

# ***Bemessung von nichtrostenden Stählen***

## **Beispiel 1:**

### **Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer 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>

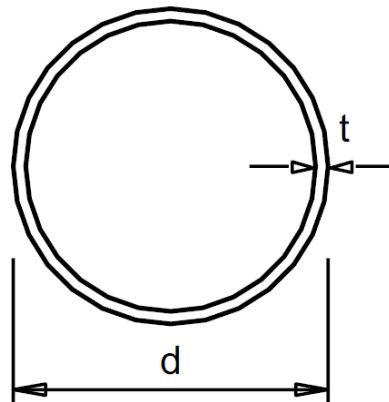
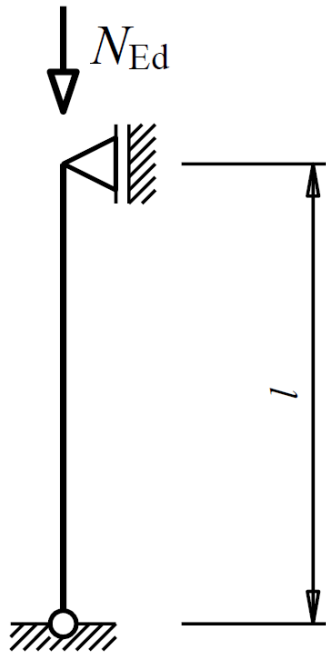
Mehrsprachige Ausgaben:

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

ISBN 978-1-85942-228-1

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

## System



## Gegeben:

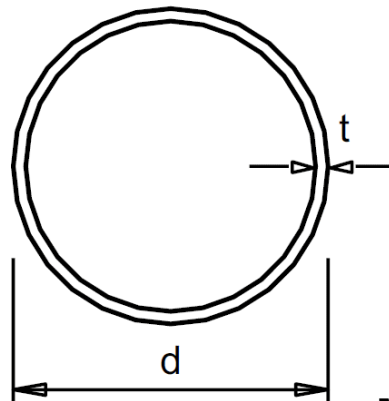
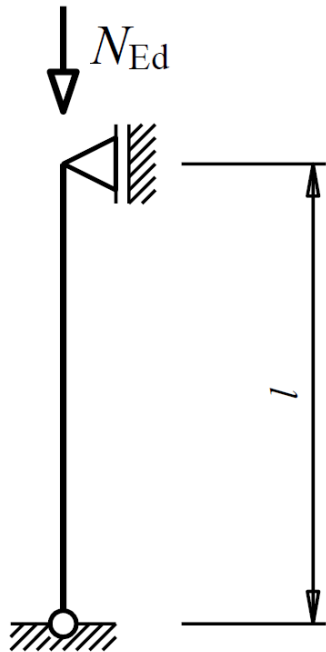
- Kaltgeformtes, kreisförmiges Hohlprofil KHP 159 x 4,
- an beiden Enden gelenkig gelagert,
- Stützweite  $l = 3,50$  m,
- Zentrische Normalkraft  $N_{Ed} = 250$  kN,
- Nichtrostender austenitischer Stahl 1.4307.

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

## Teilsicherheitsbeiwerte:

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

## Querschnitts- und Materialkennwerte



### Querschnittswerte:

- Querschnittsfläche:  $A = 19,5 \text{ cm}^2$
- Flächenträgheitsmoment:  $I = 585,3 \text{ cm}^4$
- Widerstandsmomente:  $W_{el} = 73,6 \text{ cm}^3$   
 $W_{pl} = 96,1 \text{ cm}^3$

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

### Materialkennwerte: Nichtrostender austenitischer Stahl 1.4307

- 0,2 %-Dehngrenze:  $f_y = 220 \text{ N/mm}^2$ ,
- Zugfestigkeit:  $f_u = 520 \text{ N/mm}^2$ ,
- Elastizitätsmodul:  $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$ ,
- Bruchdehnung:  $A = 45 \%$ .

