

## 1.1. Dane

### Dane materiałowe

Stal: S350GD

$$f_{yb} = 355 \text{ MPa} \quad f_u = 420 \text{ MPa}$$

Współczynniki obliczeniowe:  $\gamma_{M0} = 1,0 \quad \gamma_{M1} = 1,0$

Wytrzymałość obliczeniowa:  $f_{db} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{350}{1,0} = 350 \text{ MPa}$

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

Moduł Younga:  $E = 210 \text{ GPa}$

Współczynnik Poissona:  $\nu = 0,3$

Moduł sprężystości poprzecznej:  $G_s = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{210}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 80,77 \text{ GPa}$

### Dane geometryczne

Wysokość przekroju:  $h = 350 \text{ mm}$

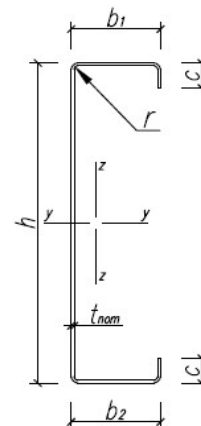
Grubość ścianki:  $t = 2,0 \text{ mm}$

Szerokość półki ściskanej:  $b_1 = 85 \text{ mm}$

Szerokość półki rozciąganej:  $b_2 = 85 \text{ mm}$

Szerokość fałdy:  $c = 30 \text{ mm}$

Promień gięcia:  $r = 2,63 \text{ mm}$



Kąt nachylenia środka do półek  $\nu = 90^\circ$

Rys. 2.1 Przekrój poprzeczny kształtownika

### Sprawdzenie proporcji geometrycznych wg Tab. 5.1 normy PN-EN 1993-1-3

Pas górny:  $\frac{b_1}{t} = \frac{85}{2,0} = 42,5 < 60$

Pas dolny:  $\frac{b_2}{t} = \frac{85}{2} = 42,5 < 60$

Środek:  $\frac{h}{t} = \frac{350}{2,0} = 175 < 500 \cdot \sin \phi = 500 \cdot \sin(90^\circ) = 500$

Usztywnienie:  $\frac{c}{t} = \frac{30}{2,0} = 15 < 50$

## 1.2. Przekrój równoważny

### Umowne szerokości ścianek współpracujących

$$g_r = r_m \left( \tan \left( \frac{\phi}{2} \right) - \sin \left( \frac{\phi}{2} \right) \right) = \left( r + \frac{t}{2} \right) \cdot \left( \tan \left( \frac{\phi}{2} \right) - \sin \left( \frac{\phi}{2} \right) \right) = \left( 2,63 + \frac{2}{2} \right) \cdot \left( \tan \left( \frac{90^\circ}{2} \right) - \sin \left( \frac{90^\circ}{2} \right) \right) = 1,06 \text{ mm}$$

Dodatkowo usztywnienia brzegowe powinny spełniać warunek:

$$0,2 \leq \frac{c}{b} \leq 0,6$$

$$0,2 \leq \frac{30}{85} = 0,36 \leq 0,6$$

Warunek spełniony.

Wpływ zaokrąglenia naroży:

$$r = 2,63 \text{ mm} < 5t = 5 \cdot 2,0 = 10,0 \text{ mm}$$

$$b_p = b_2 - t - 2 \cdot g_r = 85 - 2,0 - 2 \cdot 1,06 = 80,87 \text{ mm}$$

$$r = 2,63 \text{ mm} < 0,1b_p = 0,1 \cdot 80,87 = 8,09 \text{ mm}$$

Warunki są spełnione, przy określaniu nośności przekroju pominięto wpływ zaokrąglenia naroży.

Umowne szerokości części płaskich elementu

$$\text{Pas ściskany: } b_{p,1} = b_1 - t - 2 \cdot g_r = 85 - 2,0 - 2 \cdot 1,06 = 80,87 \text{ mm}$$

$$\text{Pas rozciągany: } b_{p,2} = b_2 - t - 2 \cdot g_r = 85 - 2,0 - 2 \cdot 1,06 = 80,87 \text{ mm}$$

$$\text{Środek: } h_w = h - t - 2 \cdot g_r = 350 - 2,0 - 2 \cdot 1,06 = 345,87 \text{ mm}$$

$$\text{Usztywnienie: } c_p = c - 0,5 \cdot t - g_r = 30 - 0,5 \cdot 2,0 - 1,06 = 27,94 \text{ mm}$$

### Parametry geometryczne przekroju równoważnego

$$A_{g,sh} = 2,0 \cdot (2 \cdot 27,94 + 80,87 + 80,87 + 345,87) = 1126,99 \text{ mm}^2$$

Przekrój symetryczny, oś obojętna leży w środku przekroju.

