachweis am Zwischenauflager

☐ Nachweis am Trägerende

Sonstiges:

Querlastbeulen

$F_{z,Ed}$   kN

starre Lasteinleitungslänge  $s_s$   mm

auf Außenkante des Untergurts

In diesem Beispiel wird das Querlastbeulen mit dem **Verfahren der wirksamen Fläche** durchgeführt. Der Nachweis erfolgt **im Trägerfeld**, da sich gegenüberliegend kein Gegenauflager zur direkten Aufnahme der Einzellast befindet. In der Aufgabenstellung werden nur die Tragfähigkeiten ermittelt, das Programm *EC3BL* weist jedoch die Ausnutzungen gegenüber einer Einwirkung aus. Daher wird hier eine Querlast von 4.000 kN angesetzt.

#### 3.2.2.3

### Berechnung: Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche - Querlastbeulen

Querlastbeulen wird für das maßgebende Einzelfeld und das Gesamtfeld im Steg untersucht. Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen Erläuterungen (Abs. 4.5, S. 37) beschrieben.

#### Querlastbeulen

Lasteinleitungslänge der Querlast auf dem Beulfeld  $l_{eff} = s_s + 2 \cdot t_{fu} = 720.0$  mm

Einzelfeld 2:

Beulfeld  $a = 2400.0$  mm,  $h_w = 300.0$  mm,  $t_w = 20.0$  mm

Beulwert  $k_F = 6.0 + 2 \cdot (h_w/a)^2 = 6.03$  (Typ (a))

kritische Beullast  $F_{cr} = k_F \cdot \sigma_E \cdot t_w \cdot h_w = 30526.2$  kN,  $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 843.6$  N/mm<sup>2</sup>,  $b' = 300.0$  mm

wirksame Lastausbreitungslänge  $l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + m_1^{1/2}) = 1377.3$  mm,  $m_1 = b_f/t_w = 30.00$

Fließlast  $F_y = f_y \cdot t_w \cdot l_y = 9778.6$  kN

Schlankheitsgrad  $\lambda_F = (F_y/F_{cr})^{1/2} = 0.566$

Abminderungsfaktor  $\chi_F = 0.5/\lambda_F = 0.883$

wirksame Beullänge  $l_{eff} = \chi_F \cdot l_y = 1216.7$  mm

Beulwiderstand  $F_{z,Rd} = f_y \cdot l_{eff} \cdot t_w / \gamma_{M1} = 7853.29$  kN

Nachweis

$F_{z,Ed}/F_{z,Rd} = 0.509 < 1$  ok.

Da der Lastangriff unten erfolgt, ist das belastete Einzelfeld 2 nachzuweisen. Anschließend wird das Gesamtfeld mit der am meisten belasteten Längssteife untersucht. Der Beulwert des unversteiften Beulfelds wird um den Anteil der Längssteife erhöht.

Gesamtfeld:

Beulfeld  $a = 2400.0 \text{ mm}$ ,  $h_w = 1200.0 \text{ mm}$ ,  $t_w = 20.0 \text{ mm}$

Beulwert  $k_F = 6.0 + 2 \cdot (h_w/a)^2 = 6.50$  (Typ (a))

mitwirkende Breite der Steife  $b_{sl} = 528.2 \text{ mm}$ , angrenzende Beulfelder  $b_1 = 300.0 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 860.0 \text{ mm}$

Steifenanteil  $k_{F,sl} = (5.44 \cdot b_1/a - 0.21) \cdot \gamma_s^{1/2} = 2.87$ ,  $\gamma_s = \gamma_{s,1} = 37.38$

wobei  $\gamma_{s,1} = 10.9 \cdot I_{sl,1}/(h_w \cdot t_w^3) = 37.38 < \gamma_{s,2} = 13 \cdot (a/h_w)^2 + 210 \cdot (0.3 \cdot b_1/a) = 140.75$ ,  $I_{sl,1} = 3292.2 \text{ cm}^4$

Beulwert mit Steifenanteil  $k_F = 6.50 + 2.87 = 9.37$

Das Trägheitsmoment der Steife wird unter Berücksichtigung der mitwirkenden Plattenbreite bestimmt. In der Literaturquelle wird das Trägheitsmoment der Längssteife  $I_{sl,1}$  für die horizontale Achse berechnet, es ist jedoch die vertikale Achse maßgebend (analog Querkraftbeulen).

Der nationale Anhang für Deutschland empfiehlt, zur Berechnung der kritischen Beullast den Beulwert mit Steifenanteil wie folgt anzupassen

$k_{F,1} = k_F = 9.37$

$k_{F,2} = (0.8 \cdot (s_s + 2 \cdot t_f)/a + 0.6) \cdot (a/b_1)^{0.6} \cdot (s_s + 2 \cdot t_f)/a + 0.5 = 3.45$

$F_{cr,1} = k_{F,1} \cdot \sigma_E \cdot t_w \cdot h_w = 11860.6 \text{ kN}$ ,  $\sigma_{E,1} = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 52.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $b' = h_w$

$F_{cr,2} = k_{F,2} \cdot \sigma_E \cdot t_w \cdot b_1 = 17484.2 \text{ kN}$ ,  $\sigma_{E,2} = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 843.6 \text{ N/mm}^2$ ,  $b' = b_1$

$F_{cr} = F_{cr,1} \cdot F_{cr,2} / (F_{cr,1} + F_{cr,2}) = 7066.8 \text{ kN}$

Beulwert  $k_F = F_{cr} / (\sigma_E \cdot t_w \cdot h_w) = 5.58$ ,  $\sigma_E = \sigma_{E,1}$

In der Literaturquelle wird der Beulwert nicht nach den Vorgaben des nationalen Anhangs für Deutschland angepasst. Dadurch ergibt sich eine wesentlich geringere kritische Beullast.

Die Berechnung des Abminderungsfaktors erfolgt ebenfalls nach dem nationalen Anhang für Deutschland

kritische Beullast  $F_{cr} = k_F \cdot \sigma_E \cdot t_w \cdot h_w = 7068.0 \text{ kN}$ ,  $\sigma_E = \sigma_{E,1}$

wirksame Lastausbreitungslänge  $l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + m_1^{1/2}) = 1377.3 \text{ mm}$ ,  $m_1 = b_1/t_w = 30.00$

Fließlast  $F_y = f_y \cdot t_w \cdot l_y = 9778.6 \text{ kN}$

Schlankheitsgrad  $\lambda_F = (F_y/F_{cr})^{1/2} = 1.176$

Abminderungsfaktor  $\chi_F = 1 / (\varphi_p + (\varphi_p^2 - \lambda_F^2)^{1/2}) = 0.696$  mit  $\varphi_p = (1 + \alpha_p \cdot (\lambda_F - \lambda_{p0}) + \lambda_F) / 2 = 1.13$ ,  $\alpha_p = 0.21$ ,  $\lambda_{p0} = 0.8$

wirksame Beullänge  $L_{eff} = \chi_F \cdot l_y = 958.9 \text{ mm}$

Beulwiderstand  $F_{z,Rd} = f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w / \gamma_{M1} = 6189.20 \text{ kN}$

Nachweis

$F_{z,Ed} / F_{z,Rd} = 0.646 < 1$  **ok.**

Die Methode der reduzierten Spannungen ist konzipiert worden für die Anwendung von Software zur Berechnung der Beulwerte. Bei der Handrechnung nach EC 3-1-5 ergibt sich eine hohe Ausnutzung

Reduzierte Spannungen

Steg:

Spannungen am Blechrand  $\sigma_o = 0.0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_u = 0.0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{zu} = 277.8 \text{ N/mm}^2$

Gesamtfeld:

maßgebende Steife 1 mit  $b_1 = 320.0 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 880.0 \text{ mm}$ ,  $\sigma_{sl} = 0.0 \text{ N/mm}^2$

Beulspannungen  $\sigma_{z,Ed} = 277.8 \text{ N/mm}^2$

Laststeigerungsfaktor für Spannungen  $\alpha_{ult} = 1 / ((\sigma_{z,Ed}/f_y)^2)^{1/2} = 1.278$

Beulwert  $k_F = 6.0 + 2 \cdot (h_w/a)^2 = 6.50$  (Typ (a))

mitwirkende Breite der Steife  $b_{sl} = 528.2 \text{ mm}$ , angrenzende Beulfelder  $b_1 = 320.0 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 880.0 \text{ mm}$

Steifenanteil  $k_{F,sl} = (5.44 \cdot b_1/a - 0.21) \cdot \gamma_s^{1/2} = 3.15$ ,  $\gamma_s = \gamma_{s,1} = 37.45$

wobei  $\gamma_{s,1} = 10.9 \cdot I_{sl,1}/(h_w \cdot t_w^3) = 37.45 < \gamma_{s,2} = 13 \cdot (a/h_w)^2 + 210 \cdot (0.3 \cdot b_1/a) = 139.00$ ,  $I_{sl,1} = 3292.2 \text{ cm}^4$

Beulwert mit Steifenanteil  $k_F = 6.50 + 3.15 = 9.65$

kritische elastische Querbeulspannung  $\sigma_{cr,z} = k_F \cdot \sigma_E = 509.0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_E = 52.7 \text{ N/mm}^2$

Laststeigerungsfaktor für Stabilität  $\alpha_{cr} = 1 / [(1 + \psi_z) / (4 \cdot \alpha_{cr,z}) + (((1 + \psi_z) / (4 \cdot \alpha_{cr,z}))^2)^{1/2}] = 1.832$

mit  $\alpha_{cr,z} = \sigma_{cr,z} / \sigma_{z,Ed} = 1.832$ ,  $\psi_z = 1.00$

bezogener Schlankheitsgrad  $\lambda_p = \lambda_c = \lambda_w = (\alpha_{ult} / \alpha_{cr})^{1/2} = 0.835$

Plattenbeulen bei Querspannungen:

Abminderungsfaktor  $\rho_z = 1 / (\varphi_p + (\varphi_p^2 - \lambda_p^2)^{1/2}) = 0.946$  mit  $\varphi_p = (1 + \alpha_p \cdot (\lambda_p - \lambda_{p0}) + \lambda_p) / 2 = 0.924$ ,  $\alpha_p = 0.34$ ,  $\lambda_{p0} = 0.8$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten:

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{z,Ed} = 509.0 \text{ N/mm}^2$

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,c} = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 52.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $b' = 1200.0 \text{ mm}$

Abminderungsfaktor  $\chi_c = 1 / (\Phi + (\Phi^2 - \lambda_c^2)^{1/2}) = 0.775 \leq 1$  für  $\lambda_c > 0.2$

mit  $\Phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda_c - 0.2) + \lambda_c^2) = 0.915$ ,  $\alpha = 0.21$  für Knicklinie 'a'

endgültiger Abminderungsfaktor  $\rho_z = (\rho_z \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.946$  mit  $\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} = 8.654 > 1 \Rightarrow \xi = 1$

Grenzbeulspannung  $\sigma_{z,Rd} = \rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1} = 305.3 \text{ N/mm}^2$

