

4H-EC3BL Beul- u. Querschnittsklasse 4-Nachweise

Detailinformationen

Seite überarbeitet Dezember 2023

Kontakt



Programmübersicht



Bestelltext



Infos auf dieser Seite

... als pdf



- Eingabeoberfläche
- Geometrie u. Material
- Rechenlaufsteuerung
- Nachweisergebnisse
- Schnittgrößen
- Schnittgrößenimport
- Theorie Blechbeulen EC 3-1-5
- ... Schubverzerrungen
- ... Verf. wirksame Q-Fläche
- ... Schubbeulen
- ... Querlastbeulen
- ... Interaktionen
- ... Methode reduz. Spanngn.
- ... flanschinduz. Stegbeulen
- ... Steifen
- ... Querschnittsklasse
- Werkzeug Beulfaktoren

Eingabeoberfläche

4H-EC3 - Beulnachweise [Position 10: SK'15, Lener, Bsp.3b, S.275]

☒ einheitliche Stahlorte
Stahlorte: S 355 ☐ Vorgabe

Materialisicherheitsbeiwerte (☒ genormte Werte)

Beanspruchbarkeit von Querschnitten γ_{M0} 1.00

Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen γ_{M1} 1.10

☐ Beulfeld

☒ Träger

☐ Profil aus Profilmanager

☒ parametrisiertes Stahlprofil

Profilklasse: I-Profil

Profilhöhe h 3000.0 mm

Stegdick t_w 15.0 mm

Flanscbreite oben b_{fo} 800.0 mm

Flanscdicke oben t_{fo} 40.0 mm

Flanscbreite unten b_{fu} 800.0 mm

Flanscdicke unten t_{fu} 40.0 mm

☐ gewalztes Profil

☒ geschweißtes Profil

Schweißnahtdicke a_o 0.0 mm

a_u 0.0 mm

☐ Quersteifen zur seitlichen Begrenzung des Beulfelds

☒ Längssteifen Anzahl n_{st} 1

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

☐ Profil aus Profilmanager

☒ parametrisiertes Stahlprofil

Profilklasse: Flachstahl

Höhe h 250.0 mm

Dicke t 25.0 mm

dst0

Bild vergrößern

Mit dem Programm 4H-EC3BL, Beulnachweise, können einzelne Beulfelder oder ausgewählte Trägerprofile nachgewiesen werden.

Die zugehörigen Verbindungsparameter werden in eigenen Registerblättern verwaltet, die über folgende Symbole

die dahinter liegende Parameterauswahl kenntlich machen.



Geometrie und Material

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



Rechenlaufsteuerung

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



Bemessungsschnittgrößen

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

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

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



Ausdrucksteuerung

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



Druckliste einsehen

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



Ausdruck

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



Planbearbeitung

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

Der aktuelle Querschnitt wird im **pcae**-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.



im Register 1 werden die Material- und Geometrie-Parameter festgelegt.

Teilsicherheitsbeiwerte

Im Programm 4H-EC3BL werden nach EC 3-1-8 folgende Materialsicherheitsbeiwerte herangezogen

Materialsicherheitsbeiwerte	(☒ genormte Werte)
Beanspruchbarkeit von Querschnitten	γ_{M0} 1.00
Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen	γ_{M1} 1.10

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

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.

☒ **einheitliche Stahlsorte**

Stahlsorte ☐ Vorgabe

Kennung

Da die Beschreibung der Stahlparameter nach EC3 programmübergreifend identisch ist, wird auf die allgemeine Beschreibung der [Stahlorten](#) verwiesen.

Geometrie

Das Programm 4H-EC3BL weist die Tragfähigkeit eines typisierten Querschnittsprofils oder auch nur eines Beulfelds nach.

Dazu sind entweder die Abmessungen des Beulfelds

☒ **Beulfeld**

Blechdicke t mm

Blechbreite b 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.

☒ **Träger**

☒ Profil aus Profilmanager [neu](#)

☐ parametrisiertes Stahlprofil

Profilname

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 3080.0 mm
 Stegdicke t_w 15.0 mm
 Flanschbreite oben b_{fo} 800.0 mm
 Flanschdicke oben t_{fo} 40.0 mm
 Flanschbreite unten b_{fu} 800.0 mm
 Flanschdicke unten t_{fu} 40.0 mm

☐ gewalztes Profil
☒ geschweißtes Profil

Schweißnahtdicke a_o 6.0 mm
 a_u 6.0 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.

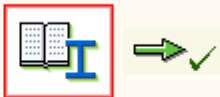
Die Steifen können ebenso entweder aus dem Profilmanager ausgewählt oder parametrisiert eingegeben werden.

Als Quersteifen stehen Winkel-, U- bzw. C-, T- bzw. 1/2I-, Trapez-Profile und Flachstähle 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**

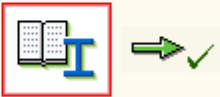
Anzahl n_{st} 2

Abstand der ersten Steife $d_{st,0}$ 350.0 mm
 von Oberkante Träger

Abstand der Steifen d_{st} 100.0 mm
 voneinander

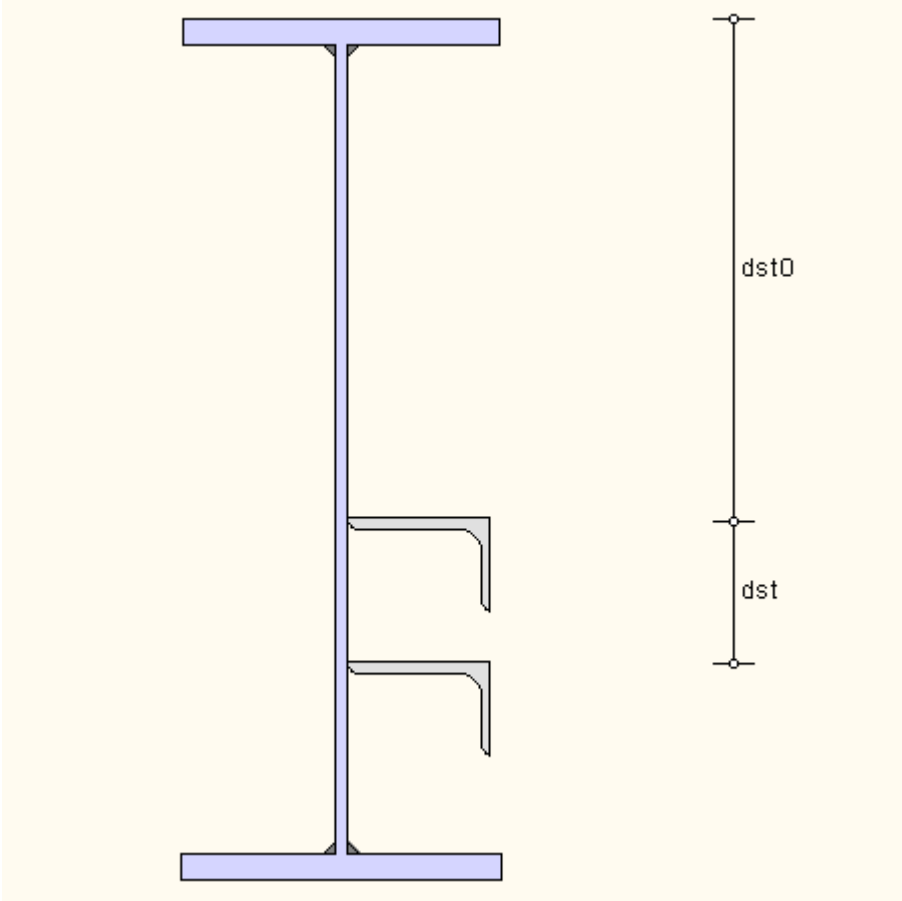
☒ Profil aus Profilmanager **neu**
☐ parametrisiertes Stahlprofil

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.



