

# ***Bemessung von nichtrostenden Stählen***

## **Beispiel 2:**

### **Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung**

# „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“ (DMSSS)



Sonderdruck 863

**Bemessungshilfen zu  
nichtrostenden Stählen im Bauwesen**

Vierte Auflage



UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

INSTITUT FÜR METALL- UND LEICHTBAU



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

- Erläuterungen
- Bemessungsbeispiele
- Kommentar
- Software und
- Apps

1. Auflage: 1993

2. Auflage: 2002

3. Auflage: 2006

4. Auflage: 2017

Deutsche Ausgabe:

<http://www.edelstahl-rostfrei.de/page.asp?pageID=1988>

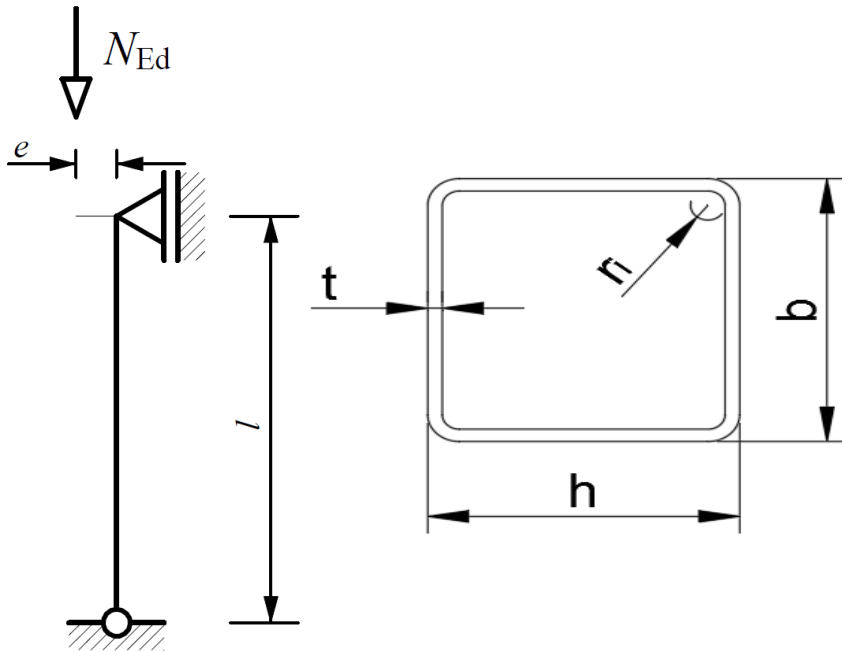
Mehrsprachige Ausgaben:

[www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual)

ISBN 978-1-85942-228-1

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## System



## Gegeben:

- Kaltgeformtes, quadratisches Rechteckhohlprofil RHP 100 x 5,
- an beiden Enden gelenkig gelagert,
- Stützweite  $l = 3,50$  m,
- Exzentrische Normalkraft  $N_{Ed} = 250$  kN,
- Exzentrizität des Lastangriffs:  $e = 100$  mm,
- Nichtrostender ferritischer Stahl 1.4016.

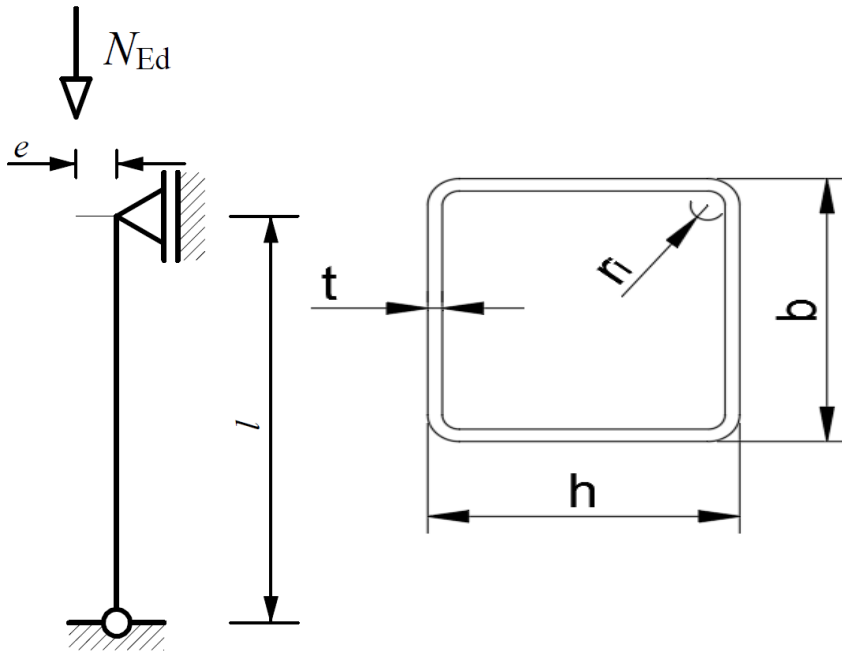
DIN EN 1993-1-4/NA, NDP zu 5.1 (2) (DMSSS, Tab. 4.1)