Nachweis:  $((\sigma_{z,Ed} / \sigma_{z,Rd})^2)^{1/2} = 0.828^{1/2} = 0.910 < 1$  **ok.**

Wird dagegen der Beulwert mit dem *#H*-Werkzeug ermittelt, ist das Ergebnis erheblich wirtschaftlicher

Gesamtfeld:

maßgebende Steife 1 mit  $b_1 = 320.0 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 880.0 \text{ mm}$ ,  $\sigma_{sl} = 0.0 \text{ N/mm}^2$

Beulspannungen  $\sigma_{z,Ed} = 277.8 \text{ N/mm}^2$

Laststeigerungsfaktor für Spannungen  $\alpha_{ult} = 1 / ((\sigma_{z,Ed}/f_y)^2)^{1/2} = 1.278$

Laststeigerungsfaktor für Stabilität  $\alpha_{cr} = 2.361$  (*4H*-Werkzeug)

bezogener Schlankheitsgrad  $\lambda_p = \lambda_c = \lambda_w = (\alpha_{ult}/\alpha_{cr})^{1/2} = 0.736$

Plattenbeulen bei Querspannungen:

Abminderungsfaktor  $\rho_z = 1/(\varphi_p + (\varphi_p^2 - \lambda_p)^{1/2}) = 1.167$  mit  $\varphi_p = (1 + \alpha_p \cdot (\lambda_p - \lambda_{p0}) + \lambda_p)/2 = 0.857$ ,  $\alpha_p = 0.34$ ,  $\lambda_{p0} = 0.8$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten:

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{z,Ed} = 655.8 \text{ N/mm}^2$

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,c} = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 52.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $b' = 1200.0 \text{ mm}$

Abminderungsfaktor  $\chi_c = 1/(\Phi + (\Phi^2 - \lambda_c^2)^{1/2}) = 0.830 \leq 1$  für  $\lambda_c > 0.2$

mit  $\Phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.827$ ,  $\alpha = 0.21$  für Knicklinie 'a'

endgültiger Abminderungsfaktor  $\rho_z = (\rho_z \cdot \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 1.167$  mit  $\xi = \sigma_{cr,p}/\sigma_{cr,c} - 1 = 11.438 > 1 \Rightarrow \xi = 1$

Grenzbeulspannung  $\sigma_{z,Rd} = \rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1} = 376.6 \text{ N/mm}^2$

Nachweis:  $((\sigma_{z,Ed}/\sigma_{z,Rd})^2)^{1/2} = 0.544^{1/2} = 0.738 < 1$  **ok**.

### 3.2.3

#### Nachweisergebnisse



Ist der Button **auto** in der Kopfzeile des Programmfensters angeschaltet, werden die Berechnungsergebnisse permanent abgeglichen und das Endresultat online am Bildschirm dargestellt.

Maximale Ausnutzung

$U_{max} = 0.882 \leq 1$  **ok**.



Je nach Nachweisoptionen und Anzahl an Lastkollektiven kann die Berechnung und damit der Bildaufbau sehr lange dauern. **pcae** empfiehlt, den Button **auto** zunächst **auszuschalten**.

### 3.2.4

#### Vorgehensweise bei drei und mehr Steifen

Bei der Berechnung der Beulspannungen von Beulfeldern mit mehr als zwei Längssteifen nach EC 3-1-5, Anh. A, können die Steifen entweder diskret oder über eine verschmierte Steifigkeit der äquivalenten orthogonalen Platte berücksichtigt werden.

⊕ Beulwerte nach EC 3-1-5 ermitteln

☒ Gesamtfeld als äquivalente orthotrope Platte (wenn  $n_{st} \geq 3$ )

Analog zur Beulspannung für die Plattenbeuluntersuchung mit reiner Druckkraft ergibt sich für das ausgesteifte Gesamtfeld des äquivalenten orthogonalen Stegblechs

Plattenbeulen:

EC 3-1-5, Anhang A.1 (Äquivalente orthotrope Platte):

Beulwert  $k_\sigma = 2 \cdot ((1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1) / (\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)) = 311.99$ ,  $\alpha = 1.00$ ,  $\gamma = 525.66$ ,  $\delta = 0.69$ ,  $\psi = 1.000$

kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 1480.4 \text{ N/mm}^2$  mit  $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 4.7 \text{ N/mm}^2$ ,  $b' = h_w$

Beulschlankheitsgrad  $\lambda_p = (\beta_A \cdot f_y / \sigma_{cr,p})^{1/2} = 0.490$ ,  $\beta_A = A_{sl,eff} / A_{sl} = 1.000$

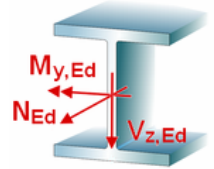
Abminderungsfaktor  $\rho = 1$  für  $\lambda_p < 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.673$ ,  $\psi = 1.000$

### 3.3

## Schnittgrößen



Das dritte Register beinhaltet die Maske zur Eingabe der **Bemessungs-schnittgrößen** sowie eine Übersicht der Querschnittsausnutzungen je Lastkombination.



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

Es können bis zu 10.000 Schnittgrößenkombinationen eingegeben werden.

Beurfeld			Bezeichnung	Zeile löschen Zeile duplizieren neue Zeile anhängen
N <sub>Ed</sub> kN	M <sub>y,Ed</sub> kNm	V <sub>z,Ed</sub> kN		
-4000.0	-33760.0	3437.5	Platten- + Schubbeulen (Kap. 5.1.1-4)	

### 3.3.1

## Schnittgrößen importieren

Detailnachweisprogramme zur Bemessung von Anschlüssen (Träger/Stütze, Träger/Träger), Fußpunkten (Stütze/Fundament) etc. benötigen Schnittgrößenkombinationen, die häufig von einem Tragwerksprogramm zur Verfügung gestellt werden. Dabei handelt es sich i.d.R. um eine Vielzahl von Kombinationen, die im betrachteten Bemessungsschnitt des übergeordneten Tragwerkprogramms vorliegen und in das Anschlussprogramm übernommen werden sollen.

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



### 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 **Einflese**-Buttons gegeben.

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

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

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

### Import aus einem //-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.

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 auch 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.

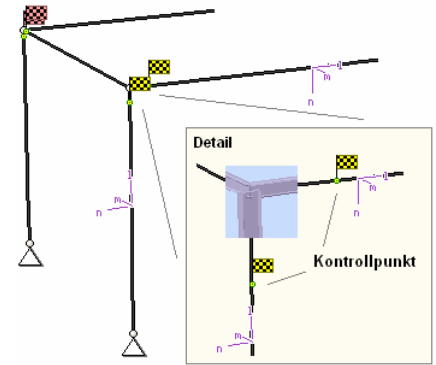


Zunächst sind in dem exportierenden #-Programm (z.B. #-FRAP) die Stellen zu kennzeichnen, deren Schnittgrößen beim nächsten Rechenlauf exportiert, d.h. für den Import bereitgestellt, werden sollen.

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. #-BETON, #-EC3SA, #-EC3BT, #-EC3RE, #-EC3GT, #-EC3TT, #-EC3BL etc.) 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	Stab	bei s	Material
Schnitt 1	Stab 3	bei s = 0.18 m	Stahlriegel, Anschl. 1
Schnitt 2	Stab 5	bei s = 0.00 m	Stahlriegel, Anschl. 2
Schnitt 3	Stab 7	bei s = 2.00 m	Stahlbetonriegel
Schnitt 4	Stab 9	bei s = 4.00 m	Stahlstütze, Anschl. 2
Schnitt 5	Stab 10	bei s = 3.88 m	Stahlstütze, Anschl. 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. 1						
Material: Stahl, Querschnitt: Profil: IPE240						
	N	Vm	Vn	T	Mm	Mn
	kN	kN	kN	kNm	kNm	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 Vz	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
max Vz	-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 Mz	-17.44	0.88	-7.61	0.00	-28.68	4.33
max Mz	-15.93	25.18	-24.26	-0.01	34.14	17.91
Schnitt 2: Stab 5 bei s = 0.00 m						
Stahlriegel, Anschl. 2						
Schnitt 3: Stab 7 bei s = 2.00 m						
Stahlbetonriegel						
Schnitt 4: Stab 9 bei s = 4.00 m						
Stahlstütze, Anschl. 2						
Schnitt 5: Stab 10 bei s = 3.88 m						
Stahlstütze, Anschl. 1						
Schnitt 6: Stab 11 bei s = 0.00 m						
Stahlbetonstütze						

In **EC3SA** ist der komplette verfügbare Schnittgrößensatz importierbar. Die anderen Programme **EC3BL**, **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!

### 3.3.2

#### Nachweisergebnisse



Ist der Button **auto** in der Kopfzeile des Programmfensters angeschaltet, werden permanent die Berechnungsergebnisse abgeglichen und je Lastkollektiv online am Bildschirm dargestellt.

Beulfeld				Ausnutzung
	$N_{Ed}$ kN	$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	U -
	-4000.0	-33760.0	3437.5	0.882
	-4000.0	-32150.0	3288.0	0.846
	-4000.0	-32750.0	3290.0	0.859

▶ maßgeb. Lk

Das maßgebende Lastkollektiv mit der höchsten **Ausnutzung** oder einer Fehlermeldung wird gekennzeichnet. Über den Link **maßgeb. Lk** kann der Statikausdruck dieses Lastkollektivs direkt eingesehen werden.



Je nach Nachweisoptionen und Anzahl an Lastkollektiven kann die Berechnung und damit der Bildaufbau sehr lange dauern. **pcae** empfiehlt, den Button **auto** zunächst **aus**zuschalten.

## 4 allgemeine Erläuterungen zur Theorie Blechbeulen EC 3-1-5

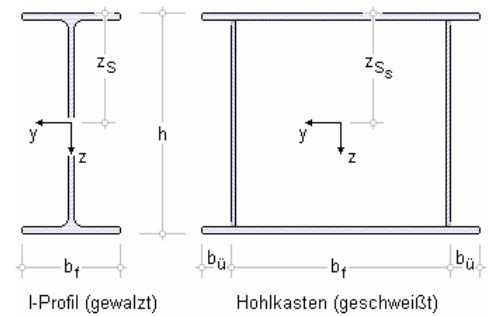
### 4.1 Einleitung

Im Stahlbau werden die Stabilitätsfälle *Biegeknicken* / *Biegedrillknicken* und *Plattenbeulen* / *Schalenbeulen* unterschieden.

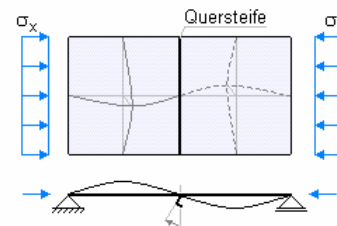
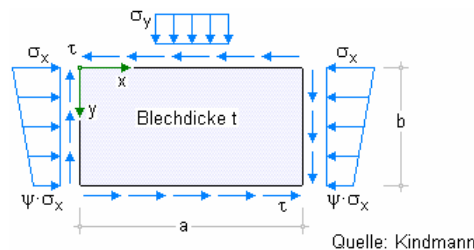
Biegeknicken / Biegedrillknicken treten bei stabförmigen, schlanken Bauteilen unter hoher Druckbeanspruchung auf. Plattenbeulen wird bei ebenen Flächentragwerken durch Druckspannungen und/oder Schubspannungen verursacht. Die Beanspruchungen entsprechen dabei den Schnittgrößen von Scheiben, die Auswirkungen den Durchbiegungen von Platten.