Rechenlaufsteuerung



im Register 2 befinden sich die Angaben zur Rechenlaufsteuerung.

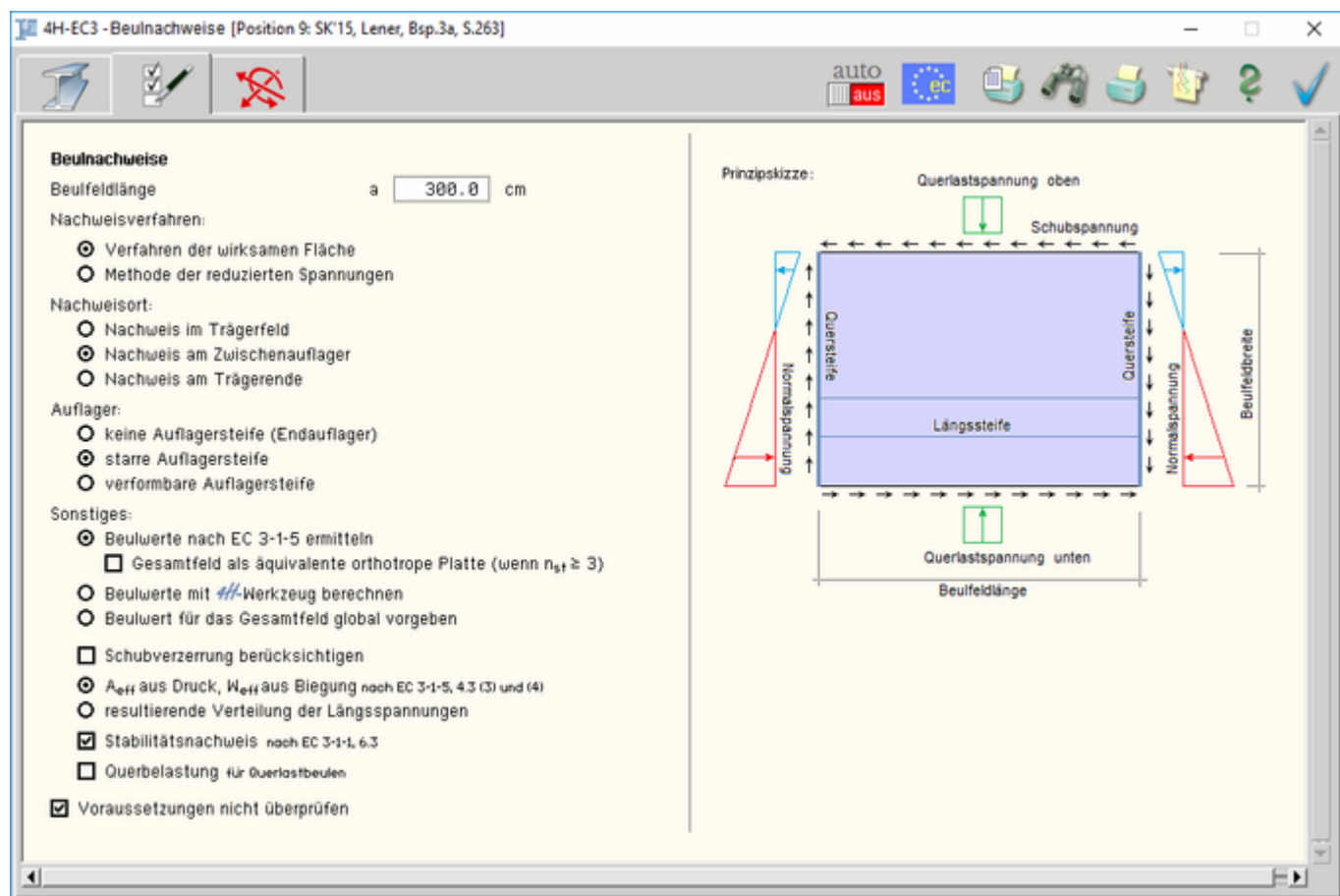


Bild vergrößern

Beulnachweise

Der Programmablauf und die Bedeutungen der Einstellungen werden in Anlehnung an zwei Literaturbeispiele aus Timmers, Lener et.al.: *Stabilitätsnachweise nach EC 3-1-5 - Theorie und Beispiele*, *Stahlbaukalender 2015* erläutert.

Beispiel 3 - Platten-/Schubbeulen

System

Ein geschweißter Blechträger (parametrisiertes I-Profil, Schweißnähte irrelevant) wird durch eine Längssteife verstärkt.

Sämtliche Blechteile sind in einheitlicher Stahlgüte ausgeführt, die Materialsicherheitsbeiwerte 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

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

Schnittgrößen bezogen auf den versteiften Querschnitt:

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

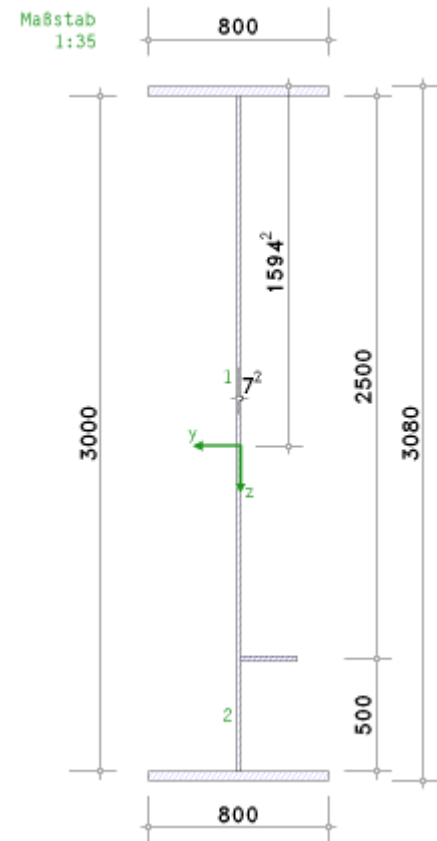
$N_{Ed} = -4000.0$ kN $M_{Ed} = -33760.0$ kNm $V_{Ed} = 3437.5$ kN

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



Rechenparameter

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 Zwischenaufleger** geführt werden.

Wird der Nachweis am Zwischenaufleger 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

Beulnachweise

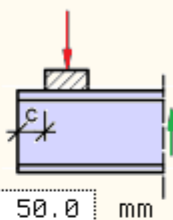
Beulfeldlänge a cm

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 ~~4H~~-Werkzeug berechnen
 - ☐ unter kombinierter Beanspruchung
- ☐ Beulwert für das Gesamtfeld global vorgeben

Vergrößerungsfaktor α_{cr}

zum Erreichen der elastischen Verzweigungslast $\sigma_{cr} = \alpha_{cr} \sigma_{Ed}$
- ☐ 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

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 4H-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 4H-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.

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

Der Beulnachweis kann als Querschnittsnachweis mit dem Sicherheitsbeiwert γ_{M0} oder als Stabilitätsnachweis für Biegeknicken und Biegedrillknicken mit γ_{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.

☒ 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 =0: nur eine Einzellast	a_R	360.0	cm

In diesem Beispiel wird Querlastbeulen nicht untersucht.

Die Voraussetzungen zur Anwendung der Verfahren sind zu überprüfen (kann unterdrückt werden).

