

Stahlbau III - WS 2015 / 2016

8. Vorlesung / Übung

Daniel Pak

14.01.2016

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 2
28.01.2016	Beulen	Stabilitätsfall Beulen 3
11.02.2016	Biegedrillknicken	Vertiefung Drehfederbettung / Kranbahnträger

xx.xx.2016

schriftliche Prüfung

Änderungen vorbehalten!

Normen

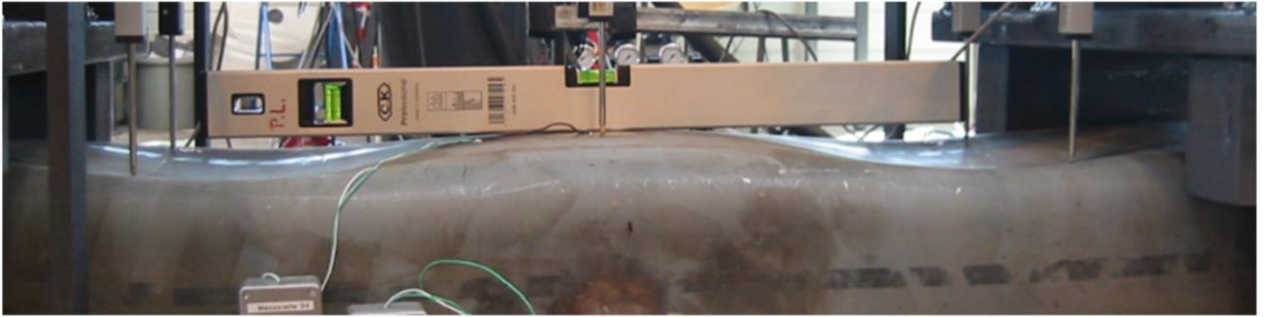
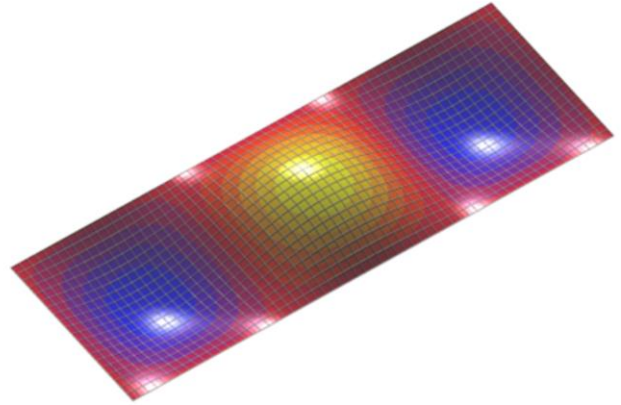
Erhältlich als Download unter www.perinorm.com

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

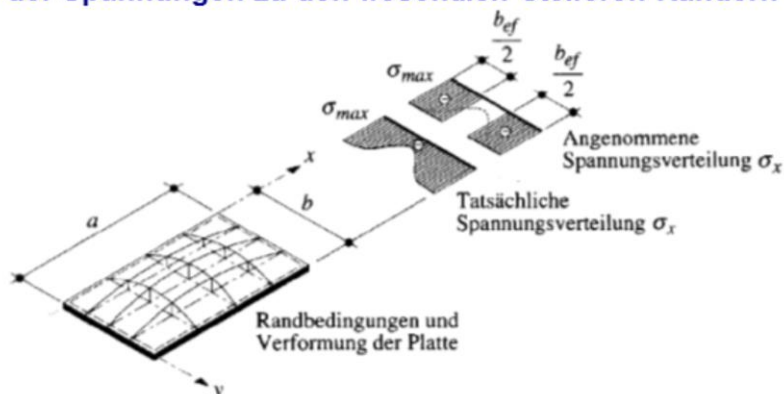
Weiterführende Literatur

- 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

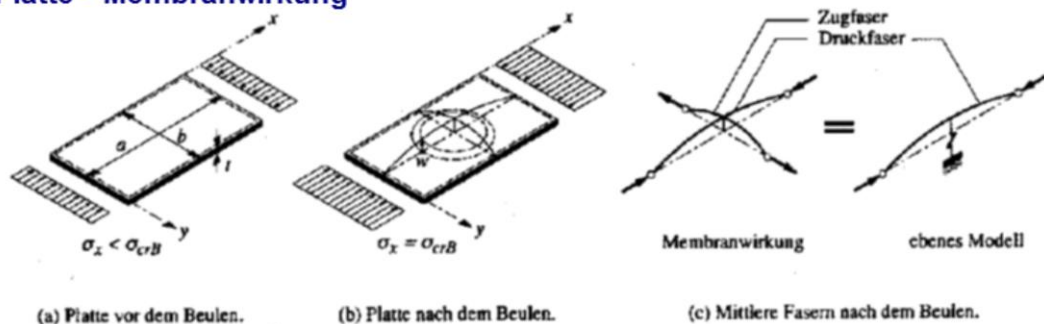
Beulen des druckbeanspruchten Obergurtes eines Hohlprofils



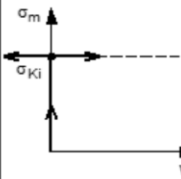
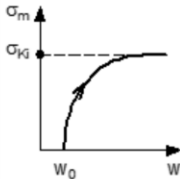
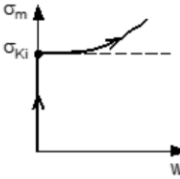
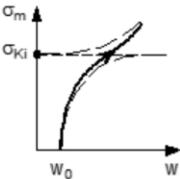
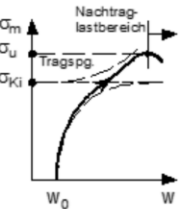
Verlagerung der Spannungen zu den wesentlich steiferen Rändern



Beulen einer Platte - Membranwirkung



Überkritisches Tragverhalten

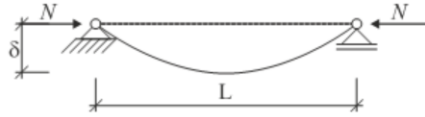
Spalte	1	2	3	4	5
Theorie	Theorie II. Ord. Verzweigungs- theorie	Theorie II. Ord.	Theorie III. Ord.	Theorie III. Ord.	Traglasttheorie
Ausgangs- geometrie (w_0)	perfekt	imperfekt	perfekt	imperfekt	imperfekt
Verformung (w)	klein	klein	groß	groß	groß
Materialgesetz	Hooke	Hooke	Hooke	Hooke	wirklich
Last- Verformungs- Diagramm					

Knicken

DGL $EI \cdot w'' + P \cdot w = 0$

$$(EI \cdot w'''' + P \cdot w'') = 0$$

perfekter Druckstab:



Ansatz: $w = A \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right), n \in \mathbb{N}$ (n = Anzahl der Wellen)

$$w'' = -A \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$$

Einsetzen in DGL: $-EI \cdot A \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) + P \cdot A \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) = 0$

$$\Rightarrow \underbrace{\left(-EI \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L}\right)^2 + P\right)}_{=0} \cdot \underbrace{A \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)}_{=0} = 0$$

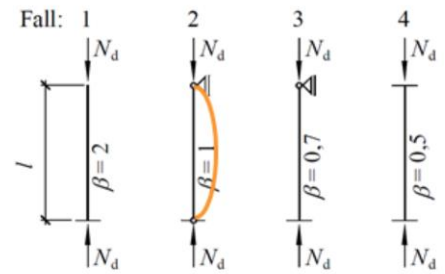
\rightarrow Knickbedingung (ausgebogene Lage 2) \rightarrow triviale Lösung: $A = 0$ (nicht ausgebogene Lage 1)

Knicken

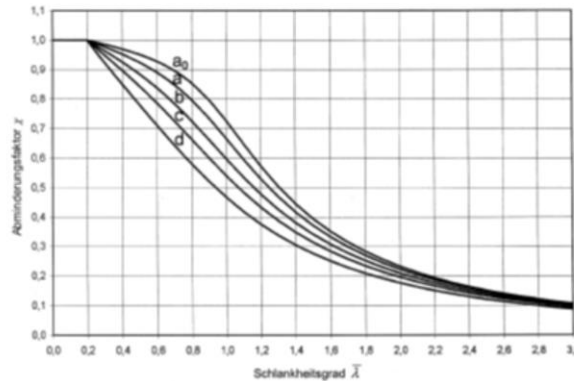
Knickbedingung:

$$-EI \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L} \right)^2 + P = 0 \Rightarrow P_{cr} = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot EI}{L^2}$$

$$n = 1 \Rightarrow P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$$



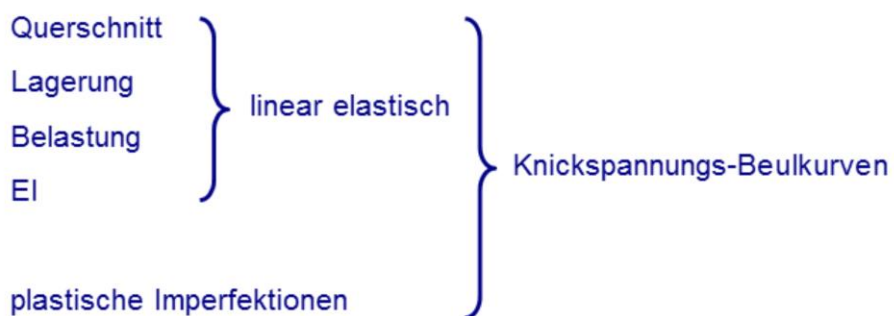
Bemessung mit Hilfe der europäischen Knickspannungslinien:



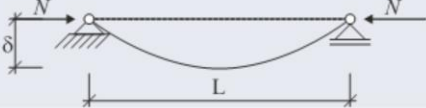
$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr}}}$$

Plattenbeulen

linearelastische Beultheorie → Beulwerte
Grenzkurven für die Bemessung



Plattenbeulen, Vergleich zum Knicken

	Knicken	Plattenbeulen (Sonderfall)
DGL	$EI \cdot w'' + P \cdot w = 0$ $EI \cdot w'''' + P \cdot w'' = 0$?
Modell		?
Ansatz	$w(x) = A \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$ $w''(x) = -A \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$?
Lösung (n=1)	$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$?