Unter Schalenbeulen wird das Stabilitätsversagen gekrümmter Flächentragwerke (z.B. Kreiszylinder) verstanden.

Im Programm *##-EC3BL* wird das Plattenbeulen von Querschnitten mit ebenen Teilflächen (Blechen) untersucht.



Beulgefährdet sind Querschnitte, die durch Biegemomente, Drucknormalkräfte und/oder Querkkräfte belastet sind und bei großen Außenabmessungen eine geringe Blechdicke oder eine höherfeste Stahlgüte aufweisen.

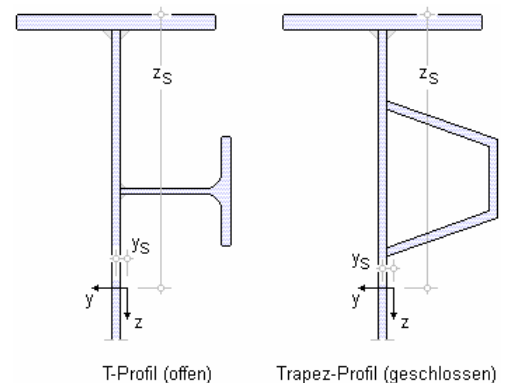


Zur Verstärkung können Längs- und/oder Quersteifen angeschweißt werden, die das Blech in einzelne Beulfelder aufteilen. Zu untersuchen sind sowohl die Einzelfelder als auch das Gesamtfeld. Es wird vorausgesetzt, dass die Quersteifen derart ausgebildet und angeordnet sind, dass sie als seitliche Auflager eines Beulfelds dienen.

Längssteifen wirken nur im Druckbereich des Beulfelds, sind dadurch allerdings selbst beulgefährdet. Es muss sichergestellt sein, dass sie eine ausreichende Beulsicherheit aufweisen.

Im Programm *##-EC3BL* werden nur diskrete (keine verschmerten) Steifen behandelt.

Die Beulsicherheitsnachweise werden nach DIN EN 1993-1-5 geführt, wobei das *Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche* (EC 3-1-5, 4-7) und die *Methode der reduzierten Spannungen* (EC 3-1-5, 10) ggf. unter Berücksichtigung von Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (s. EC 3-1-5, 3.3) im Programm umgesetzt wurden.





## 4.2

## Schubverzerrungen

Bei Biegeträgern mit breiten Flanschen bleibt der Querschnitt infolge der Schubverzerrung nicht eben und es kann sich aufgrund dieser Verwölbung keine konstante Verteilung der Biegeormalspannungen über die Breite des Gurts einstellen.

Um eine Anwendung der Bernoulli-Hypothese (Ebenbleiben der Querschnitte) zu ermöglichen, wird eine mittragende Breite eingeführt, über die die Maximalspannung konstant ist.

In Abhängigkeit der mittragenden Länge  $L_e$  wird ein Abminderungsfaktor  $\beta$  ermittelt, der die geometrische Gurtbreite  $b_0$  reduziert.

Der Einfluss der Schubverzerrung darf jedoch vernachlässigt werden, falls gilt  $b_0 < L_e/50$ .

Der Abminderungsfaktor  $\beta$  für die mittragende Breite wird nach EC 3-1-5, Tab. 3.1, bestimmt.

EC 3-1-5, Tab. 3.1 - Abminderungsfaktor $\beta$ für die mittragende Breite		
$\kappa \leq 0.02$ .....	$\beta = 1.0$	
$0.02 < \kappa \leq 0.70$ ... Feldmoment .....	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6.4 \cdot \kappa^2}$	
Stützmoment .....	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6.0 \cdot \left( \kappa - \frac{1}{2 \cdot 500 \cdot \kappa} \right) + 1.6 \cdot \kappa^2}$	
$\kappa > 0.70$ .....	Feldmoment .....	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5.9 \cdot \kappa}$
Stützmoment .....	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8.6 \cdot \kappa}$	
alle $\kappa$ .....	Endauflager .....	$\beta_0 = (0.55 + 0.025/\kappa) \cdot \beta_1$ , jedoch $\beta_0 < \beta_1$
	Kragarm .....	$\beta = \beta_2$ am Auflager und am Kragarmende
$\kappa = \alpha_0 \cdot b_0 / L_e$ ... mit ... $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 \cdot t}}$ ... und ... $A_{sl}$ = Querschnittsfläche aller Längssteifen innerhalb der Breite $b_0$		

Daraus ergibt sich die **effektive Querschnittsfläche**

- unter Voraussetzung elastischen Werkstoffverhaltens (empfohlen für die Methode der reduzierten Spannungen) zu

$$A_{eff} = \beta \cdot A_c$$

- unter Voraussetzung elastischen Werkstoffverhaltens und unter Berücksichtigung des Plattenbeulens zu

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta_{ult}$$

- unter Voraussetzung elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens und unter Berücksichtigung des Plattenbeulens sowie der Begrenzung plastischer Dehnungen (empfohlen für das Verfahren mit wirksamen Breiten) zu

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^k \geq A_{c,eff} \cdot \beta \quad \text{... mit ...}$$

$A_{c,eff}$  wirksame Querschnittsfläche eines Druckgurts unter Berücksichtigung von Plattenbeulen, bei Zuggurten gilt  $A_{eff} = A_c$

$$\beta_{ult} = \beta \text{ nach EC 3-1-5, Tab. 3.1, mit } \alpha_0 = \sqrt{\frac{A_{c,eff}}{b_0 \cdot t_f}} \quad \text{... und ... } t_f = \text{Gurtblechdicke}$$

$\kappa$  nach EC 3-1-5, Tab. 3.1

### 4.3

## Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche

Das einwirkende Spannungsfeld wird in die Beulfälle Längs-, Schub- und Querspannungsbeanspruchung zerlegt, für die dann die Beulnachweise geführt werden.

Diese Einzelnachweise erfassen das jeweilige überkritische Tragverhalten systematisch und sehr genau, da sie z.B. auch die Spannungumlagerung von hoch beanspruchten Querschnittsteilen in gering ausgenutzte Querschnittsteile berücksichtigen.

Die Einzelnachweise werden abschließend mithilfe eines Interaktionsnachweises zusammengeführt.

Die Verfahren sind für typische I- und Kastenquerschnitte und deren Beanspruchung ausgelegt.

### 4.3.1

## Voraussetzungen

- die Beulfelder sind rechteckig und die Flansche näherungsweise parallel
- soweit Steifen vorhanden sind, verlaufen diese in Längs- und/oder Querrichtung
- Löcher oder Ausschnitte sind klein
- die Bauteile sind gleichförmig
- flanschinduziertes Stegbeulen ist ausgeschlossen

### 4.3.2

## Plattenbeulen

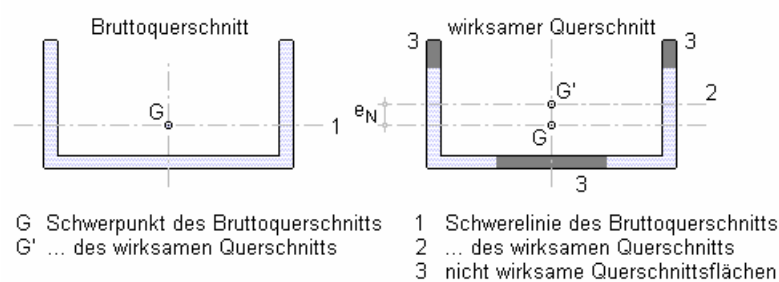
Für druckbeanspruchte Blechelemente werden die Querschnittswerte für Querschnittsklasse 4 ( $A_{eff}$ ,  $I_{eff}$ ,  $W_{eff}$ ) ermittelt. Damit können Querschnittsnachweise oder Stabilitätsnachweise (Knicken, Biegedrillknicken) geführt werden.

I.d.R. wird die wirksame Querschnittsfläche  $A_{eff}$  unter Annahme reiner Druckbeanspruchungen ( $M_{Ed} = 0$ ) und das wirksame Widerstandsmoment  $W_{eff}$  unter Annahme reiner Biegelängsspannungen ( $N_{Ed} = 0$ ) ermittelt.

Alternativ dürfen die wirksamen Querschnittswerte mit der resultierenden Verteilung der Längsspannungen (gleichzeitige Wirkung von  $N_{Ed}$  und  $M_{Ed}$ ) bestimmt werden, wobei ein iteratives Vorgehen erforderlich ist.

Aufgrund der Schnittgrößenumlagerung kann sich ein zusätzliches Moment  $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_N$  ergeben, das beim Nachweis zu berücksichtigen ist.

EC 3-1-5, Bild 4.1 - Wirkung von Normalkräften bei Querschnitten der Klasse 4



### 4.3.3

## Einzelblechfelder ohne Längssteifen

Die wirksame Fläche der Druckzone eines unausgesteiften Blechfelds wird berechnet mit

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c \quad \text{mit} \quad \dots A_c \text{ Druckzone des Blechfelds}$$

### 4.3.4

## Plattenartiges Verhalten

Abminderungsbeiwert  $\rho$  für

- beidseitig gestützte Querschnittsteile (z.B. Steg von I-Profilen)

$$\text{für } \lambda_p > 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055 \cdot \psi} \Rightarrow \rho = (\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)) / \lambda_p^2 \leq 1$$

sonst gilt  $\rho = 1$

▪ einseitig gestützte Querschnittsteile (z.B. Flansche von I-Profilen)

für  $\lambda_p > 0.748 \Rightarrow \rho = (\lambda_p - 0.188) / \lambda_p^2 \leq 1$

sonst gilt  $\rho = 1$  ... mit ...

