

Stahlbau III - WS 2015 / 2016

10. Vorlesung / Übung

Daniel Pak

28.01.2016

Terminübersicht und Übungsinhalte

Termin	Thema	Inhalt
22.10.2015	Ermüdung von Kranbahnträgern	Ermüdungsnachweis nach EN 1993-1-9 Einführung Bemessung von Kranbahnträgern
29.10.2015	Ermüdung von Kranbahnträgern	Bemessung von Kranbahnträgern Ermüdungsnachweis für Kranbahnträger
05.11.2015	Fließgelenkverfahren	Einführung
12.11.2015	Fließgelenkverfahren	Einführung, Traglastermittlung
19.11.2015	Fließgelenkverfahren	Traglastermittlung
03.12.2015	Fließgelenkverfahren	M-N-V-Interaktion, Abhängigkeit von Lasten
07.01.2016	Fließgelenkverfahren	Theorie II. Ordnung
14.01.2016	Beulen	Stabilitätsfall Beulen Einführung, Beulen unter Normalspannungen / Schub
21.01.2016	Beulen	Stabilitätsfall Beulen Knickstabähnliches Verhalten
28.01.2016	Beulen	Stabilitätsfall Beulen Knickstabähnliches Verhalten, Plattenartiges Verhalten
11.02.2016	Biegedrillknicken	Vertiefung Drehfederbettung / Kranbahnträger

xx.xx.2016

schriftliche Prüfung

Änderungen vorbehalten!

Normen

Erhältlich als Download unter www.perinorm.com

- DIN EN 1993-1-5 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5:
Plattenförmige Bauteile + **NA**

Weiterführende Literatur

- Roik, K.: Vorlesungen über Stahlbau,
Verlag Ernst und Sohn, Berlin/München/Düsseldorf
- Bode, H.: Stahlbau III
- Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen,
Vieweg Verlag, Braunschweig/München 1982

Beulen unter Längsspannungen, längs ausgesteifte Blechfelder

Nachweis:

Kap. 4, EN 1993-1-5

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y \cdot \frac{A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N}{f_y \cdot \frac{W_{y,eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-5, (Gl. 4.14)

η_1 : Plattenbeulen bei Längsspannungen

A_{eff}	wirksame Querschnittsfläche
W_{eff}	wirksames Widerstandsmoment
e_N	Verschiebung der neutralen Achse
γ_{M0}	Teilsicherheitsbeiwert
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes
N_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft

Effektive Querschnittsgrößen, A_{eff} :

Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t$$

EN 1993-1-5, Gl. 5

Der Abminderungsfaktor ρ_c ist in der Regel durch Interpolation zwischen dem

1. Abminderungsfaktor ρ für **plattenartiges Verhalten** und dem
2. Abminderungsfaktor χ_c für **knickstabähnliches Verhalten**

zu ermitteln:

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

- ρ Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens
- χ_c Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens
- ξ Verhältnis von Beulspannung zu Knickspannung

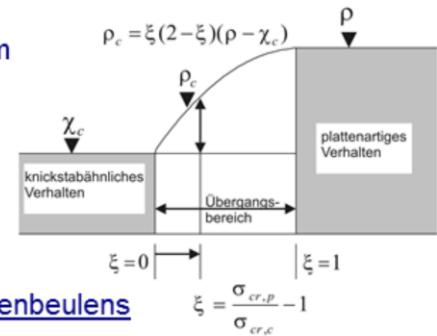
$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

$\sigma_{cr,p}$

elastische Plattenbeulspannung

$\sigma_{cr,c}$

elastische Knickspannung



Effektive Querschnittsgrößen, A_{eff} :

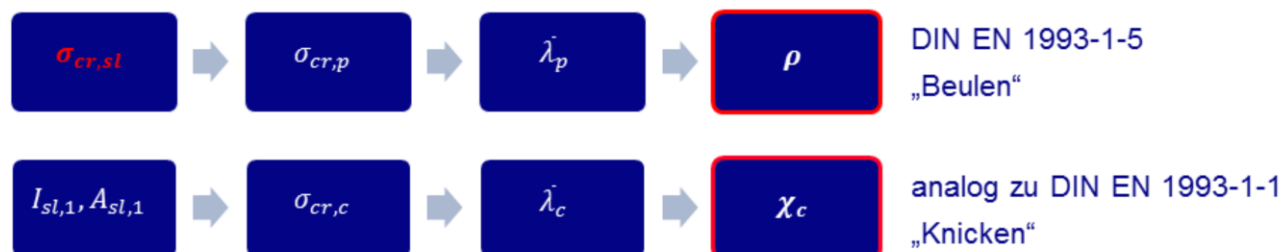
Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

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

EN 1993-1-5, Gl. 4.13

ρ Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens

χ_c Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens



$\sigma_{cr,p}$ elastische Plattenbeulspannung $\bar{\lambda}_p$ Schlankheitsgrad Platte

$\sigma_{cr,c}$ elastische Knickspannung $\bar{\lambda}_c$ Schlankheitsgrad Ersatzdruckstab

$\sigma_{cr,sl}$ elastische kritische Knickspannung der Steifen (1 oder 2 Steifen in der Druckzone)

Plattenartiges Verhalten, ρ

Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-5

EN 1993-1-5, 4.4 (2)

$$\rho = 1,0$$

$$\text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$$

$$\text{für } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi}$$

$\sigma_{cr,sl}$



$\sigma_{cr,p}$



λ_p



ρ

Plattenartiges Verhalten, ρ

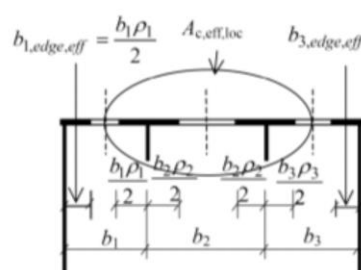
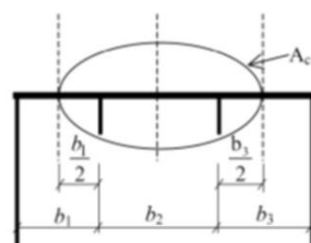
Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-5

EN 1993-1-5, Gl. 4.7

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot \frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad \beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

A_c : **Bruttoquerschnittsfläche** des längs ausgesteiften Blechfeldes ohne Berücksichtigung der durch ein angrenzendes Plattenbauteil gestützten Randbleche (A_c ist ggf. mit einem Faktor zur Berücksichtigung der Effekte aus Schubverzerrungen zu multiplizieren, EN 1993-1-5, Kap. 3.3)

$A_{c,eff,loc}$: **effektive Querschnittsfläche** (ggf. unter Berücksichtigung von Schubverzerrungen) des oben beschriebenen Bereiches des längsausgesteiften Blechfeldes unter Berücksichtigung des Einzelfeldbeulens und/oder des Gesamtfeldbeulens.



$\sigma_{cr,sl}$

$\sigma_{cr,p}$

$\bar{\lambda}_p$

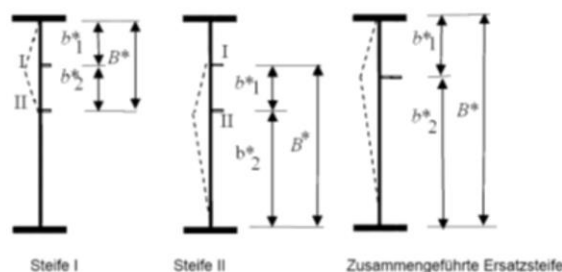
ρ

Plattenartiges Verhalten, ρ

Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-5

Berechnung als durch die Platte gehaltene fiktive Stütze nach Abschnitt 4.5 und Anhang A.2 der DIN EN 1993-1-5:

- I. Untersuchung der Steife I, wobei Steife II als unendlich steif angenommen wird.
- II. Untersuchung der Steife II, wobei Steife I als unendlich steif angenommen wird.
- III. Zusammenfassung der beiden Steifen zu einer Steife am Ort der Resultierenden der Längskräfte in den jeweiligen Steifen.