## Teilsicherheitsbeiwerte:

- $\gamma_{M0} = 1,1$ ,
- $\gamma_{M1} = 1,1$ .

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## Querschnitts- und Materialkennwerte



### Querschnittswerte:

- Innenradius:  $r_i = 5,0 \text{ mm}$
- Querschnittsfläche:  $A = 18,19 \text{ cm}^2$
- Flächenträgheitsmoment:  $I = 266,79 \text{ cm}^4$
- Widerstandsmomente:  $W_{el} = 53,36 \text{ cm}^3$   
 $W_{pl} = 63,73 \text{ cm}^3$

DIN EN 1993-1-4, Tab. 2.1 (DMSSS, Tab. 2.2)

### Materialkennwerte: Nichtrostender ferritischer Stahl 1.4016.

- 0,2 %-Dehngrenze:  $f_y = 260 \text{ N/mm}^2$ ,
- Zugfestigkeit:  $f_u = 450 \text{ N/mm}^2$ ,
- Elastizitätsmodul:  $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$ ,
- Bruchdehnung:  $A = 20 \text{ \%}$ .

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### Aufgabenstellung

Führen Sie den Tragsicherheitsnachweis für das dargestellte quadratische Rechteckhohlprofil und vergleichen Sie anschließend die Ergebnisse:

- a) ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung
- b) mit Berücksichtigung einer **Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze**
- c) mit Berücksichtigung einer **Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“**

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## Querschnittsklassifizierung

Beiwert:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{260} \cdot \frac{200000}{210000}} = 0,93$$

Querschnittsklassifizierung (DMSSS, Tabelle 5.2):

Beidseitig gestützte Querschnittsteile:

Auf Druck beanspruchte Querschnittsteile:

$$\frac{c}{t} = \frac{85,0}{5,0} = 17,0 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,93 = 30,69$$

mit:  $c = h - 3 \cdot t = 100,0 - 3 \cdot 5,0 = 85,0$  mm (auf der sicheren Seite liegend)

→ QKL 1

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## Querschnittsklassifizierung

Querschnittsklassifizierung (DMSSS, Tabelle 5.2):

Beidseitig gestützte Querschnittsteile:

Auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile:

$$\alpha = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y \cdot c \cdot \sum t_w} \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{250,0 \cdot 10^3}{260 \cdot 85,0 \cdot 2 \cdot 5,0} \right) = 1,07 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} = \frac{85,0}{5,0} = 17,0 < \frac{396 \cdot \varepsilon}{(13 \cdot \alpha - 1)} = \frac{396 \cdot 0,93}{(13 \cdot 1,07 - 1)} = 28,53$$

mit:  $c = h - 3 \cdot t = 100,0 - 3 \cdot 5,0 = 85,0$  mm (auf der sicheren Seite liegend)

→ QKL 1

**Der Querschnitt kann der Querschnittsklasse 1 zugeordnet werden.**

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

#### Bemessungsschnittgrößen:

Exzentrische Normalkraft:

$$N_{Ed} = 250 \text{ kN}$$

Biegemoment aus der Exzentrizität:

$$M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e = 250,0 \cdot 100,0 \cdot 10^{-3} = 25,0 \text{ kNm}$$

Querkraft aus der Exzentrizität:

$$V_{Ed} = \frac{N_{Ed} \cdot e}{l} = \frac{250,0 \cdot 100,0 \cdot 10^{-3}}{3,5} = 7,14 \text{ kN}$$



## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Normalkraft (DIN EN 1993-1-1, 6.2.10):

$$V_{Ed} = 7,14 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 0,5 \cdot \frac{A_v \cdot \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = 0,5 \cdot \frac{9,1 \cdot 10^2 \cdot \left( \frac{260,0 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} \right)}{1,1} = 62,09 \text{ kN}$$

$$\text{mit: } A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{18,19 \cdot 100,0}{(100,0 + 100,0)} = 9,1 \text{ cm}^2$$

⇒ Es braucht keine Abminderung der Biegebeanspruchbarkeit aufgrund der Querkraft durchgeführt werden, es sei denn Schubbeulen vermindert die Querschnittstragfähigkeit, siehe EN 1993-1-5.