$\lambda_p = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,p}}$  Beulslankheitsgrad

$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E$  kritische elastische Plattenbeulspannung

$k_{\sigma,p}$  Beulwert für die orthotrope Platte, s. Tabellen 4.1, 4.2

$\sigma_E = (\pi^2 \cdot E \cdot t^2) / (12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2)$  Grundwert der Beulspannung

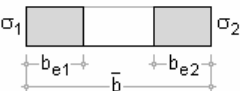
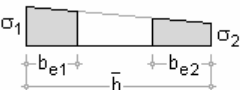
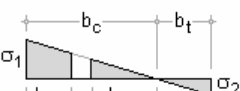
$b$  Beulfeldbreite

$t$  Beulfelddicke

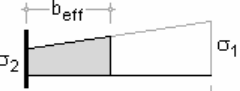
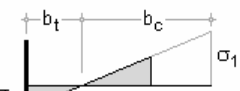
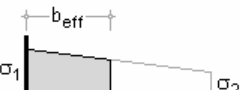

$E, f_y, \nu$  Materialbeiwerte

$\psi = \sigma_1 / \sigma_2$  ... und ...  $\sigma_1 \geq \sigma_2$  Randspannungsverhältnis (Druck positiv)

EC 3-1-5, Tab. 4.1 - zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)	wirksame Breite $b_{eff}$
	$\psi = 1 \dots b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = 0.5 \cdot b_{eff} \dots b_{e2} = 0.5 \cdot b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0 \dots b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = 2 \cdot b_{eff} / (5 - \psi) \dots b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0 \dots b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0.4 \cdot b_{eff} \dots b_{e2} = 0.6 \cdot b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ -1 $-1 > \psi > -3$
Beulwert $k_\sigma$	4.0 $8.2 / (1 + \psi)$ 7.81 $7.81 - 6.29 \cdot \psi + 9.78 \cdot \psi^2$ 23.9 $5.98 \cdot (1 - \psi)^2$

EC 3-1-5, Tab. 4.2 - einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)	wirksame Breite $b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0 \dots b_{eff} = \rho \cdot c$
	$\psi < 0 \dots b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1    0    -1 $-1 > \psi > -3$
Beulwert $k_\sigma$	0.43    0.57    0.85 $0.57 - 0.21 \cdot \psi + 0.07 \cdot \psi^2$
	$1 > \psi \geq 0 \dots b_{eff} = \rho \cdot c$
	$\psi < 0 \dots b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ -1
Beulwert $k_\sigma$	0.43 $0.578 / (\psi + 0.34)$ 1.70 $1.7 - 5 \cdot \psi + 17.1 \cdot \psi^2$ 23.8

Der Beulschlankheitsgrad darf ersetzt werden durch

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\sigma_{com,Ed} / (f_y / \gamma_{M0})} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$\sigma_{com,Ed}$  größter Bemessungswert der einwirkenden Druckbeanspruchung im Blechfeld.  
Beim Knicknachweis ist  $\sigma_{com,Ed}$  nach Th. II. Ord. unter Berücksichtigung globaler Imperfektionen zu ermitteln.

#### 4.3.5 Knickstabähnliches Verhalten

Bei nicht ausgesteiften Blechfeldern ohne Lagerung in Längsrichtung oder mit kleinem Seitenverhältnis ( $a/b < 1$ ) kann knickstabähnliches Verhalten auftreten.

Der Abminderungsbeiwert  $\chi_c$  wird auf Grundlage der maßgebenden Knicklinie (a) für nicht ausgesteifte Blechfelder bestimmt (s. EC 3-1-1, 6.3.1.2)

$$\chi_c = 1 / \left( \Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2} \right) \leq 1 \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$\Phi = 0.5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0.2) + \bar{\lambda}_c^2 \right) \quad \text{Imperfektionsbeiwert für Knicklinie (a): } \alpha = 0.21$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,c}} \quad \text{Knickschlankheitsgrad des Ersatzdruckstabs}$$

$$\sigma_{cr,c} = (\pi^2 \cdot E \cdot t^2) / (12 \cdot (1 - \nu^2)) \cdot a^2 \quad \text{kritische elastische Knickspannung}$$

$a$  Beulfeldlänge

$t$  Beulfelddicke

$E, f_y, \nu$  Materialbeiwerte

#### 4.3.6 Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Der endgültige Abminderungsbeiwert wird bestimmt mit

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} - 1 \quad \dots \text{ und } \dots \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

$\sigma_{cr,p}$  elastische Plattenbeulspannung

$\sigma_{cr,c}$  elastische Knickspannung

$\chi_c$  Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens

$\rho$  Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens

#### 4.3.7 Längs ausgesteifte Blechfelder

Zunächst werden die wirksamen Flächen der Einzelfelder (s.o. Einzelblechfelder ohne Steifen) zur Berücksichtigung des Einzelfeldbeulens bestimmt. Anschließend wird die wirksame Fläche des ausgesteiften Gesamtfelds aus den wirksamen Flächen der Steifen zur Berücksichtigung des Gesamtfeldbeulens ermittelt (Modell der äquivalenten orthotropen Platte).

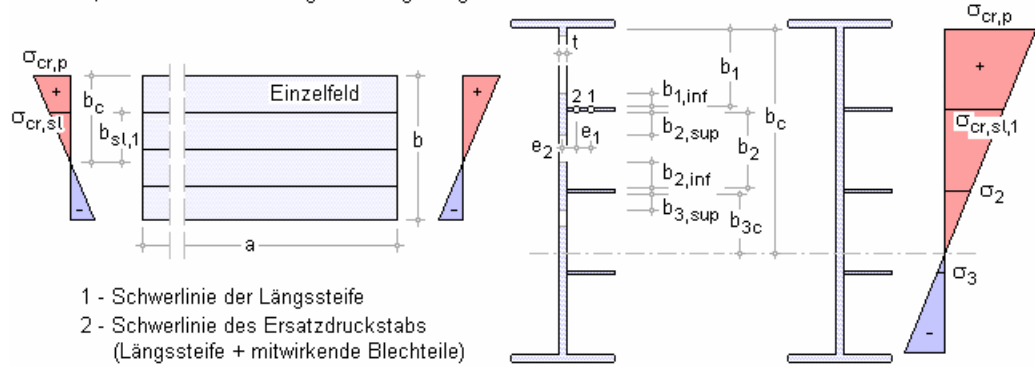
Die wirksame Fläche der Druckzone eines ausgesteiften Blechfelds wird berechnet mit

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum (b_{edge,eff} \cdot t) \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$A_{c,eff,loc}$  Summe der wirksamen Flächen aller Steifen und Einzelfelder, die sich ganz oder teilweise im Druckbereich befinden, jedoch nicht durch ein angrenzendes Plattenbauteil gestützt werden

$b_{edge,eff}$  wirksame Breite der Querschnittsteile, die durch ein angrenzendes Plattenbauteil gestützt werden

EC 3-1-5, Bild A.1 - Bezeichnungen für längsausgesteifte Beulfelder



	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen nach Tab. 4.1	Bedingung für $\psi_i$
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} \cdot b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} \cdot b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,st,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} \cdot b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} \cdot b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,st,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} \cdot b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} \cdot b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0.4 \cdot b_{3c}$	$0.4 \cdot b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

#### 4.3.8

#### Plattenartiges Verhalten

Blechkfelder mit mindestens drei Längssteifen in der Druckzone, deren Steifigkeit verschmiert werden darf, dürfen als äquivalente orthotrope Platten nachgewiesen werden. Die kritische elastische Plattenbeulspannung am Blechkfeldrand mit der größten Druckspannung ergibt sich zu

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E$$

Der **Beulwert**  $k_{\sigma,p}$  darf entweder entsprechenden Beulwerttafeln oder mittels Computerberechnungen ermittelt werden. Für längs ausgesteifte Blechkfelder mit mindestens drei äquidistant verteilten Längssteifen darf der Beulwert näherungsweise wie folgt bestimmt werden

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot ((1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1)}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} \quad \text{für } \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4 \cdot (1 + \sqrt{\gamma})}{(\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} \quad \text{für } \alpha > \sqrt[4]{\gamma} \quad \text{mit } \dots$$

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \geq 0.5 \quad \text{und } \sigma_1 > \sigma_2$$

$$\alpha = a / b \geq 0.5$$

$$\gamma = I_{sl} / I_p \quad \text{mit } I_p = b \cdot t^3 / (12 \cdot (1 - \nu^2))$$

$$\delta = A_{sl} / A_p \quad \text{mit } A_p = b \cdot t$$

$I_{sl}$  Flächenträgheitsmoment des gesamten längsversteiften Blechkfelds

$A_{sl}$  Summe der Bruttoquerschnittsflächen aller Steifen ohne Anteile des Blechkfelds

Bei Blechkfeldern mit ein oder zwei Steifen in der Druckzone wird das vereinfachte Modell eines Ersatzstabs mit elastischer Bettung durch ein Blech angewandt. Bei nur einer Längssteife in der Druckzone lautet die elastische kritische Knickspannung der Steifen

$$\sigma_{cr,st} = 1.05 \cdot E / A_{sl,1} \cdot \sqrt{I_{sl,1} \cdot t^3 \cdot b / (b_1 \cdot b_2)} \quad \text{für } a \geq a_c$$

$$\sigma_{cr,st} = (\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1} / (A_{sl,1} \cdot a^2) + (E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2) / (4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2)) \quad \text{für } a < a_c \quad \text{mit } \dots$$

$$a_c = 4.33 \cdot \sqrt[4]{(I_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2) / (t^3 \cdot b)}$$

$I_{sl,1}$  und  $A_{sl,1}$  setzen sich aus dem Bruttoquerschnitt der Steife und der anschließenden mitwirkenden Blechteile zusammen (s. Bild A.1)

Die kritische elastische Plattenbeulspannung wird aus  $\sigma_{cr,sl}$  an dem Blechfeldrand mit der größten Druckspannung extrapoliert. Bei zwei Steifen in der Druckzone werden zunächst die Einzelsteifen unabhängig voneinander, dann eine zusammengeführte Ersatzsteife betrachtet. Die niedrigste Beulspannung ist maßgebend.

Abminderungsbeiwert  $\rho$  für die äquivalente orthotrope Platte

- beidseitig gestützte Querschnittsteile (z.B. Steg von I-Profilen)

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)) / \bar{\lambda}_p^2 \leq 1 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p > 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055 \cdot \psi}$$

sonst gilt  $\rho = 1$

- einseitig gestützte Querschnittsteile (z.B. Flansche von I-Profilen)

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0.188) / \bar{\lambda}_p^2 \leq 1 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p > 0.748$$

sonst gilt  $\rho = 1$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot f_y / \sigma_{cr,p}} \quad \text{Beulschlankheitsgrad für eine äquivalente orthotrope Platte}$$

$$\beta_{A,c} = A_{c,eff,loc} / A_c$$

$A_c$  Bruttoquerschnittsfläche des längs ausgesteiften Blechfelds ohne Berücksichtigung der durch ein angrenzendes Plattenbauteil gestützten Randbereiche

### 4.3.9

#### Knickstabähnliches Verhalten

Bei längs ausgesteiften Blechfeldern mit großem Seitenverhältnis ( $a/b > 1$ ) kann knickstabähnliches Verhalten auftreten. Der Abminderungsbeiwert  $\chi_c$  wird auf Grundlage der maßgebenden Knicklinie bestimmt (s. EC 3-1-1, 6.3.1.2)

$$\chi_c = 1 / \left( \Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2} \right) \leq 1 \quad \text{mit} \quad \dots$$

$$\Phi = 0.5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0.2) + \bar{\lambda}_c^2 \right)$$

Nach EC 3-1-5, 4.5.3(5), wird i.d.R. Knicklinie (b) für Hohlsteifenquerschnitte und Knicklinie (c) für offene Steifenquerschnitte verwendet.

