

Nr.	Blatt	1 von 7	Index	A
Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4				
Auftraggeber RFCS	Aufgestellt	JG/AO	Datum	Feb. 2006
	Geprüft	GZ	Datum	März 2006

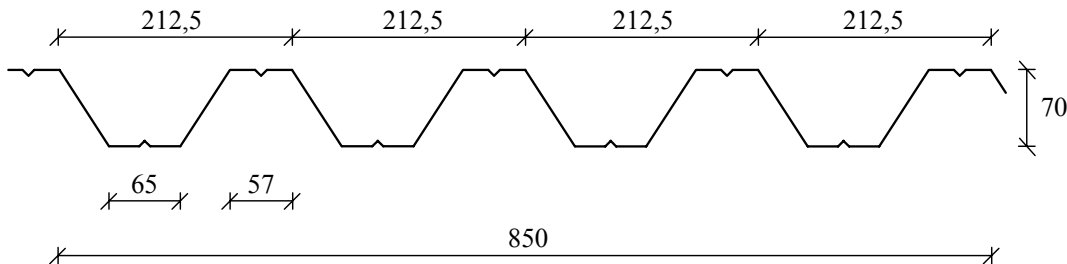
## BEMESSUNGSBEISPIEL 11 – STAHLTRAPEZPROFIL FÜR DÄCHER DER QUERSCHNITTSKLASSE 4, VERGLEICH DER BEMESSUNG KALTVERFESTIGTEN MATERIALS MIT WARMVERFORMTEM MATERIAL

In diesem Beispiel wird die Bemessung eines Stahltrapezprofils für Dächer behandelt. Es besteht aus Edelstahl rostfrei der Sorte 1.4401 CP 500, d.h. kaltverfestigtes Material mit der Streckgrenze  $500 \text{ N/mm}^2$ . Es wird ein Vergleich hergestellt zu einem gleichen Profil der Sorte 1.4401 im warmgeformten Zustand, d.h.  $f_y = 240 \text{ N/mm}^2$  (s. auch Bemessungsbeispiel 3). Die Materialdicke beträgt  $0,6 \text{ mm}$ .

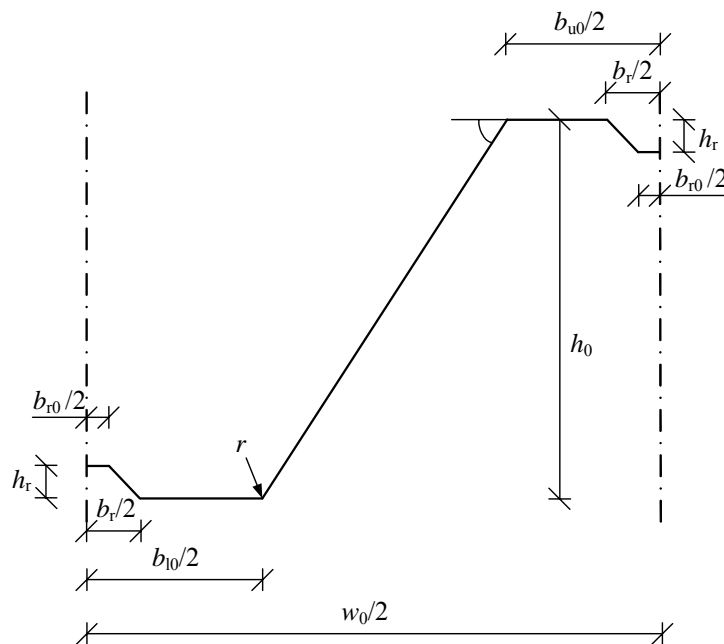
Im Falle, dass die Nennstreckgrenze nicht in alle Richtungen des Bleches durch den Hersteller garantiert wird, sollte diese auf 80% ihres Wertes reduziert werden. Um das Vorgehen zu veranschaulichen, wird in diesem Beispiel davon ausgegangen, dass die Streckgrenze nicht in alle Richtungen garantiert wurde.