Plattenbeulen

Herleitung der Beuldifferentialgleichung

DGL: für querbelastete Platten gilt die Kirchhoff'sche Plattengleichung

$$K \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = p(x, y) \quad \text{oder} \quad K \cdot \Delta \Delta w = p(x, y)$$

$$K = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad \text{Plattensteifigkeit}$$

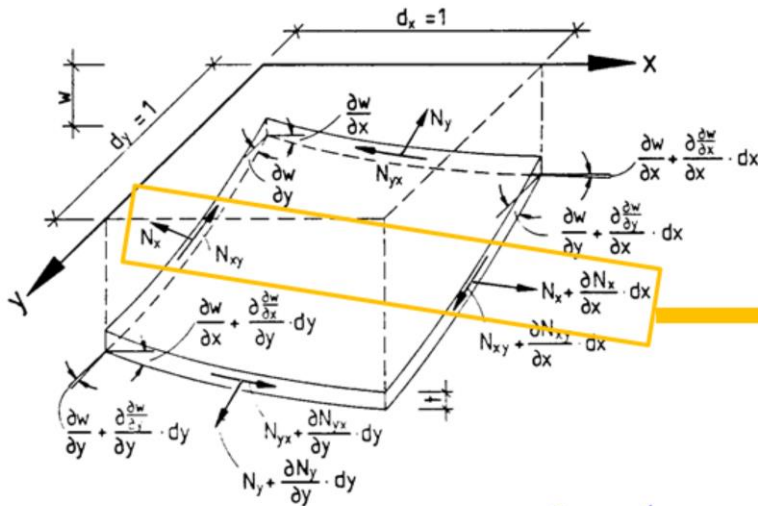
(Querb Belastung p ist im Grundzustand nicht vorhanden, ergibt sich jedoch aus Abtriebskräften im ausgebogenen Nachbarzustand)

$$\Delta \text{ LAPLACEscher Operator, } \Delta w = \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad \Delta \Delta w = \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right)$$

Plattenbeulen

Herleitung der Beuldifferentialgleichung

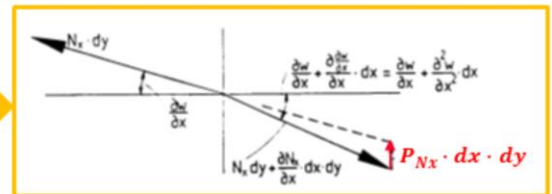
Ermittlung der Abtriebskräfte P am verformten Zustand (aus Scheibenkräften am infinitesimalen Element, kleine Winkel)



$$\sigma_x \cdot t = N_x$$

$$\sigma_y \cdot t = N_y$$

$$\tau_{xy} \cdot t = N_{xy}$$



$$P_{Nx} \cdot dx \cdot dy = N_x \cdot dy \cdot \frac{\partial w}{\partial x} - \left(N_x dy + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx dy \right) \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \right)$$

Plattenbeulen

Herleitung der Beulgleichung

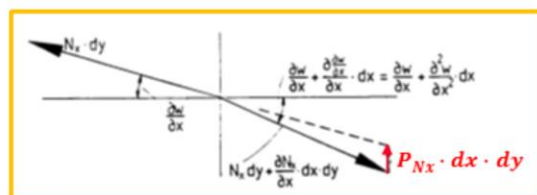
Ermittlung der Abtriebskräfte P am verformten Zustand (aus Scheibenkräften am infinitesimalen Element, kleine Winkel)

$$P_{Nx} \cdot dx \cdot dy = N_x \cdot dy \cdot \frac{\partial w}{\partial x} - \left(N_x dy + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx dy \right) \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \right)$$

$$\Rightarrow P_{Nx} \cdot dx \cdot dy = -N_x \cdot dy \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx - \frac{\partial N_x}{\partial x} dx dy \cdot \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial N_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx^2 dy$$

$$\Rightarrow P_{Nx} \cdot dx \cdot dy \approx -N_x \cdot dy \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx - \frac{\partial N_x}{\partial x} dx dy \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\Rightarrow P_{Nx} \approx -N_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial N_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$



Plattenbeulen

Herleitung der Beulgleichung

Ermittlung der Abtriebskräfte P am verformten Zustand (aus Scheibenkräften am infinitesimalen Element, kleine Winkel)

$$P_{Nx} \approx -N_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial N_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$

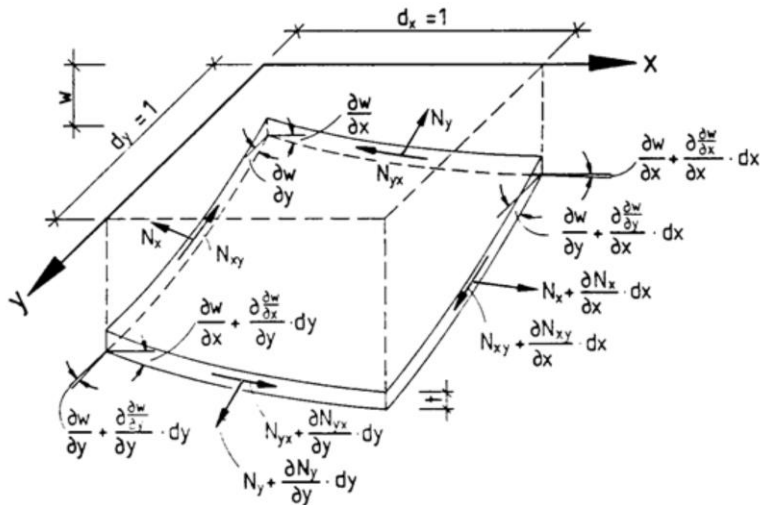
analog:

$$P_{Ny} \approx -N_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial N_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$P_{Nxy} \approx -N_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$P_{Nyx} \approx -N_{yx} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$p(x, y) = p_{Nx} + p_{Ny} + p_{Nxy} + p_{Nyx}$$



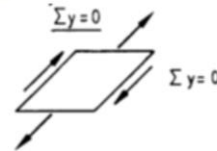
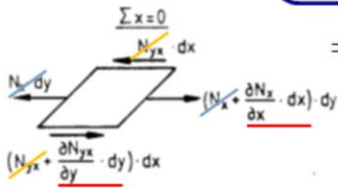
Plattenbeulen

Herleitung der Beulgleichung

Ermittlung der Abtriebskräfte P am verformten Zustand (aus Scheibenkräften am infinitesimalen Element, kleine Winkel)

$$p(x, y) = - \left(N_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + N_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_{yx} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right. \\ \left. + \frac{\partial N_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$$p(x, y) = - \left(N_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \cdot N_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right. \\ \left. + \underbrace{\left(\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} \right) \cdot \frac{\partial w}{\partial x}}_{= 0} + \underbrace{\left(\frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial w}{\partial y}}_{= 0} \right)$$



Plattenbeulen

Herleitung der Beulgleichung

Ermittlung der Abtriebskräfte P am verformten Zustand (aus Scheibenkräften am infinitesimalen Element, kleine Winkel)

$$p(x, y) = - \left(N_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \cdot N_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$\Rightarrow p(x, y) = -t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \sigma_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

Die Beulgleichung, die angibt, dass der ausgebogene Nachbarzustand als Gleichgewichtszustand neben dem Grundzustand bei ungeänderter Last existiert, lautet somit:

$$\frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = -t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \sigma_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

wobei σ_x und σ_y Druckspannungen sind.