Imperfektionsbeiwert

$$\alpha = 0.34 \quad \text{für Knicklinie b}$$

$$\alpha = 0.49 \quad \text{für Kn. c}$$

Bei ausgesteiften Blechfeldern ist  $\alpha$  zu vergrößern auf

$$\alpha_e = \alpha + 0.09 / (i/e) \quad \text{mit} \quad i = \sqrt{I_{sl,1} / A_{sl,1}} \quad \text{und} \quad e = \max(e_1, e_2), \text{ s. Bild A.1}$$

Der Knickschlankheitsgrad des Ersatzdruckstabs ergibt sich zu

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot f_y / \sigma_{cr,c}} \quad \text{mit} \quad \beta_{A,c} = A_{sl,1,eff} / A_{sl,1}$$

$I_{sl,1}, A_{sl,1}$  Bruttoquerschnittswerte und

$A_{sl,1,eff}$  wirksame Querschnittsfläche des Ersatzdruckstabs, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen bezogen auf Knicken senkrecht zur Blechebene ergeben

$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,c,sl} \cdot b_c / b_{sl,1}$  kritische elastische Knickspannung

$$\sigma_{cr,c,sl} = (\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}) / (A_{sl,1} \cdot a^2)$$

$a$  Beulfeldlänge

$t$  Beulfeldstärke

$E, f_y$  Materialbeiwerte

$b_c, b_{sl,1}$  Extrapolationsgrößen, s. Bild A.1

### 4.3.10

#### Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Der endgültige Abminderungsfaktor wird bestimmt mit

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad \text{mit} \quad \dots$$

$$\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} - 1 \quad \text{und} \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

#### 4.3.11

### Nachweis

- als Querschnittsnachweis (Th. I.O.)  

$$\eta_1 = N_{Ed} / (f_y \cdot A_{eff} / \gamma_{M0}) + (M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N) / (f_y \cdot W_{eff} / \gamma_{M0}) \leq 1$$
- als Stabilitätsnachweis (Th. II.O.)  

$$\eta_1 = N_{Ed} / (f_y \cdot A_{eff} / \gamma_{M1}) + (M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N) / (f_y \cdot W_{eff} / \gamma_{M1}) \leq 1$$

#### 4.4

### Schubbeulen

Für nicht ausgesteifte Blechfelder mit

$$h_w / t > 72 / \eta \cdot \varepsilon$$

und für ausgesteifte Beulfelder mit

$$h_w / t > 31 / \eta \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}$$

$h_w$  lichte Höhe

$t$  Dicke des Blechfelds

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} \quad \dots \text{ mit } f_y \text{ in N/mm}^2$$

$$\eta = 1.2 \text{ (empfohlen für Stahlsorten bis S460 im Hochbau, sonst } \eta = 1.0)$$

ist ein Schubbeulnachweis zu führen. Außerdem sind Quersteifen an den Lagern vorzusehen.

#### 4.4.1

### Voraussetzungen

- die Beulfelder sind rechteckig und die Flansche näherungsweise parallel
- soweit Steifen vorhanden sind, verlaufen diese in Längs- und/oder Querrichtung
- Löcher oder Ausschnitte sind klein
- die Bauteile sind gleichförmig

#### 4.4.2

### Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit besteht aus den Anteilen für den Steg und die Flansche und wird berechnet mit

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \eta \cdot f_y \cdot h_w \cdot t / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1})$$

Beitrag des Stegs

$$V_{bw,Rd} = \chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1})$$

Der Beiwert  $\chi_w$  ist bei Anordnung von Quersteifen an den Auflagern (Auflagersteifen) zu berechnen mit

EC 3-1-5, Tab. 5.1 - Beitrag des Stegs  $\chi_w$  zur Schubbeanspruchbarkeit

	starre Auflagersteife	verformbare A.
$\bar{\lambda}_w < 0.83 / \eta$	$\eta$	$\eta$
$0.83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1.08$	$0.83 / \bar{\lambda}_w$	$0.83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1.08$	$1.37 / (0.7 + \bar{\lambda}_w)$	$0.83 / \bar{\lambda}_w$

$$\bar{\lambda}_w = 0.76 \cdot \sqrt{f_{yw} / \tau_{cr}} \quad \text{modifizierte Schlankheit}$$

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E \quad \text{kritische Schubbeulspannung}$$

wobei der Fall *starre Auflagersteifen* auch für Innenfelder und Felder an Zwischenauflagern von durchlaufenden Trägern gilt.

Für Blechfelder, die durch starre Quersteifen begrenzt sind und entweder keine oder mehr als zwei Längssteifen besitzen, oder für Blechfelder mit einer oder zwei Längssteifen und  $a/h_w \geq 3$  gilt

$$k_{\tau} = 5.34 + 4.00 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau,sl} \dots \text{für } a/h_w \geq 1$$

$$k_{\tau} = 4.00 + 5.34 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau,sl} \dots \text{für } a/h_w < 1$$

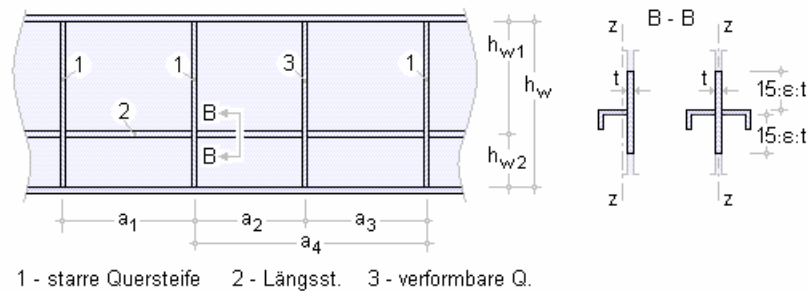
$$k_{\tau,sl} = 9 \cdot (h_w/a)^2 \cdot \sqrt[4]{(I_{sl}/(t^3 \cdot h_w))^3} \geq 2.1/t \cdot \sqrt[3]{I_{sl}/h_w}$$

$I_{sl}$  Summe der Steifigkeiten aller Einzelsteifen (einschl. mitwirkende Stegblechbreite) um die z-Achse

Für Blechfelder mit einer oder zwei Längssteifen und  $a/h_w < 3$  gilt

$$k_{\tau} = 4.1 + (6.3 + 0.18 \cdot I_{sl}/(t^3 \cdot h_w))/a^2 + 2.2 \cdot \sqrt[3]{I_{sl}/(t^3 \cdot h_w)}$$

EC 3-1-5, Bild 5.3 - Stegblech mit Quer- und Längssteifen



Grundwert der Beulspannung

$$\sigma_E = (\pi^2 \cdot E \cdot t^2) / (12 \cdot (1 - \nu^2)) \cdot h_w^2$$

#### 4.4.3

#### Beitrag der Flansche

Werden die Flansche bei Annahme eines Zweipunktquerschnitts nicht vollständig für die Querschnittsbeanspruchung ausgenutzt, darf der Flanschbeitrag zur Schubbeanspruchbarkeit herangezogen werden.

Wenn  $M_{Ed} < M_{Rd}$ , gilt

$$V_{bf,Rd} = (b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (c \cdot \gamma_{M1}) \cdot (1 - (M_{Ed}/M_{t,Rd})^2) \dots \text{mit } \dots$$

$b_f, t_f$  Querschnittswerte für den Flansch, der die kleinere Beanspruchbarkeit für Normalkräfte liefert, wobei gilt  $b_f \leq 15 \cdot \epsilon \cdot t_f$

$$c = a \cdot (0.25 + (1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (t_f \cdot h_w^2 \cdot f_y))$$

$M_{t,Rd} = M_{t,k} / \gamma_{M0} \cdot (1 - (N_{Ed} / ((A_{f1} + A_{f2}) \cdot f_y / \gamma_{M0})))$  Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit bei Berücksichtigung allein der effektiven Flächen der Flansche  $A_{f1}$  und  $A_{f2}$

$$M_{t,k} = \min(A_{f1}, A_{f2}) \cdot (h_w + 0.5 \cdot (t_{f1} + t_{f2})) \cdot f_y$$

#### 4.4.4

#### Nachweis

$$\eta_3 = V_{Ed} / V_{b,Rd} \leq 1$$

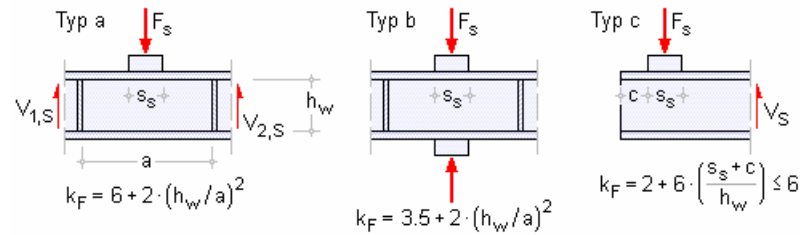


## 4.5

### Querlastbeulen

Querlasten werden über die Flansche in den Steg eingeleitet. Es werden drei Arten der Lastenleitung (ohne Quersteifen) unterschieden, die zu unterschiedlichen Beulwerten führen.

EC 3-1-5, Bild 6.1 - Beulwerte für verschiedene Arten der Lastenleitung



## 4.5.1

### Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

$$F_{Rd} = f_{yw} \cdot L_{eff} \cdot t_w / \gamma_{M1}$$

$L_{eff}$  wirksame Lastenleitungslänge unter Berücksichtigung des Stegbeulens bei Querlasten  $L_{eff} = \chi_F \cdot l_y$

$l_y$  wirksame Lastenleitungslänge ohne Stegbeulen

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq a \quad \text{für Typen (a) und (b)}$$

$$l_y = l_e + t_f \cdot \sqrt{0.5 \cdot m_1 + (l_e/t_f)^2 + m_2} \quad \text{für Typ (c) ... mit ...}$$

$$l_e = (k_F \cdot E \cdot t_w^2) / (2 \cdot f_{yw} \cdot h_w) \leq s_s + c$$

$$m_1 = (f_{yf} \cdot b_f) / (f_{yw} \cdot t_w)$$

$$m_2 = 0.02 \cdot (h_w/t_f)^2 \quad \text{für ... } \bar{\lambda}_F > 0.5 \quad \text{sonst ... } m_2 = 0 \quad (\text{grundsätzlich empfohlen})$$

$$\chi_F = 0.5 / \bar{\lambda}_F \quad \text{Abminderungsfaktor infolge Stegbeulen bei Querlasten}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw} / F_{cr}} \quad \text{Beulslankheitsgrad}$$

$$F_{cr} = 0.9 \cdot k_F \cdot E \cdot t_w^3 / h_w \quad \text{Ersatzverzweigungslast}$$

$$k_F \quad \text{Beulwert für Stege ohne Längssteifen s. Bild 6.1}$$

$$k_F = 6 + 2 \cdot (h_w/a)^2 + (5.44 \cdot b_1/a - 0.21) \cdot \sqrt{\gamma_S} \quad \text{Beulwert für Stege mit Längssteifen}$$

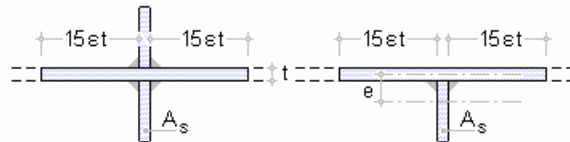
gilt für  $0.05 \leq b_1/a \leq 0.3$  und  $b_1/h_w \leq 0.3$  für Typ (a)