☒ Voraussetzungen nicht überprüfen

In diesem Beispiel ist die Einhaltung der Voraussetzungen nicht relevant.

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 mitragenden 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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 !!

Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche

• Plattenbeulen

Der Nachweis für Plattenbeulen wird anhand des ersten Lastkollektivs (s.o.) erläutert.

Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen [Erläuterungen](#) beschrieben.

Nachweis getrennt nach den Lastkomponenten

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

Plattenbeulen

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

Spannungen in den Gurtblechen $\sigma_o = 34.7 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_u = 34.7 \text{ N/mm}^2$

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

Flansch oben = Flansch unten:

Beulfeld: $b = 392.5 \text{ mm}$, $t = 40.0 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 34.7 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 34.7 \text{ N/mm}^2$

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

keine Abminderung: $\rho = 1$

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

Sind die Flansche jedoch beulgefährdet (z.B. bei $t_f = 20 \text{ mm}$) 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: $b = 392.5 \text{ mm}$, $t = 20.0 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 47.7 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 47.7 \text{ N/mm}^2$

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

Plattenbeulen:

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

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

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

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 $b_{c,eff} = \rho \cdot b = 259.5 \text{ mm}$

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 $\sigma_o = 34.7 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_u = 34.7 \text{ N/mm}^2$

Beulfeld 1:

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

Beulfeld: $b = 2487.5 \text{ mm}$, $t = 15.0 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 34.7 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 34.7 \text{ N/mm}^2$

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

Plattenbeulen:

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

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

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

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

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

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

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten:

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

..... $b' = 2000.0 \text{ mm}$

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

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

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

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

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

Beulfeld 2:

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

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

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

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

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

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

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

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

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',

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

endgültiger Abminderungsfaktor $\rho = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.848$ mit $\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} - 1 = 0.012$, $0 \leq \xi \leq 1$

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 $b_{i+1,e1} = b_{i+1,b}/2$.

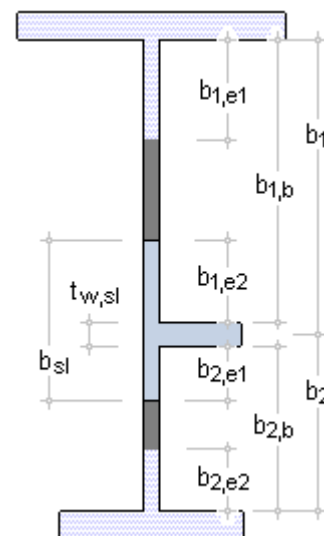
Die Extrapolation der kritischen Beulspannung der Steife auf den am meisten gedrückten Blechrand erfolgt über die einwirkenden Spannungen σ_1 und σ_{sl} .

Der Beulschlankheitsgrad 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 ρ 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:
 Schwerpunktabstand 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.

Plattenbeulen

Effektives Widerstandsmoment für $M_{Ed} = 33760.0 \text{ kNm}$, $N_{Ed} = 0$
 Spannungen in den Gurtblechen $\sigma_o = -283.4 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_u = 263.9 \text{ N/mm}^2$

Flansch oben:

Zugblech: $b = 392.5 \text{ mm}$, $\sigma_1 = -283.4 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = -283.4 \text{ N/mm}^2$
 wirksame Breite $b_{t,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$
 Gesamtbreite $b = 2 \cdot b_{t,eff} + t_w = 800.0 \text{ mm}$

Flansch unten:

Beulfeld: $b = 392.5 \text{ mm}$, $t = 40.0 \text{ mm}$, $\sigma_1 = 263.9 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 263.9 \text{ N/mm}^2$
 Querschnittsklasse 3 für $8.14 < c/t = 9.81 < 11.20$
 keine Abminderung: $\rho = 1$
 wirksame Breite $b_{c,eff} = b = 392.5 \text{ mm}$
 Gesamtbreite $b = 2 \cdot b_{c,eff} + t_w = 800.0 \text{ mm}$

Der weitere Berechnungsablauf entspricht demjenigen für reinen Druck.

Es ergibt sich das aufnehmbare Biegemoment, wobei das Widerstandsmoment bei einer Berechnung ohne Iteration auf die Mittelebene des Druckflanschs bezogen werden darf (EC 3-1-5, 4.2(2)).

Traglasten bezogen auf den reduzierten Querschnitt:
 Schwerpunktabstand von oben $z_{s,eff} = 1579.7 \text{ mm}$
 Flächenträgheitsmoment $I_{y,eff} = 18595061.34 \text{ cm}^4$
 Widerstandsmoment $W_{y,eff} = 125619.21 \text{ cm}^3$
 bezogen auf die Mittelebene des Druckflanschs
 Traglasten $M_{Rd} = (f_y \cdot W_{eff}) / \gamma_{M0} = 44594.82 \text{ kNm}$

Der Nachweis wird mittels der M-N-Interaktion geführt.

Nachweis (M-N-Interaktion)

Einwirkendes Moment $M_{Ed}' = M_{Ed} - \Delta M_{Ed} = 33454.78 \text{ kNm}$
 $|N_{Ed}|/N_{Rd} + |M_{Ed}'|/M_{Rd} = 0.132 + 0.750 = 0.882 < 1$ **ok.**

Es ergibt sich ein Unterschied zur Literaturvorlage, da in der Veröffentlichung das minimale auf den Steg bezogene Widerstandsmoment angesetzt wird. Dies entspricht jedoch nicht der Orientierung des Moments.

Nachweis mit resultierender Verteilung der Längsspannungen

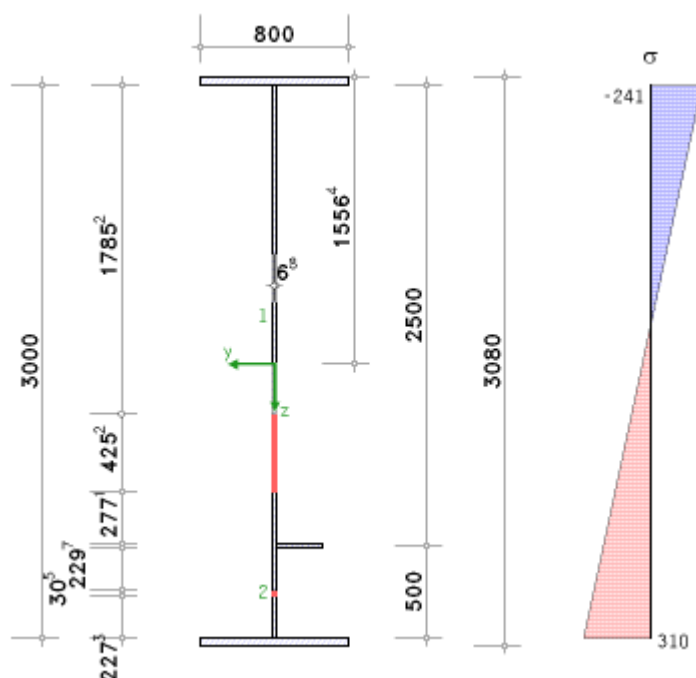
Erfolgt jedoch die Berechnung aus gleichzeitiger Wirkung von N_{Ed} und M_{Ed} , erhält man nach drei Iterationsschritten dieselbe Ausnutzung (zufällig), wobei jedoch die effektiven Querschnittswerte durchaus verschieden sind.