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

Schubtragfähigkeit (DIN EN 1993-1-5, 5; DMSSS, Kapitel 6.4.3):

Die Schubtragfähigkeit muss nur unter folgender Bedingung betrachtet werden:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2 \cdot \varepsilon}{\eta} \quad (\text{bei nicht ausgesteiften Stegen})$$

$$\frac{h_w}{t} = \frac{85,0}{5} = 17,0 \geq \frac{56,2 \cdot \varepsilon}{\eta} = \frac{56,2 \cdot 0,93}{1,2} = 43,56$$

mit:  $\eta = 1,2$

⇒ Es braucht keine Abminderung der Biegebeanspruchbarkeit aufgrund der Schubtragfähigkeit durchgeführt werden.

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

$$N_{Ed} = 250 \text{ kN} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 0,25 \cdot \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \\ 0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \end{array} \right\}$$
$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot \frac{18,19 \cdot 10^2 \cdot 260,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 107,49 \text{ kN} \\ 0,5 \cdot 85,0 \cdot 5,0 \cdot \frac{260,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 50,23 \text{ kN} \end{array} \right\} = 50,23 \text{ kN}$$

mit:  $h_w = c = 85,0 \text{ mm}$

⇒ Der Einfluss der Normalkraft auf die plastische Momentenbeanspruchbarkeit muss berücksichtigt werden.

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

Beanspruchung aus Biegung und Normalkraft (DIN EN 1993-1-1, 6.2.9):

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5 \cdot a_w)} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5 \cdot a_w)}$$
$$= \frac{63,73 \cdot 10^2 \cdot 260,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(1-0,58)}{(1-0,5 \cdot 0,45)} = 8,16 \text{ kNm}$$

$$M_{N,y,Rd} = 8,16 \text{ kNm} \leq M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{63,73 \cdot 10^2 \cdot 260,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} \cdot 10^{-2} = 15,06 \text{ kNm}$$

mit:  $a_w = \frac{(A - 2 \cdot b \cdot t)}{A} = \frac{(18,19 - 2 \cdot 100,0 \cdot 5,0 \cdot 10^{-2})}{18,19} = 0,45 \leq 0,5$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{A_g \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{250,0}{18,19 \cdot 10^2 \cdot \frac{260,0 \cdot 10^{-3}}{1,1}} = 0,58$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

$$M_{y,Ed} \leq M_{N,y,Rd}$$

$$M_{y,Ed} = 25,0 \text{ kNm} \leq M_{N,y,Rd} = 8,16 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{25,0}{8,16} = 3,06 > 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 306,0 % Ausnutzung nicht erfüllt.

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Drucknormalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5.2):

Drucknormalkraft und einachsige Biegung:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \cdot \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{\beta_W \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \right) \leq 1,0$$

$$\text{mit: } k_y = 1 + D_1 \cdot (\bar{\lambda}_y - D_2) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1 + D_1 \cdot (D_3 - D_2) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}$$

$$D_1 = 1,3; \quad D_2 = 0,45; \quad D_3 = 1,6$$

$$\beta_W = 1,0$$

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Anmerkung: Doppelsymmetrische Querschnitte müssen nicht auf Biegedrillknicken untersucht werden, da der Schubmittelpunkt mit dem Schwerpunkt zusammenfällt. Allerdings kann Drillknicken maßgebend werden.

Kreisförmige bzw. quadratische Hohlprofile versagen i. d. R. nicht unter Drillknicken.

Bei den üblicherweise im Bauwesen eingesetzten Rechteckhohlprofilen wird Drillknicken i. d. R. nicht maßgebend. Bei Rechteckhohlprofilen muss Drillknicken daher nur berücksichtigt werden, wenn ungewöhnlich große h/b-Verhältnisse vorliegen.

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2}$$



## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200000 \cdot 266,79 \cdot 10^4}{(3,5 \cdot 10^3)^2} \cdot 10^{-3} = 429,9 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{18,19 \cdot 10^2 \cdot 260}{429,9 \cdot 10^3}} = 1,05$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,49 \cdot (1,05 - 0,2) + 1,05^2 \right) = 1,26$$

$$\text{mit: } \alpha = 0,49 \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ (DMSSS, Tabelle 6.1)}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^{-2}}} = \frac{1}{1,26 + \sqrt{1,26^2 - 1,05^{-2}}} = 0,51 \leq 1,0$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,51 \cdot 18,19 \cdot 10^2 \cdot \frac{260 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 219,27 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{250,0}{219,27} = 1,14 > 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 114,0 % Ausnutzung nicht erfüllt.