Plattenbeulen

Herleitung der Beulgleichung

Beulgleichung (DGL):

$$\frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = -t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \sigma_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

Hinweis: Übergang zum Stab:

$$\frac{E \cdot t^3}{12} \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) = -t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

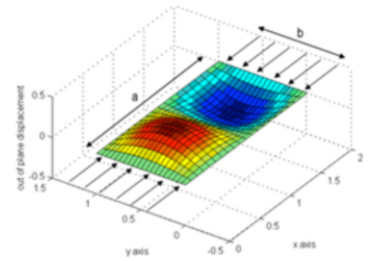
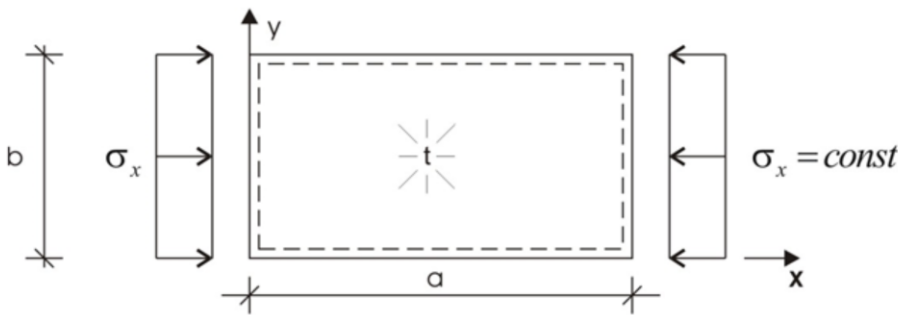
$$\Rightarrow EI \cdot w'''' + P \cdot w'' = 0$$

Plattenbeulen

Lösung der Beulgleichung für einen Sonderfall

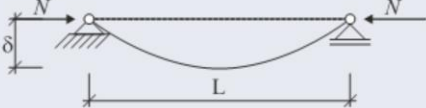

Beulgleichung (DGL):

$$\frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = -t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \sigma_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0$$



(alle 4 Ränder gelenkig gelagert, nur konstante Spannungen σ_x vorhanden)

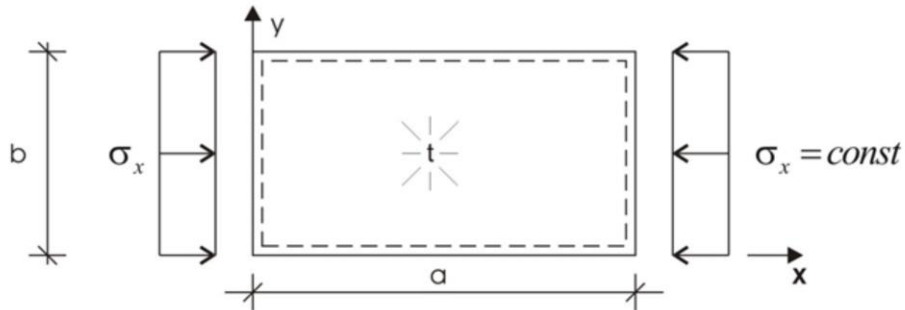
Plattenbeulen, Vergleich zum Knicken

	Knicken	Plattenbeulen (Sonderfall)
DGL	$EI \cdot w'' + P \cdot w = 0$ $EI \cdot w'''' + P \cdot w'' = 0$	$\frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0$
Modell		
Ansatz	$w(x) = A \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$ $w''(x) = -A \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$?
Lösung (n=1)	$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$?

Plattenbeulen

Lösung der Beulgleichung für einen Sonderfall

Ansatz:



$$w(x, y) = A_{mn} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right), m, n \in \mathbb{N}$$

m Anzahl der Wellen in x-Richtung

n Anzahl der Wellen in y-Richtung

Plattenbeulen

Lösung der Beulgleichung für einen Sonderfall

$$w(x, y) = A_{mn} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right), m, n \in \mathbb{N}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -A_{mn} \cdot \left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = -A_{mn} \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = A_{mn} \cdot \left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^4 \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = A_{mn} \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^4 \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = A_{mn} \cdot \frac{m^2 \cdot n^2 \cdot \pi^4}{a^2 \cdot b^2} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right)$$

Einsetzen in DGL

Plattenbeulen

Lösung der Beuldifferentialgleichung für einen Sonderfall

Beulgleichung (DGL) (Sonderfall):

$$K \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = -t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$



$$K \cdot A_{mn} \cdot \left(\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^4 + 2 \cdot \frac{m^2 \cdot n^2 \cdot \pi^4}{a^2 \cdot b^2} + \left(\frac{n \cdot \pi}{b} \right)^4 \right) = A_{mn} \cdot t \cdot \left(\sigma_x \cdot \left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2 \right)$$

$$\Rightarrow A_{mn} \cdot \left[\left(\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b} \right)^2 \right)^2 - \sigma_x \cdot \frac{t}{K} \cdot \left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2 \right] = 0$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{= 0} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{= 0} \rightarrow \text{Beulbedingung (ausgebogene Lage 2)}$
 $\rightarrow \text{triviale Lösung: } A_{mn} = 0 \text{ (nicht ausgebogene Lage 1)}$

Plattenbeulen

Lösung der Beulgleichung für einen Sonderfall
Beulbedingung:

$$\left[\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b} \right)^2 \right]^2 - \sigma_x \cdot \frac{t}{K} \cdot \left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2 = 0$$

$$\Rightarrow \sigma_{cr} = \frac{K}{t} \cdot \frac{\left[\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b} \right)^2 \right]^2}{\left(\frac{m \cdot \pi}{a} \right)^2} = \frac{K \cdot \pi^2}{t} \cdot \frac{\left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2}{\left(\frac{m}{a} \right)^2}$$

$$\Rightarrow \sigma_{cr} = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{n^2}{m} \cdot \alpha \right)^2 \cdot \frac{K \cdot \pi^2}{t \cdot b^2} \quad \frac{a}{b} = \alpha \quad K = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$$\Rightarrow \sigma_{cr} = \underbrace{\left(\frac{m}{\alpha} + \alpha \cdot \frac{n^2}{m} \right)^2}_{k_{\sigma_x}} \cdot \underbrace{\frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2}_{\sigma_e}$$

σ_e kann als Eulerknickspannung eines Stabes gedeutet werden, der 1 cm breit ist, die Länge b hat und auf Druck belastet ist.

Plattenbeulen

Lösung der Beuldifferentialgleichung für einen Sonderfall

$$\sigma_{cr} = \underbrace{\left(\frac{m}{\alpha} + \alpha \cdot \frac{n^2}{m} \right)^2}_{k_{\sigma_x}} \cdot \underbrace{\frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2}_{\sigma_e}$$

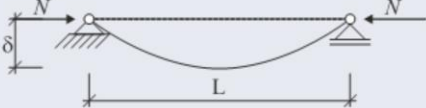

maßgebender Beulwert: $n=1$

$$\sigma_{cr} = k_{\sigma_x} \cdot \sigma_e$$

$$k_{\sigma_x} = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m} \right)^2 \quad \text{„Beulwert“}$$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad \text{„Bezugsspannung“}$$

Plattenbeulen, Vergleich zum Knicken

	Knicken	Plattenbeulen (Sonderfall)
DGL	$EI \cdot w'' + P \cdot w = 0$ $EI \cdot w'''' + P \cdot w'' = 0$	$\frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \cdot \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0$
Modell		
Ansatz	$w(x) = A \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$ $w''(x) = -A \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{L}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$	$w(x, y) = A_{mn} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right)$
Lösung (n=1)	$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$	$\sigma_{cr} = \left(\frac{m}{a} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2$

Plattenbeulen

Lösung der Beulifferentialgleichung für einen Sonderfall

Normative Regelung nach EN 1993-1-5:

Die lineare Beultheorie wird (lediglich) herangezogen, um den bezogenen Plattenschlankheitsgrad (bei Normalspannungen)

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$$

zu bestimmen.

Von ihm sind die für den Beulsicherheitsnachweis erforderlichen Abminderungsfaktoren ρ abhängig!

Plattenbeulen

Lösung der Beulgleichung für einen Sonderfall

Herleitung des Nachweisformates nach EN 1993-1-5:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad \sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{23,5}{f_y}} \Rightarrow f_y = \frac{23,5}{\varepsilon^2}$$

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \cdot \sigma_e = k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21.000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2$$
$$\approx k_\sigma \cdot 19.000 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

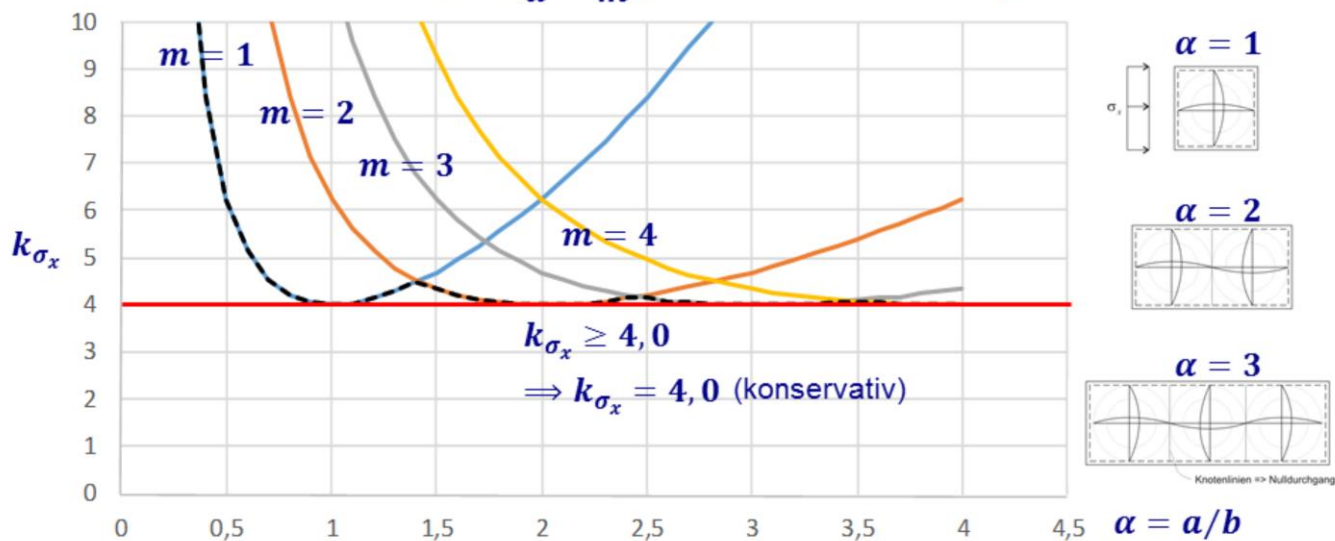
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{f_y \cdot (b/t)^2}{k_\sigma \cdot 19.000}} = \sqrt{\frac{23,5 \cdot (b/t)^2}{k_\sigma \cdot \varepsilon \cdot 19.000}} \Rightarrow \bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