EN 1993-1-5, Bild A.3

Querschnittsfläche	$A_{s(I)}$	$A_{s(II)}$	$A_{s(I)} + A_{s(II)}$
Flächenträgheitsmoment	$I_{s(I)}$	$I_{s(II)}$	$I_{s(I)} + I_{s(II)}$

Bild A.3 — Bezeichnungen für ein Blechfeld mit zwei Steifen in der Druckzone

$$\sigma_{cr,sl} \quad \sigma_{cr,sl} \quad \sigma_{cr,sl}$$

Die kritische elastische Beulspannung $\sigma_{cr,p}$ ist der kleinste Wert, der sich aus diesen drei Berechnungsschritten ergibt.

$$\sigma_{cr,sl}$$

$$\sigma_{cr,p}$$

$$\lambda_p$$

$$\rho$$

Plattenartiges Verhalten, ρ

Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-5

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{1,05 \cdot E}{A_{sl,1}} \cdot \frac{\sqrt{I_{sl,1} \cdot t^3 \cdot b}}{b_1 \cdot b_2}$$

für $a > a_c$

EN 1993-1-5, Gl. A.4

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

$$\text{mit } a_c = 4,33 \cdot \left[\frac{I_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b} \right]^{1/4}$$

$\sigma_{cr,sl}$ elastische kritische Knickspannung der Steifen (elastisch gebettet)

$A_{sl,1}$ Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen entsprechend zusammensetzt

$I_{sl,1}$ Flächenträgheitsmoment des Ersatzdruckstabes

$\sigma_{cr,sl}$

$\sigma_{cr,p}$

λ_p

ρ

Knickstabähnliches Verhalten, χ_c

Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-1 / DIN EN 1993-1-5

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} \quad \Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2]$$

α Imperfektionsbeiwert; bei ausgesteiften Blechfeldern ist der Imperfektionsbeiwert α i.d.R. zur Berücksichtigung größerer Imperfektionen geschweißter Platten durch den vergrößerten Wert α_e zu ersetzen:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \quad i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}}$$

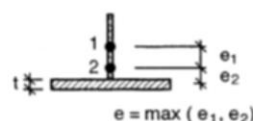
$\alpha = 0,34$ (Kurve b) für Hohlsteifenquerschnitte

$\alpha = 0,49$ (Kurve c) für offene Steifenquerschnitte

$A_{sl,1}$ Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen entsprechend zusammensetzt

$I_{sl,1}$ Flächenträgheitsmoment des Ersatzdruckstabes

1 = Schwerlinie der Steife
2 = Schwerlinie der ausgesteiften Platte



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



$$\sigma_{cr,c}$$



$$\bar{\lambda}_c$$



$$\chi_c$$

Knickstabähnliches Verhalten, χ_c

Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-1 / DIN EN 1993-1-5

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot \frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}}$$

EN 1993-1-5, Gl. 4.11

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,ef}}{A_{sl,1}}$$

$\beta_{A,c} = 1$ bei nicht ausgesteiften Blechfeldern

EN 1993-1-5, Gl. 4.10

$A_{sl,1}$ Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen entsprechend zusammensetzt

$A_{sl,1,eff}$ die wirksame Querschnittsfläche der Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen unter Berücksichtigung des Beulens



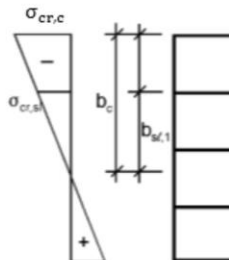
Knickstabähnliches Verhalten, χ_c

Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-1 / DIN EN 1993-1-5

Bei einem ausgesteiften Blechfeld darf $\sigma_{cr,c}$ mit Hilfe der Knickspannung $\sigma_{cr,sl}$ der am höchstbelasteten Druckrand liegenden Steife ermittelt werden:

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{b_c}{b_{sl,1}}$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2}$$



$A_{sl,1}$: Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen zusammensetzt

$A_{sl,1,eff}$: wirksame Querschnittsfläche der Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen unter Berücksichtigung des Beulens

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

$\sigma_{cr,c}$

λ_c

χ_c

EN 1993-1-5,

Bild A.1

Knickstabähnliches Verhalten, χ_c

Ermittlung des Abminderungsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-1 / DIN EN 1993-1-5

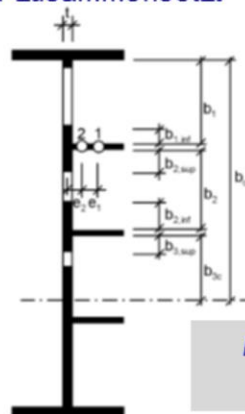
$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} \quad \Leftrightarrow \quad \sigma_{cr,sl} \text{ plattenartiges Verhalten (dort: elast. gebettet)}$$

$\sigma_{cr,c}$ elastische kritische Knickspannung der am höchsten druckbelasteten Steife

$A_{sl,1}$ Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen entsprechend zusammensetzt

$I_{sl,1}$ Flächenträgheitsmoment des Ersatzdruckstabes

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen nach Tabelle 4.1	Bedingung für ψ_i
$h_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} h_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} h_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$h_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} h_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} h_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$h_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} h_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} h_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$h_{3,sup}$	$0,4 h_{3c}$	$0,4 h_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$



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

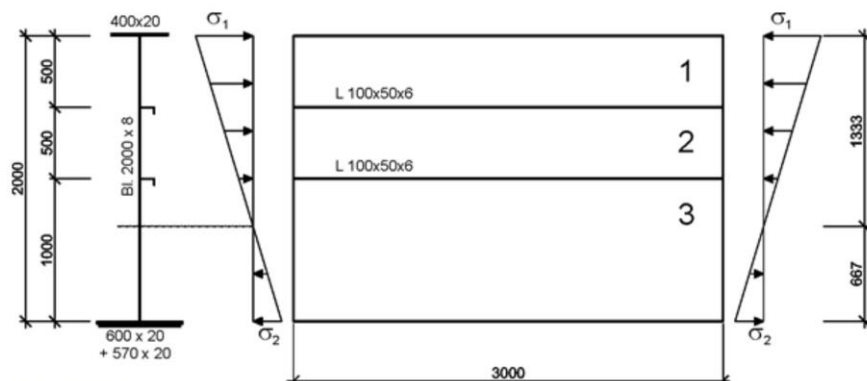
$\sigma_{cr,c}$

λ_c

χ_c

EN 1993-1-5,
Bild A.1

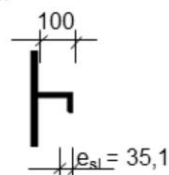
Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen



Steife:

$$A_{sl} = 8,71 \text{ cm}^2$$

$$I_{sl} = 89,9 \text{ cm}^4$$



gegeben:

- Abmessungen und Beanspruchungen gemäß Skizze
- Querschnittswerte (ohne Längssteifen): $I_y = 3.256.900 \text{ cm}^4$
- Stahl S235
- Belastung: $M_{y,Ed} = 3.689,36 \text{ kNm}$
- Die Flansche sind starr anzunehmen; die Steifen müssen nicht abgemindert werden ($\rho=1,0$)

gesucht:

Weisen Sie die ausreichende Sicherheit des Trägerstegs gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

Blechfelder nicht ausgesteift

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

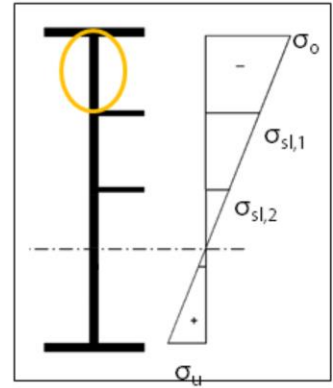
Plattenbeulen der Einzelfelder

Einzelblech 1: $b = 50\text{cm}$, $t = 0,8\text{cm}$

$$\sigma_o = \frac{M_y}{W_o} = \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot z_o = \frac{3.689,36 \cdot 100}{3.256.900} \cdot 133,3 = 15,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{sl,1} &= \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot z_o = \frac{3.689,36 \cdot 100}{3.256.900} \cdot (133,3 - 50) \\ &= 9,44 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