## Aufgabenstellung

Führen Sie den Tragsicherheitsnachweis für das dargestellte kreisförmige Hohlprofil 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 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

## Querschnittsklassifizierung

Beiwert:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,01$$

Querschnittsklassifizierung (DMSSS, Tabelle 5.2):

Rohrhohlprofile:

$$\frac{d_e}{t} = \frac{159,0}{4,0} = 39,75 < 50 \cdot \varepsilon^2 = 50 \cdot 1,01^2 = 51,01$$

→ QKL 1

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

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Querschnitt unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 5.7.3):

$$N_{c,Rd} = A_g \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 19,5 \cdot 10^2 \cdot \frac{220 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 390,0 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{250,0}{390,0} = 0,64 \leq 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 64,0 % Ausnutzung erfüllt.

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

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.

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

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



# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

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 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200000 \cdot 585,3 \cdot 10^4}{(3,5 \cdot 10^3)^2} \cdot 10^{-3} = 943,13 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{19,5 \cdot 10^2 \cdot 220}{943,13 \cdot 10^3}} = 0,67$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,49 \cdot (0,67 - 0,2) + 0,67^2 \right) = 0,84$$

mit:

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

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,84 + \sqrt{0,84^2 - 0,67^2}} = 0,74 \leq 1,0$$

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

## a) Tragsicherheitsnachweis ohne Berücksichtigung einer Materialverfestigung

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,74 \cdot 19,5 \cdot 10^2 \cdot \frac{220 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 288,6 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{250,0}{288,6} = 0,87 \leq 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 87,0 % Ausnutzung erfüllt.

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

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

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

Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

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

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

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

$$\varepsilon_{CHS} = \frac{t}{2 \cdot (d - t)}; \quad \varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E}; \quad \varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \leq A \text{ (Bruchdehnung)}$$

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

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

Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

$$\varepsilon_{CHS} = \frac{t}{2 \cdot (d - t)} = \frac{4,0}{2 \cdot (159,0 - 4,0)} = 0,013$$

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E} = 0,002 + \frac{220,0}{200000,0} = 0,003$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} = 1 - \frac{220,0}{520,0} = 0,58 > 0,45 = A$$

$$\Rightarrow \varepsilon_u = 0,45$$

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

Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen (DMSSS, Anhang B):

$$n_p = \frac{\ln\left(\frac{f_y}{f_u}\right)}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{p0,2}}{\varepsilon_u}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{220,0}{520,0}\right)}{\ln\left(\frac{0,003}{0,45}\right)} = 0,17$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}} = \frac{220,0}{0,003^{0,17}} = 590,63$$

$$f_{ya} = f_{yCHS} = 0,85 \cdot K \cdot (\varepsilon_{CHS} + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} = 0,85 \cdot 590,63 \cdot (0,013 + 0,003)^{0,17} = 248,56 \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow f_{ya} = 248,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{mit: } f_y = 220,0 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yCHS} = 248,0 \text{ N/mm}^2 \leq f_u = 520,0 \text{ N/mm}^2$$

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

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

Querschnittsklassifizierung:

Beiwert:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{ya}} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{248,0} \cdot \frac{200000}{210000}} = 0,95$$

Querschnittsklassifizierung (DMSSS, Tabelle 5.2):

$$\frac{d_e}{t} = \frac{159,0}{4,0} = 39,75 < 50 \cdot \varepsilon^2 = 50 \cdot 0,95^2 = 45,13$$

→ QKL 1

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

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

Querschnitt unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 5.7.3):

$$N_{c,Rd} = A_g \cdot \frac{f_{ya}}{\gamma_{M0}} = 19,5 \cdot 10^2 \cdot \frac{248 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 439,64 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{250,0}{439,64} = 0,57 \leq 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 57,0 % (ohne Verfestigung 64,0 %) Ausnutzung erfüllt.



# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

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

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200000 \cdot 585,3 \cdot 10^4}{(3,5 \cdot 10^3)^2} \cdot 10^{-3} = 943,13 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{ya}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{19,5 \cdot 10^2 \cdot 248}{943,13 \cdot 10^3}} = 0,72$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,49 \cdot (0,72 - 0,2) + 0,72^2 \right) = 0,89$$

mit:

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

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,89 + \sqrt{0,89^2 - 0,72^2}} = 0,71 \leq 1,0$$

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

Bauteile unter Druckbeanspruchung (DMSSS, Kapitel 6.3):

Biegeknicken (DMSSS, Kapitel 6.3.3):

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_{ya}}{\gamma_{M1}} = 0,71 \cdot 19,5 \cdot 10^2 \cdot \frac{248 \cdot 10^{-3}}{1,1} = 312,14 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{250,0}{312,14} = 0,80 \leq 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 80,0 % (ohne Verfestigung 87,0 %) Ausnutzung erfüllt.

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

## 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 kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) mit bezogenen Schlankheiten größer als 0,30 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.

$$f_y = f_{ya} = 248,0 \text{ N/mm}^2$$

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer 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):

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{248,0}{6090,34}} = 0,2 \leq 0,3 \quad (\text{für kreisförmige Hohlprofile})$$

mit:

$$f_y = f_{ya} = 248,0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cr,c} = \frac{E \cdot 2 \cdot t}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot D} = \frac{200000 \cdot 2 \cdot 4,0}{\sqrt{3 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot 159,0} = 6090,34 \text{ N/mm}^2$$

mit:  $\nu = 0,3$  (Querdehnzahl)

# Beispiel 1: Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

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

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

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

Kreisförmiges Hohlprofil mit  $\bar{\lambda}_c = 0,2 \leq 0,3$ :

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = A \cdot \frac{f_{csm}}{\gamma_{M0}}; \quad f_{csm} = f_y + E_{sh} \cdot \varepsilon_y \cdot \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right)$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \cdot \varepsilon_u - \varepsilon_y}; \quad C_2 = 0,16 \text{ (für Austenit)}$$

$$\varepsilon_u = C_3 \cdot \left( 1 - \frac{f_y}{f_u} \right); \quad C_3 = 1,0 \text{ (für Austenit)}$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E}; \quad \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{4,44 \cdot 10^{-3}}{\bar{\lambda}_c^{4,5}} \leq \min \left\{ \frac{15}{C_1 \cdot \varepsilon_u} \right\}; \quad C_1 = 0,1 \text{ (für Austenit)}$$

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

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

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

Kreisförmiges Hohlprofil mit  $\bar{\lambda}_c = 0,2 \leq 0,3$ :

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = \frac{248,0}{200000,0} = 0,001$$

$$\varepsilon_u = C_3 \cdot \left(1 - \frac{f_y}{f_u}\right) = 1,0 \cdot \left(1 - \frac{248,0}{520,0}\right) = 0,52$$

mit:  $C_3 = 1,0$  (für Austenit)

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{4,44 \cdot 10^{-3}}{\bar{\lambda}_c^{-4,5}} = \frac{4,44 \cdot 10^{-3}}{0,2^{4,5}} = 6,21 \leq \min \left\{ \frac{C_1 \cdot \varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{15}{0,001} = 15 \right\} = 15$$

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

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

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

Kreisförmiges Hohlprofil mit  $\bar{\lambda}_c = 0,2 \leq 0,3$ :

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \cdot \varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{520,0 - 248,0}{0,16 \cdot 0,52 - 0,001} = 3309,0 \text{ N/mm}^2$$

mit:  $C_2 = 0,16$  (für Austenit)

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \cdot \varepsilon_y \cdot \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) = 248,0 + 3309,0 \cdot 0,001 \cdot (6,21 - 1) = 265,24 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = A \cdot \frac{f_{csm}}{\gamma_{M0}} = 19,5 \cdot 10^2 \cdot \frac{265,24}{1,1} \cdot 10^{-3} = 470,2 \text{ N/mm}^2$$

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

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

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

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{250,0}{470,2} = 0,53 \leq 1,0$$

Der Nachweis ist mit ca. 53,0 % (ohne Verfestigung 64,0 %, mit erhöhter mittlerer Festigkeit 57,0 %) Ausnutzung erfüllt.

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