Plattenbeulen

Lösung der Beulgleichung für einen Sonderfall

Herleitung des Nachweisformates nach EN 1993-1-5:

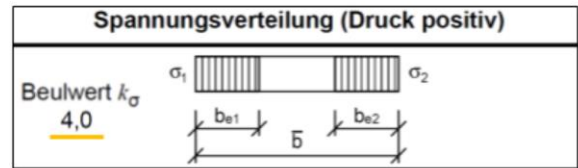
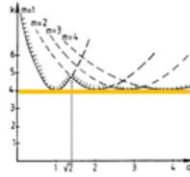
Darstellung der Beulwerte: $k_{\sigma_x} = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2$



Plattenbeulen

Lösung der Beuldifferentialgleichung für einen Sonderfall

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$



EN 1993-1-5, (Tab. 4.1)

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

EN 1993-1-5, 4.4 (2)

\bar{b} maßgebende Breite nach folgender Festlegung (Bezeichnungen siehe EN 1993-1-1, Tabelle 5.2);

b_w für Stege;

b für beidseitig gestützte Gurtelemente (außer bei rechteckigen Hohlprofilen);

k_σ Beulwert in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis ψ und den Lagerungsbedingungen; Beulwerte langer Platten sind in Tabelle 4.1 oder Tabelle 4.2 angegeben;

t Blechdicke;

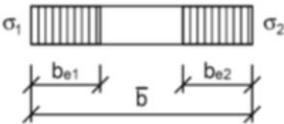
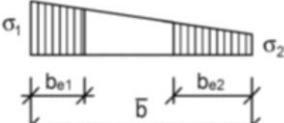
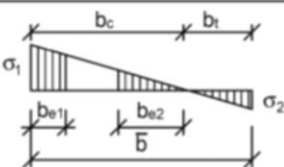
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \text{ [N/mm}^2]}}$$

Plattenbeulen

Nachweisformat nach EN 1993-1-5:

Beulwert k_{σ} in Abhängigkeit der Spannungsverteilung

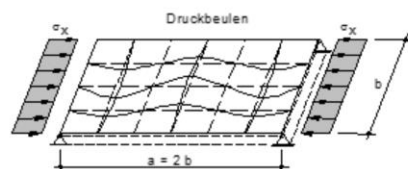
EN 1993-1-5, (Tab. 4.1)

Spannungsverteilung (Druck positiv)				Wirksame Breite b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$\boxed{AC} -1 > \psi \geq -3 \boxed{AC}$
Beulwert k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Betrachtete Stabilitätsfälle „Stahlbau III“

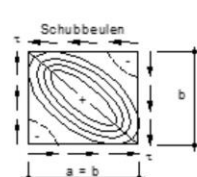
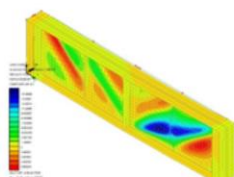
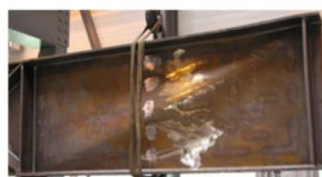
- Beulen unter Längsspannungen

EN 1993-1-5, Kap. 4 + A.1 + A.2



- Beulen unter Schubspannungen

EN 1993-1-5, Kap. 5 + A.3



- Beulen bei lokaler Lasteinleitung (Stahlbau II)

EN 1993-1-5, Kap. 6

- Interaktion

EN 1993-1-5, Kap. 7

Stabilitätsfall Beulen: Überblick Beulen unter Längsspannungen

EN 1993-1-5, Kap. 4 + A.1 + A.2

- Nachweis:
$$\eta_1 = \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{yd}} = \frac{N_{Ed}}{f_y \cdot \frac{A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{y,N}}{f_y \cdot \frac{W_{y,eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0$$
- Ziel: Ermittlung Wirksame Querschnittswerte (A_{eff} , W_{eff} , I_{eff})
- Vorgehen: Berücksichtigung verschiedener Versagensverhalten:
 - Plattenartiges Verhalten $\rightarrow \rho$
 - Knickstabähnliches Verhalten $\rightarrow \chi_c$
- Unterschiedliche Verfahren für:
 - Nicht ausgesteifte Blechfelder
 - Ausgesteifte Blechfelder mit 1 oder 2 Längssteifen in der Druckzone
 - Ausgesteifte Blechfelder mit mehr als 2 Längssteifen in der Druckzone

Stabilitätsfall Beulen: Überblick Beulen unter Schubspannungen

EN 1993-1-5, Kap. 5 + A.3

- Nachweis:
$$\eta_3 = \frac{\tau_{Ed}}{\chi_v \cdot \frac{f_{ywd}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}} = \frac{V_{Ed}}{\chi_v \cdot h_w \cdot t \cdot \frac{f_{ywd}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}} \leq 1,0$$
- Annahme: Flansche tragen nicht zum Schubwiderstand bei ($\tau_{Ed} = V_{Ed}/h_w \cdot t$)
- Ziel: Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_v
- (Grundsätzlich) gleiches Verfahren für:
 - Nicht ausgesteifte Blechfelder
 - Ausgesteifte Blechfelder mit 1 oder 2 Längssteifen in der Druckzone
 - Ausgesteifte Blechfelder mit mehr als 2 Längssteifen in der Druckzone

Stabilitätsfall Beulen: Überblick

Beulen bei lokaler Lasteinleitung (siehe Stahlbau 2)

EN 1993-1-5, Kap. 6

- Nachweis:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{L_{eff} \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

- Annahme: Flansche tragen nicht zum Schubwiderstand bei ($\sigma_{Ed} = F_{Ed}/L_{eff} \cdot t_w$)
- Ziel: Ermittlung der wirksame Lastausbreitungslänge L_{eff}

Interaktion

EN 1993-1-5, Kap. 7

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \text{ mit } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$
$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 \leq 1,4$$

Beulen unter Längsspannungen

Nachweis:

Kap. 4, EN 1993-1-5

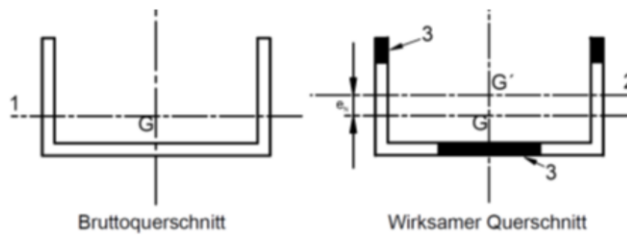
$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y \cdot \frac{A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N}{f_y \cdot \frac{W_{y,eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0$$

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} :



EN 1993-1-5, (Bild 4.1)

Legende

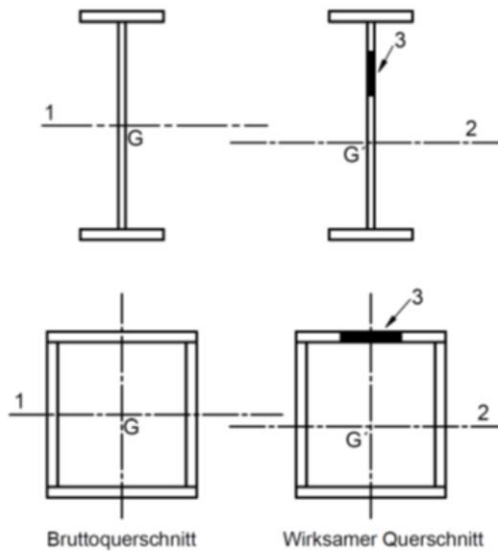
- G Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts
- G' Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts
- 1 Schwerlinie des Bruttoquerschnitts
- 2 Schwerlinie des wirksamen Querschnitts
- 3 nicht wirksame Querschnittsflächen

Die wirksame Querschnittsfläche A_{eff} wird in der Regel unter der Annahme reiner Druckspannungen infolge der Druckkraft N_{Ed} berechnet. Bei unsymmetrischen Querschnitten erzeugt die Verschiebung der Schwerlinie e_N der wirksamen Querschnittsfläche A_{eff} gegenüber der Schwerlinie des Bruttoquerschnitts ein zusätzliches Moment, siehe Abbildung oben, das in der Regel beim Querschnittsnachweis zu berücksichtigen ist.

(1) Bei der Berechnung der Längsspannungen sind in der Regel die Einflüsse der Schubverzerrung und des Plattenbeulens durch effektive Breiten zu berücksichtigen, siehe 3.3.

(2) Die effektiven Querschnittswerte von Bauteilen sind in der Regel aus den effektiven Flächen der druckbeanspruchten Blechelemente und den mittragenden Flächen der zugbeanspruchten Blechelemente unter Berücksichtigung ihrer Lage im Querschnitt zu ermitteln.