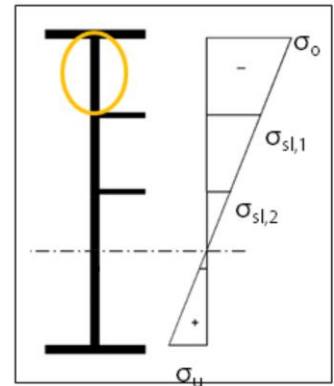
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\sigma_{sl,1}}{\sigma_o} = \frac{9,44}{15,1} = 0,625 > 0$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen der Einzelfelder

Einzelblech 1: $b = 50\text{cm}$, $t = 0,8\text{cm}$



$$\psi = 0,625 \Rightarrow k_{\sigma} = \frac{8,2}{1,05 + \psi} = \frac{8,2}{1,05 + 0,625} = 4,90$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{50/0,8}{28,4 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{4,90}} = 0,994$$

$$> 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot 0,625} = 0,725$$

$$\Rightarrow \rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$= \frac{0,994 - 0,055 \cdot (3 + 0,625)}{0,994^2} = 0,804$$

$$b_{eff} = 0,804 \cdot 50 = 40,2[\text{cm}]$$

$$b_{e1} = \frac{2}{5 - 0,625} \cdot 40,2 = 18,38[\text{cm}]$$

$$b_{e2} = 40,2 - 18,38 = 21,62[\text{cm}]$$

Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)			Wirksame Breite b_{eff}		
	σ_1	σ_2	$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$		
			$b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
	σ_1	σ_2	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$		
			$b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
	σ_1	σ_2	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot \bar{b} / (1 - \psi)$		
			$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	$23,9$
					$5,98 (1 - \psi)^2$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

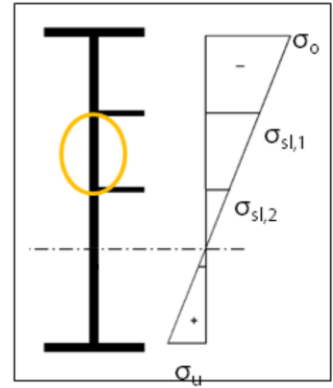
Plattenbeulen der Einzelfelder

Einzelblech 2: $b = 50\text{cm}$, $t = 0,8\text{cm}$

$$\sigma_{sl,1} = 9,44 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{sl,2} &= \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot z_o = \frac{3.689,36 \cdot 100}{3.256.900} \cdot (133,3 - 100) \\ &= 3,77 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

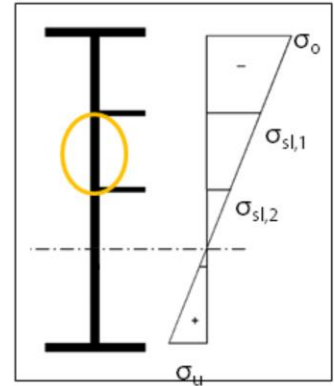
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\sigma_{sl,2}}{\sigma_{sl,1}} = \frac{3,77}{9,44} = 0,40 > 0$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen der Einzelfelder

Einzelblech 2: $b = 50\text{cm}$, $t = 0,8\text{cm}$



$$\psi = 0,40 \Rightarrow k_{\sigma} = \frac{8,2}{1,05 + \psi} = \frac{8,2}{1,05 + 0,40} = 5,66$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{50/0,8}{28,4 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{5,66}} = 0,925$$

$$> 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot 0,40} = 0,751$$

$$\Rightarrow \rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$= \frac{0,925 - 0,055 \cdot (3 + 0,4)}{0,925^2} = 0,863$$

$$b_{eff} = 0,863 \cdot 50 = 43,15[\text{cm}]$$

$$b_{e1} = \frac{2}{5 - 0,40} \cdot 43,15 = 18,76[\text{cm}]$$

$$b_{e2} = 43,15 - 18,76 = 24,39[\text{cm}]$$

Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)			Wirksame Breite b_{eff}		
	σ_1	σ_2	$\psi = 1$:	$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$	$b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$
	σ_1	σ_2	$1 > \psi \geq 0$:	$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$	$b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	σ_1	σ_2	$\psi < 0$:	$b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot \bar{b} / (1 - \psi)$	$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	$23,9$ $5,98 (1 - \psi)^2$

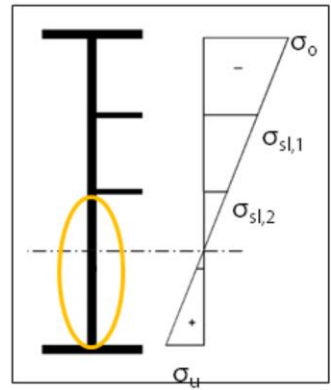
Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen der Einzelfelder

Einzelblech 3: $b = 100\text{cm}$, $t = 0,8\text{cm}$

$$\sigma_{sl,2} = 3,77 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_u = \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot z_o = \frac{3.689,36 \cdot 100}{3.256.900} \cdot (-66,7) = -7,55 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$



$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{sl,2}} = \frac{-7,55}{3,77} = -2,0 < -1,0$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen der Einzelfelder

Einzelblech 3: $b = 100\text{cm}$, $t = 0,8\text{cm}$

$$\psi = -2,0 \Rightarrow k_{\sigma} = 5,98 \cdot (1 - \psi)^2 = 5,98 \cdot (1 + 2)^2 = 53,82$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{100/0,8}{28,4 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{53,82}} = 0,60$$

$$< 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot (-2)} = 0,942$$

$$\Rightarrow \rho_3 = 1,0$$

$$b_{eff} = 1,0 \cdot 33,33 = 33,33[\text{cm}]$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot 33,33 = 13,32[\text{cm}]$$

$$b_{e2} = 0,5 \cdot 33,33 = 20,00[\text{cm}]$$

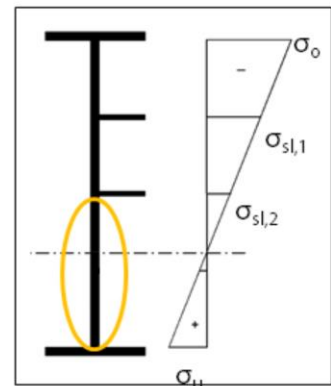


Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)			Wirksame Breite b_{eff}		
	$\psi = 1$:	$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$	$b_{e1} = 0,5 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,5 b_{eff}$	
	$1 > \psi \geq 0$:	$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$	$b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$	$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$	
	$\psi < 0$:	$b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot \bar{b} / (1 - \psi)$	$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$	
	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$
Beulwert k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9
					$5,98 (1 - \psi)^2$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen der Einzelfelder

Zusammenfassung

$$\rho_1 = 0,804$$

$$b_{1,e1} = 18,38[cm]$$

$$\psi_1 = 0,625$$

$$b_{1,e2} = 21,62[cm]$$

$$\rho_2 = 0,863$$

$$b_{2,e1} = 18,76[cm]$$

$$\psi_2 = 0,4$$

$$b_{2,e2} = 24,39[cm]$$

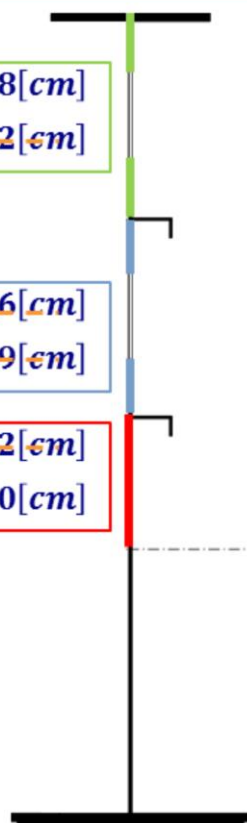
$$\rho_3 = 1,0$$

$$b_{3,e1} = 13,32[cm]$$

$$\psi_3 = -2,0$$

$$b_{3,e2} = 20,00[cm]$$

----- • nicht benötigt



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Wirksame Fläche der Druckzone:

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t$$

EN 1993-1-5, Gl. 4.5

Der Abminderungsfaktor ρ_c ist in der Regel durch Interpolation zwischen dem

1. Abminderungsfaktor ρ für **plattenartiges Verhalten** und dem
2. Abminderungsfaktor χ_c für **knickstabähnliches Verhalten**

zu ermitteln.