Traglasten bezogen auf den reduzierten Querschnitt:
 Schwerpunktabstand von oben $z_{s,eff} = 1556.4 \text{ mm}$
 Differenzmoment aus $\Delta z_s = -37.8 \text{ mm}$: $\Delta M_{Ed} = -151.22 \text{ kNm}$
 Querschnittsfläche $A_{eff} = 1076.83 \text{ cm}^2$
 Flächenträgheitsmoment $I_{y,eff} = 18471446.28 \text{ cm}^4$
 Widerstandsmomente $W_{y,eff,o} = 120223.49 \text{ cm}^3$
 $W_{y,eff,u} = 122850.24 \text{ cm}^3$
 Traglasten $N_{Rd} = (f_y \cdot A_{eff}) / \gamma_{M0} = 38227.50 \text{ kN}$
 $M_{Rd,o} = (f_y \cdot W_{eff,o}) / \gamma_{M0} = 42679.34 \text{ kNm}$
 $M_{Rd,u} = (f_y \cdot W_{eff,u}) / \gamma_{M0} = 43611.84 \text{ kNm}$

Nachweis

Einwirkendes Moment $M_{Ed}' = M_{Ed} - \Delta M_{Ed} = 33911.22 \text{ kNm}$
 $|N_{Ed}|/N_{Rd} + |M_{Ed}'|/M_{Rd,u} = 0.105 + 0.778 = 0.882 < 1$ **ok.**

Ist in der **Ausdrucksteuerung** der Umfang der Druckausgabe nicht **minimal** und sind die **Erläuterungsskizzen** angewählt, werden der reduzierte Querschnitt (die Fehlfächen sind rot gekennzeichnet und vermaßt) sowie die resultierende Spannungsverteilung auf den Steg dargestellt.



• Schubbeulen

Der Nachweis gegen Schubbeulen wird anhand des ersten Lastkollektivs (s.o.) erläutert.

Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen **Erläuterungen** beschrieben.

Die Einzelfelder und das Gesamtfeld werden untersucht.

Schubbeulen

Beulfeld 1:

Schubbeulen: $h_w/t_w = 166.67 > 72 \cdot \epsilon / \eta = 48.82$, $h_w = 2500.0$ 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/mm² mit $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 6.8$ N/mm², $b' = h_w$

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: $h_w/t_w = 33.33 \leq 72 \cdot \epsilon / \eta = 48.82$, $h_w = 500.0$ 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: $h_w/t_w = 200.00 > 31 \cdot \epsilon \cdot k_\tau^{1/2} / \eta = 85.14$, $k_\tau = 16.41$, $h_w = 3000.0$ mm $\Rightarrow$ genauer Nachweis !

wirksame Fläche der Flansche ohne durch angrenzende Plattenbauteile gestützte Querschnittsteile

$A_{f1} = 320.00$ cm² mit $b_{f1} = 800.0$ mm, $A_{f2} = 320.00$ cm² 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 Biege normalspannungen 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.

$$M_{Ed} = 20000.00 \text{ kNm} < M_{f,Rd} = 28454.40 \text{ kNm}$$

$$\text{Flansch 1: } t_f = 40.0 \text{ mm, } b_f = 800.0 \text{ mm} \leq 2 \cdot 15 \cdot t_f \cdot \epsilon = 991.3 \text{ mm}$$

$$c = a \cdot (0.25 + (1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (t_w \cdot h_w^2 \cdot f_y)) = 795.5 \text{ mm}$$

$$\text{Flansch 2: } t_f = 40.0 \text{ mm, } b_f = 800.0 \text{ mm} \leq 2 \cdot 15 \cdot t_f \cdot \epsilon = 991.3 \text{ mm}$$

$$c = a \cdot (0.25 + (1.6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (t_w \cdot h_w^2 \cdot f_y)) = 795.5 \text{ mm}$$

$$\text{Beanspruchbarkeit } V_{bf,Rd} = (b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y) / (c \cdot \gamma_{M1}) \cdot (1 - (M_{Ed} / M_{f,Rd})^2) = 262.73 \text{ kN}$$

Beitrag des Stegs:

EC 3-1-5, Anhang A.3 (Schubbeulwert):

mitwirkende Breite der Steife $b_{sl} = 391.1 \text{ mm}$, angrenzende Beulfelder $b_1 = 2500.0 \text{ mm}$, $b_2 = 500.0 \text{ mm}$

Schubbeulwert für $a/h_w = 1.00 < 3$: $k_\tau = 4.1 + (6.3 + 0.18 \cdot |s_l| / (h_w \cdot t_w^3)) / (a/h_w)^2 + 2.2 \cdot (|s_l| / (h_w \cdot t_w^3))^{1/3} = 16.41$,

$a = 3000.0 \text{ mm}$, $h_w = 3000.0 \text{ mm}$, $|s_l| = 8579.1 \text{ cm}^4$

kritische Schubbeulspannung $\tau_{cr,p} = k_\tau \cdot \sigma_E = 77.9 \text{ N/mm}^2$ mit $\sigma_E = \pi^2 \cdot E / (12 \cdot (1 - \mu^2)) \cdot (t/b')^2 = 4.7 \text{ N/mm}^2$, $b' = h_w$

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 $V_{bw,Rd} = (\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 4945.45 \text{ kN}$

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

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 4945.4 \text{ kN} < \lim V_{b,Rd}$

mit $\lim V_{b,Rd} = 1 \cdot (\eta \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w) / (3^{1/2} \cdot \gamma_{M1}) = 10061.64 \text{ kN}$

Traglasten $V_{b,Rd,min} = 4379.9 \text{ kN}$, $V_{bw,Rd,min} = 4379.9 \text{ kN}$

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 $V_{b,Rd,min} = V_{b,Rd,1}$.

• 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](#) 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:

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

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

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

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

mit $M_{f,k} = \min(Ar_1, Ar_2) \cdot (h_w + (t_{r1} + t_{r2}) / 2) \cdot f_y = 34534.4 \text{ kNm}$

$N_{Ed} > 0$: $f_{N,f} = 1 - N_{Ed} / ((Ar_1 + Ar_2) \cdot f_y / \gamma_{M0}) = 0.824$

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

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

Zunächst wird die nur auf den Steg bezogene Tragfähigkeit aus Schubbeulen η_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.

Methoden der reduzierten Spannungen

Der Nachweis wird anhand des dritten Lastkollektivs (s.o.) erläutert.

Der Berechnungsvorgang wird in den allgemeinen [Erläuterungen](#) 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:

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

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

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

$$\text{für } 0.02 < \kappa \leq 0.70: \beta_1 = 1 / (1 + 6 \cdot \kappa^2) = 0.990,$$

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

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

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

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

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 4H-Werkzeug ermittelt werden und bei der **Methode der reduzierten Spannungen** grundsätzlich eine kombinierte Beanspruchung vorliegt, können die Beulwerte vorab berechnet werden.

Beulwerte (4H-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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

Beulfeld 1:

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

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

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

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

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

Plattenbeulen:

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

$$\text{Schubbeulen: } \psi = -1.184$$

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

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

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

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 $\lambda_p > 0.5 + (0.085 - 0.055 \cdot \psi)^{1/2} = 0.861$,

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten: $\psi = -0.824$

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 $\chi_c = 1 / (\Phi + (\Phi^2 - \lambda_c^2)^{1/2}) = 0.420 \leq 1$ 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 Knickeinie '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.

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.

Beispiel 4 - Querlastbeulen

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 $h = 1320.0$ mm, Stegdicke $t_w = 20.0$ mm
Flanschbreite $b_f = 600.0$ mm, Flanschdicke $t_f = 60.0$ mm

Längssteifen: Anzahl $n_{st} = 1$

Profilparameter (Flachstahl):

Höhe $h = 140.0$ mm, Dicke $t = 40.0$ mm
Abstand der Steife von Oberkante Träger $d_{st,0} = 940.0$ mm

Belastung

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

Der Querschnitt wird maßstäblich dargestellt, die Lasteinleitungsstelle (Ober- oder Untergurt) ist gekennzeichnet.