Effektive Querschnittsgrößen, W_{eff} :



EN 1993-1-5, (Bild 4.2)

Das wirksame Widerstandsmoment W_{eff} ist in der Regel unter der Annahme reiner Biegelängsspannungen infolge M_{Ed} zu bestimmen, siehe Abbildung oben. Bei zweiachsender Biegung sind in der Regel die wirksamen Widerstandsmomente für beide Hauptachsen zu bestimmen.

(1) Bei der Berechnung der Längsspannungen sind in der Regel die Einflüsse der Schubverzerrung und des Plattenbeulens durch effektive Breiten zu berücksichtigen, siehe 3.3.

(2) Die effektiven Querschnittswerte von Bauteilen sind in der Regel aus den effektiven Flächen der druckbeanspruchten Blechelemente und den mittragenden Flächen der zugbeanspruchten Blechelemente unter Berücksichtigung ihrer Lage im Querschnitt zu ermitteln.

Effektive Querschnittsgrößen, A_{eff} :

Einzelblechfelder ohne Längssteifen

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

Beidseitig gestützte Querschnittsteile:

EN 1993-1-5, 4.4 (2)

$$\rho = 1,0$$

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

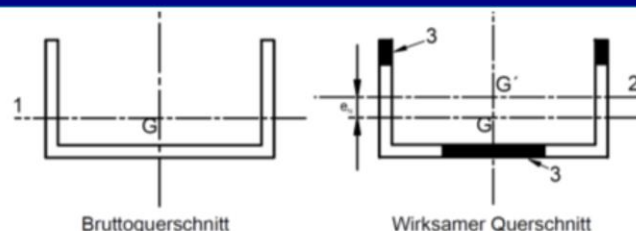
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

$\bar{\lambda}_p$ Beulslankheitsgrad

ψ Spannungsverhältnis

k_σ Beulwert



Spannungsverteilung (Druck positiv)			Wirksame Breite b_{eff}		
	$\psi = 1$		$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$		
	$0 < \psi < 1$		$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$	$b_{e1} = 0,5 \cdot b_{eff}$	$b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff}$
	$\psi < 0$		$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$	$b_{e1} = \frac{2}{3 - \psi} \cdot b_{eff}$	$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_σ	4,0	$8,2/(1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2$	$23,9$
					$5,98 \cdot (1 - \psi)^2$

Effektive Querschnittsgrößen, A_{eff} :

Einzelblechfelder ohne Längssteifen

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$$

Einseitig gestützte Querschnittsteile:

EN 1993-1-5, 4.4 (2)

$$\rho = 1,0 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

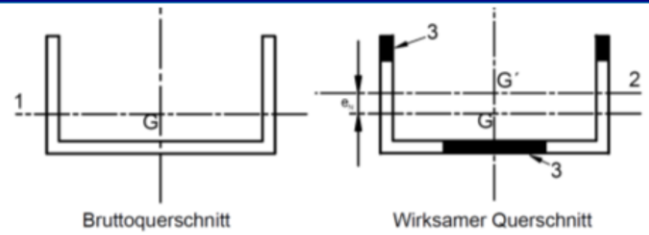
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p > 0,748$$

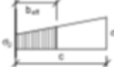
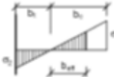
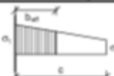
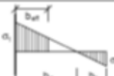
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

$\bar{\lambda}_p$ Beulslankheitsgrad

ψ Spannungsverhältnis

k_σ Beulwert



Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0: \quad b_{eff} = \rho \cdot c$			
		$\psi < 0: \quad b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c(1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Beulwert k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0: \quad b_{eff} = \rho \cdot c$			
		$\psi < 0: \quad b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot c(1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_σ	0,43	$0,578(\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8

Beulen unter Schubspannungen

Nachweis:

Kap. 5, EN 1993-1-5

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.10)

η_3 : Plattenbeulen bei Schubspannungen

V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft aus Querkraft und Torsion

$V_{b,Rd}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

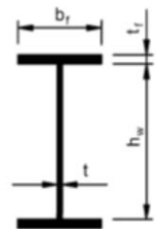
$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.1)

$V_{bw,Rd}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Steganteil

$V_{bf,Rd}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Flanschanteil
(EN 1993-1-5, Kap. 5.4, wird i.d.R. vernachlässigt)

η Beiwert nach NA ($\eta = 1,2$ bis S460, $\eta = 1,0$ ab S460 und im Brückenbau)



Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Anteil des Steges:

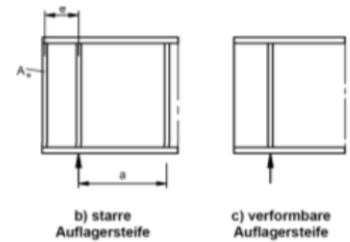
$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.10)

χ_w Beitrag des Steges zur Schubbeanspruchbarkeit

Bei Stegen mit Quersteifen nur an den Auflagern und Stegen die quer und/oder längs ausgesteift sind, ist χ_w zu bestimmen nach:

	starre Auflagersteife	verformbare Auflagersteife
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	$\chi_w = \eta$	$\chi_w = \eta$
$\frac{0,83}{\eta} \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$



EN 1993-1-5, (Tab. 5.1)

$\bar{\lambda}_w$ modifizierte Schlankheit (Steg)

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Anteil des Steges:

Ermittlung der modifizierten Stegslankheit:

In der Regel:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}}$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.3)

τ_{cr} kritische Beulspannung

Darf wie folgt ermittelt werden (hierzu später, „Alternative Ermittlung $\bar{\lambda}_w$ “):

a) nur Auflagersteifen:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t \cdot \varepsilon}$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.5)

b) Auflagersteifen und zusätzlich in Querrichtung und/oder Längsrichtung laufende Steifen:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}}$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.6)

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Anteil des Steges:

Ermittlung der kritischen Beulspannung:

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \cdot \sigma_E$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.4)

σ_E Beiwert, zu ermitteln nach Anhang A

k_{τ} Schubbeulwert für ausgesteifte Blechfelder, zu ermitteln nach Anhang A

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21.000 \cdot t^2}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot b^2} \approx 19.000 \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

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

t Blechdicke

b Blechhöhe

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Anteil des Steges:

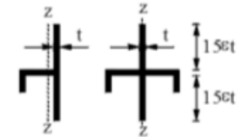
Schubbeulwert für ausgesteifte Blechfelder mit mehr als zwei oder ohne Längssteifen, die durch starre Quersteifen begrenzt sind:

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau Sl} \quad \text{für } a/h_w \geq 1,0$$

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

$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau Sl} \quad \text{für } a/h_w < 1,0$$

$$k_{\tau Sl} = 9 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 \cdot h_w} \right)^3} \geq \frac{2,1}{t} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}}$$

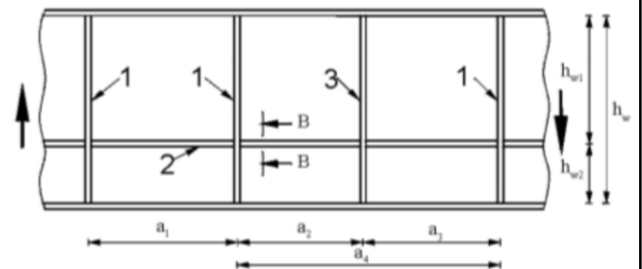


B - B

EN 1993-1-5, Bild 5.3 (b)

a Abstand starrer Quersteifen (a)

I_{sl} Flächenträgheitsmoment einer Längsteife um die z-z-Achse (bei Stegblechen mit Steifen: Summe aller Einzelsteifen) (b)



EN 1993-1-5, Bild 5.3 (a) — Stegblech mit Quer- und Längssteifen

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Anteil des Steges:

Alternative Ermittlung der mod. Stegslankheit $\bar{\lambda}_w$:

$$\sigma_E = 19.000 \left(\frac{t}{h_w} \right)^2$$

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} \quad \text{Allgemein}$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.3)

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{k_\tau \cdot \sigma_E}} = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw} \cdot h_w^2}{k_\tau \cdot 19.000 \cdot t^2}} = \frac{h_w}{181 \cdot t} \cdot \frac{\sqrt{f_{yw}}}{\sqrt{k_\tau}}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{181 \cdot t} \cdot \frac{\sqrt{23,5}}{\varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{h_w}{37,4 \cdot t} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{23,5}{f_{yw}}} \Rightarrow \sqrt{f_{yw}} = \frac{\sqrt{23,5}}{\varepsilon}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} \quad \text{Auflagersteifen und zusätzlich in Querrichtung und/oder Längsrichtung laufende Steifen}$$

EN 1993-1-5, (Gl. 5.6)

Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, Anteil des Steges:

Alternative Ermittlung der mod. Stegslankheit $\bar{\lambda}_w$, nur Auflagersteifen:

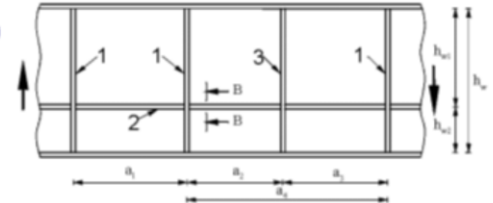
$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}}$$

Nur Auflagersteifen ($(a/h_w) \rightarrow \infty$):

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \cdot (h_w/a)^2 \quad \text{für } a/h_w \geq 1,0$$

$$\lim_{(h_w/a) \rightarrow 0} (5,34 + 4,00 \cdot (h_w/a)^2) = 5,34$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot \sqrt{5,34}} = \frac{h_w}{86,4 \cdot t} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$$