$b_1$  Höhe des belasteten Einzelfelds als lichter Abstand zwischen dem belasteten Flansch und der ersten Steife

$$\gamma_S = 10.9 \cdot I_{sl,1} / (h_w \cdot t_w^3) \leq 13 \cdot (a/h_w)^3 + 210 \cdot (0.3 - b_1/a)$$

$I_{sl,1}$  Flächenträgheitsmoment der zu dem belasteten Flansch am nächsten gelegenen Steife einschließlich der wirksamen Stegbreite, wobei  $15 \cdot e \leq t \leq$  lichter Abstand der Steifen

EC 3-1-5, Bild 9.1, wirksamer Querschnitt von Steifen



Nach NA-DE darf die Ersatzverzweigungslast für Stege mit Längssteifen ermittelt werden zu

$$F_{cr} = (F_{cr,1} \cdot F_{cr,2}) / (F_{cr,1} + F_{cr,2}) \quad \text{mit ...}$$

$$F_{cr,1} = k_{F,1} \cdot (\pi^2 \cdot E) / (12 \cdot (1 - \nu^2)) \cdot t_w^3 / h_w$$

$$F_{cr,2} = k_{F,2} \cdot (\pi^2 \cdot E) / (12 \cdot (1 - \nu^2)) \cdot t_w^3 / b_1 \quad \text{und ...}$$

$$k_{F,1} = k_F \text{ (s.o.)}$$

$$k_{F,2} = (0.8 \cdot (s_s + 2 \cdot t_f) / a + 0.6) \cdot (a/b_1)^{0.6 \cdot (s_s + 2 \cdot t_f) / a + 0.5}$$

Nach NA-DE ist eine genauere Ermittlung des Beulwerts  $k_F$  nach diesem Verfahren z.B. mit Software oder aus Literatur nicht zulässig.

Der Abminderungsfaktor infolge Stegbeulen bei Querlasten wird nach NA-DE berechnet mit

$$\chi_F = 1 / \left( \varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_F} \right) \leq 1 \quad \dots \text{mit} \dots \quad \varphi = 0.5 \cdot \left( 1 + 0.21 \cdot (\bar{\lambda}_F - 0.80) \right) + \bar{\lambda}_F$$

Beulschlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_F$  (s.o.) mit  $m_2 = 0$

#### 4.5.2

#### Nachweis

$$\eta_2 = F_{Ed} / F_{Rd} \leq 1$$

### 4.6

#### Interaktionen

#### 4.6.1

##### Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft

Für den Steg von Doppel-T- oder Kastenquerschnitten ist die gleichzeitige Wirkung von Schub, Biegemoment und Normalkraft zu untersuchen, wenn die Querkrafttragfähigkeit des Stegs  $\eta_3 > 0.5$  ist.

$$\bar{\eta}_1 + (1 - M_{t,Rd} / M_{pl,Rd}) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1 \quad \dots \text{mit} \dots$$

$$\bar{\eta}_1 = M_{Ed} / M_{pl,Rd} \geq M_{t,Rd} / M_{pl,Rd}$$

$$\bar{\eta}_3 = V_{Ed} / V_{bw,Rd}$$

Das plastische Moment  $M_{pl,Rd}$  wird dabei aus den effektiven Querschnittsflächen der Flansche und der vollen Querschnittsfläche des Stegs (unabhängig von der Querschnittsklasse) berechnet.

#### 4.6.2

##### Interaktion zw. Querbelastrung an Längsrändern, Biegemoment u. Normalkraft

$$\eta_2 + 0.8 \cdot \eta_1 \leq 1.4$$

Wirkt eine Querlast auf den Zugflansch, ist der Interaktionsnachweis nicht zu führen. Allerdings ist ein elastischer Spannungsnachweis erforderlich.

#### 4.6.3

##### Interaktion zw. Querbelastrung an Längsrändern u. Querkraft (nur NA-DE)

$$\left( \eta_3 \cdot \left( 1 - F_{Ed} / (2 \cdot V_{Ed}) \right) \right)^{1.6} + \eta_2 \leq 1$$

## 4.7 Methode der reduzierten Spannungen

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass es z.B. auch für Bauteile mit veränderlichem Querschnitt oder Träger mit Stegausschnitten anwendbar ist.

Der Beulnachweis wird auf Grundlage des gesamten einwirkenden Spannungsfeldes geführt. Dabei wird die überkritische Tragreserve von Einzelfeldern i.d.R. erfasst, nicht jedoch die Spannungsumlagerung von hoch beanspruchten Querschnittsteilen in weniger ausgenutzte Querschnittsteile.

Die Tragbeulspannung des schwächsten Querschnittsteils ist somit maßgebend für die Tragfähigkeit des Gesamtquerschnitts.

### 4.7.1 Voraussetzungen

- soweit Steifen vorhanden sind, verlaufen diese in Längs- und/oder Querrichtung
- Löcher oder Ausschnitte sind klein
- die Bauteile sind gleichförmig
- flanschinduziertes Stegbeulen ist ausgeschlossen

### 4.7.2 Traglast

Bei ausgesteiften und nicht ausgesteiften Blechfeldern darf Querschnittsklasse 3 angenommen werden, wenn gilt

$$\rho \cdot \alpha_{ult,k} / \gamma_{M1} \geq 1 \quad \dots \text{mit } \dots$$

$\alpha_{ult,k} = f_y / \sigma_{v,Ed}$  kleinster Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslasten, um den charakteristischen Wert der Beanspruchbarkeit am kritischen Punkt des Blechfelds zu erreichen

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} \quad \dots \text{Vergleichsspannung}$$

$\rho$  ist der Reduktionsbeiwert in Abhängigkeit des Schlankheitsgrads des gesamten Blechfeldes, der

- entweder als kleinster Wert der Reduktionsbeiwerte für Platten- ( $\rho_x$ ), Querlast- ( $\rho_z$ ) und Schubbeulen ( $\chi_w$ ) zu dem Nachweisformat

$$(\sigma_v / (f_y / \gamma_{M1}))^2 \leq \min(\rho_x, \rho_z, \chi_w)^2$$

- oder als aus den Reduktionsbeiwerten für Platten- ( $\rho_x$ ), Querlast- ( $\rho_z$ ) und Schubbeulen ( $\chi_w$ ) interpolierter Reduktionsbeiwert zu dem Nachweisformat

$$((\sigma_{x,Ed} / \rho_x)^2 + (\sigma_{z,Ed} / \rho_z)^2 - (\sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed}) / (\rho_x \cdot \rho_z) + 3 \cdot (\tau_{Ed} / \chi_w)^2) / (f_y / \gamma_{M1})^2 \leq 1$$

führt. Ggf. ist knickstabähnliches Verhalten bei Platten- und Querlastbeanspruchung zu berücksichtigen.

Bei biaxialem Druck aus Platten- und Querlastbeanspruchung wird das gemischte Glied der Gleichung mit dem Wert  $\rho_x \cdot \rho_z$  multipliziert (s. Kommentar zu DIN EN 1993-1-5, Stahlbaukalendar 2012).

Alle Reduktionsbeiwerte werden gebildet mit dem modifizierten Schlankheitsgrad des Blechfelds

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult,k} / \alpha_{cr}} \quad \dots \text{mit } \dots$$

$\alpha_{cr}$  kleinster Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslasten, um die elastische Verzweigungsbelastung für das gesamte einwirkende Spannungsfeld zu erreichen

Kann  $\alpha_{cr}$  nicht für das gesamte Blechfeld einschließlich der Einzelfelder als Ganzes bestimmt werden, so dürfen getrennte Nachweise für die Einzelfelder und das Gesamtfeld geführt werden. Liegen nur die Werte  $\alpha_{cr,i}$  jeweils für die Komponenten des Spannungsfeldes vor (d.h.  $\alpha_{cr,x}$  für  $\sigma_{x,Ed}$ ,  $\alpha_{cr,z}$  für  $\sigma_{z,Ed}$  und  $\alpha_{cr,t}$  für  $\tau_{Ed}$ ), so darf der Wert für die gemeinsame Wirkung bestimmt werden mit

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1+\psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} + \left( \left( \frac{1+\psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1-\psi_x}{2 \cdot \alpha_{cr,x}^2} + \frac{1-\psi_z}{2 \cdot \alpha_{cr,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,t}^2} \right)^{0.5} \dots \text{mit} \dots$$

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} \dots \text{und} \dots \alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}} \dots \text{und} \dots \alpha_{cr,t} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_{Ed}}$$

Zur Ermittlung der Reduktionsbeiwerte  $\rho_x$  und  $\chi_w$  s. *Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche*.

Für Querbelastung gilt nach NA-DE

$$\rho_z = 1 / \left( \varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_p} \right) \leq 1 \dots \text{mit} \dots$$

$$\varphi = 0.5 \cdot (1 + \alpha_p \cdot (\lambda_p - \lambda_0) + \lambda_p) \dots \text{und} \dots \alpha_p = 0.34 \dots \text{und} \dots \lambda_0 = 0.80$$

## 4.8 Flanschinduziertes Stegbeulen

Das Einknicken des Druckflansches in den Steg ist zu vermeiden. Daher ist unter Vernachlässigung von Steifen folgendes Kriterium zu erfüllen

$$h_w / t_w \leq k \cdot E / f_y \cdot \sqrt{A_w / A_{fc}} \dots \text{mit} \dots$$

$A_w = h_w \cdot t_w$  ... Stegfläche  
 $A_{fc}$  effektive Querschnittsfläche des Druckflanschs (bei zwei Stegen nur die Hälfte)  
 $k = 0.3$  ... bei Ausnutzung plastischer Rotationen  
 $k = 0.4$  ... der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit  
 $k = 0.55$  ... der elastischen Momentenbeanspruchbarkeit

## 4.9 Steifen

### 4.9.1 Längssteifen

Bei offenen Querschnitten (z.B. Flachstahl, T-, L-Profil) ist nachzuweisen, dass Drillknicken vermieden wird. Dazu ist folgendes Kriterium zu erfüllen

$$I_T / I_p \geq 5.3 \cdot f_y / E \dots \text{mit} \dots$$

$I_p = I_y + I_z$  polares Trägheitsmoment um den Anschlusspunkt an das Blech  
 $I_T$  ..... St. Venant'sches Torsionsträgheitsmoment

### 4.9.2 Quersteifen

Quersteifen sind so auszubilden, dass sie als starre Lagerung des Beulfelds dienen.

Es ist i.d.R. mit einer elastischen Berechnung nach Th.II.O. nachzuweisen, dass im GZT die maximale Spannung in den Steifen unter der Bemessungslast die Streckgrenze  $f_y / \gamma_{M1}$  nicht überschreitet und die zusätzliche Auslenkung zu der Imperfektion den Wert  $b/300$  nicht überschreitet.