## 1.3. SGN Przekrój poddany zginaniu

### 1.3.1 Przekrój efektywny przy zginaniu

#### Efektywne szerokości pasa ścianek

Krok pierwszy

Na podstawie pkt. 4.4 PN-EN 1993-1-5

- Efektywne szerokości pasa ściskanego

Dla  $\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$  (równomierne ściskanie) parametr niestateczności miejscowej  $k_\sigma = 4,0$ .

Tab. 4.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{80,87/2,0}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{4,0}} = 0,875 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\Psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot 1,0} = 0,673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\Psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,875 - 0,055(3+1,0)}{0,875^2} = 0,856$$

Szerokość współpracująca ścianki:  $b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_p = 0,856 \cdot 80,88 = 69,19 \text{ mm}$

$$b_{\text{eff},1} = b_{\text{eff},2} = 0,5 \cdot b_{\text{eff}} = 0,5 \cdot 69,19 = 34,59 \text{ mm}$$

- Efektywne szerokości fałdy krawędziowej

$$\frac{c_p}{b_{p1}} = \frac{27,94}{80,87} = 0,35 < 0,5 \rightarrow k_\sigma = 0,5$$

Smukłość względna ścianki:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{c_p/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{27,94/2,0}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{0,5}} = 0,855 > 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,855 - 0,188}{0,855^2} = 0,912$$

Współpracująca szerokość ścianki:

$$c_{\text{eff}} = \rho \cdot c_p = 0,912 \cdot 27,94 = 25,49 \text{ mm}$$

### Krok drugi

Efektywny przekrój usztywnienia krawędziowego

$$A_s = t \cdot (c_{\text{eff}} + b_{\text{eff},2}) = 2,0 \cdot (25,49 + 34,59) = 120,17 \text{ mm}^2$$

Odległość od środka do środka efektywnego pola przekroju usztywnienia w strefie ściskanej (pas górny)

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{\text{eff},2} \cdot t \cdot \frac{b_{\text{eff},2}}{2}}{(b_{\text{eff},2} + c_{\text{eff}}) \cdot t} = 80,87 - \frac{34,59 \cdot 2 \cdot \frac{34,59}{2}}{(34,59 + 25,49) \cdot 2} = 70,91 \text{ mm}$$

$k_f = 0$  -element zginany względem osi y-y

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 b_2 h_w k_f} = \frac{210000 \cdot 2,0^3}{4 \cdot (1-0,3^2)} \cdot \frac{1}{70,91^2 \cdot 345,87 + 70,91^3 + 0} = 0,2202 \text{ N/mm}^2$$

Moment bezwładności usztywnienia:

$$I_s = \frac{b_{\text{eff},2} \cdot t^3}{12} + \frac{t \cdot c_{\text{eff}}^3}{12} + \left( b_{\text{eff},2} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{\text{eff}}^2}{2 \cdot (b_{\text{eff},2} + c_{\text{eff}})} \right)^2 \right) + c_{\text{eff}} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{\text{eff}}}{2} - \frac{c_{\text{eff}}^2}{2 \cdot (b_{\text{eff},2} + c_{\text{eff}})} \right)^2 =$$

$$\frac{34,59 \cdot 2^3}{12} + \frac{2 \cdot 25,49^3}{12} + \left( 34,59 \cdot 2 \cdot \left( \frac{25,49^2}{2 \cdot (34,59 + 25,49)} \right)^2 \right) + 25,49 \cdot 2 \cdot \left( \frac{25,49}{2} - \frac{25,49^2}{2 \cdot (34,59 + 25,49)} \right)^2 =$$

$$7553 \text{ mm}^4$$

Naprężenia krytyczne przy wyboczeniu sprężystym usztywnienia brzegowego:

$$\sigma_{\text{cr},s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = \frac{2\sqrt{0,2202 \cdot 210000 \cdot 7553}}{120,17} = 311,03 \text{ N/mm}^2$$

Współczynnik redukcji wg. 5.5.3.1(7)

Smukłość względna:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{\text{cr},s}} = \sqrt{355/311,02} = 1,07$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 1,07 < 1,38$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,07 = 0,698$$

### Krok trzeci

Iteracja 1.:

$$\sigma_{\text{com},Ed} = \chi_{d,1} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 0,698 \cdot \frac{355}{1,0} = 248 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_{p,red,p}(\bar{\lambda}_p) = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}$$

- Efektywne szerokości pasa ściskanego

$$\bar{\lambda}_{p,1} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} = 0,8675 \cdot 0,835 = 0,73$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,73 - 0,055(3 + 1,0)}{0,73^2} = 0,96$$

$$b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_p = 0,96 \cdot 80,87 = 77,35 \text{ mm}$$

$$b_{\text{eff},1} = b_{\text{eff},2} = 0,5 \cdot b_{\text{eff}} = 0,5 \cdot 77,35 = 38,67 \text{ mm}$$