**Auf einen Nachweis gegen Drillknicken wird an dieser Stelle verzichtet.**

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Drucknormalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5.2):

Drucknormalkraft und einachsige Biegung:

$$k_y = 1 + D_1 \cdot (\bar{\lambda}_y - D_2) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}$$

$$= 1 + 1,3 \cdot (1,05 - 0,45) \cdot \frac{250,0}{219,27}$$

$$k_y \approx 1,89 \leq 1 + D_1 \cdot (D_3 - D_2) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = 1 + 1,3 \cdot (1,6 - 0,45) \cdot \frac{250,0}{219,27} = 2,71$$

mit:

$$D_1 = 1,3; \quad D_2 = 0,45; \quad D_3 = 1,6$$

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Drucknormalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5.2):

Drucknormalkraft und einachsige Biegung:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \cdot \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{\beta_w \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \right) = \frac{250,0}{219,27} + 1,89 \cdot \left( \frac{0,0 + 250,0 \cdot 100,0 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 63,73 \cdot 10^2 \cdot \frac{260,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} \cdot 10^{-2}} \right)$$
$$= 4,28 > 1,0$$

mit:  $\beta_w = 1,0$

Der Nachweis ist mit ca. 428,0 % Ausnutzung nicht erfüllt.

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

#### Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

Anmerkung: Bei kaltgewalzten quadratischen Rechteckhohlprofilen aus nichtrostendem Stahl kann eine erhöhte mittlere Streckgrenze  $f_{ya}$  angesetzt werden, um die Kaltverfestigung während der Herstellung zu berücksichtigen.

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} \cdot A_{c,rolled} + f_{yf} \cdot (A - A_{c,rolled})}{A}$$

$$\text{mit: } f_{yc} = 0,85 \cdot K \cdot (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad (\text{mit: } f_y \leq f_{yc} \leq f_u)$$

$$f_{yf} = 0,85 \cdot K \cdot (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad (\text{mit: } f_y \leq f_{yf} \leq f_u)$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}}; \quad n_p = \frac{\ln\left(\frac{f_y}{f_u}\right)}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{p0,2}}{\varepsilon_u}\right)}$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

$$A_{c,rolled} = \left( n_c \cdot \pi \cdot \frac{t}{4} \right) \cdot (2 \cdot r_i + t) + 4 \cdot n_c \cdot t^2$$

mit:  $n_c$  : Anzahl der rechtwinkligen Ecken (90°) in dem Bauteil

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2 \cdot (2 \cdot r_i + t)};$$

$$\varepsilon_f = \left( \frac{t}{900} \right) + \left( \frac{\pi \cdot t}{2 \cdot (b + h - 2 \cdot t)} \right)$$

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E};$$

$$\varepsilon_u = 0,6 \cdot \left( 1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \leq A \text{ (Bruchdehnung)}$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

$$\begin{aligned}A_{c,rolled} &= \left( n_c \cdot \pi \cdot \frac{t}{4} \right) \cdot (2 \cdot r_i + t) + 4 \cdot n_c \cdot t^2 \\ &= \left( 4 \cdot \pi \cdot \frac{5,0}{4} \right) \cdot (2 \cdot 5,0 + 5,0) + 4 \cdot 4 \cdot 5,0^2 = 635,62 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

mit:  $n_c = 4$ ; Anzahl der rechtwinkligen Ecken ( $90^\circ$ ) in dem Bauteil

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2 \cdot (2 \cdot r_i + t)} = \frac{5,0}{2 \cdot (2 \cdot 5,0 + 5,0)} = 0,17$$

$$\varepsilon_f = \left( \frac{t}{900} \right) + \left( \frac{\pi \cdot t}{2 \cdot (b + h - 2 \cdot t)} \right) = \left( \frac{5,0}{900} \right) + \left( \frac{\pi \cdot 5,0}{2 \cdot (100,0 + 100,0 - 2 \cdot 5,0)} \right) = 0,05$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E} = 0,002 + \frac{260,0}{200000,0} = 0,003$$

$$\varepsilon_u = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{260,0}{450,0}\right) = 0,25 > 0,2 = A \text{ (Bruchdehnung)}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_u = 0,2$$

$$n_p = \frac{\ln\left(\frac{f_y}{f_u}\right)}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{p0,2}}{\varepsilon_u}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{260,0}{450,0}\right)}{\ln\left(\frac{0,003}{0,2}\right)} = 0,13$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}} = \frac{260,0}{0,003^{0,13}} = 553,28$$



## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

$$f_{yc} = 0,85 \cdot K \cdot (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} = 0,85 \cdot 553,28 \cdot (0,17 + 0,003)^{0,13} = 374,38 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{mit: } f_y = 260,0 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yc} = 374,38 \text{ N/mm}^2 \leq f_u = 450,0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yf} = 0,85 \cdot K \cdot (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} = 0,85 \cdot 553,28 \cdot (0,05 + 0,003)^{0,13} = 321,01 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{mit: } f_y = 260,0 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yf} = 321,01 \text{ N/mm}^2 \leq f_u = 450,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} f_{ya} &= \frac{f_{yc} \cdot A_{c,rolled} + f_{yf} \cdot (A - A_{c,rolled})}{A} \\ &= \frac{374,38 \cdot 635,62 + 321,01 \cdot (18,19 \cdot 10^2 - 635,62)}{18,19 \cdot 10^2} = 339,66 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow f_{ya} = 339,0 \text{ N/mm}^2$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Querschnittsklassifizierung:

Beiwert:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{ya}} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{339} \cdot \frac{200000}{210000}} = 0,81$$

Querschnittsklassifizierung (DMSSS, Tabelle 5.2):

Beidseitig gestützte Querschnittsteile:

Auf Druck beanspruchte Querschnittsteile:

$$\frac{c}{t} = \frac{85,0}{5,0} = 17,0 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73$$

mit:  $c = h - 3 \cdot t = 100,0 - 3 \cdot 5,0 = 85,0$  mm (auf der sicheren Seite liegend)

→ QKL 1

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Querschnittsklassifizierung (DMSSS, Tabelle 5.2):

Beidseitig gestützte Querschnittsteile:

Auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile:

$$\alpha = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_{ya} \cdot c \cdot \sum t_w} \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{250,0 \cdot 10^3}{339,0 \cdot 85,0 \cdot 2 \cdot 5,0} \right) = 0,93 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} = \frac{85,0}{5,0} = 17,0 < \frac{396 \cdot \varepsilon}{(13 \cdot \alpha - 1)} = \frac{396 \cdot 0,81}{(13 \cdot 0,93 - 1)} = 28,92$$

mit:  $c = h - 3 \cdot t = 100,0 - 3 \cdot 5,0 = 85,0$  mm (auf der sicheren Seite liegend)

→ QKL 1

**Der Querschnitt kann der Querschnittsklasse 1 zugeordnet werden.**

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Normalkraft (DIN EN 1993-1-1, 6.2.10):

$$V_{Ed} = 7,14 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd} = 0,5 \cdot \frac{A_v \cdot \left( \frac{f_{ya}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = 0,5 \cdot \frac{9,1 \cdot 10^2 \cdot \left( \frac{339,0 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} \right)}{1,1} = 80,96 \text{ kN}$$

$$\text{mit: } A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{18,19 \cdot 100,0}{(100,0 + 100,0)} = 9,1 \text{ cm}^2$$

⇒ Es braucht keine Abminderung der Biegebeanspruchbarkeit aufgrund der Querkraft durchgeführt werden, es sei denn Schubbeulen vermindert die Querschnittstragfähigkeit, siehe EN 1993-1-5.

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

Schubtragfähigkeit (DIN EN 1993-1-5, 5; DMSSS, Kapitel 6.4.3):

Die Schubtragfähigkeit muss nur unter folgender Bedingung betrachtet werden:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2 \cdot \varepsilon}{\eta} \quad (\text{bei nicht ausgesteiften Stegen})$$

$$\frac{h_w}{t} = \frac{85,0}{5} = 17,0 \geq \frac{56,2 \cdot \varepsilon}{\eta} = \frac{56,2 \cdot 0,81}{1,2} = 37,94$$

mit:  $\eta = 1,2$

⇒ Es braucht keine Abminderung der Biegebeanspruchbarkeit aufgrund der Schubtragfähigkeit durchgeführt werden.