$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t \cdot \varepsilon}$$

nur Auflagersteifen

EN 1993-1-5, (Gl. 5.4)

Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft:

EN 1993-1-5, (Gl. 7.1)

$$\bar{\eta}_1 = M_{Ed}/M_{pl,Rd} \quad \bar{\eta}_3 = V_{Ed}/V_{bw,Rd}$$

$\bar{\eta}_3 \leq 0,5 \Rightarrow$ Einfluss der Schubkräfte auf die Beanspruchbarkeit für Biegemoment und Normalkraft darf vernachlässigt werden

$\bar{\eta}_3 > 0,5 \Rightarrow$ für die gemeinsame Wirkung von Biegung, Normalkraft und Schub im Steg von I-Trägern oder Kastenträgern ist folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

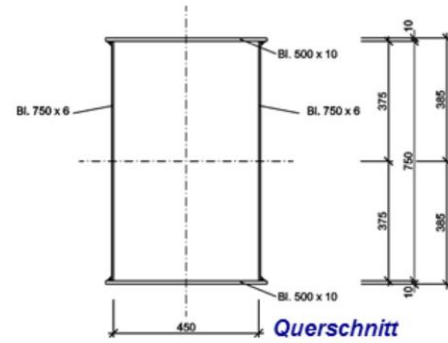
$M_{f,Rd}$ Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der nur mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche berechnet wird

$M_{pl,Rd}$ Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche und der vollen Querschnittsfläche des Steges berechnet wird (unabhängig von der Querschnittsklasse)

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

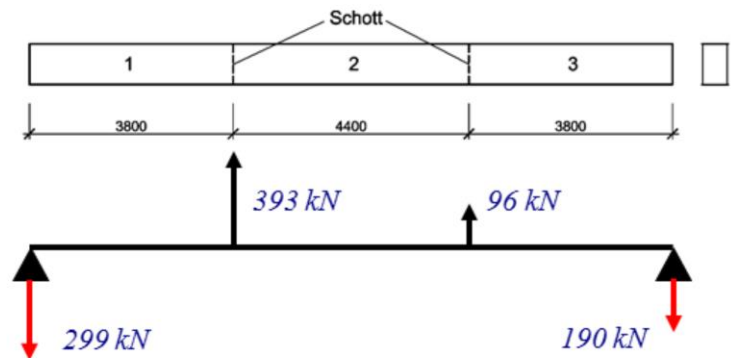
gegeben:

- statisches System gemäß Skizze
- Querschnittswerte: $I_{yy} = 186.600 \text{ cm}^4$
 $W_y = 4.850 \text{ cm}^3$
- Stahl S355



gesucht:

- Bestimmen Sie die Querschnittsklasse des Querschnitts.
- Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.
- Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Schubbeulen nach.

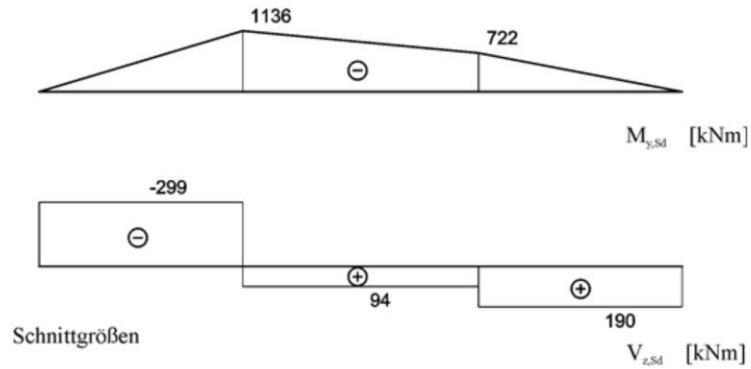


Blechfelder nicht ausgesteift

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

Hinweis:

- Schnittgrößenverläufe wie angegeben



Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

a) Bestimmen Sie die Querschnittsklasse des Querschnitts.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

Gurt (reiner Druck):

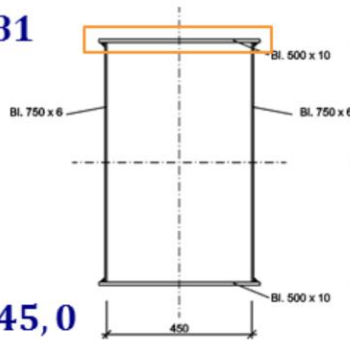
$$\frac{c}{t_f} = \frac{45,0}{1,0} = 45,0$$

$$\text{QKL 1: } 33 \cdot \varepsilon = 26,73 < 45,0$$

$$\text{QKL 2: } 38 \cdot \varepsilon = 30,78 < 45,0$$

$$\text{QKL 1: } 42 \cdot \varepsilon = 34,02 < 45,0$$

→ Querschnittsklasse 4 im Gurt



Tafel 8.9 QK für beidseitig (t) gestützte, druckbeanspruchte Querschnittsteile [-1-1 Tab.5.2]

Querschnittsklasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile		auf Druck beanspruchte Querschnittsteile		auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile	
	Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)		Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)		Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)	
1	$c/t \leq 72 \cdot \varepsilon$		$c/t \leq 33 \cdot \varepsilon$		$a > 0,5 \cdot c/t \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot a - 1}$ $a \leq 0,5 \cdot c/t \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{a}$	
2	$c/t \leq 83 \cdot \varepsilon$		$c/t \leq 38 \cdot \varepsilon$		$a > 0,5 \cdot c/t \leq \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot a - 1}$ $a \leq 0,5 \cdot c/t \leq \frac{41,5 \cdot \varepsilon}{a}$	
3	$c/t \leq 124 \cdot \varepsilon$		$c/t \leq 42 \cdot \varepsilon$		$\psi > -1; a/t \leq \frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33 \cdot \psi}$ $\psi \leq -1^{10}; c/t \leq 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \sqrt{1 - \psi}$	

¹⁰ Es gilt $\psi \leq -1$, falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_y > f_y/E$ sind.

Schneider Bauteilen

EN 1993-1-5, 4.3 Effektive Querschnittsgrößen

(5) Die Spannungen in den Flanschen sind in der Regel mit dem elastischen Widerstandsmoment, bezogen auf die Mittelebene des Gurtbleches, zu berechnen.

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

a) Bestimmen Sie die Querschnittsklasse des Querschnitts.

Steg (reine Biegung):

$$\frac{c}{t_w} = \frac{75,0}{0,6} = 125$$

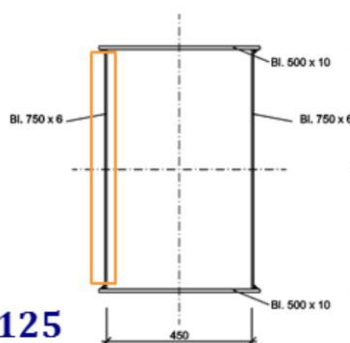
$$\text{QKL 1: } 72 \cdot \varepsilon = 58,32 < 125$$

$$\text{QKL 2: } 83 \cdot \varepsilon = 67,32 < 125$$

$$\text{QKL 1: } 124 \cdot \varepsilon = 100,44 < 125$$

→ Querschnittsklasse 4 im Steg

→ Der Gesamtquerschnitt fällt in QKL 4



Tafel 8.9 QK für beidseitig (?) gestützte, druckbeanspruchte Querschnittsteile [-1-1 Tab. 5.2]

Querschnittsklasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile		
	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile
Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)			
1	$c/t \leq 72 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq 33 \cdot \varepsilon$	$a > 0,5 \cdot c/t \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot a - 1}$ $a \leq 0,5 \cdot c/t \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{a}$
2	$c/t \leq 83 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq 38 \cdot \varepsilon$	$a > 0,5 \cdot c/t \leq \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot a - 1}$ $a \leq 0,5 \cdot c/t \leq \frac{41,5 \cdot \varepsilon}{a}$
Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)			
3	$c/t \leq 124 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq 42 \cdot \varepsilon$	$\psi > -1 \cdot c/t \leq \frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33 \cdot \psi}$ $\psi \leq -1^{10} \cdot c/t \leq 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi)^{1/2} \cdot \psi$

¹⁰ Es gilt $\psi \leq -1$, falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_c$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_t > f_t/E$ sind.