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

beidseitig gestützte Querschnittsteile:

$$\rho = 1,0 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot \frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad \beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

elastische kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p}$
ermitteln mit Hilfe der elastischen kritischen
Knickspannung der Längssteife als
Ersatzdruckstab auf elastischer Bettung

Zwei Steifen in der Druckzone eines ausgesteiften Beulfeldes:

Zunächst wird angenommen, dass jede der beiden Steifen für sich ausknicken kann, wobei die andere als starr gilt. Dann wird das gemeinsame Ausknicken beider Steifen durch Betrachtung einer einzigen Ersatzsteife berücksichtigt, in der beide Steifen zusammengeführt sind.

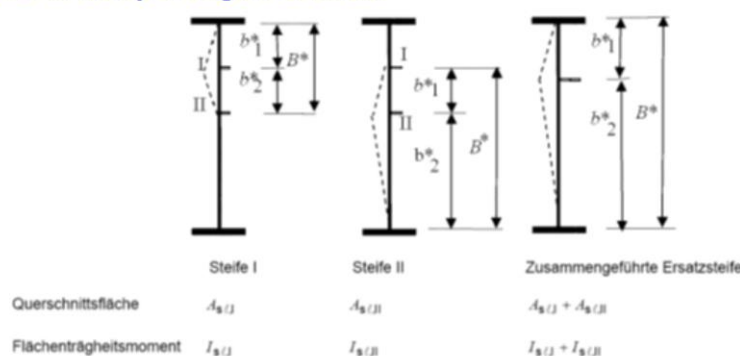
Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Berechnung als durch die Platte gehaltene fiktive Stütze nach Abschnitt 4.5 und Anhang A.2 der DIN EN 1993-1-5:

- I. Untersuchung der Steife I, wobei Steife II als unendlich steif angenommen wird.
- II. Untersuchung der Steife II, wobei Steife I als unendlich steif angenommen wird.
- III. Zusammenfassung der beiden Steifen zu einer Steife am Ort der Resultierenden der Längskräfte in den jeweiligen Steifen.



EN 1993-1-5, Bild A.3

Bild A.3 — Bezeichnungen für ein Blechfeld mit zwei Steifen in der Druckzone

Die kritische elastische Beulspannung ist der kleinste Wert, der sich aus diesen drei Berechnungsschritten ergibt.

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

EN 1993-1-5, A.2.1(1)

„...die elastische kritische Beulspannung [wird ermittelt] mit Hilfe der elastischen kritischen Knickspannung der Längssteife als Ersatzdruckstab auf elastischer Bettung ...“

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{1,05 \cdot E}{A_{sl,1}} \cdot \frac{\sqrt{I_{sl,1} \cdot t^3 \cdot b}}{b_1 \cdot b_2} \quad \text{für } a > a_c$$

EN 1993-1-5,

Gl. A.4

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

$$\text{mit } a_c = 4,33 \cdot \left[\frac{I_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b} \right]^{1/4}$$

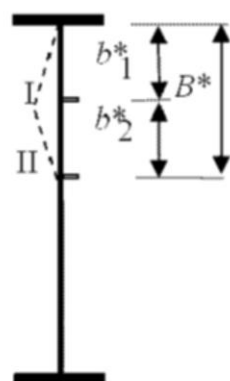
$A_{sl,1}$: Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen zusammensetzt

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

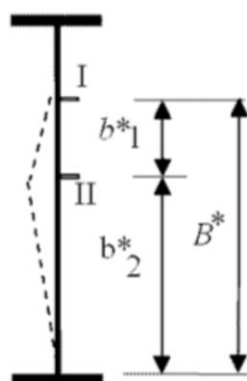
1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Aufteilung der Flächen zur Ermittlung von $A_{sl,i}$ und $I_{sl,i}$



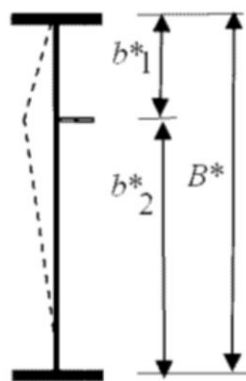
Steife I

Kritische elastische
Knickspannungen
für Steife I



Steife II

Kritische elastische
Knickspannungen
für Steife II



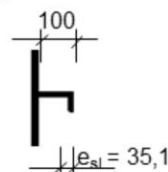
Zusammengeführte Ersatzsteife

Kritische elastische
Knickspannungen
für Steife I+II

Steife:

$$A_{sl} = 8,71 \text{ cm}^2$$

$$I_{sl} = 89,9 \text{ cm}^4$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

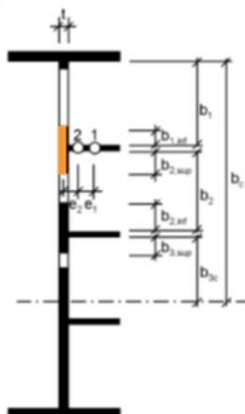
1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife I, Bruttoquerschnittsflächen

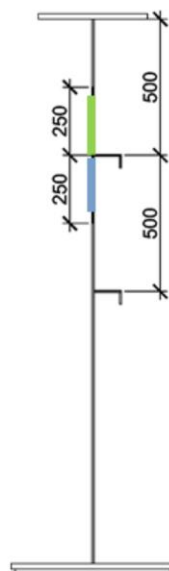
$$b_1 = 50,0[cm] \quad b_{1,inf} = \frac{3 - 0,625}{5 - 0,625} \cdot 50[cm] = 27,14[cm]$$

$$b_2 = 50,0[cm] \quad b_{2,sup} = \frac{2}{5 - 0,4} \cdot 50[cm] = 21,74[cm]$$

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche
$b_{1,inf}$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_2$
$b_{2,inf}$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_2$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$



Steife I



$$\psi_1 = 0,625$$

$$\psi_2 = 0,4$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife I, Bruttoquerschnittsflächen

$$A_{sl} = 8,71 [cm^2]$$

$$A_p = (27,14 + 21,74) \cdot 0,8 = 39,10 [cm^2]$$

$$A_{sl,1} = 8,71 + 39,10 = 47,81 [cm^2]$$

$$I_{sl,1} = \sum I_{sl} + \frac{A_{sl} \cdot A_p}{A_{sl} + A_p} \cdot e^2$$

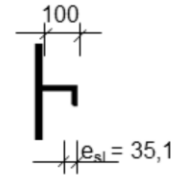
$$= 89,9 + \frac{8,71 \cdot 39,10}{8,71 + 39,10} \cdot \left(10,0 - 3,51 + \frac{0,8}{2}\right)^2$$

$$= 428,05 [cm^4]$$

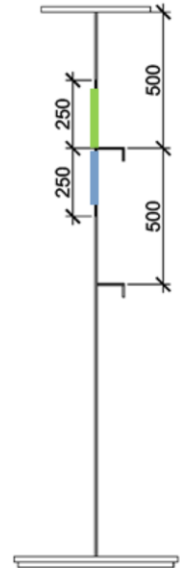
Steife:

$$A_{sl} = 8,71 cm^2$$

$$I_{sl} = 89,9 cm^4$$



Steife I



$$b_{1,inf} = 27,14 [cm]$$

$$b_{2,sup} = 21,74 [cm]$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife I

$$a_c = 4,33 \cdot \left[\frac{I_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b} \right]^{1/4} = 4,33 \cdot \left[\frac{428,05 \cdot 50^2 \cdot 50^2}{0,8^3 \cdot 100} \right]^{1/4}$$

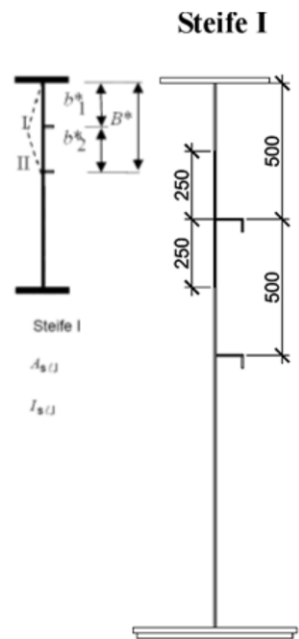
$$= 368,14[cm] > a = 300[cm]$$

b_1, b_2 : Abstände der Steifen zu den Längsrändern ($b_1 + b_2 = b$)