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

$$N_{Ed} = 250 \text{ kN} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot N_{pl,Rd} = 0,25 \cdot \frac{A_g \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} \\ 0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{ya}}{\gamma_{M0}} \end{array} \right\}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot \frac{18,19 \cdot 10^2 \cdot 339,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 140,15 \text{ kN} \\ 0,5 \cdot 85,0 \cdot 5,0 \cdot \frac{339,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 65,49 \text{ kN} \end{array} \right\} = 65,49 \text{ kN}$$

mit:  $h_w = c = 85,0 \text{ mm}$

⇒ Der Einfluss der Normalkraft auf die plastische Momentenbeanspruchbarkeit muss berücksichtigt werden.

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

Beanspruchung aus Biegung und Normalkraft (DIN EN 1993-1-1, 6.2.9):

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5 \cdot a_w)} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5 \cdot a_w)}$$
$$= \frac{63,73 \cdot 10^2 \cdot 339,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} \cdot 10^{-2} \cdot \frac{(1-0,45)}{(1-0,5 \cdot 0,45)} = 13,94 \text{ kNm}$$

$$M_{N,y,Rd} = 13,94 \text{ kNm} \leq M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} = \frac{63,73 \cdot 10^2 \cdot 339,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} \cdot 10^{-2} = 19,64 \text{ kNm}$$

mit:  $a_w = \frac{(A - 2 \cdot b \cdot t)}{A} = \frac{(18,19 - 2 \cdot 100,0 \cdot 5,0 \cdot 10^{-2})}{18,19} = 0,45 \leq 0,5$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{A_g \cdot f_{ya} / \gamma_{M0}} = \frac{250,0}{18,19 \cdot 10^2 \cdot 339,0 \cdot 10^{-3} / 1,1} = 0,45$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung) (DMSSS, Kapitel 5.7.6):

$$M_{y,Ed} \leq M_{N,y,Rd}$$

$$M_{y,Ed} = 25,0 \text{ kNm} \leq M_{N,y,Rd} = 13,94 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{25,0}{13,94} = 1,79 > 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 179,0 % (ohne Verfestigung ca. 306,0 %) Ausnutzung nicht erfüllt.



## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200000 \cdot 266,79 \cdot 10^4}{(3,5 \cdot 10^3)^2} \cdot 10^{-3} = 429,9 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{ya}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{18,19 \cdot 10^2 \cdot 339,0}{429,9 \cdot 10^3}} = 1,2$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,49 \cdot (1,2 - 0,2) + 1,2^2 \right) = 1,47$$

$$\text{mit: } \alpha = 0,49 \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ (DMSSS, Tabelle 6.1)}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,47 + \sqrt{1,47^2 - 1,2^2}} = 0,43 \leq 1,0$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_{ya}}{\gamma_{M1}} = 0,43 \cdot 18,19 \cdot 10^2 \cdot \frac{339,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 241,05 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{250,0}{241,05} = 1,04 > 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 104,0 % (ohne Verfestigung ca. 114,0 %) Ausnutzung nicht erfüllt.

**Auf einen Nachweis gegen Drillknicken wird an dieser Stelle verzichtet.**

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Drucknormalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5.2):

Drucknormalkraft und einachsige Biegung:

$$k_y = 1 + D_1 \cdot (\bar{\lambda}_y - D_2) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}$$
$$= 1 + 1,3 \cdot (1,2 - 0,45) \cdot \frac{250,0}{241,05}$$

$$k_y \approx 2,01 \leq 1 + D_1 \cdot (D_3 - D_2) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = 1 + 1,3 \cdot (1,6 - 0,45) \cdot \frac{250,0}{241,05} = 2,55$$

mit:

$$D_1 = 1,3; \quad D_2 = 0,45; \quad D_3 = 1,6$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### b) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze

Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5):

Drucknormalkraft und Biegung (DMSSS, Kapitel 6.5.2):

Drucknormalkraft und einachsige Biegung:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \cdot \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{\beta_W \cdot W_{pl,y} \cdot \frac{f_{ya}}{\gamma_{M1}}} \right) = \frac{250,0}{241,05} + 2,01 \cdot \left( \frac{0,0 + 250,0 \cdot 100,0 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 63,73 \cdot 10^2 \cdot \frac{339,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} \cdot 10^{-2}} \right)$$

= 3,6 > 1,0

mit:  $\beta_W = 1,0$

Der Nachweis ist mit ca. 360,0 % (ohne Verfestigung ca. 428,0 %) Ausnutzung nicht erfüllt.

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Anmerkung: Bei symmetrischen Querschnitten mit geringen bezogenen Schlankheiten bietet die CSM deutliche Vorteile gegenüber den herkömmlichen Regeln zur Querschnittsbemessung (DMSSS, Kap. 5). Die Vorteile aus der „Continuous Strength Method“ bei Querschnitten mit ebenen Abschnitten mit bezogenen Schlankheiten größer als 0,68 sind vergleichsweise eher gering.

