



Nr.	Blatt	1 von 8	Index	A
Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber	Aufgestellt	ER/EM	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	HB	Datum	März 2006

**BEMESSUNGSBEISPIEL 12 – GEKANTETES U-PROFIL AUS KALT VERFESTIGTEM EDELSTAHL IN EINEM OFFENEN GESCHOSS UNTER BIEGUNG.**

Zu bemessen ist ein einfach gelagerter Balken als gekantetes U-Profil in einem offenen Geschoss. Er besteht aus Edelstahl der Sorte 1.4401 CP500, d.h. kaltverfestigtes Material einer Streckgrenze von 500 N/mm<sup>2</sup>. Der Balken ist einfach gelagert über eine Spannweite mit  $l = 4$  m. Der Abstand zwischen benachbarten Trägern beträgt 1 m.

Da die Last nicht im Schubmittelpunkt des Querschnitts angreift, ist es erforderlich, die Interaktion von Torsionswiderstand des Querschnitts und den Biegedrillknickwiderstand des Bauteils zu untersuchen. In diesem Beispiel wird jedoch nur der Biegedrillknickwiderstand des Bauteils untersucht.

**Sicherheitsfaktoren**

Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M0} = 1,1$  und  $\gamma_{M1} = 1,1$

Lastfaktor  $\gamma_G = 1,35$  (ständige Lasten) und  $\gamma_Q = 1,5$  (veränderliche Lasten)

Tabelle 2.1  
Abschnitt 2.3.2

**Einwirkungen**

Ständige Lasten ( $G$ ): 2 kN/m<sup>2</sup>

Veränderliche Lasten ( $Q$ ): 3 kN/m<sup>2</sup>

Maßgebende Lastfallkombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit:

$$q^* = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 7,2 \text{ kN/m}$$

Gleich. 2.3

**Bemessung**

Auflagerreaktionen (Bemessungsquerkraft)

$$V_{Ed} = \frac{q^* \times 4}{2} = 14,4 \text{ kN}$$

Bemessungsbiegemoment

$$M_{Ed} = \frac{q^* \times 4^2}{8} = 14,4 \text{ kNm}$$

**Materialeigenschaften**

Streckgrenze

$$f_y = 500 \text{ N/mm}^2$$

Elastizitätsmodul

$$E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

Gleitmodul

$$G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

Tabelle 3.5  
Abschnitt 3.2.4  
Abschnitt 3.2.4

**Querschnitseigenschaften**

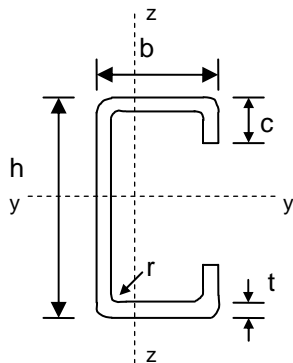
Der Einfluss der abgerundeten Ecken kann bei der Ermittlung der Querschnittswiderstände vernachlässigt werden, wenn der innere Radius  $r \leq 5t$  und

Abschnitt 4.6.2



Nr.	Blatt	2 von 8	Index	A
Titel				
RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt				
Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber		Aufgestellt	ER/EM	Datum
RFCS		Geprüft	HB	Feb. 2006
				Datum
				März 2006

$r \leq 0,10b_p$  beträgt. Für diesen Fall kann der Querschnitt aus ebenen Elementen mit scharfen Ecken angenommen werden. Für die Steifigkeitseigenschaften des Querschnitts muss der Einfluss der gerundeten Ecken jedoch immer berücksichtigt werden.



$$\begin{aligned} h &= 160 \text{ mm} \\ b &= 125 \text{ mm} \\ c &= 30 \text{ mm} \\ t &= 5 \text{ mm} \\ r &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m [\tan(\phi/2) - \sin(\phi/2)] = 2,2 \text{ mm}$$

$$r_m = r + t/2 = 7,5 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 5t = 25 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 0,10b_p = 11,56 \text{ mm}$$

Der Einfluss der gerundeten Ecken auf die Querschnittseigenschaften kann hinreichend genau berücksichtigt werden, indem man die Querschnittseigenschaften eines gleichen Querschnittes mit scharfen Ecken durch die folgende Näherungsformeln reduziert:

$$\text{Angenommene Breite des Flansches, } b_{p,f} = b - t - 2g_r = 115,61 \text{ mm}$$

$$\text{Angenommene Breite des Steges, } b_{p,w} = h - t - 2g_r = 150,61 \text{ mm}$$

$$\text{Angenommene Breite der Lippe, } b_{p,l} = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$$

$$A_{g,sh} = 2162 \text{ mm}^2$$

$$I_{y,sh} = 9,069 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 2119 \text{ mm}^2$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) = 8,708 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