Unter der Annahme, dass keine Normalkräfte in den Quersteifen vorhanden sind, dürfen beide Kriterien als erfüllt angesehen werden, wenn gilt

$$I \geq \sigma_m / E \cdot (b / \pi)^4 \cdot (1 + w_0 \cdot (300 / b) \cdot u) \dots \text{mit} \dots$$

$\sigma_m = \sigma_{cr,c} / \sigma_{cr,p} \cdot N_{Ed} / b \cdot (1/a_1 + 1/a_2)$   
 $w_0 = s / 300 \dots \text{mit} \dots s = \min(a_1, a_2, b)$   
 $u = \pi^2 \cdot E \cdot e_{max} / (f_y \cdot 300 \cdot b / \gamma_M) \geq 1$   
 $\sigma_{cr,c} / \sigma_{cr,p} = 1 \dots$  auf der sicheren Seite liegend  
 $N_{Ed} = \sigma_{c,max} \cdot b_c / 2 \dots \text{mit} \dots b_c$  Höhe der Druckfläche  
 $a_1, a_2$  Längen der benachbarten Beulfelder  
 $e_{max}$  Abstand der Randfaser zum Schwerpunkt der Steife

Außerdem ist bei Quersteifen mit offenen Querschnitten (z.B. Flachstahl, T-, L-Profil) Drillknicken zu vermeiden.

Liegt eine **starre Auflagersteife** vor, bilden zwei doppelseitig angeordnete Quersteifen die Flansche eines kurzen Biegeträgers der Länge  $h_w$ . Die Mindestquerschnittsfläche einer doppel-seitigen Quersteife ist

$$A_{st,min} = 4 \cdot h_w \cdot t^2 / e \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$e > 0.1 \cdot h_w \quad \text{Abstand zwischen den Mittelebenen der Flachbleche}$$

**Zwischenliegende Quersteifen**, die als starre Randlagerung für die Stegbeulfelder dienen, haben i.d.R. mit dem mittragenden Teil des Stegs folgenden Mindestbedingungen für das Flächenträgheitsmoment zu genügen

$$\text{für } a/h_w < \sqrt{2}: I_{st,min} = 1.5 \cdot h_w^3 \cdot t^3 / a^2$$

$$\text{für } a/h_w \geq \sqrt{2}: I_{st,min} = 0.75 \cdot h_w \cdot t^3$$

$$\text{Tragfähigkeit: } N_{Ed,st} = V_{Ed} - 1/\lambda_w^2 \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1})$$

## 4.10

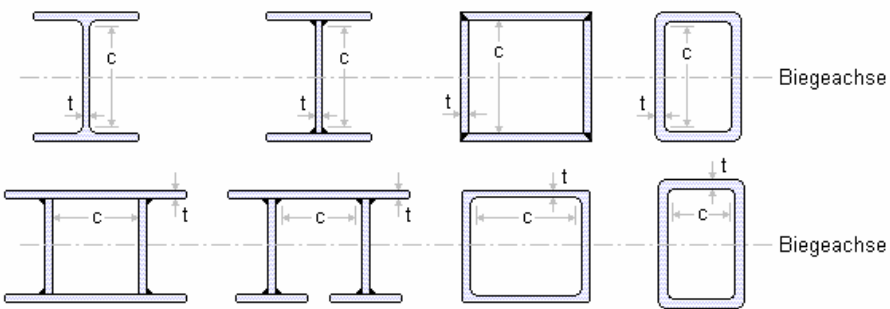
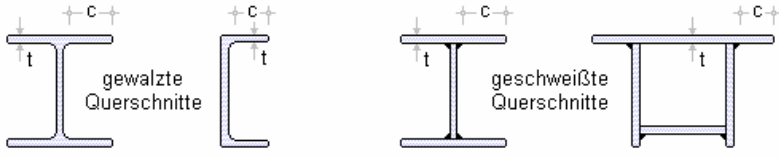
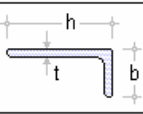
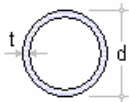
### Querschnittsklasse

Querschnitte werden auf Grund ihrer geometrischen Beanspruchbarkeit durch lokales Beulen in vier Querschnittsklassen eingeteilt (s. EC 3-1-1, 5.5).

- Querschnitte der Klasse 1 können plastische Gelenke mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität ausbilden
- Querschnitte der Klasse 2 können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, haben aber nur eine begrenzte Rotationskapazität
- Querschnitte der Klasse 3 erreichen für eine elastische Spannungsverteilung die Streckgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser, können aber die plastische Momententragfähigkeit nicht entwickeln
- Querschnitte der Klasse 4 sind solche, bei denen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze auftritt

Für die Beuluntersuchung bedeutet das, dass Querschnitte der Klassen 1 bis 3 als nicht beulgefährdet bzgl. lokalen Beulens betrachtet werden dürfen.

Die Klassifizierung eines Querschnitts ist vom  $c/t$ -Verhältnis seiner druckbeanspruchten Teile abhängig, wobei die höchste Klasse eines Querschnittsteils maßgebend für die Klasse des Gesamtquerschnitts ist. Die Grenzabmessungen können den folgenden Tabellen entnommen werden.

beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile																								
																								
Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile																					
1	$c/t \leq 72 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 33 \cdot \epsilon$	... für ... $\alpha > 0.5$ ... $c/t \leq 396 \cdot \epsilon / (13 \cdot \alpha - 1)$ ... für ... $\alpha \leq 0.5$ ... $c/t \leq 36 \cdot \epsilon / \alpha$																					
2	$c/t \leq 83 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 38 \cdot \epsilon$	... für ... $\alpha > 0.5$ ... $c/t \leq 456 \cdot \epsilon / (13 \cdot \alpha - 1)$ ... für ... $\alpha \leq 0.5$ ... $c/t \leq 41.5 \cdot \epsilon / \alpha$																					
3	$c/t \leq 124 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 42 \cdot \epsilon$	... für ... $\psi > -1$ ... $c/t \leq 42 \cdot \epsilon / (0.67 + 0.33 \cdot \psi)$ ... für ... $\psi \leq -1$ ... $c/t \leq 62 \cdot \epsilon \cdot (1 - \psi) \cdot \sqrt{-\psi}$ ( $\psi \leq -1$ : falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\epsilon_y > f_y/E$ sind)																					
einseitig gestützte Flansche																								
																								
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile																						
		freier Rand im Druckbereich	freier Rand im Zugbereich																					
1	$c/t \leq 9 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 9 \cdot \epsilon / \alpha$	$c/t \leq 9 \cdot \epsilon / (\alpha \cdot \sqrt{\alpha})$																					
2	$c/t \leq 10 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 10 \cdot \epsilon / \alpha$	$c/t \leq 10 \cdot \epsilon / (\alpha \cdot \sqrt{\alpha})$																					
3	$c/t \leq 14 \cdot \epsilon$	$c/t \leq 21 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}$ ... $k_\sigma$ s. EN 1993-1-5																						
Winkel	 s. auch einseitig gestützte Flansche gilt nicht für Winkel mit durchgehender Verbindung zu anderen Bauteilen																							
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile																							
3	$h/t \leq 15 \cdot \epsilon$ ... und ... $(b+h)/(2 \cdot t) \leq 11.5 \cdot \epsilon$																							
runde Hohlquerschnitte	 <table data-bbox="796 1610 1291 1711"><tr><td><math>\epsilon = \sqrt{235/f_y}</math></td><td><math>f_y</math></td><td>235</td><td>275</td><td>355</td><td>420</td><td>460</td></tr><tr><td><math>\epsilon</math></td><td></td><td>1.00</td><td>0.92</td><td>0.81</td><td>0.75</td><td>0.71</td></tr><tr><td><math>\epsilon^2</math></td><td></td><td>1.00</td><td>0.85</td><td>0.66</td><td>0.56</td><td>0.51</td></tr></table>			$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460	$\epsilon$		1.00	0.92	0.81	0.75	0.71	$\epsilon^2$		1.00	0.85	0.66	0.56	0.51
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460																		
$\epsilon$		1.00	0.92	0.81	0.75	0.71																		
$\epsilon^2$		1.00	0.85	0.66	0.56	0.51																		
Klasse	auf Biegung und / oder Druck beanspruchte Querschnittsteile																							
1	$d/t \leq 50 \cdot \epsilon^2$																							
2	$d/t \leq 70 \cdot \epsilon^2$																							
3	$d/t \leq 90 \cdot \epsilon^2$ ... für ... $d/t > 90 \cdot \epsilon^2$ s. EN 1993-1-6																							

Werden keine Stabilitätsnachweise (Biegeknicken, Biegedrillknicken) geführt, dürfen Querschnitte der Klasse 4 wie Querschnitte der Klasse 3 behandelt werden, falls das  $c/t$ -Verhältnis, das mit einer Erhöhung von  $\varepsilon$  um

$$\sqrt{f_y / (\gamma_{M0} \cdot \sigma_{\text{com,Ed}})} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$\sigma_{\text{com,Ed}}$  größter Bemessungswert der Druckspannung im Bemessungsteil

ermittelt wird, kleiner als die Grenze für Klasse 3 ist.

Bei Querschnitten der Klasse 4 dürfen effektive Breiten (s. EC 3-1-5, 4.4) verwendet werden, um die Abminderung der Beanspruchbarkeit infolge lokalen Beulens zu berücksichtigen.

## pcae-Werkzeug zur Berechnung von Beulfaktoren

Der Grundspannungszustand des Beulfelds kann durch den ebenen Spannungszustand einer Scheibe dargestellt werden. Die Beulsteifen bleiben hierbei unberücksichtigt.

Die Normalspannungen  $\sigma_x$  werden durch die vier Werte an den Ecken des Beulfelds definiert. Hieraus resultiert ein in beiden Koordinatenrichtungen möglicher linearer Spannungsverlauf. Der Schubspannungsverlauf ist konstant.

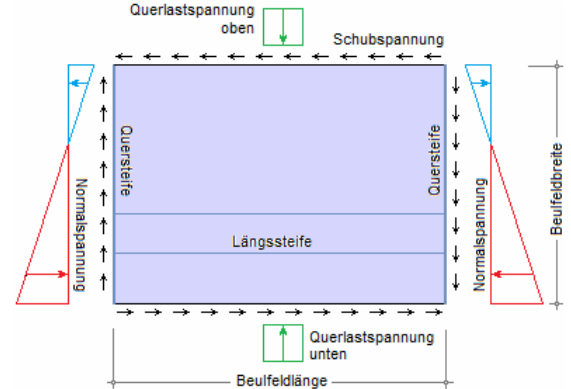
Am oberen oder unteren Längsrand können konzentrierte Blockspannungen aus Querlasten einwirken.

Zur Formulierung der Übergangsbedingungen an den Scheibenlängsrändern wird die Belastung in Fourierreihen entwickelt.

Für die Beulfläche und die Längsrandbelastung werden Reihenansätze gewählt, die prinzipiell aus unendlich vielen Gliedern bestehen.

Die Fourierreihenglieder  $n_x$  und  $n_y$  bestimmen die maximale Anzahl an Halbwellen der Beulfigur in x- und y-Richtung des Beulfelds.

Die Längs- und Quersteifenanordnungen sind hierbei die Bestimmungsgrößen.