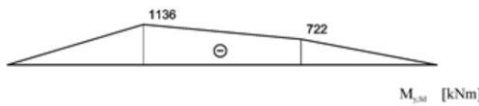
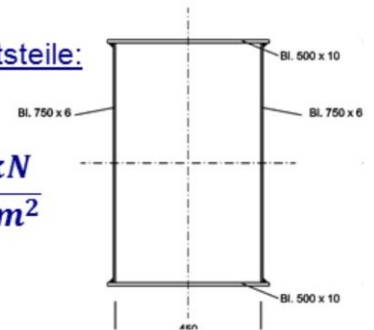
Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

Bestimmung der Abminderungsfaktoren ρ für die einzelnen Querschnittsteile:

Gurt (reiner Druck):

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{M_y}{W_{el,y}} = \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot z = \frac{1.136 \cdot 10^2}{186.600} \cdot \left(\frac{75}{2} + 1 \right) = 23,13 \frac{kN}{cm^2}$$



$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,0 \Rightarrow k_\sigma = 4,0$$

Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

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

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

- b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

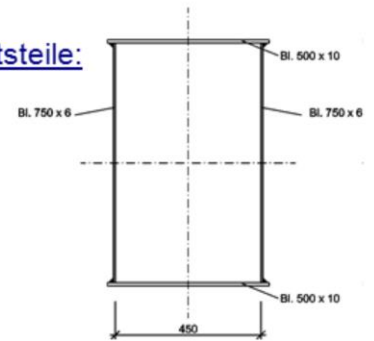
Bestimmung der Abminderungsfaktoren ρ für die einzelnen Querschnittsteile:

Gurt (reiner Druck):

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{42/1,0}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{4}} = 0,913$$

$$> 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} = 0,673$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,913 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{0,913^2} = 0,831$$



Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

- b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

Bestimmung der Abminderungsfaktoren ρ für die einzelnen Querschnittsteile:

Gurt (reiner Druck):

$$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b} = 0,831 \cdot 42[cm] = 34,9[cm]$$

$$b_{e1} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 34,9[cm] = 17,45[cm]$$

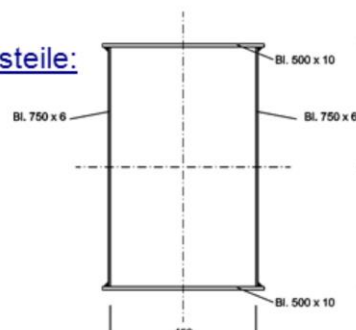





Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

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 $0 > \psi > -1$ -1 $\frac{b_c}{\bar{b}} - 1 > \psi \geq -3$		
Beulwert κ_ϕ	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 1: Kastenträger einer Lasttraverse

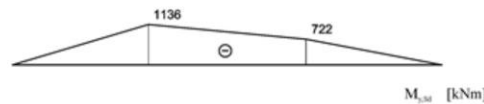
b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

Bestimmung der Abminderungsfaktoren ρ für die einzelnen Querschnittsteile:

Steg (Biegung):

$$\sigma_1 = \frac{M_y}{W_{el,y}} = \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot z = \frac{1.136 \cdot 10^2}{186.600} \cdot \left(\frac{75}{2}\right) = 22,83 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_2 = -\sigma_1 = -22,83 \frac{kN}{cm^2}$$



$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1,0 \Rightarrow k_\sigma = 23,9$$

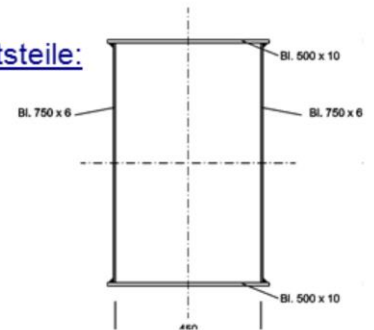


Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

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	0
Beulwert k_σ	1	8,2/(1,05 + ψ)	7,81
	4,0	7,81 - 6,29 ψ + 9,78 ψ^2	23,9
		-1	5,98 (1 - ψ) ²

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

- b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

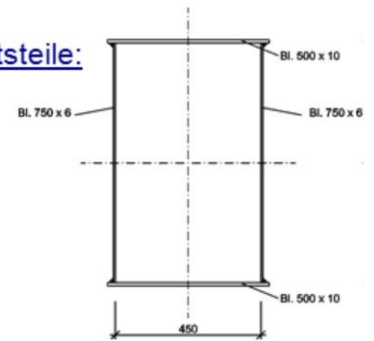
Bestimmung der Abminderungsfaktoren ρ für die einzelnen Querschnittsteile:

Steg (Biegung):

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{75/0,6}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{23,9}} = 1,11$$

$$> 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} = 0,874$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,11 - 0,055 \cdot (3 - 1)}{1,11^2} = 0,812$$



Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

Bestimmung der Abminderungsfaktoren ρ für die einzelnen Querschnittsteile:

Steg (Biegung):

$$b_{eff} = \rho \cdot \frac{\bar{b}}{1 - \psi} = 0,812 \cdot \frac{75 [cm]}{1 - (-1)} = 30,45 [cm]$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 30,45 [cm] = 12,18 [cm]$$

$$b_{e1} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 30,45 [cm] = 18,27 [cm]$$

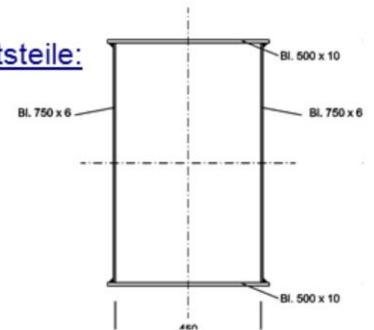


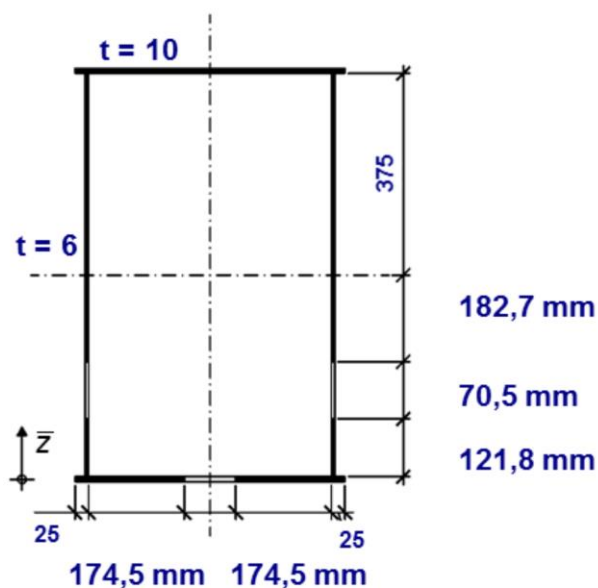
Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)			Wirksame Breite b_{eff}		
	$\psi = 1$	$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$	$\psi > 0$: $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot \bar{b} (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$
	$\psi > 0$	$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$	$b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$	$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$
	$\psi < 0$	$b_{eff} = \rho \cdot b_c = \rho \cdot \bar{b} (1 - \psi)$	$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$	$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$	$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$
Beulwert k_σ	1	0	-1	20	10
	4,0	8,2 (1,05 + ψ)	7,81	7,81 - 6,29 ψ + 9,78 ψ^2	23,9
					5,98 (1 - ψ) ²

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

- b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

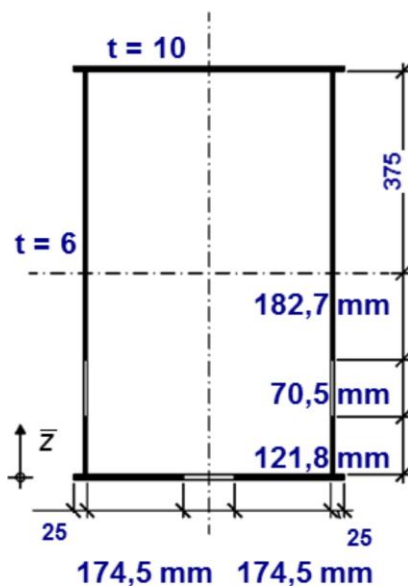
Bestimmung der effektiven Querschnittsabmessungen:



Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

Bestimmung der effektiven Querschnittsabmessungen / Querschnittswerte:



	A_i	\bar{z}_i	$\bar{z}_i \cdot A_i$
Untergurt	39,90	0	0
Steg	14,62	6,59	96,35
	21,92	28,87	632,83
	45,00	56,75	2553,75
Obergurt	50,00	76,00	3800,00
Summe	171,44	-	7082,93

$$z_{s,eff} = \frac{\sum \bar{z}_i \cdot A_i}{\sum A_i} = \frac{7.082,93 [cm^2]}{171,44 [cm]} = 41,31 [cm]$$

$$10 \times (174,5 \times 2 + 25 \times 2) = 39,90 \text{ cm}^2$$

$$121,8 \times 6 \times 2 = 14,62 \text{ cm}^2$$

$$182,7 \times 6 \times 2 = 21,92 \text{ cm}^2$$

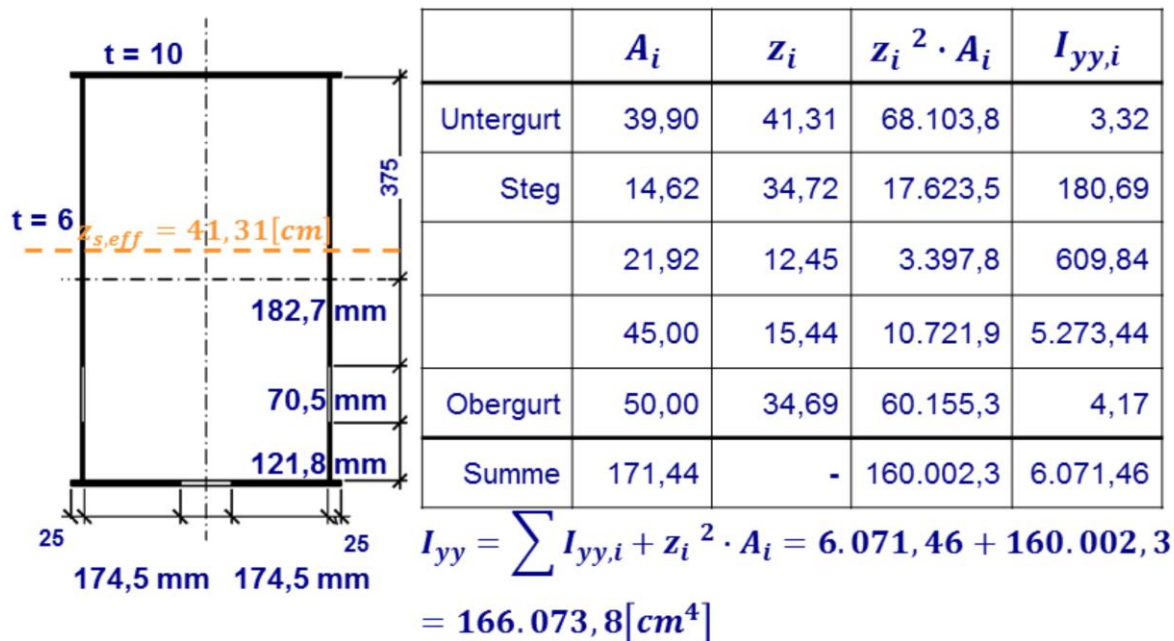
$$375 \times 6 \times 2 = 45,00 \text{ cm}^2$$