Bei Kastenträgern können keine Einzellasten berechnet werden.

Rechenparameter

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

Beulnachweise

Beulfeldlänge

a

240.0

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

Einzellast unten

starre Lasteinleitungslänge auf Außenkante des Untergurts

$F_{z,Ed}$

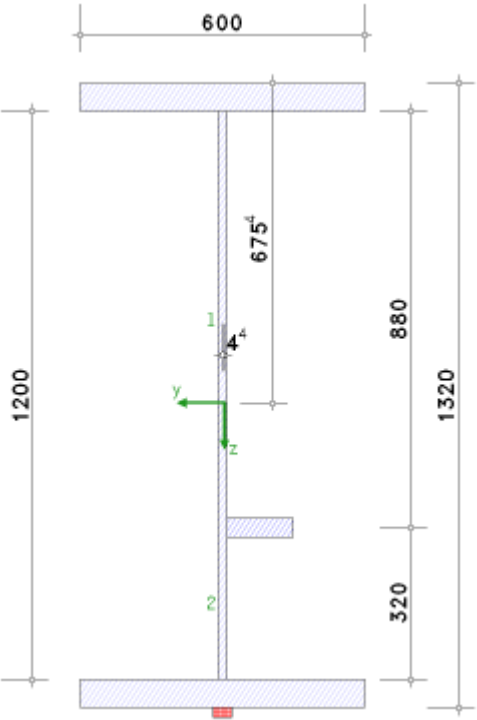
4000.0

kN

s_s

600.0

mm



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 4H-EC3BL weist jedoch die Ausnutzungen gegenüber einer Einwirkung aus.

Daher wird hier eine Querlast von 4.000 kN angesetzt.

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** beschrieben.

Querlastbeulen

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

Einzelfeld 2:

Beulfeld $a = 2400.0 \text{ mm}$, $h_w = 300.0 \text{ mm}$, $t_w = 20.0 \text{ mm}$

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

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

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

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

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

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

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

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

Nachweis

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

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

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

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

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

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

Nachweis

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

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 $b_1 = 320.0 \text{ mm}$, $b_2 = 880.0 \text{ mm}$

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

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

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

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

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

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

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 4H-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 $\rho_z = 1/(\phi_p + (\phi_p^2 - \lambda_p)^{1/2}) = 1.167$ mit $\phi_p = (1 + \alpha_p \cdot (\lambda_p - \lambda_{p0}) + \lambda_p)/2 = 0.857$, $\alpha_p = 0.34$, $\lambda_{p0} = 0.8$

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.**

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**.

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 $n_{st} \geq 3$)

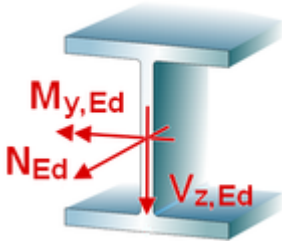
Analog zur Beulspannung für die Plattenbeuluntersuchung mit reiner Druckkraft ergibt sich für das ausgesteifte Gesamtfeld des äquivalenten orthogonalen Stegblechs

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

Schnittgrößen



das dritte Register beinhaltet die Maske zur Eingabe der Bemessungsschnittgrößen 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.

Beulfeld				Bezeichnung	Zeile löschen	Zeile duplizieren	neue Zeile anhängen
NEd	My,Ed	Vz,Ed					
kN	kNm	kN					
	-4000.0	-33760.0	3437.5	Platten- + Schubbeulen (Kap. 5.1.1-4)			

Schnittgrößen importieren

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

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

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

Schnittgrößen aus Programm importieren

Schnittgrößen aus Text-Datei einlesen

• Import aus einem 4H-Programm

Voraussetzung zur Anwendung des DTE[®]-Import-Werkzeugs ist, dass sich ein **pcae**-Programm auf dem Rechner befindet, das Ergebnisdaten exportieren kann.
Eine ausführliche Beschreibung zum Schnittgrößenimport aus einem **pcae**-Programm befindet sich [hier](#).

• Import aus einer Text-Datei

Die Schnittgrößenkombinationen können aus einer Text-Datei im ASCII-Format eingelesen werden.
Die Datensätze müssen in der Text-Datei in einer bestimmten Form vorliegen; der entsprechende Hinweis wird bei Betätigen des **Einlese**-Buttons gegeben.
Anschließend wird der Dateiname einschl. Pfad der entsprechenden Datei abgefragt.
Es werden sämtliche vorhandenen Datensätze eingelesen und in die Tabelle übernommen. Bereits bestehende Tabellenzeilen bleiben erhalten.
Wenn keine Daten gelesen werden können, erfolgt eine entsprechende Meldung am Bildschirm.

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	▶ maßgeb. Lk
	-4000.0	-32150.0	3288.0	0.846	
	-4000.0	-32750.0	3290.0	0.859	

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.

allgemeine Erläuterungen zur Theorie Blechbeulen EC 3-1.5

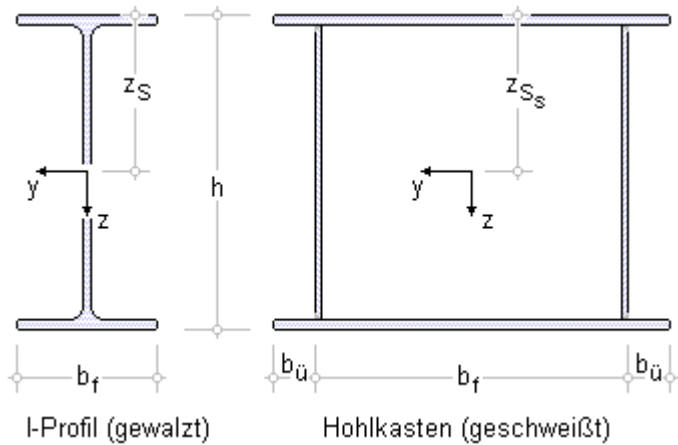
Einleitung

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

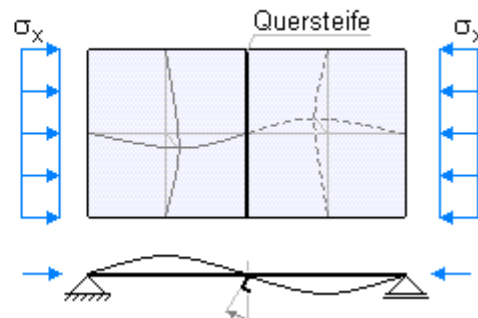
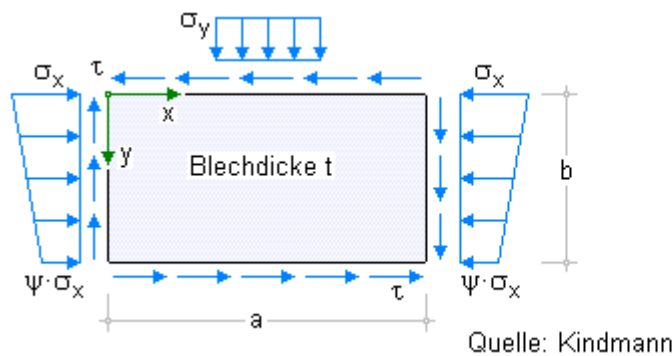
Biegeknicken / Biegedrillknicken treten bei stabförmigen, schlanken Bauteilen unter hoher Druckbeanspruchung auf. Plattenbeulen wird bei ebenen Flächentragwerken durch Druckspannungen und/oder Schubspannungen verursacht. Die Beanspruchungen entsprechen dabei den Schnittgrößen von Scheiben, die Auswirkungen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

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

Im Programm 4H-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.