### Querschnittsklassifizierung

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = 0,669$$

**Flansch:** Innenliegende gedrückte Querschnittsteile, die unter Druck stehen.

$$c = b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

Bild 4.5

Gleich. 4.21

Gleich. 4.18

Gleich. 4.19

Abschnitt 4.3

Tabelle 4.2



Nr.	Blatt	3 von 8	Index	A
Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber	Aufgestellt	ER/EM	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	HB	Datum	März 2006

$c/t=23,12 > 30,7 \epsilon$ , somit sind die Flansche Klasse 4

**Steg:** Innenliegende gedrückte Querschnittsteile, die auf Biegung beansprucht werden.

$$c=h-t-2g_r=150,6 \text{ mm}$$

$c/t=30,12 \leq 56 \epsilon$ , somit ist der Steg Klasse 1

**Lippe:** Auskragende Flanschteile, die unter Druck stehen, Spitze unter Druck

$$c = c - t/2 - g_r = 25,30 \text{ mm}$$

$c/t=5,06 \leq 10 \epsilon$ , somit ist die Lippe Klasse 1

### Berechnung der wirksamen Querschnittseigenschaften

**Wirksame Flanschbreite:** Innere gedrückte Querschnittsteile, die unter Druck stehen.

$$\bar{b} = b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

Es wird eine gleichmäßige Spannungsverteilung im gedrückten Flansch unterstellt:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \text{ und der Knickbeiwert } k_\sigma = 4$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,608$$

$$\text{Kaltverformte innenliegende Teilflächen: } \rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,9311 < 1$$

$$b_{\text{eff}} = \rho \bar{b} = 107,64 \text{ mm}, \quad b_{e1} = 0,5b_{\text{eff}} = 53,82 \text{ mm}, \quad b_{e2} = 0,5b_{\text{eff}} = 53,82 \text{ mm}$$

### Mitragende Breiten

Eine Reduzierung der mitragende Breite in Flanschen kann vernachlässigt werden, wenn  $b_0 < L_e/50$ , wobei  $b_0$  als auskragende Flanschbreite bzw. als halbe Breite eines innenliegenden Querschnittsteils anzusetzen ist und  $L_e$  der Abstand zwischen den Momentennullpunkten darstellt.

Für innenliegende Elemente:  $b_0 = (b-t)/2 = 60 \text{ mm}$

Die Abstand zwischen den Momentennullpunkten:  $L_e = 4000 \text{ mm}$ ,  $L_e/50 = 80 \text{ mm}$

Somit kann die Reduzierung der mittragenden Breite vernachlässigt werden.

### Flanscheindrehungen

$$u = 2 \frac{\sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z} = 2,55 \text{ mm}$$

$b_s = 141 \text{ mm}$  ist der Abstand zwischen den Flanschen

$t = 5 \text{ mm}$

$z = 77,5 \text{ mm}$  ist der Abstand des Flansches bezogen auf die neutrale Faser.

Abschnitt  
4.4.1

Tabelle 4.3

Gleich. 4.2

Abschnitt  
4.4.2

Abschn. 4.4.3  
prEN 1993-1-3, Satz 5.4



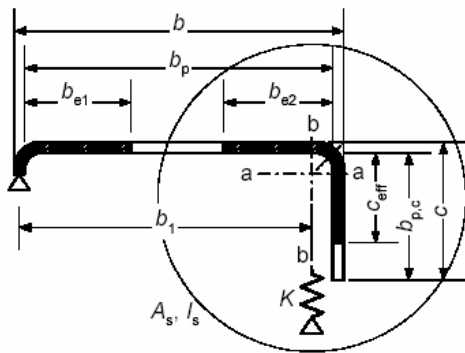
Nr.	Blatt	4 von 8	Index	A
Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber	Aufgestellt	ER/EM	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	HB	Datum	März 2006

$\sigma_a$  ist die mittlere Spannung in den Flanschen unter Annahme des Bruttoquerschnitts ( $f_y=500 \text{ N/mm}^2$  wird angenommen)

Flanscheindrehungen können vernachlässigt werden, wenn sie kleiner als 5% der Profiltiefe des Querschnitts sind:

$u=2,55 \text{ mm} < 0,05h=8 \text{ mm}$ , somit können Flanscheindrehungen vernachlässigt werden.