$$500 \times 10 = 50,00 \text{ cm}^2$$

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

- b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

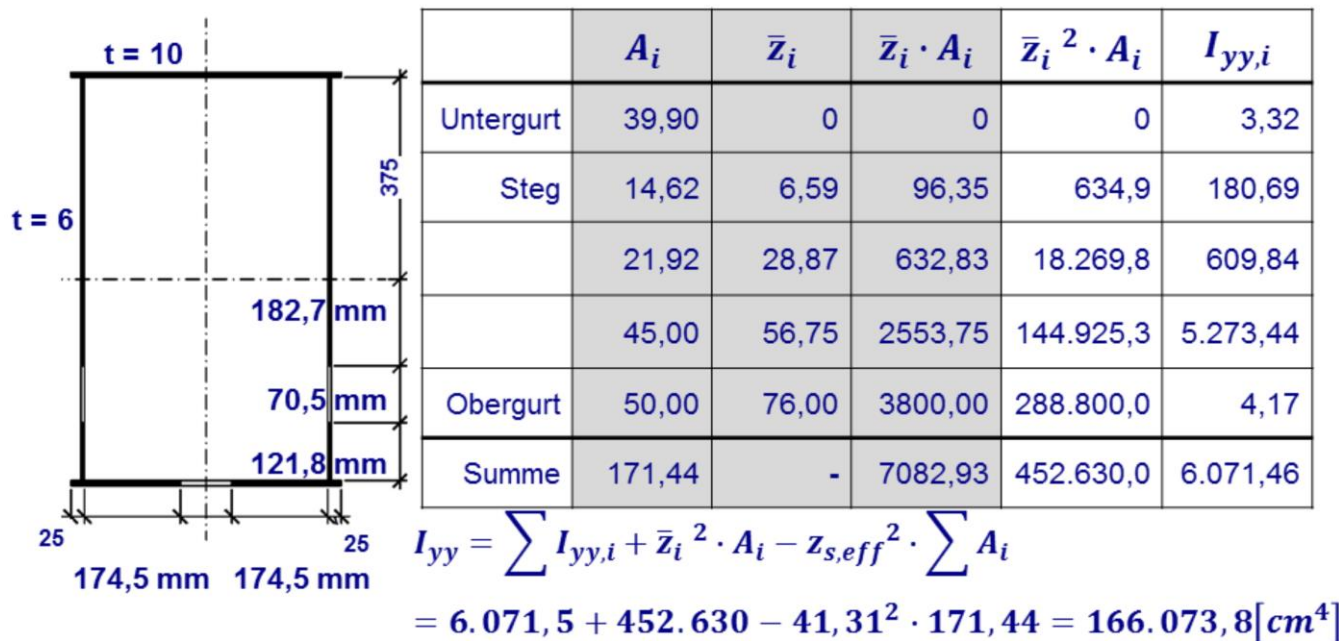
Bestimmung der effektiven Querschnittsabmessungen / Querschnittswerte:



Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

- b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

Bestimmung der effektiven Querschnittsabmessungen / Querschnittswerte (schneller):



Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

- b) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Beulen unter Längsspannungen nach.

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

$$W_{y,eff} = \frac{I_{yy}}{z} + \frac{166.073,8[cm^4]}{41,31[cm] + 0,5[cm]} = 3.972,1[cm^3]$$

$$\eta_1 = \frac{0}{f_y \cdot \frac{A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{1.136 \cdot 100 + 0 \cdot e_N}{35,5 \cdot \frac{3.972,1}{1,0}} = 0,81 \leq 1,0$$

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

c) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Schubbeulen nach.

Nachweis:

Nachweis auf Schubbeulen (nicht ausgesteifte Blechfelder) erforderlich, wenn:

$$\frac{h_w}{t} > \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon \quad \frac{750}{6} = 125 > \frac{72}{1,2} \cdot 0,81 = 48,6$$

Ermittlung des Bemessungswiderstandes gegen Querkraft unter Berücksichtigung des Schubbeulens:

$$V_{b,Rd} = \underbrace{V_{bw,Rd}}_{\text{Beitrag Steg}} + \underbrace{V_{bf,Rd}}_{\text{Beitrag Flansch}} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

der Beitrag der Flansche wird i.d.R. vernachlässigt

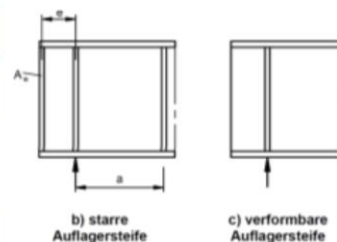
$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

c) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Schubbeulen nach.

Bei Stegen mit Quersteifen nur an den Auflagern und Stegen die quer und/oder längs ausgesteift sind, ist χ_w zu bestimmen nach:

	starre Auflagersteife	verformbare Auflagersteife
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	$\chi_w = \eta$	$\chi_w = \eta$
$\frac{0,83}{\eta} \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$



EN 1993-1-5, (Tab. 5.1)

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} \quad \tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E$$

$$\sigma_E = 19.000 \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 19.000 \left(\frac{0,6}{75} \right)^2 = 1,216 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

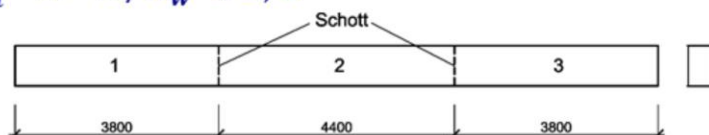
Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

c) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Schubbeulen nach.

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau Sl} \quad \text{für } a/h_w \geq 1,0$$

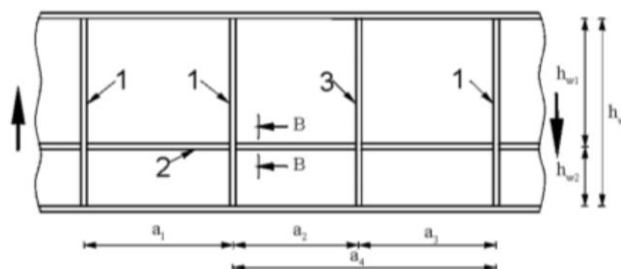
$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau Sl} \quad \text{für } a/h_w < 1,0$$

$$a/h_w = 380/75 = 5,07 > 1,0$$



$$k_{\tau Sl} = 0 \quad (\text{wird vernachlässigt, sichere Seite})$$

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \cdot (75/380)^2 = 5,50$$

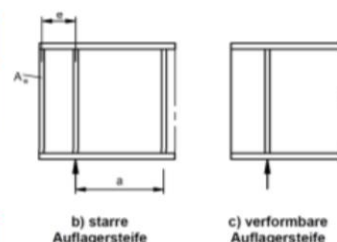


$$\Rightarrow \tau_{cr} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 5,50 \cdot 1,216 \left[\frac{kN}{cm^2} \right] = 6,68 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

c) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Schubbeulen nach.

	starre Auflagersteife	verformbare Auflagersteife
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	$\chi_w = \eta$	$\chi_w = \eta$
$\frac{0,83}{\eta} \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$



EN 1993-1-5, (Tab. 5.1)

Verformbare Auflagersteife:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{35,5}{6,68}} = 1,75 > 1,08$$

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,83}{1,75} = 0,474$$

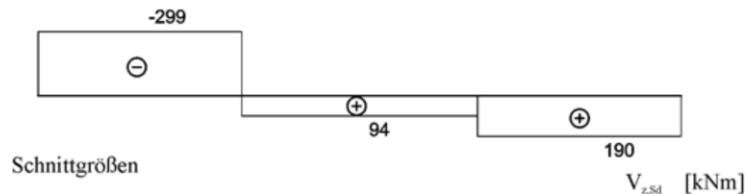
Beispiel 1: Kastenträger einer Lasttraverse

c) Weisen Sie die ausreichende Sicherheit der Lasttraverse gegen Schubbeulen nach.

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 2 \cdot \frac{0,474 \cdot 35,5 \cdot 75 \cdot 0,6}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 794,87[kN]$$

Nachweis:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0$$



$$\eta_3 = \frac{299[kN]}{794,87[kN]} = 0,38 \leq 1,0$$

$$\bar{\eta}_3 = V_{Ed}/V_{bw,Rd} = \eta_3 \leq 0,5 \Rightarrow \text{Einfluss aus Interaktion (EN 1993-1-5, Kap. 7.1) ist nicht zu untersuchen}$$

$$\eta_3 = \bar{\eta}_3 \text{ da } V_{bf,Rd} \text{ vernachlässigt wurde}$$