Abschnitt  
3.2.4

Die Abmessungen des Querschnittes sind wie folgt:



Eine Detailskizze des Trapezprofils ist dem nachstehenden Bild zu entnehmen. Der untere Flansch steht über dem mittleren Auflager unter Druck, dieser Fall wird im vorliegenden Beispiel untersucht.



Achsmaße:

- $h_0 = 70 \text{ mm}$
- $w_0 = 212,5 \text{ mm}$
- $b_{u0} = 57 \text{ mm}$
- $b_r = 20 \text{ mm}$
- $h_r = 6 \text{ mm}$
- $b_{r0} = 8 \text{ mm}$
- $b_{l0} = 65 \text{ mm}$

Radius,  $r = 3 \text{ mm}$

Winkel,  $\varphi = 57,1^\circ$

<h1>SBI</h1> <p>Stålbyggnadsinstitutet The Swedish Institute of Steel Construction</p> <p><b>Statikpapper</b></p>	Nr.	Blatt	2 von 7	Index	A
	Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
	Inhalt Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4				
	Auftraggeber	Aufgestellt	JG/AO	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	GZ	Datum	März 2006	

### Bemessungsdaten

Spannweite	$L = 3,5 \text{ m}$	
Belastung	$q = 1,4 \text{ kN/m}^2$	
Eigengewicht	$g = 0,07 \text{ kN/m}^2$	
Blechdicke	$t = 0,6 \text{ mm}$	
Auflagerbreite	$s_s = 100 \text{ mm}$	
Streckgrenze	$f_y = 0,8 \times 500 = 400 \text{ N/mm}^2$	Tabelle 3.5
Elastizitätsmodul	$E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$	

Teilsicherheitsbeiwert	$\gamma_{M0} = 1,1$	Tabelle 2.1
Teilsicherheitsbeiwert	$\gamma_{M1} = 1,1$	Tabelle 2.1
Lastfaktor	$\gamma_G = 1,35$ (ständige Lasten)	Abschnitt 2.3.2
Lastfaktor	$\gamma_Q = 1,5$ (veränderliche Lasten)	Abschnitt 2.3.2

### Wirksame Querschnittswerte

Maximales Breite/Dicke-Verhältnis		Tabelle 4.1
$\max(b_{10}/t, b_{u0}/t) = b_{10}/t = 108 < 400$		
$h_0/t = 117 < 400$		

### Lage der Schwerachse für den Fall, dass der Steg vollständig wirkt

Wirksame Breite des gedrückten Flansches		Abschnitt 4.4.1
--	--	-----------------

$b_p = \frac{b_{10} - b_r}{2} = 22,5 \text{ mm}$	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = 0,75$	Tabelle 4.2
--	--	-------------

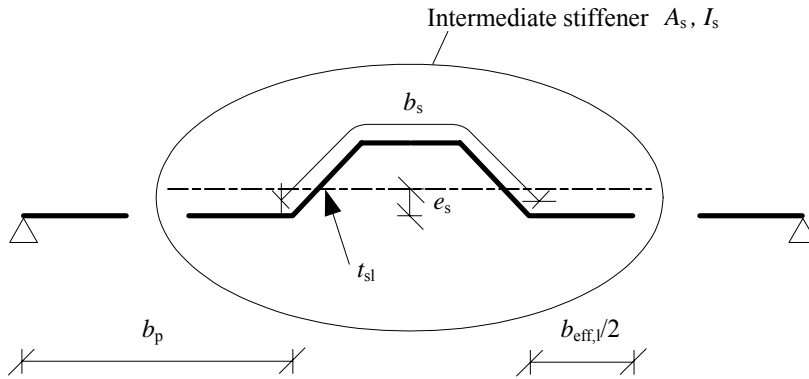
$k_\sigma = 4$	$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,883$	Tabelle 4.3 Gleich. 4.2
----------------	--	----------------------------

$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,714 \rightarrow b_{\text{eff},1} = \rho b_p = 16,1 \text{ mm}$	Gleich. 4.1a Tabelle 4.3
--	-----------------------------

Reduzierte Dicke der Steife des Flansches:	Abschnitt 4.5.3
--	-----------------

Der untere unter Druck stehende Flansch ist im Detail unten dargestellt.