**Ausgesteifte Teilflächen. Randaussteifung  
Drillknicken. Ebene Teilflächen mit Randaussteifung**



$b/t \leq 60$   
a) single edge fold

**Schritt 1: Anfänglicher wirksamer Querschnitt der Steife**

Für Flansche (wie zuvor berechnet)

- $b=125 \text{ mm}$
- $b_p=115,61 \text{ mm}$
- $b_{eff}=107,65 \text{ mm}$
- $b_{e1}=0,5b_{eff}=53,82 \text{ mm}$
- $b_{e2}=0,5b_{eff}=53,82 \text{ mm}$

Für die Lippe sollte die wirksame Breite mit  $c_{eff}$  berechnet werden, indem folgende Ausdrücke für den entsprechenden Knickbeiwert  $k_\sigma$ ,  $\bar{\lambda}_p$  und  $\rho$  verwendet werden:

$b_{p,c} = c-t/2-g_r=25,30 \text{ mm}$

$b_p = 115,6 \text{ mm}$

$b_{p,c}/b_p = 0,22 < 0,35$  dann gilt  $k_\sigma=0,5$

$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,45$  ( $\bar{b} = 30 \text{ mm}$ )

Kaltverformte auskragende Teilflächen:  $\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} = 1,08 > 1$  dann gilt  $\rho=1$

$c_{eff}=\rho b_{p,c}=25,30 \text{ mm}$

**Schritt 2: Reduktionsfaktor für Drillknicken**

Berechnung der Geometrieigenschaften des wirksamen Querschnitts der Randaussteifung

Abschnitt 4.5.1 and prEN 1993-1-3, Satz 5.5.3

prEN 1993-1-3, Satz 5.5.3.2

prEN 1993-1-3, Glch. 5.13b

Glch. 4.2

Glch. 4.1b

prEN 1993-1-3, Glch. 5.13a

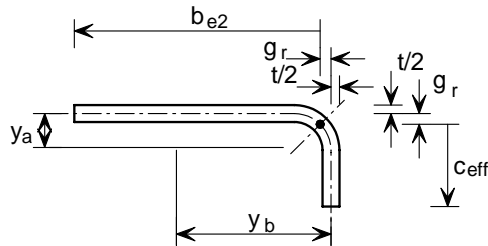


Nr.	Blatt	5 von 8	Index	A
Titel				
RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt				
Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber	Aufgestellt	ER/EM	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	HB	Datum	März 2006

$$b_{e2} = 53,82 \text{ mm}$$

$$c_{\text{eff}} = 25,30 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{e2} + c_{\text{eff}})t = 395,64 \text{ mm}^2$$



$$y_a = 4,01 \text{ mm}$$

$$y_b = 18,27 \text{ mm}$$

$$I_s = 21211,8 \text{ mm}^4$$

Berechnung der linearen Federsteifigkeit

$$K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_w k_f} = 2,487 \text{ N/mm}^2$$

$b_1 = b - y_b - t/2 = 104,23 \text{ mm}$  (der Abstand zwischen dem Anschluss Steg-Flansch zum Schwerpunkt der wirksamen Fläche der Randaussteifung, unter Berücksichtigung des wirksamen Teils des Flansches  $b_{e2}$ )

$k_f = 0$  (Flansch 2 steht unter Druck)

$h_w = 150 \text{ mm}$  ist die Stegtiefe

Elastische kritische Beulspannung für den wirksamen Querschnitt der Randaussteifung

$$\sigma_{\text{cr,s}} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = 519,195 \text{ N/mm}^2$$

Reduktionsfaktor  $\chi_d$  für Drillknicken

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{\text{cr,s}}} = 0,98$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \text{dann gilt} \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,76$$

Reduzierte Fläche und Dicke des wirksamen Querschnitts der Aussteifung

$$A_{s,\text{red}} = \chi_d A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{\text{com,Ed}}} = 300,88 \text{ mm}^2$$

$$t_{\text{red}} = t A_{s,\text{red}} / A_s = 3,8 \text{ mm}$$

Berechnung der wirksamen Querschnittseigenschaften mit Drillknickeinfluss

$$A_{\text{eff,sh}} = 2028 \text{ mm}^2$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

prEN 1993-1-3, Fig. 5.9

prEN 1993-1-3, Glch. 5.10b

prEN 1993-1-3, Glch. 5.15

prEN 1993-1-3, Glch. 5.12d

prEN 1993-1-3, Glch. 5.17

Glch. 4.21



Nr.	Blatt	6 von 8	Index	A
Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber	Aufgestellt	ER/EM	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	HB	Datum	März 2006

$$A_{eff} = A_{eff,sh} (1 - \delta) = 1987 \text{ mm}^2$$

Gleich. 4.18

$z_G = 68,98 \text{ mm}$  (Abstand von der unteren Faser zur neutralen Faser)

$$I_{y,eff,sh} = 8,274 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,eff} = I_{y,eff,sh} (1 - 2\delta) = 7,943 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Gleich. 4.19

$$W_{y,eff,sup} = 92,34 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff,inf} = 115,2 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