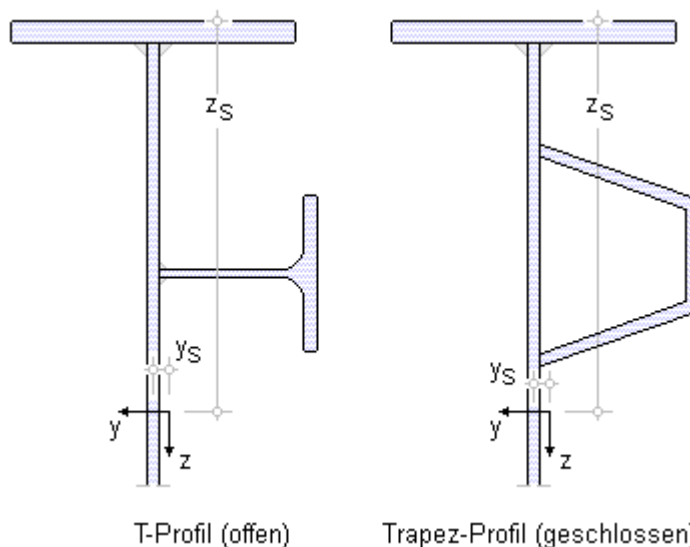
Es wird vorausgesetzt, dass die Quersteifen derart ausgebildet und angeordnet sind, dass sie als seitliche Auflager eines Beulfelds dienen.

Längssteifen wirken nur im Druckbereich des Beulfelds, sind dadurch allerdings selbst beulgefährdet.

Es muss sichergestellt sein, dass sie eine ausreichende Beulsicherheit aufweisen.

Im Programm 4H-EC3BL werden nur diskrete (keine verschmierten) 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.



T-Profil (offen)

Trapez-Profil (geschlossen)

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 Biegenormalspannungen 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 β 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 β für die mittragende Breite wird nach EC 3-1-5, Tab. 3.1, bestimmt.

EC 3-1-5, Tab. 3.1 - Abminderungsfaktor β 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 κ	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

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

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

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

κ nach EC 3-1-5, Tab. 3.1

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.

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

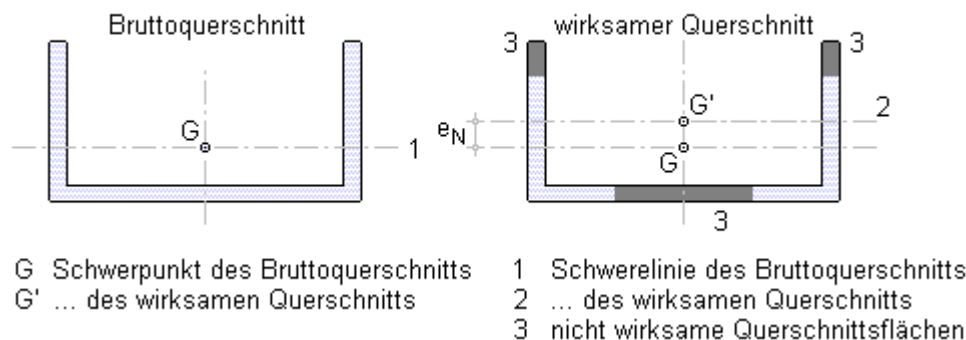
Plattenbeulen

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



Einzelblechfelder ohne Längssteifen

Die wirksame Fläche der Druckzone eines unausgesteiften Blechfelds wird berechnet mit

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

Plattenartiges Verhalten

Abminderungsbeiwert ρ 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)

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

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

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

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

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

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

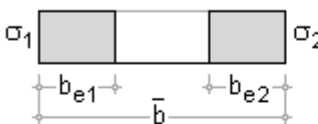
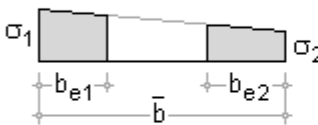
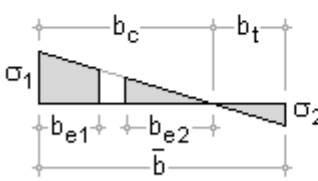
$$b \quad \text{Beulfeldbreite}$$

$$t \quad \text{Beulfelddicke}$$

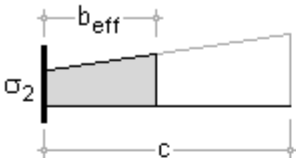
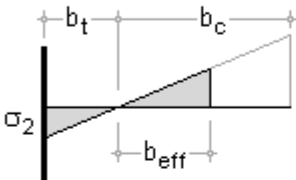
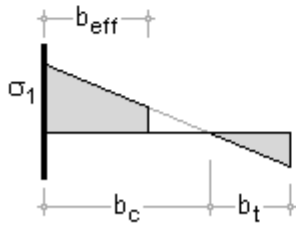
$$E, f_y, \nu \quad \text{Materialbeiwerte}$$

$$\psi = \sigma_1 / \sigma_2 \quad \text{... und ... } \sigma_1 \geq \sigma_2 \quad \text{Randspannungsverhältnis (Druck positiv)}$$

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_σ	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}		
				$1 > \psi \geq 0 \dots b_{\text{eff}} = \rho \cdot c$		
				$\psi < 0 \dots b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$-1 > \psi > -3$		
Beulwert k_σ	0.43	0.57	0.85	$0.57 - 0.21 \cdot \psi + 0.07 \cdot \psi^2$		
				$1 > \psi \geq 0 \dots b_{\text{eff}} = \rho \cdot c$		
				$\psi < 0 \dots b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$		0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_σ	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.

Knickstabähnliches Verhalten

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

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

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

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

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

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

a Beulfeldlänge

t Beulfeldstärke

E, f_y , ν Materialbeiwerte

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Der endgültige Abminderungsfaktor wird bestimmt mit

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

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

$\sigma_{cr,p}$ elastische Plattenbeulspannung

$\sigma_{cr,c}$ elastische Knickspannung

χ_c Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens

ρ Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens

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).

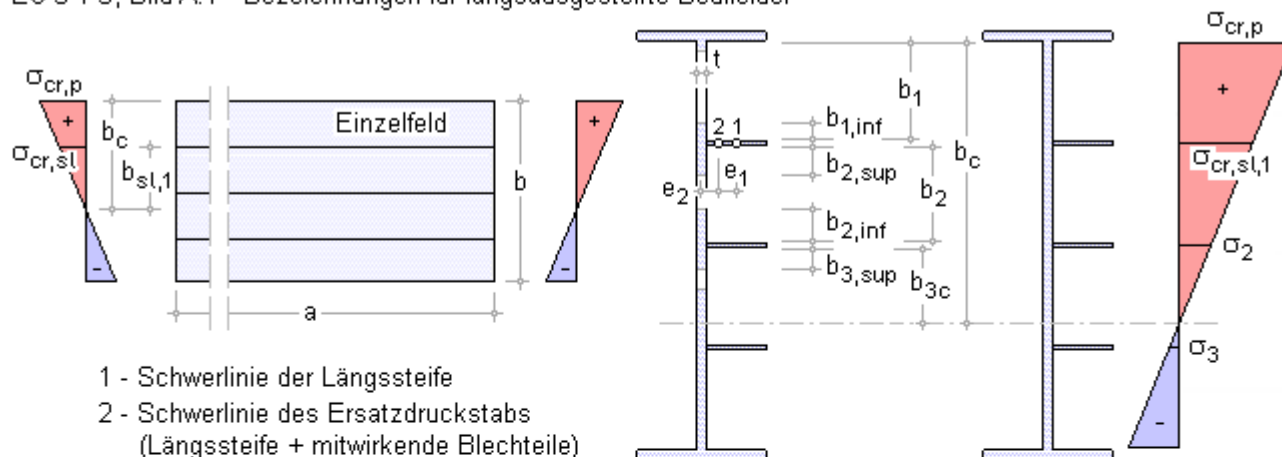
Die wirksame Fläche der Druckzone eines ausgesteiften Blechfelds wird berechnet mit

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

$A_{c,eff,loc}$ 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 ψ_i
$b_{1,inf}$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_1$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_2$	$\frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_2$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0.4 \cdot b_{3c}$	$0.4 \cdot b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

Plattenartiges Verhalten

Blechfelder mit mindestens drei Längssteifen in der Druckzone, deren Steifigkeit verschmiert werden darf, dürfen als äquivalente orthotrope Platten nachgewiesen werden.