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 21.000 \cdot 428,05}{47,81 \cdot 300^2} + \frac{21.000 \cdot 0,8^3 \cdot 100 \cdot 300^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 47,81 \cdot 50^2 \cdot 50^2}$$

$$= 20,62 \left[\frac{kN}{cm^2} \right] + 9,01 \left[\frac{kN}{cm^2} \right] = 29,63 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$



$$I_{sl,1} = 428,05[cm^4]$$

$$A_{sl,1} = 47,81[cm^2]$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

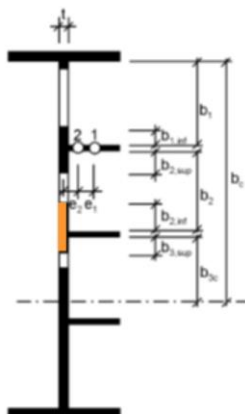
1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife II

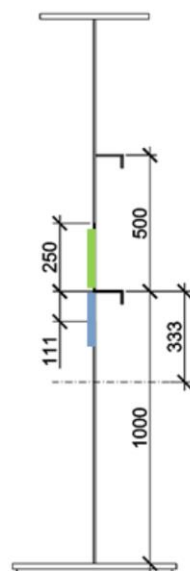
$$b_2 = 50,0[cm] \quad b_{2,inf} = \frac{3 - 0,4}{5 - 0,4} \cdot 50[cm] = 28,26[cm]$$

$$b_{3,c} = 33,3[cm] \quad b_{3,sup} = 0,4 \cdot 33,3[cm] = 13,33[cm]$$

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche
$b_{1,inf}$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_2$
$b_{2,inf}$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_2$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$



Steife II



$$\psi_2 = 0,4$$

$$\psi_3 = 1,0$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife II

$$A_{sl} = 8,71 [cm^2]$$

$$A_p = (28,26 + 13,33) \cdot 0,8 = 33,27 [cm^2]$$

$$A_{sl,2} = 8,71 + 33,27 = 41,98 [cm^2]$$

$$I_{sl,2} = \sum I_{sl} + \frac{A_{sl} \cdot A_p}{A_{sl} + A_p} \cdot e^2$$

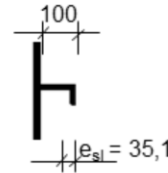
$$= 89,9 + \frac{8,71 \cdot 33,27}{8,71 + 33,27} \cdot \left(10,0 - 3,51 + \frac{0,8}{2} \right)^2$$

$$= 417,59 [cm^4]$$

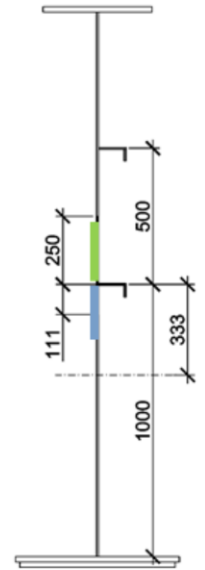
Steife:

$$A_{sl} = 8,71 cm^2$$

$$I_{sl} = 89,9 cm^4$$



Steife II



$$b_{2,inf} = 28,26 [cm]$$

$$b_{3,sup} = 13,33 [cm]$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife II

$$a_c = 4,33 \cdot \left[\frac{I_{sl,2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b} \right]^{1/4} = 4,33 \cdot \left[\frac{417,59 \cdot 50^2 \cdot 100^2}{0,8^3 \cdot 150} \right]^{1/4}$$

$$= 467,54[cm] > a = 300[cm]$$

b_1, b_2 : Abstände der Steifen zu den Längsrändern ($b_1 + b_2 = b$)

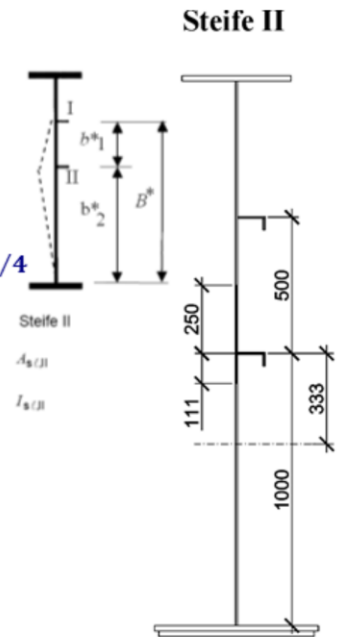
$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,2}}{A_{sl,2} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 21.000 \cdot 417,59}{41,98 \cdot 300^2} + \frac{21.000 \cdot 0,8^3 \cdot 150 \cdot 300^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 41,98 \cdot 100^2 \cdot 50^2}$$

$$= 22,91 \left[\frac{kN}{cm^2} \right] + 3,85 \left[\frac{kN}{cm^2} \right] = 26,76 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

$$I_{sl,2} = 417,59[cm^4]$$

$$A_{sl,2} = 41,98[cm^2]$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Bruttoquerschnittsflächen, Zusammenfassung

$$A_{sl,1} = 47,81 [cm^2]$$

$$I_{sl,1} = 428,05 [cm^4]$$

$$b_{1,inf} = 27,14 [cm]$$

$$b_{2,sup} = 21,74 [cm]$$

$$A_{sl,2} = 41,98 [cm^2]$$

$$I_{sl,2} = 417,59 [cm^4]$$

$$b_{2,inf} = 28,26 [cm]$$

$$b_{3,sup} = 13,33 [cm]$$

$$\rho_1 = 0,804$$
$$\rho_2 = 0,863$$
$$\rho_3 = 1,000$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

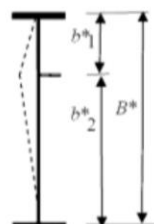
1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife I+II

$$y_s = \frac{h}{3} \cdot \frac{a + 2 \cdot b}{a + b} = \frac{50}{3} \cdot \frac{9,44 + 2 \cdot 3,77}{9,44 + 3,77} = 21,42 [cm]$$

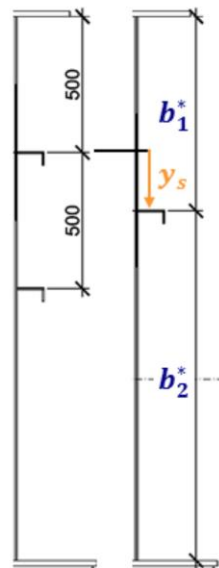
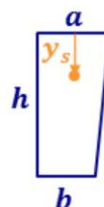
$$\sigma_{sl,1} = 9,44 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_{sl,2} = 3,77 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$



$$b_1^* = 50,0 + 21,42 = 71,42 [cm]$$

$$b_2^* = 150 - 21,42 = 128,58 [cm]$$



Zusammengeführte Ersatzsteife

$$A_{s(I)} + A_{s(II)}$$

$$I_{s(I)} + I_{s(II)}$$

Zusammenfassung der beiden Steifen zu einer Steife am Ort der Resultierenden der Längskräfte in den jeweiligen Steifen.