Bei kaltgeformten Querschnitten kann bei der „Continuous Strength Method“ die erhöhte mittlere Streckgrenze  $f_{ya}$  des Querschnitts gemäß ANHANG B (DMSSS) anstelle der Streckgrenze  $f_y$  verwendet werden.

$$f_y = f_{ya} = 339,0 \text{ N/mm}^2$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Spannungsberechnung:

Druckflansch:

$$\sigma_1 = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M}{W_{pl}} = \frac{250,0 \cdot 10^3}{18,19 \cdot 10^2} + \frac{25,0 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{63,73 \cdot 10^3} = 529,72 \text{ N/mm}^2$$

Zugflansch:

$$\sigma_2 = \frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M}{W_{pl}} = \frac{250,0 \cdot 10^3}{18,19 \cdot 10^2} - \frac{25,0 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{63,73 \cdot 10^3} = -254,84 \text{ N/mm}^2$$

Spannungsverhältnis im Querschnittsabschnitt unter Biegebeanspruchung:

$$\psi = \frac{-254,84}{529,72} = -0,48$$

Spannungsverhältnis im Querschnittsabschnitt unter Druckbeanspruchung:

$$\psi = 1,0$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Beulwerte (DMSSS, Tabelle 5.3):

Querschnittsabschnitt unter Biegebeanspruchung:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,48) + 9,78 \cdot (-0,48)^2 = 13,08$$

mit:  $\psi = -0,48$

Querschnittsabschnitt unter Druckbeanspruchung:

$$k_{\sigma} = 4,0$$

mit:  $\psi = 1,0$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Elastische Beulspannung (DMSSS, ANHANG D.3.2):

Querschnittsabschnitt unter Biegebeanspruchung:

$$f_{cr,p} = \frac{k_{\sigma} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \bar{b}^2} = \frac{13,08 \cdot \pi^2 \cdot 200000 \cdot 5,0^2}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 85,0^2} = 8181,2 \text{ N/mm}^2$$

mit:  $k_{\sigma} = 13,08$ ;  $\nu = 0,3$  (Querdehnzahl);  $\bar{b} = c = 85,0 \text{ mm}$

Querschnittsabschnitt unter Druckbeanspruchung:

$$f_{cr,p} = \frac{k_{\sigma} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \bar{b}^2} = \frac{4,0 \cdot \pi^2 \cdot 200000 \cdot 5,0^2}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 85,0^2} = 2501,9 \text{ N/mm}^2$$

mit:  $k_{\sigma} = 4,0$ ;  $\nu = 0,3$  (Querdehnzahl);  $\bar{b} = c = 85,0 \text{ mm}$



## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Bezogene Schlankheit eines Querschnitts (DMSSS, ANHANG D.3.2):

Querschnittsabschnitt unter Biegebeanspruchung:

$$\bar{\lambda}_{p} = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{339,0}{8181,2}} = 0,2 \quad (\text{für Querschnitte mit ebenen Abschnitten})$$

mit:  $f_y = f_{ya} = 339,0 \text{ N/mm}^2$

Querschnittsabschnitt unter Druckbeanspruchung:

$$\bar{\lambda}_{p} = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{339,0}{2501,9}} = 0,37 \quad (\text{für Querschnitte mit ebenen Abschnitten})$$

mit:  $f_y = f_{ya} = 339,0 \text{ N/mm}^2$

$$\Rightarrow \bar{\lambda}_{p} = 0,37 \quad (\text{für den Gesamtquerschnitt})$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Grenzdehnung eines Querschnitts (DMSSS, ANHANG D.3):

Basiskurve (DMSSS, ANHANG D3.1):

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} = \frac{0,25}{0,37^{3,6}}$$

$$= 8,96 \leq \min \left\{ \frac{C_1 \cdot \varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{0,4 \cdot 0,15}{0,002} = 30 \right\} = 15 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p = 0,37 \leq 0,68$$

mit:  $C_1 = 0,4$ ;  $C_3 = 0,6$

$$\varepsilon_u = C_3 \cdot \left( 1 - \frac{f_y}{f_u} \right) = 0,6 \cdot \left( 1 - \frac{339,0}{450,0} \right) = 0,15; \quad \varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = \frac{339,0}{200000,0} = 0,002$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Querschnittstragfähigkeit unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6):