Die kritische elastische Plattenbeulspannung am Blechfeldrand 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 Blechfelder mit mindestens drei äquidistant verteilten Längssteifen darf der Beulwert näherungsweise wie folgt bestimmt werden

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

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

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

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

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

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

I_{sl} Flächenträgheitsmoment des gesamten längsversteiften Blechfelds

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

Bei Blechfeldern 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

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

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

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

$I_{sl,1}$ 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 ρ für die äquivalente orthotrope Platte

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

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

sonst gilt $\rho = 1$

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

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

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

Knickstabähnliches Verhalten

Bei längs ausgesteiften Blechfeldern mit großem Seitenverhältnis ($a/b > 1$) kann knickstabähnliches Verhalten auftreten.

Der Abminderungsbeiwert χ_c wird auf Grundlage der maßgebenden Knicklinie bestimmt (s. EC 3-1-1, 6.3.1.2)

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

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

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 α zu vergrößern auf

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

Der Knickschlankheitsgrad des Ersatzdruckstabs ergibt sich zu

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

$I_{sl,1}, A_{sl,1}$ 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 Beulfelddicke

E, f_y Materialbeiwerte

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

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Der endgültige Abminderungsfaktor wird bestimmt mit

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

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

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.)

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

Schubbeulen

Für nicht ausgesteifte Blechfelder mit

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

und für ausgesteifte Beulfelder mit

$$h_w / t > 31 / \eta \cdot \epsilon \cdot \sqrt{\kappa_\tau}$$

h_w lichte Höhe

t Dicke des Blechfelds

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

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

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

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

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 χ_w ist bei Anordnung von Quersteifen an den Auflagern (Auflagersteifen) zu berechnen mit

EC 3-1-5, Tab. 5.1 - Beitrag des Stags χ_w zur Schubbeanspruchbarkeit

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

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

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

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

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

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

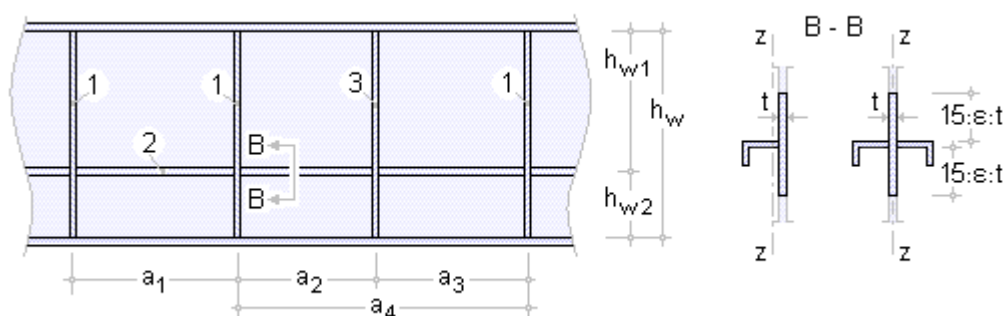
$$k_{\tau,sl} = 9 \cdot (h_w/a)^2 \cdot \sqrt[4]{(I_{sl}/(t^3 \cdot h_w))^3} \geq 2.1/t \cdot \sqrt[3]{I_{sl}/h_w}$$

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



1 - starre Quersteife 2 - Längsst. 3 - verformbare Q.

Grundwert der Beulspannung

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

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

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

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

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

$$M_{f,Rd} = M_{f,k} / \gamma_{M0} \cdot (1 - (N_{Ed} / ((A_{f1} + A_{f2}) \cdot f_y / \gamma_{M0}))) \quad \text{Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit}$$

bei Berücksichtigung allein der effektiven Flächen der Flansche A_{f1} und A_{f2}

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

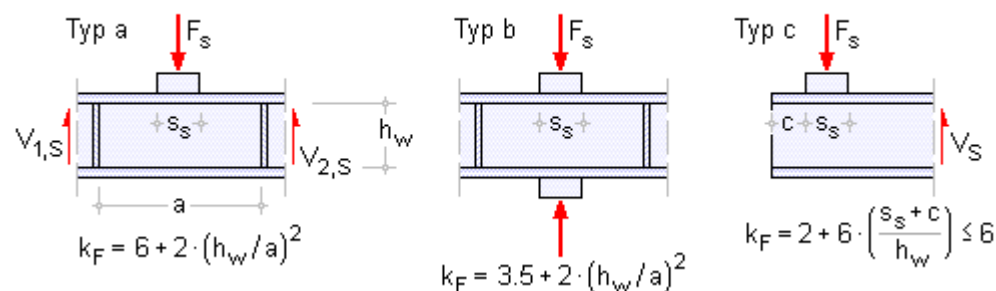
Nachweis

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

Querlastbeulen

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

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



Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

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

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

l_y wirksame Lasteinleitungslänge ohne Stegbeulen

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

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

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

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

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

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

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

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

k_F Beulwert für Stege ohne Längssteifen s. Bild 6.1

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

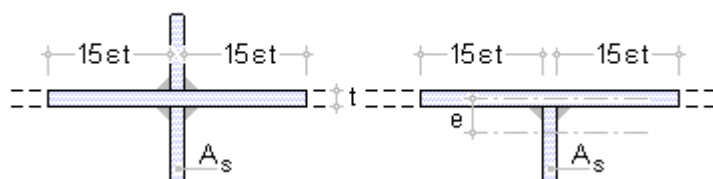
gilt für $0.05 \leq b_1/a \leq 0.3$ und $b_1/h_w \leq 0.3$ für Typ (a)

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 $15 \cdot e \cdot t \leq$ 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

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

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

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

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

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

Nach NA-DE ist eine genauere Ermittlung des Beulwerts $\bar{k}_F$ nach diesem Verfahren z.B. mit Software oder aus Literatur nicht zulässig.

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

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

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

Nachweis

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

Interaktionen

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 $\bar{\eta}_3 > 0.5$ 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.

Interaktion zwischen Querbelastung an den Längsrändern, Biegemoment und 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.

Interaktion zwischen Querbelastung an den Längsrändern und Querkraft (nur NA-DE)

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

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.

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

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

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

ρ ist der Reduktionsbeiwert in Abhängigkeit des Schlankheitsgrads des gesamten Blechfeldes, der

- entweder als kleinster Wert der Reduktionsbeiwerte für Platten- (ρ_x), Querlast- (ρ_z) und Schubbeulen (χ_w) zu dem Nachweisformat

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

- oder als aus den Reduktionsbeiwerten für Platten- (ρ_x), Querlast- (ρ_z) und Schubbeulen (χ_w) interpolierter Reduktionsbeiwert zu dem Nachweisformat

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

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, Stahlbaukalender 2012).