### Querschnittstragfähigkeit

Abschnitt 4.7

#### Querschnitt unter Biegung

Abschnitt 4.7.4

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} f_y / \gamma_{M0} = 41,97 \text{ kNm}$$
 für Querschnitt der Klasse 4

Gleich. 4.29

Bemessungsmoment  $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}$

Querschnittstragfähigkeit unter Biegung nachgewiesen

#### Querschnitt unter Schub

Abschnitt 4.7.5

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 209,95 \text{ kN}$$

Gleich. 4.30

$A_v = 800 \text{ mm}^2$  ist die Schubfläche

Bemessungsquerkraft  $V_{Ed} = 14,4 \text{ kN}$

Querschnittstragfähigkeit unter Schub nachgewiesen

#### Querschnitt unter kombinierter Belastung

Abschnitt 4.7.6

$$V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} > 0,5 V_{pl,Rd} = 104,97 \text{ kN}$$

Es ist keine Interaktion zwischen Biegung und Schub zu berücksichtigen.

### Biegebeanspruchte Bauteile

Abschnitt 5.4

#### Biegedrillknicken

Abschnitt 5.4.2

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,eff,sup} f_y / \gamma_{M1}$$
 für Querschnitt der Klasse 4

Gleich. 5.8

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$$

Gleich. 5.9

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right)$$

Gleich. 5.10

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_y}{M_{cr}}}$$

Gleich. 5.11



Nr.	Blatt	7 von 8	Index	A
Titel				
RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt				
Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber		Aufgestellt	ER/EM	Datum
RFCS		Geprüft	HB	Feb. 2006
				März 2006

$\alpha_{LT}=0,34$  für kaltverformte Querschnitte

Bestimmung des elastischen kritischen Biegedrillknickmomentes

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left( \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right)$$

Für einfach gehaltene Träger mit gleichmäßig verteilter Belastung:  
 $C_1=1,12$ ,  $C_2=0,45$  and  $C_3=0,525$ .

Unter Annahmen normaler Einspannbedingung an jedem Ende:  $k_z=k_w=1$

$z_j=0$  für gleiche angeflanschte Querschnitte

$z_g = z_a - z_s = h/2 = 80$  mm

$z_a$  ist die Koordinate des Lastangriffspunktes der Einzellast

$z_s$  ist die Koordinate des Schubmittelpunktes

$y_G = 45,34$  mm (Abstand von der Mittelachse des Steges zum Schwerpunkt)

$I_{z,sh} = 4,274 \times 10^6$  mm<sup>4</sup>

$I_{t,sh} = 18,02 \times 10^3$  mm<sup>4</sup>

$I_{w,sh} = 23,19 \times 10^9$  mm<sup>6</sup>

$I_z = I_{z,sh} (1 - 2\delta) = 4,103 \times 10^6$  mm<sup>4</sup>

$I_t = I_{t,sh} (1 - 2\delta) = 17,30 \times 10^3$  mm<sup>4</sup>

$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) = 21,33 \times 10^9$  mm<sup>6</sup>

Anmerkung: Der Ausdruck zur Bestimmung von Wölbkrafttorsion wurde ermittelt von Wei-Wen You, "Cold-Formed Steel Design", Anhang B-Torsion

$$\text{Somit, } M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left( \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g) \right) = 33,74 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff,sup} f_y}{M_{cr}}} = 1,17 \quad (W_{y,eff,sup} = 92,39 \times 10^3 \text{ mm}^3, \text{ Flansch unter Druck})$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 1,315$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \left[ \varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]^{0,5}} = 0,522$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{y,eff,sup} f_y / \gamma_{M1} = 21,91 \text{ kNm}$$

Bemessungsmoment  $M_{Ed} = 14,4$  kNm, somit ist der Biegedrillknickwiderstand nachgewiesen

Anmerkung: Da die Belastung nicht im Schubmittelpunkt des U-Profils angreift muss die Interaktion zwischen Torsionstragfähigkeit des Querschnitts und Biegedrillknicktragfähigkeit des Bauteils nachgewiesen werden.

Anhang B,  
Abschnitt B.1

Abschnitt



Nr.	Blatt	8 von 8	Index	A
Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt Bemessungsbeispiel 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Edelstahl unter Biegung				
Auftraggeber RFCS	Aufgestellt	ER/EM	Datum	Feb. 2006
	Geprüft	HB	Datum	März 2006

**Schubbeultragfähigkeit**

Die Schubbeultragfähigkeit ist nur zu untersuchen, falls  $h_w / t \geq 52\varepsilon/\eta$  für einen unausgesteiften Steg.

Der empfohlene Wert ist  $\eta = 1,20$

$h_w / t = 28, 52\varepsilon/\eta = 28,99$ , somit ist keine weitere Untersuchung erforderlich.

5.4.3