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife I+II

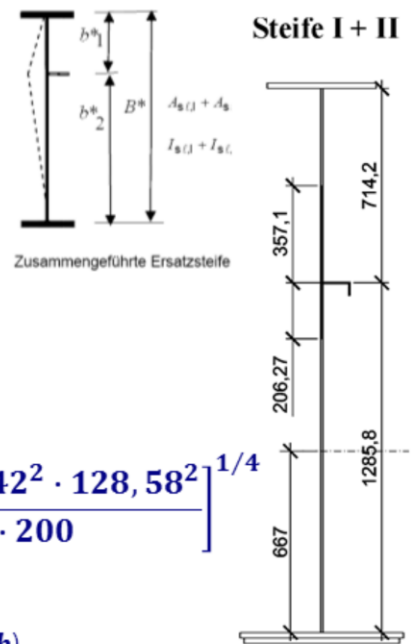
$$I_{sl,1+2} = I_{sl,1} + I_{sl,2} = 417,59 + 428,05 = 845,64 [cm^4]$$

$$A_{sl,1+2} = A_{sl,1} + A_{sl,2} = 47,81 + 41,98 = 89,79 [cm^2]$$

$$a_c = 4,33 \cdot \left[\frac{I_{sl,1+2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b} \right]^{1/4} = 4,33 \cdot \left[\frac{845,64 \cdot 71,42^2 \cdot 128,58^2}{0,8^3 \cdot 200} \right]^{1/4}$$

$$= 703,41 [cm] > a = 300 [cm]$$

b_1, b_2 : Abstände der Steifen zu den Längsrändern ($b_1 + b_2 = b$)



$$A_{sl,1} = 47,81 [cm^2]$$

$$A_{sl,2} = 41,98 [cm^2]$$

$$I_{sl,1} = 428,05 [cm^4]$$

$$I_{sl,2} = 417,59 [cm^4]$$

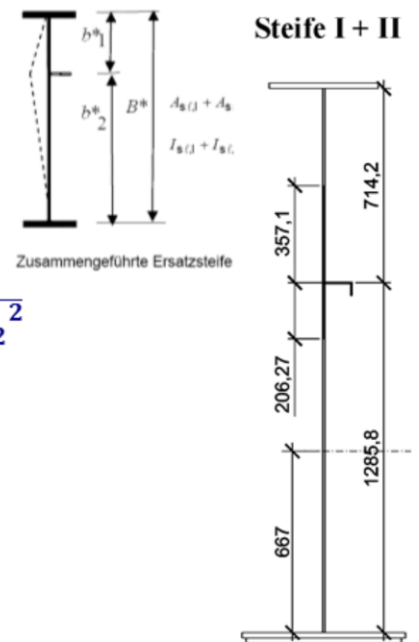
Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen für Steife I+II

$$\begin{aligned}\sigma_{cr,sl} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1+2}}{A_{sl,1+2} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,1+2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2} \\ &= \frac{\pi^2 \cdot 21.000 \cdot 845,64}{89,79 \cdot 300^2} \\ &\quad + \frac{21.000 \cdot 0,8^3 \cdot 200 \cdot 300^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 89,79 \cdot 71,42^2 \cdot 128,58^2} \\ &= 21,69 \left[\frac{kN}{cm^2} \right] + 0,71 \left[\frac{kN}{cm^2} \right] = 22,40 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]\end{aligned}$$

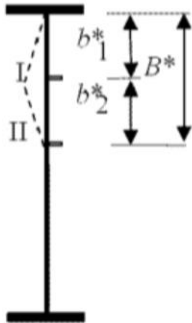


Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

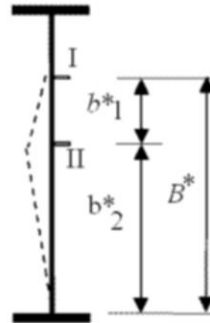
1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

Kritische elastische Knickspannungen



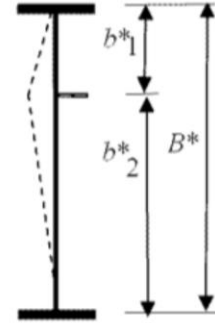
Steife I

$$\sigma_{cr,sl} = 29,63 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$



Steife II

$$\sigma_{cr,sl} = 26,76 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$



Zusammengeführte Ersatzsteife

$$\sigma_{cr,sl} = 22,40 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

↓
maßgebend

$$\sigma_{cr,p} = 22,40 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot \frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad \beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

$$A_c = 2 \cdot 8,71 + 27,14 \cdot 0,8 + 50 \cdot 0,8 + 13,3 \cdot 0,8 = 89,77 [cm^2]$$

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen nach Tabelle 4.1
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_{1,eff}$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,eff}$

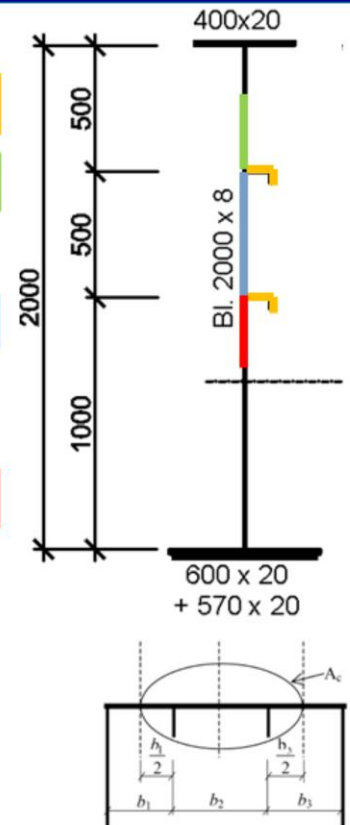
die Querschnittsteile $b_1/2$ und $b_3/2$ werden nicht berücksichtigt!

$$A_{c,eff} = 8,71 [cm^2]$$

$$b_{1,inf} = 27,14 [cm]$$

$$b = 50 [cm]$$

$$b_{3,sup} = 13,33 [cm]$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot \frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad \beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

$$A_{c,eff,loc} = 2 \cdot 8,71 + 27,14 \cdot 0,8 \cdot 0,804 + 50 \cdot 0,8 \cdot 0,863 + 13,33 \cdot 0,8 \cdot 1,0 = 80,04 [cm^2]$$

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen nach Tabelle 4.1
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_{1,eff}$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,eff}$

die Querschnittsteile $b_{1,edge,eff}$ und $b_{3,edge,eff}$ werden nicht berücksichtigt!

$$A_{c,eff} = 8,71 [cm^2]$$

$$b_{1,inf} = 27,14 [cm]$$

$$\rho_1 = 0,804 [-]$$

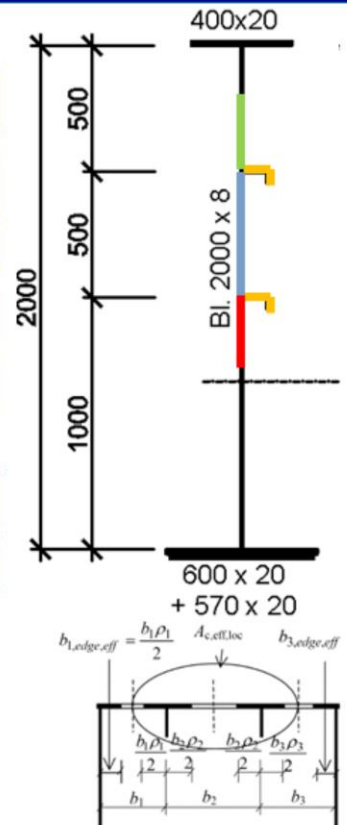
$$b = 50 [cm]$$

$$\rho_2 = 0,863 [-]$$

$$b_{3,sup} = 13,33 [cm]$$

$$\rho_3 = 1,0 [-]$$

$b_{1,inf}$, b , $b_{3,sup}$ berechnet mit Bruttoquerschnittsflächen, hier benötigt: wirksame Flächen (daher: Multiplikation mit ρ)



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

1. Untersuchung „Plattenartiges Verhalten“

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot \frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad \beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

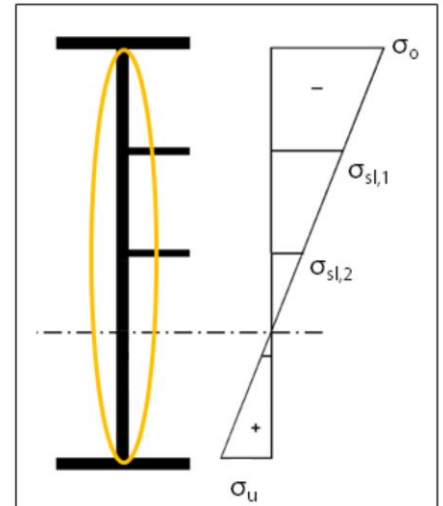
$$\beta_{A,c} = \frac{80,04}{89,77} = 0,892$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{0,892 \cdot \frac{23,5}{22,08}} = 0,974$$

$$> 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot (-0,5)} = 0,863$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$= \frac{0,974 - 0,055 \cdot (3 + (-0,5))}{0,974^2} = 0,882$$



$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{-7,55}{15,1} = -0,5$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