Nr.	Blatt	3 von 7	Index	A
Titel				
RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
Inhalt				
Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4				
Auftraggeber		Aufgestellt	JG/AO	Datum
RFCS		Geprüft	GZ	Feb. 2006
				Datum
				März 2006



Wirksame Dicke des geneigten Bereiches der Steife

$$t_{rl} = \frac{\left( \sqrt{\left( \frac{b_r - b_{r0}}{2} \right)^2 + h_r^2} \right) t}{h_r} = 0,85 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{\text{eff},l} + b_{r0})t + 2h_r t_{rl} = 24,62 \text{ mm}^2$$

$$e_s = \frac{b_{r0} h_r t + 2h_r \frac{h_r}{2} t_{rl}}{A_s} = 2,41 \text{ mm}$$

Bild 4.3

Das Flächenträgheitsmoment der Steifen wird berechnet mit zwei Blechprofilen der Breite  $15t$  neben der Steife (kleinere Terme werden vernachlässigt)

$$I_s = 2 \times 15t^2 e_s^2 + b_{r0} t (h_r - e_s)^2 + 2h_r t_{rl} \left( \frac{h_r}{2} - e_s \right)^2 + 2 \frac{t_{rl} h_r^3}{12} = 159,1 \text{ mm}^4$$

$$b_s = 2 \sqrt{h_r^2 + \left( \frac{b_r - b_{r0}}{2} \right)^2} + b_{r0} = 24,97 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2b_p + 3b_s)}{t^3}} = 251,0 \text{ mm}$$

Gleich. 4.9

$$s_w = \sqrt{\left( \frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2} \right)^2 + h_0^2} = 83,4 \text{ mm}$$

$$b_d = 2b_p + b_s = 70,0 \text{ mm}$$

Gleich. 4.11

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = 1,37$$

Gleich. 4.10

$$l_b / s_w = 3,01 > 2 \rightarrow k_w = k_{w0} = 1,37$$

Gleich. 4.7

$$\sigma_{\text{cr},s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2 (2b_p + 3b_s)}} = 557,5 \text{ N/mm}^2$$

Gleich. 4.3

<h1>SBI</h1> <p>Stålbyggnadsinstitutet The Swedish Institute of Steel Construction</p> <p><b>Statikpapier</b></p>	Nr.	Blatt	4 von 7	Index	A
	Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
	Inhalt Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4				
	Auftraggeber	Aufgestellt	JG/AO	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	GZ	Datum	März 2006	

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = 0,85 \rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,86$$

$$t_{red} = \chi_d t = 0,51 \text{ mm}$$

Optional kann iteriert werden, um den Reduktionsfaktor für das Beulen der Steife zu verfeinern.

Gleich. 4.16

prEN 1993-1-3, Satz 5.5.3.3 (3)

Abstand des unter Druck stehenden Flansches zur neutralen Faser (vollständig wirksamer Steg)

$$A_{tot} = \sum A_i = 84,0 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 36,3 \text{ mm}$$

### Wirksame Querschnittswerte des Steges

$$\psi = -\frac{h_0 - e_c}{e_c} = -0,929$$

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2 = 22,1$$

Abschnitt 4.4.1

Tabelle 4.3

$$b_{p,w} = s_w = 83,4 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_{p,w} / t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 1,391$$

Gleich. 4.2

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,490 \rightarrow b_{eff,w} = \rho \frac{b_{p,w}}{1 - \psi} = 21,2 \text{ mm}$$

Gleich. 4.1a, Tabelle 4.3

$$s_{eff,1} = 0,4b_{eff,w} = 8,47 \text{ mm}$$

$$s_{eff,2} = 0,6b_{eff,w} = 12,7 \text{ mm}$$

Tabelle 4.3

### Wirksame Querschnittseigenschaften für die halbe Riffelung

$$A_{eff,tot} = \sum A_{eff,i} = 70,8 \text{ mm}^2$$

$$e_{eff,c} = \frac{\sum A_{eff,i} e_{eff,i}}{A_{eff,tot}} = 40,0 \text{ mm}$$

$$I_{tot} = \sum I_{eff,i} + \sum A_{eff,i} (e_c - e_{eff,i})^2 = 51710 \text{ mm}^4$$