Die Güte der Approximation der Querbelastung durch die Fourierreihenentwicklung sinkt mit geringer werdender Lastausbreitung, so dass für die Approximation von lokal eng begrenzten Querspannungen (z.B. infolge Radlasteinleitung) ein größerer Wert  $n_q$  für die Anzahl an Fourierreihengliedern vorzusehen ist als für die Entwicklung einer Querspannung über die gesamte Beulfeldlänge.

Die Anzahl der berücksichtigten Reihenglieder bestimmt demzufolge die Genauigkeit, mit der die vorhandene Belastung angenähert wird, und damit auch wesentlich den Spannungszustand der Scheibe.

### 5.1

## Berechnungsverfahren

Zur Lösung des Beulproblems wird die Energiemethode verwendet, mit der das Variationsproblem

$$\delta \cdot (\delta^2 \cdot \pi_0) = 0$$

formuliert werden kann. Mit  $\pi_0$  wird die potentielle Energie des Grundzustands bezeichnet. Unter Anwendung des Ritz'schen Verfahrens wird das Variationsproblem auf eine Extremwertaufgabe reduziert. Als Ansatzfunktion für die Beulfigur wird die Doppelsinusreihe

$$w(x,y) = \sum \sum A_{mn} \cdot \sin \frac{m\pi x}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y}{b}$$

gewählt, die an allen Rändern die Navier'schen Randbedingungen erfüllt.

Durch die Variationen nach den unbekannten Ritzparametern erhält man das allgemeine Eigenwertproblem

$$(\underline{A} - k_i \cdot \underline{B}) \cdot \underline{v}_i = 0 \quad \text{mit ...}$$

$\underline{A}, \underline{B}$     symmetrische Matrizen  
 $k_i$         Eigenwert des Problems  
 $\underline{v}_i$         zugehöriger Eigenvektor

Die Ordnung des Eigenwertproblems hängt direkt von den berücksichtigten Reihengliedern ab. Mit  $n_x$  Reihengliedern in x-Richtung und  $n_y$  Reihengliedern in y-Richtung ergibt sich die Ordnung des Gleichungssystems zu

$$s = n_x \cdot n_y$$

Das Beulproblem reduziert sich also auf die Aufgabe, den kleinsten Eigenwert  $\alpha_{cr} = \min k_i$  des Eigenwertproblems zu bestimmen, da sich mit diesem die niedrigste Verzweigungslast ergibt. Im kritischen Nachbarzustand nimmt die gewählte Bezugsspannung  $\sigma_{Ed}$  dann den Wert

$$\sigma_{cr} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{Ed}$$



an. Bei kombinierter Belastung wird vorausgesetzt, dass alle Spannungen im gleichen Verhältnis bis zur Beulgrenze anwachsen. Mit dieser Bedingung erhält man einen von der Bezugsspannung unabhängigen Beulwert.

## 5.2 Lösung des Eigenwertproblems

Zur Ermittlung des Eigenwerts wird das Jakobi-Verfahren (Rotationsverfahren) eingesetzt. Dieses Verfahren ist unempfindlich für Ausnahmefälle wie betragsnahe oder betragsgleiche Eigenwerte und es liefert alle Eigenwerte des Problems. Ausgehend von dem Matrizeneigenwertproblem (s.o.)

$$(\underline{A} - k_i \cdot \underline{B}) \cdot \underline{v}_i = \underline{0}$$

werden die beiden reell-symmetrischen Matrizen A und B simultan durch eine Kongruenztransformation auf die Diagonalmatrizen L und I überführt.

$$\begin{array}{l} \underline{X} \underline{A} \underline{X} = \underline{L} \quad \dots \text{ mit } \dots \quad \underline{X} \text{ Modalmatrix der Eigenvektoren } \dots \text{ und } \dots \\ \quad \underline{L} \text{ Diagonalmatrix der Eigenwerte} \\ \underline{X} \underline{B} \underline{X} = \underline{I} \quad \dots \text{ mit } \dots \quad \underline{I} \text{ Einheitsmatrix} \end{array}$$

Für Längsrandbelastung und Beulfläche werden Fourierreihenansätze gewählt, die prinzipiell aus unterschiedlich vielen Gliedern bestehen können. Die Anzahl der Reihenglieder bestimmt die Ordnung des zu lösenden Gleichungssystems und den auftretenden Abbruchfehler.

Der Abbruchfehler bei einer bestimmten Anzahl von Reihengliedern hängt von vielen Parametern ab. Besonders erwähnt seien hier die Anzahl und Steifigkeit der Beulsteifen und die Belastungsart. Bei komplexen Systemen ist es ratsam, den Abbruchfehler durch Testrechnungen mit veränderter Anzahl der Reihenglieder abzuschätzen.

## 5.3 Literatur zur Beulwertberechnung

- Kuhlmann, U. etc.: Competitive steel and composite bridges by innovative steel-plated structures, Final Report, Research Fund for Coal and Steel, European Communities, 2008
- Kindmann, R., Kraus, M.: Finite-Elemente-Methoden im Stahlbau, Bauingenieur-Praxis, Verlag Ernst & Sohn, 2013
- Klöppel, K., Scheer, J.: Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1960
- Klöppel, K., Möller, K.-H.: Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1968
- Protte, W.: Zum Scheiben- und Beulproblem längsversteifter Stegblechfelder bei örtlicher Lasteinleitung und bei Belastung aus Haupttragwirkung, Techn. Mitt. Krupp, Forschungsbericht, Band 33, Heft 2, 1975
- Pflüger, A.: Stabilitätsprobleme der Elastostatik, Springer-Verlag, Berlin 1964

## 5.4 Implementierung in #EC3BL

Sowohl für die Einzelfelder ohne Steifen als auch für das Gesamtfeld mit Längssteifen wird der Beulwert, d.h. der Vergrößerungsfaktor zum Erreichen der kritischen Verzweigungslast  $\alpha_{cr}$ , bezogen auf die gesamte einwirkende Spannung  $\sigma_{Ed}$ ,  $T_{Ed}$  und/oder die einwirkende Querlast  $F_{z,Ed}$  ermittelt. Dazu werden die Spannungen  $\sigma_{Ed}$ ,  $T_{Ed}$  am Bruttoquerschnitt, d.h. einschließlich der Längssteifen, nach Abminderung der Flanschbreiten infolge Schubverzerrung berechnet.

Die Anzahl der zu berücksichtigenden Reihenglieder  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_q$  berechnet das Programm in Abhängigkeit der geometrischen Bedingungen automatisch. Die Genauigkeit des Resultats wird mittels Iteration gewährleistet.

Beim **Verfahren der wirksamen Fläche** ergibt sich dann die kritische Verzweigungslast für das Platten- und Schubbeulen zu

$$\sigma_{cr} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{Ed} \quad \dots \text{ und } \dots \quad \tau_{cr} = \alpha_{cr} \cdot \tau_{Ed}$$

die in die Berechnung des Beulschlankheitsgrads  $\lambda$  eingehen. Diese genauere Ermittlung der Beulwerte darf für den Beulnachweis unter Querspannung nicht angewendet werden.

Bei der **Methode der reduzierten Spannungen** wird mit dem Laststeigerungsfaktor  $\alpha_{cr}$  direkt der bezogene Beulschlankheitsgrad  $\lambda$  ermittelt.

Die Beulwertberechnung von langen schlanken Beulfeldern mit einer gering dimensionierter Querspannung  $\sigma_{z,Ed}$  ist besonders aufwändig, da die Genauigkeit des Ergebnisses im Besonderen abhängig ist von der Anzahl an Reihengliedern in Längsrichtung des Beulfelds.

Aufgrund der durch die Beulfeldlänge beeinflussten zunehmenden Längsspannung (das Moment unter der Querlast wächst an) verringert sich der Beulwert mit zunehmendem Längen-/Höhenverhältnis.

Bei Variationen der Beulfeldlänge fällt auf, dass ab einem Längen-/Höhenverhältnis von etwa 10 die berechneten Beulwerte stark absinken.

**pcae** empfiehlt daher, das Verhältnis der Beulfeldabmessungen auf Länge/Breite = 10 zu begrenzen.

## 6 Allgemeines

### 6.1 Stahlsorten

In **pcae**-Programmen werden folgende typisierten Stahlsorten vorgehalten (s. EC 3-1-1, 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 <sup>2</sup>
char. Zugfestigkeit	$f_u$	430.0 N/mm <sup>2</sup>
E-Modul	E	210000 N/mm <sup>2</sup>
Korrelationsbeiwert	$\beta_w$	0.85

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

### 6.2 Ausdrucksteuerung

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

**Ausdrucksteuerung**

**Eingabeprotokoll**

- ☒ Grafik im Maßstab 1: 0,0
- ☒ Eingabeparameter
- ☒ Teilsicherheitsbeiwerte
- ☐ zusätzliche Informationen
- ☐ Parameter des nationalen Anhangs
- ☐ Vorschriften

**Ergebnisse**

- ☐ ausführlich
- ☒ standard
- ☐ minimal
- ☒ Bemessungsgrößen
- ☒ Zwischenergebnisse

Zunächst kann eine maßstäbliche **grafische Darstellung** des Querschnitts 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 **Teilsicherheitsbeiwerte** ausgedruckt.

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

Im Anschluss an die Ergebnisse sind die für den Nachweis maßgebenden **Parameter des nationalen Anhangs** angeordnet.

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

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



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

Beispielausdrucke, auch in englischer Sprache, finden Sie im Internet unter [www.pcae.de](http://www.pcae.de).

## 6.3

### 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 Stahlhochbau 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](http://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:  $\zeta$ -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

## 8 Index

Abkürzungen.....	2	Längssteifen.....	40
Anhang nationaler.....	48	Lastbild.....	2
Ausdrucksteuerung.....	47	Lastfall.....	2
Ausnutzung.....	27	Lastkollektiv.....	2
Bauteil erzeugen.....	7	Materialsicherheitsbeiwert.....	11
Bemessungsschnittgrößen.....	25	Ordner.....	7
Beulfaktoren.....	44	Plattenbeulen.....	16, 30
Beulnachweis.....	14	Profil.....	11
Beulwert.....	33	Profil parametrisiertes.....	11
blank.....	2	Querbelastung.....	22
Buttons.....	2	Querlastbeulen.....	15, 37
Cursor.....	2	Querschnittsfläche effektive.....	29
Druckliste.....	47	Querschnittsklasse.....	41
Einwirkung.....	2	Quersteife.....	12, 40
e-Mail.....	6	Schnittgrößen.....	25
Englisch.....	48	Schnittgrößenimport.....	25
Extremalbildungsvorschrift.....	2	Schreibtisch.....	6
Fremdsprache.....	48	Schreibtischauswahl.....	5
Gesamtfeldbeulen.....	17	Schubbeulen.....	19, 35
Import.....	25	Schubverzerrung.....	20, 29
Installation.....	5	Stahlsorte.....	11, 47
Interaktion.....	20, 38	Startsymbol.....	5
Kontextsensitivität.....	6	Steuerbutton.....	6
Längssteife.....	12		