Alle Reduktionsbeiwerte werden gebildet mit dem modifizierten Schlankheitsgrad des Blechfelds

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

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

Kann α_{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 $\alpha_{cr,\tau}$ für τ_{Ed}), so darf der Wert für die gemeinsame Wirkung bestimmt werden mit

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

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

Zur Ermittlung der Reduktionsbeiwerte ρ_x und χ_w s. *Verfahren der wirksamen Querschnittsfläche*.

Für Querbelastung gilt nach NA-DE

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

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

flanschinduziertes Stegbeulen

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

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

$A_w = h_w \cdot t_w$... 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

Steifen

Längssteifen

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

Dazu ist folgendes Kriterium zu erfüllen

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

$I_p = I_y + I_z$ polares Trägheitsmoment um den Anschlusspunkt an das Blech

I_T St. Venant'sches Torsionsträgheitsmoment

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/γ_{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

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

$$\sigma_m = \sigma_{cr,c} / \sigma_{cr,p} \cdot N_{Ed} / b \cdot (1/a_1 + 1/a_2)$$

$$w_0 = s/300 \quad \text{mit ...} \quad s = \min(a_1, a_2, b)$$

$$u = \pi^2 \cdot E \cdot e_{max} / (f_y \cdot 300 \cdot b / \gamma_M) \geq 1$$

$$\sigma_{cr,c} / \sigma_{cr,p} = 1 \quad \text{auf der sicheren Seite liegend}$$

$$N_{Ed} = \sigma_{c,max} \cdot b_c / 2 \quad \text{mit ...} \quad b_c \text{ Höhe der Druckfläche}$$

$$a_1, a_2 \quad \text{Längen der benachbarten Beulfelder}$$

$$e_{max} \quad \text{Abstand der Randfaser zum Schwerpunkt der Steife}$$

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 doppelseitigen Quersteife ist

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

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

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

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

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

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

Querschnittsklasse

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

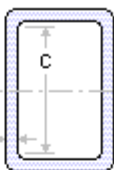
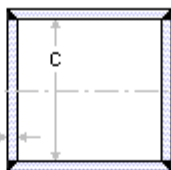
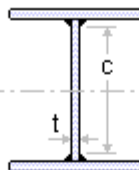
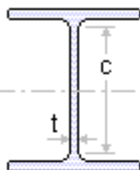
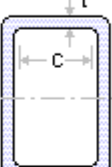
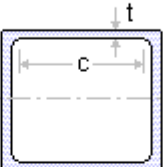
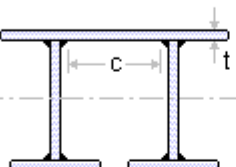
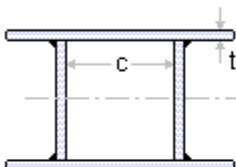
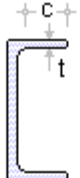
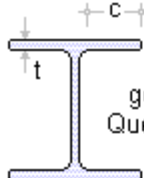
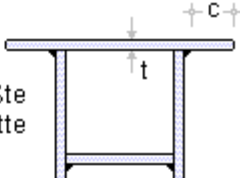
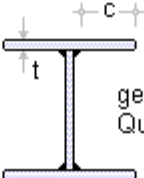
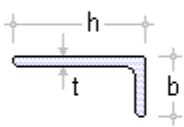
- Querschnitte der Klasse 1 können plastische Gelenke mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität ausbilden
- Querschnitte der Klasse 2 können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, haben aber nur eine begrenzte Rotationskapazität
- Querschnitte der Klasse 3 erreichen 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.

EC 3-1-1, Tab. 5.2 - maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile

beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile																	
  Biegeachse Biegeachse																	
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																	
 gewalzte Querschnitte  geschweißte Querschnitte																	
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_σ 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><tr><td>$e = \sqrt{235/f_y}$</td><td>f_y</td><td>235</td><td>275</td><td>355</td><td>420</td><td>460</td></tr><tr><td></td><td>ϵ</td><td>1.00</td><td>0.92</td><td>0.81</td><td>0.75</td><td>0.71</td></tr></table>				$e = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460		ϵ	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71
$e = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460											
	ϵ	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71											



	ϵ^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 ϵ um

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

$$\sigma_{com,Ed}$$
 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.

4H-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 σ_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.

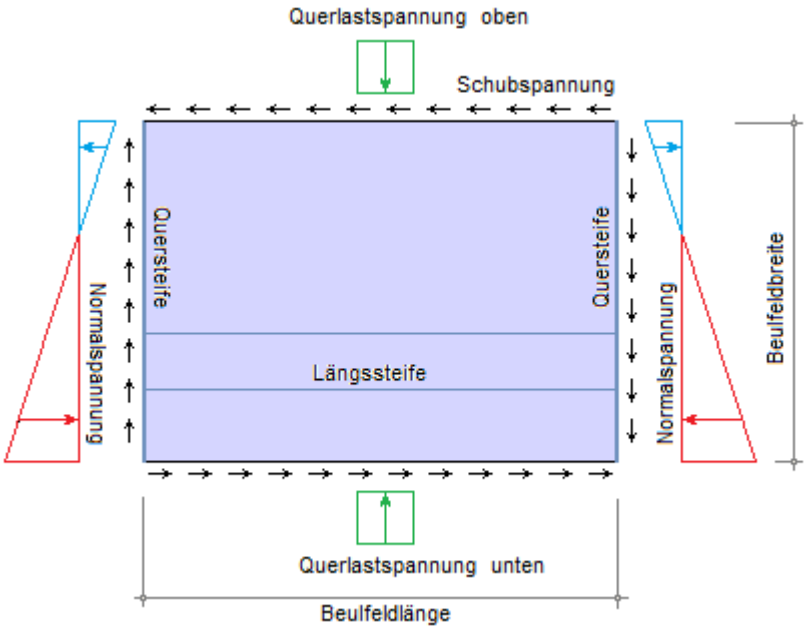
Zur Formulierung der Übergangsbedingungen an den Scheibenlängsrändern wird die Belastung in Fourierreihen entwickelt.

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 Fourierreihenglieder 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.

Berechnungsverfahren

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

$$\bar{\delta} \cdot (\bar{\delta}^2 \cdot \pi_0) = 0$$

formuliert werden kann. Mit π_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

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

$\underline{A}, \underline{B}$ 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 σ_{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.

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.)

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

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

$$\underline{X} \underline{A} \underline{X} = \underline{L} \quad \dots \text{mit } \dots \quad \underline{X} \quad \text{Modalmatrix der Eigenvektoren } \dots \text{ und } \dots$$

$$\underline{L} \quad \text{Diagonalmatrix der Eigenwerte}$$

$$\underline{X} \underline{B} \underline{X} = \underline{I} \quad \dots \text{mit } \dots \quad \underline{I} \quad \text{Einheitsmatrix}$$

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.

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

Implementierung in 4H-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 α_{cr} , bezogen auf die gesamte einwirkende Spannung σ_{Ed} , τ_{Ed} und/oder die einwirkende Querlast $F_{z,Ed}$ ermittelt.

Dazu werden die Spannungen σ_{Ed} , τ_{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

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

die in die Berechnung des Beul schlankheitsgrads λ 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 α_{cr} direkt der bezogene Beul schlankheitsgrad λ 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.

zur Hauptseite [4H-EC3BL](#), Beulnachweise



© **pcae** GmbH Kopernikusstr. 4A 30167 Hannover Tel. 0511/70083-0 Fax 70083-99 Mail dte@pcae.de