<h1>SBI</h1> <p>Stålbyggnadsinstitutet The Swedish Institute of Steel Construction</p> <p><b>Statikpapper</b></p>	Nr.	Blatt	5 von 7	Index	A
	Titel				
	RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
	Inhalt				
Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4					
Auftraggeber		Aufgestellt	JG/AO	Datum	Feb. 2006
RFCS		Geprüft	GZ	Datum	März 2006

### Momententragfähigkeit pro Einheitsbreite (1 m)

$$I = I_{\text{tot}} \frac{1000 \text{ mm}}{0,5w_0} = 486685 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff,l}} = \frac{I}{e_c} = 12165 \text{ mm}^3$$

$$W_{\text{eff,u}} = \frac{I}{h_0 - e_c} = 16227 \text{ mm}^3$$

$$W_{\text{eff,l}} < W_{\text{eff,u}} \rightarrow W_{\text{eff,min}} = W_{\text{eff,l}}$$

$$M_{\text{c,Rd}} = W_{\text{eff,min}} f_y / \gamma_{M0} = 4,42 \text{ kNm}$$

Abschnitt  
4.7.4

Gleich. 4.29

### Widerstand gegenüber lokaler Querkräfte am mittleren Auflager

Widerstand gegenüber lokaler Querkräfte pro Einheitsbreite (1 m)

$$\alpha = 0,15 \text{ (für dünnwandige Profile) und } l_a = s_s$$

$$R_{\text{w,Rd}} = \alpha t^2 \sqrt{f_y E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t}\right) \left[0,5 + \sqrt{0,02l_a/t}\right] \left(2,4 + (\varphi/90)^2\right) \frac{1000 \text{ mm}}{0,5w_0} / \gamma_{M1}$$

$$R_{\text{w,Rd}} = 20,9 \text{ kN}$$

prEN 1993-1-3, Gleich. 6.20c, 6.19b und 6.18

### Interaktion von Biegung und Querkraft

Das maximale Biegemoment tritt am mittleren Lager auf, wo es mit den Beanspruchungen aus der Lagerreaktion zu überlagern ist. Deshalb muss der folgende Nachweis geführt werden.

$$\frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{c,Rd}}} \leq 1 \quad \frac{F_{\text{Ed}}}{R_{\text{w,Rd}}} \leq 1 \quad \frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{c,Rd}}} + \frac{F_{\text{Ed}}}{R_{\text{w,Rd}}} \leq 1,25$$

Bemessungslast pro Einheitsbreite (1 m)

$$q_d = \gamma_G g + \gamma_Q q = 2,20 \text{ kN/m}$$

Die Bemessungslast  $q_d$  verursacht das folgende Biegemoment und die folgende Lagerreaktion am mittleren Auflager.

$$M_{\text{Ed}} = \frac{qL^2}{8} = 3,37 \text{ kNm}$$

$$F_{\text{Ed}} = \frac{5}{4} qL = 9,63 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{c,Rd}}} = 0,76$$

$$\frac{F_{\text{Ed}}}{R_{\text{w,Rd}}} = 0,46$$

$$\frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{c,Rd}}} + \frac{F_{\text{Ed}}}{R_{\text{w,Rd}}} = 1,22$$

**OK**

prEN 1993-1-3, Gleichn. 6.28a-c

Abschnitt  
2.3.2

Gleich. 2.3

<h1>SBI</h1> <p>Stålbyggnadsinstitutet The Swedish Institute of Steel Construction</p> <p><b>Statikpapier</b></p>	Nr.	Blatt	6 von 7	Index	A
	Titel				
	RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
	Inhalt				
Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4					
Auftraggeber		Aufgestellt	JG/AO	Datum	Feb. 2006
RFCS		Geprüft	GZ	Datum	März 2006

### Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sollte die wirksame Breite der gedrückten Bauteile auf der Druckspannung des Bauteils basieren, die unter Gebrauchslasten herrscht. Die maximale Druckspannung wird wie folgt berechnet. Es wird eine konservative Näherung vorgenommen, die auf  $W_{\text{eff,min}}$  im Grenzzustand der Tragfähigkeit basiert.

$$M_{\text{Ed,ser}} = \frac{(q + g)L^2}{8} = 2,25 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{\text{com,Ed,ser}} = \frac{M_{\text{Ed,ser}}}{W_{\text{eff,min}}} = 186 \text{ N/mm}^2$$

Nun werden die wirksamen Querschnittswerte wie zuvor bestimmt, aber indem  $f_y$  durch  $\sigma_{\text{com,Ed,ser}}$  ersetzt wird. Die Berechnung wird hier nicht gezeigt, die ermittelten Ergebnisse sind:

$$\begin{aligned} I &= 573\,150 \text{ mm}^4 \\ W_u &= 15\,866 \text{ mm}^3 \\ W_1 &= 16\,919 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

### Bestimmung der Verformung:

Das Sekantenmodul entsprechend der Spannung jeweils in der Druck- bzw. Zugzone der Flansche

$$\sigma_{1,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{\text{Ed,ser}}}{W_u} = 142 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{\text{Ed,ser}}}{W_1} = 133 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{s,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{f_y} \left( \frac{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^{n-1}} = 199\,604 \text{ N/mm}^2 \quad n = 7,0$$

$$E_{s,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{f_y} \left( \frac{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^{n-1}} = 199\,730 \text{ N/mm}^2$$

$$E_s = \frac{E_{s,1} + E_{s,2}}{2} = 199\,667 \text{ N/mm}^2$$

Als Vereinfachung kann die Veränderlichkeit von  $E_s$  entlang der Querschnittsachse vernachlässigt werden und der Minimalwert von  $E_s$  des Bauteiles kann auf der sicheren Seite liegend über die volle Querschnittslänge angesetzt werden, d.h.

$$E_s = E_{s,1} = 199\,603 \text{ N/mm}^2$$

Die zulässige Verformung beträgt  $L/300 = 11,7 \text{ mm}$

prEN 1993-1-3, Satz 5.5.1(4)

Abschnitt 2.3.4

Anhang C

Anhang C  
Tabelle C.1

Anhang C

<h1>SBI</h1> <p>Stålbyggnadsinstitutet The Swedish Institute of Steel Construction</p> <p><b>Statikpapper</b></p>	Nr.	Blatt	7 von 7	Index	A
	Titel RFCS Stainless Steel Valorisation Project				
	Inhalt Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4				
	Auftraggeber	Aufgestellt	JG/AO	Datum	Feb. 2006
RFCS	Geprüft	GZ	Datum	März 2006	

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} L = 1,47 \text{ m} \quad (\text{Lage der maximalen Durchbiegung})$$

$$\delta = \frac{(g + q) L^4}{48 E_{s,1} I} \left( \frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right) = 10,4 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

### Vergleich zum Trapezprofil der Sorte 1.4401 im warmgeformten Zustand

Die Biegetragfähigkeit pro Einheitsbreite eines identischen Bleches der Sorte 1.4401 in warmgeformten Zustand ( $f_y = 240 \text{ N/mm}^2$ ) ist:

$$M_{c,Rd} = 3,22 \text{ kNm}$$

und die Querkrafttragfähigkeit ist:

$$R_{w,Rd} = 16,2 \text{ kN}$$

Mit einem Trapezprofil aus warmgeformtem Edelstahl der Sorte 1.4401 muss die Spannweite auf 2,90 m reduziert werden verglichen mit 3,5 m für kaltverformtes Material. Daher erlaubt der Einsatz von kaltverformten Blechen höhere Spannweiten, d.h. dass die Anzahl von Trägern und Pfetten reduziert werden könnte, was wiederum zu einer Kostenreduzierung führen kann.