2. Untersuchung „Knickstabähnliches Verhalten“

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

Bei einem ausgesteiften Blechfeld darf $\sigma_{cr,c}$ mit Hilfe der Knickspannung $\sigma_{cr,sl}$ der am höchstbelasteten Druckrand liegenden Steife ermittelt werden:

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{b_c}{b_{sl,1}}$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2}$$

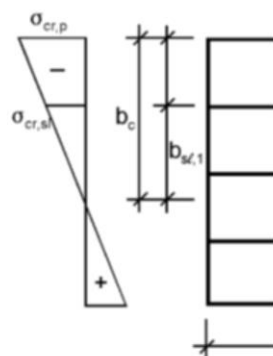
Steife I (am höchstbelasteten Druckrand):

$$A_{sl,1} = 47,81 [cm^2]$$

$$I_{sl,1} = 428,05 [cm^4]$$

$A_{sl,1}$: Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen zusammensetzt

$A_{sl,1,eff}$: wirksame Querschnittsfläche der Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen unter Berücksichtigung des Beulens



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

2. Untersuchung „Knickstabähnliches Verhalten“

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}}$$

$$A_{sl,eff} = A_{sl} = 8,71 [cm^2]$$

$$A_{p,eff} = (0,804 \cdot 27,14 + 0,863 \cdot 21,74) \cdot 0,8$$

$$= 32,47 [cm^2]$$

$$A_{sl,1,eff} = 8,71 + 32,47 = 41,18 [cm^2]$$

$$\beta_{A,c} = \frac{41,18}{47,81} = 0,861$$

$$A_{c,eff} = 8,71 [cm^2]$$

$$b_{1,inf} = 27,14 [cm]$$

$$\rho_1 = 0,804 [-]$$

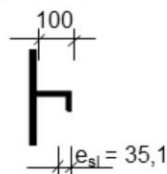
$$b_{2,sup} = 21,74 [cm]$$

$$\rho_2 = 0,863 [-]$$

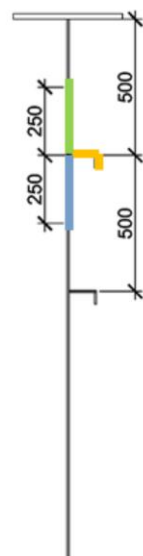
Steife:

$$A_{sl} = 8,71 cm^2$$

$$I_{sl} = 89,9 cm^4$$



Steife I



$$\psi_1 = 0,625$$

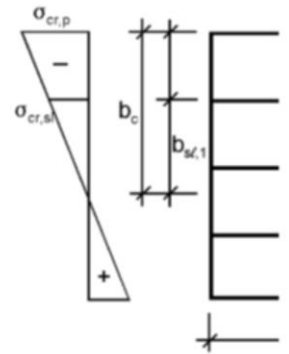
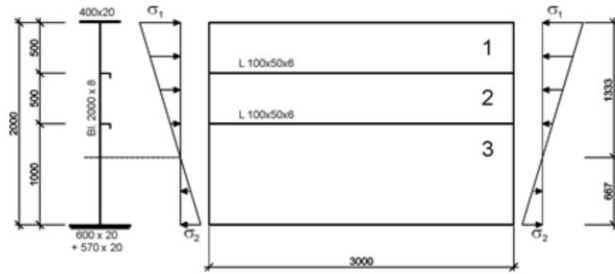
Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

2. Untersuchung „Knickstabähnliches Verhalten“

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21.000 \cdot 428,05}{47,81 \cdot 300^2} = 20,62 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{b_c}{b_{sl,1}} = 20,62 \cdot \frac{133,3}{50 + 33,3} = 33,00 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$



$$\Rightarrow \bar{\lambda}_c = \sqrt{\beta_{A,c} \cdot \frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{0,861 \cdot \frac{23,5}{33,0}} = 0,783$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes 2. Untersuchung „Knickstabähnliches Verhalten“

Ermittlung des Knickbeiwertes nach EN 1993-1-5 / 1-1:

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}}$$

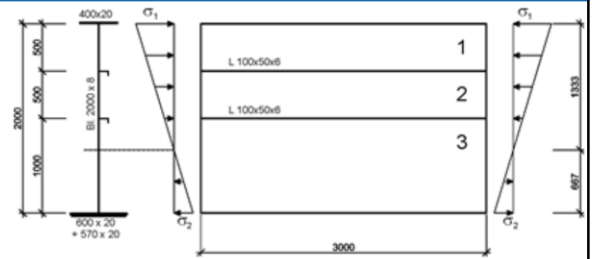
$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2]$$

Bei ausgesteiften Blechfeldern ist der Imperfektionsbeiwert α in der Regel zur Berücksichtigung größerer Imperfektionen geschweißter Platten durch den vergrößerten Wert α_e zu ersetzen:

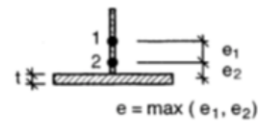
$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \quad i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} = \sqrt{\frac{428,05}{47,81}} = 2,99[cm]$$

$\alpha = 0,34$ (Kurve b) für Hohlsteifenquerschnitte

$\alpha = 0,49$ (Kurve c) für offene Steifenquerschnitte



1 = Schwerlinie der Steife
2 = Schwerlinie der ausgesteiften
Platte



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

2. Untersuchung „Knickstabähnliches Verhalten“

Ermittlung des Knickbeiwertes nach EN 1993-1-5 / 1-1:

$$e = \max(e_1, e_2)$$

$$e_1 + e_2 = \left(10 - 3,51 + \frac{0,8}{2} \right) = 6,89 [cm]$$

$$e_2 = \frac{A_{sl} \cdot (e_1 + e_2) + A_{Platte} \cdot 0}{A_{sl} + A_{Platte} = A_{sl,1}} = \frac{8,71 \cdot 6,89}{47,81} = 1,26 [cm]$$

$$A_{sl,1} = 47,81 [cm^2]$$

$$e_1 = 6,89 [cm] - 1,26 [cm] = 5,63 [cm]$$

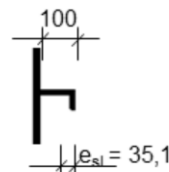
$$\Rightarrow e = e_1 = 5,63 [cm]$$

$$\alpha_e = 0,49 + \frac{0,09}{2,99 [cm] / 5,63 [cm]} = 0,659$$

Steife:

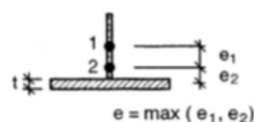
$$A_{sl} = 8,71 cm^2$$

$$I_{sl} = 89,9 cm^4$$



1 = Schwerlinie der Steife

2 = Schwerlinie der aussteiften Platte

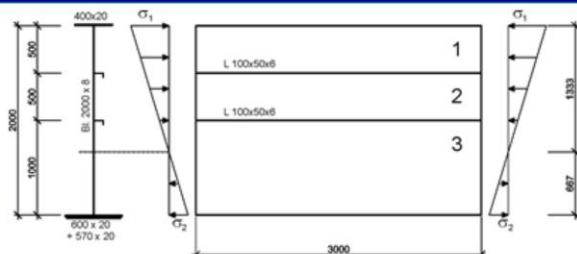


Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen

Plattenbeulen des Gesamtfeldes

2. Untersuchung „Knickstabähnliches Verhalten“

Ermittlung des Knickbeiwertes nach EN 1993-1-5 / 1-1:



$$\begin{aligned}\Phi &= 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2] \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,659 \cdot (0,783 - 0,2) + 0,783^2] \\ &= 0,999\end{aligned}$$

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,999 + \sqrt{0,999^2 - 0,783^2}} = 0,618$$

Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichen Verhalten:

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

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{22,40}{33,00} - 1 = -0,321 \quad 0 \leq \xi \leq 1,0 \Rightarrow \xi = 0$$

$$\Rightarrow \rho_c = (0,882 - 0,618) \cdot 0 \cdot (2 - 0) + 0,618 = 0,618$$

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Effektiver Querschnitt:

$$b_{eff} = \rho_c \cdot \rho_{loc} \cdot b_i$$

$$b_{edge,eff} = \rho_{loc} \cdot b_i$$

Stegfeld 1:

$$b_{1,sup,eff} = b_{1,e1} = 18,38$$

$$b_{1,inf,eff} = 0,618 \cdot 0,804 \cdot 27,14 \\ = 13,49$$

$$b_{1,e1} = 18,38[cm]$$

$$b_{1,inf} = 27,14[cm]$$

$$\rho_1 = 0,804[-]$$

$$b_{2,sup} = 21,74[cm]$$

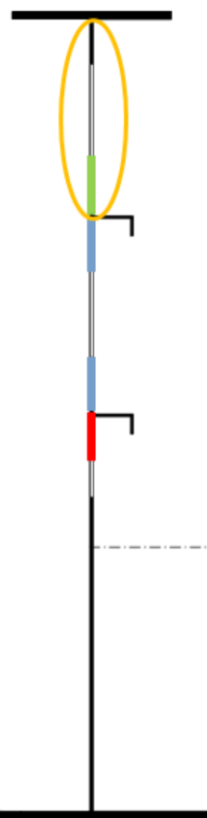
$$\rho_2 = 0,863[-]$$

$$b_{2,inf} = 28,26[cm]$$

$$b_{3,sup} = 13,33[cm]$$

$$\rho_3 = 1,0[-]$$

$$b_{3,e} = b_3 = 33,33$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Effektiver Querschnitt:

$$b_{eff} = \rho_c \cdot \rho_{loc} \cdot b_i$$

$$b_{edge,eff} = \rho_{loc} \cdot b_i$$

Stegfeld 2:

$$b_{2,sup,eff} = 0,618 \cdot 0,863 \cdot 21,74 = 11,59$$

$$b_{2,inf,eff} = 0,618 \cdot 0,863 \cdot 28,26 = 15,07$$

$$b_{1,e1} = 18,38[cm]$$

$$b_{1,inf} = 27,14[cm]$$

$$\rho_1 = 0,804[-]$$

$$b_{2,sup} = 21,74[cm]$$

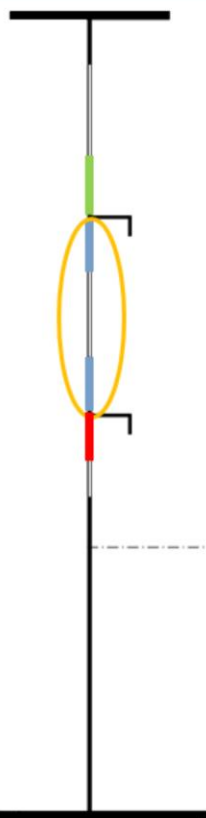
$$\rho_2 = 0,863[-]$$

$$b_{2,inf} = 28,26[cm]$$

$$b_{3,sup} = 13,33[cm]$$

$$\rho_3 = 1,0[-]$$

$$b_{3,e} = b_3 = 33,33$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Effektiver Querschnitt:

$$b_{eff} = \rho_c \cdot \rho_i \cdot b_i$$

$$b_{edge,eff} = \rho_i \cdot b_i$$

Stegfeld 3:

$$b_{3,sup,eff} = 0,618 \cdot 1,0 \cdot 13,3 = 8,22$$

$$b_{3,inf,eff} = 0,618 \cdot 20,0 = 12,36$$

$$b_{1,e1} = 18,38[cm]$$

$$b_{1,inf} = 27,14[cm]$$

$$\rho_1 = 0,804[-]$$

$$b_{2,sup} = 21,74[cm]$$

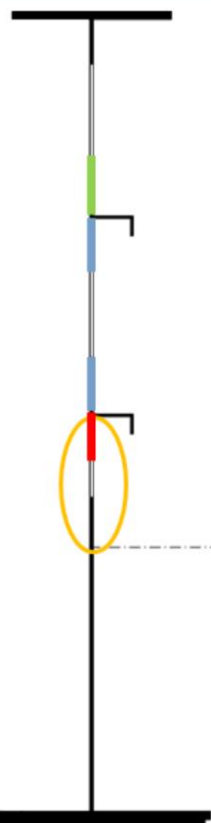
$$\rho_2 = 0,863[-]$$

$$b_{2,inf} = 28,26[cm]$$

$$b_{3,sup} = 13,33[cm]$$

$$\rho_3 = 1,0[-]$$

$$b_{3,e} = b_3 = 33,33$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Effektiver Querschnitt:

$$b_{1,noneff} = 50 - 18,38 - 13,49 \\ = 18,13[cm]$$

$$z_{1,noneff} = 1 + 18,38 + 18,13/2 \\ = 28,45$$

$$b_{2,noneff} = 50 - 11,59 - 15,07 \\ = 23,34[cm]$$

$$z_{2,noneff} = 1 + 50 + 11,59 + 23,34/2 \\ = 74,26[cm]$$

$$b_{3,noneff} = 100 - 8,22 - 12,36 - 66,66 \\ = 12,76[cm]$$

$$z_{3,noneff} = 1 + 100 + 8,22 + 12,76/2 \\ = 115,60[cm]$$

Stegfeld 1:

$$b_{1,sup,eff} = 18,38[cm]$$

$$b_{1,inf,eff} = 13,49[cm]$$

Stegfeld 2:

$$b_{2,sup,eff} = 11,59[cm]$$

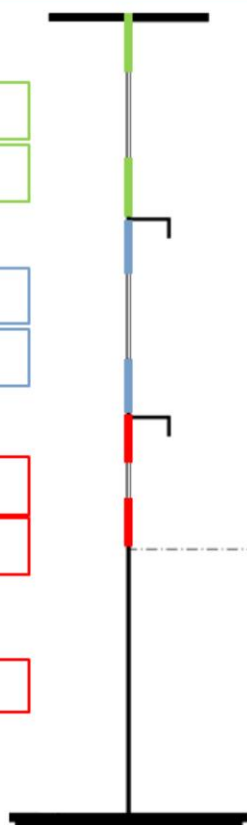
$$b_{2,inf,eff} = 15,07[cm]$$

Stegfeld 3:

$$b_{3,sup,eff} = 8,22[cm]$$

$$b_{3,inf,eff} = 12,36[cm]$$

$$b_{tension} = 66,66[cm]$$



Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Effektiver Querschnitt:

	b_i	t_i	A_i	\bar{z}_i	$\bar{z}_i \cdot A_i$	$\bar{z}_i^2 \cdot A_i$	$I_{yy,i}$
Obergurt	40,00	2,0	80,00	0	0	0	26,7
Steg	200,00	0,8	160,00	101,00	16.160,0	1.632.160	533.333,3
	-18,13	0,8	-14,50	28,45	-412,5	-11.736	-379,3
	-23,34	0,8	-18,67	74,26	-1.386,4	-102.957	-847,6
	-12,76	0,8	-10,21	115,60	-1.180,3	-136.440	-138,5
Untergurt	60,00	2,0	120,00	202,00	24.240	4.896.480	40,0
	57,00	2,0	114,00	204,00	23.256	4.744.224	38,0
Summe			430,62	-	60.676,8	11.021.731	532.072,6

Beispiel 3: Vollwandträger mit Längssteifen Plattenbeulen des Gesamtfeldes

Effektiver Querschnitt:

$$z_{s,eff} = \frac{\sum \bar{z}_i \cdot A_i}{\sum A_i} = \frac{60.676,8 [cm^2]}{430,62 [cm]} = 140,91 [cm]$$

$$I_{yy,eff} = \sum I_{yy,i} + \bar{z}_i^2 \cdot A_i - z_{s,eff}^2 \cdot \sum A_i$$

$$= 532.072,6 + 11.021.731 - 140,91^2 \cdot 430,62 = 3.003.573 [cm^4]$$

$$W_{y,eff} = \frac{I_{yy,eff}}{z} = \frac{3.003.573 [cm^4]}{141,91 [cm] + 1 [cm]} = 21.017 [cm^3]$$

Nachweis:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y \cdot \frac{A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N}{f_y \cdot \frac{W_{y,eff}}{\gamma_{M0}}} = \frac{3.689,36 \cdot 100}{23,5 \cdot \frac{21.017}{1,0}} = 0,747 \leq 1,0$$