Rechteckhohlprofile unter kombinierter Beanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6.1):

$$M_{y,Ed} \leq M_{R,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd} \cdot \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5 \cdot a_w)} \leq M_{csm,y,Rd} \quad \text{für } \bar{\lambda}_p = 0,37 \leq 0,6$$

$$\left( \frac{M_{y,Ed}}{M_{R,csm,y,Rd}} \right)^{\alpha_{csm}} \leq 1,0$$

$$\text{mit: } n_{csm} = \frac{N_{Ed}}{N_{csm,Rd}}; \quad a_w = \frac{c \cdot t \cdot 2}{A}; \quad \alpha_{csm} = \frac{1,66}{(1 - 1,13 \cdot n_{csm}^2)}$$

# Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

## c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Querschnittstragfähigkeit unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6):

Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung (DMSSS, ANHANG D.5):

$$M_{csm,y,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \cdot \left( 1 + \frac{E_{sh} \cdot W_{el}}{E \cdot W_{pl}} \cdot \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) \right) / \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^\alpha$$

$$= \frac{63,73 \cdot 10^2 \cdot 10^{-2} \cdot 339,0 \cdot 10^{-3}}{1,1} \cdot \left( 1 + \frac{1694,66 \cdot 53,36}{200000 \cdot 63,73} \cdot (8,96 - 1) - \left( 1 - \frac{53,36}{63,73} \right) \right) / (8,96)^{2,0}$$

$$= 20,71 \text{ kNm} \quad \text{für } \varepsilon_{csm} / \varepsilon_y = 8,96 \geq 1,0$$

mit:  $E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \cdot \varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{450,0 - 339,0}{0,45 \cdot 0,15 - 0,002} = 1694,66 \text{ N/mm}^2; C_2 = 0,45; \alpha = 2,0 \text{ (RHS)}$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Querschnittstragfähigkeit unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6):

Querschnittstragfähigkeit unter Druckbeanspruchung (DMSSS, ANHANG D.4):

$$N_{csm,Rd} = \frac{A \cdot f_{csm}}{\gamma_{M0}} = \frac{18,19 \cdot 10^2 \cdot 365,98 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 605,2 \text{ kN}$$

$$\text{für } \bar{\lambda}_p = 0,37 \leq 0,68 \quad \text{sowie} \quad \text{für } \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = 8,96 \geq 1,0$$

$$\text{mit: } f_{csm} = f_y + E_{sh} \cdot \varepsilon_y \cdot \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) = 339,0 + 1694,66 \cdot 0,002 \cdot (8,96 - 1) = 365,98 \text{ N/mm}^2$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Querschnittstragfähigkeit unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6):

Rechteckhohlprofile unter kombinierter Beanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6.1):

$$n_{csm} = \frac{N_{Ed}}{N_{csm,Rd}} = \frac{250,0}{605,2} = 0,41$$

$$a_w = \frac{c \cdot t \cdot 2}{A} = \frac{85,0 \cdot 5,0 \cdot 2}{18,19 \cdot 10^2} = 0,47$$

$$\alpha_{csm} = \frac{1,66}{(1 - 1,13 \cdot n_{csm}^2)} = \frac{1,66}{(1 - 1,13 \cdot 0,41^2)} = 2,05$$

## Beispiel 2: Quadratisches Rechteckhohlprofil unter exzentrischer Druckbeanspruchung

### c) Tragsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung einer Materialverfestigung durch die „Continuous Strength Method“

„Continuous Strength Method“ (DMSSS, Anhang D):

Querschnittstragfähigkeit unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6):

Rechteckhohlprofile unter kombinierter Beanspruchung (DMSSS, ANHANG D.6.1):

$$M_{R,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd} \cdot \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5 \cdot a_w)} = 20,71 \cdot \frac{(1 - 0,41)}{(1 - 0,5 \cdot 0,47)} = 15,97 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed} = 25,0 \text{ kNm} \leq M_{R,csm,y,Rd} = 15,97 \text{ kNm} \leq M_{csm,y,Rd} = 20,71 \text{ kNm} \quad \text{für } \bar{\lambda}_p = 0,37 \leq 0,6$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{R,csm,y,Rd}} = \frac{25,0}{15,97} = 1,57 > 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 157,0 % (ohne Verfestigung ca. 306,0 %, mit erhöhter mittlerer Festigkeit ca. 179,0 %) Ausnutzung nicht erfüllt.

**Mit der „Continuous Strength Method“ werden nur Querschnittsnachweise geführt. Stabilitätsnachweise werden mit diesem Verfahren nicht abgedeckt.**