- Efektywne szerokości fałdy krawędziowej

$$\bar{\lambda}_{p,1} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} = 0,855 \cdot 0,835 = 0,714 < 0,748$$

$$\rho = 1,0$$

$$c_{\text{eff}} = \rho \cdot c_p = 1,0 \cdot 27,94 = 27,94 \text{ mm}$$

Efektywny przekrój usztywnienia krawędziowego

$$A_s = t \cdot (c_{\text{eff}} + b_{\text{eff},2}) = 2,0 \cdot (27,94 + 38,67) = 133,22 \text{ mm}^2$$

$$b_1 = 69,65 \text{ mm}$$

$$K = 0,229 \text{ N/mm}^2$$

$$I_s = 9989 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = 329,03 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = 1,04$$

$$\chi_{d,1} = 0,719$$

Iteracja 2.:

Jak w iteracji pierwszej.

$$\sigma_{com,Ed} = \chi_{d,1} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 0,719 \cdot \frac{355}{1,0} = 255 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cr,s} = 329,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = 1,04$$

$$\chi_{d,2} = 0,720$$

Iteracja 3.:

Jak w iteracji pierwszej.

$$\sigma_{com,Ed} = \chi_{d,1} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 0,719 \cdot \frac{355}{1,0} = 255 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cr,s} = 329,62 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = 1,04$$

$$\chi_{d,3} = 0,720$$

$$\chi_{d,3} = 0,720 \approx \chi_{d,2} = 0,720, \text{ lecz } \chi_{d,3} = 0,720 \leq \chi_{d,2} = 0,720 \rightarrow \text{kończymy iteracje}$$

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p = 1,0 \cdot 27,94 = 27,94 \text{ mm}$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 38,33 \text{ mm}$$

$$t_{red} = t \cdot \chi_d = 2,0 \cdot 0,720 = 1,44 \text{ mm}$$

### **Efektywne charakterystyki przekroju  rodnika**

Po ozienie osi oboj etnej w stosunku do pasa  ciskanego

$$h_c = \frac{c_p \cdot \left(h_p - \frac{c_p}{2}\right) + b_{p,2} \cdot h_p + \frac{h_w \cdot h_p}{2} + \frac{c_{eff}^2 \cdot \chi_d}{2}}{c_p + b_{p,2} + h_w + b_{e1} + b_{e2} + c_{eff}} = \frac{27,94 \cdot \left(348 - \frac{27,94}{2}\right) + 80,87 \cdot 348 + \frac{345,87 \cdot 348}{2} + \frac{27,94^2 \cdot 0,72}{2}}{27,94 + 80,87 + 345,87 + 38,33 + 38,33 + 27,94} =$$

$$175,12 \text{ mm}$$

Wsp łczynnik rozk adu napr e en:

$$\psi = \frac{h_c - h_p}{h_c} = \frac{175,12 - 3}{175,12} = -0,987$$

Wsp łczynnik wyboczeniowy:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,987) + 9,78 \cdot (-0,987)^2 = 23,55$$

Współczynnik redukcyjny wg. 5.5.3.1(7)

Smukłość względna:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{h_w/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{345,88/2,0}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{22,55}} = 1,54 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot (-0,987)} = 0,87$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,54 - 0,055(3 + (-0,987))}{1,56^2} = 0,60$$

Efektywna wysokość środka w strefie ściskanej:

$$h_{\text{eff}} = \rho \cdot h_c = 0,60 \cdot 175,12 = 105,4 \text{ mm}$$

Przy pasie ściskanym:

$$h_{\text{eff},1} = 0,4 \cdot h_{\text{eff}} = 0,4 \cdot 105,4 = 42,16 \text{ mm}$$

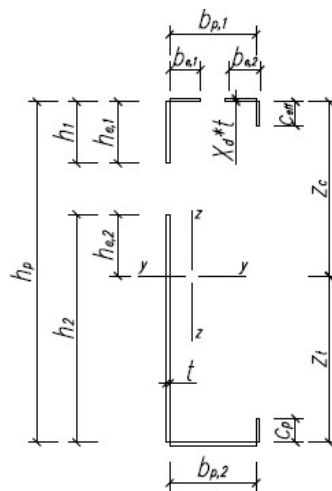
Przy osi obojętnej:

$$h_{\text{eff},2} = 0,6 \cdot h_{\text{eff}} = 0,6 \cdot 105,4 = 63,24 \text{ mm}$$

$$h_1 = h_{\text{eff},1} = 42,16 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_w - (h_c - h_{\text{eff},2}) = 345,88 - (175,12 - 63,24) = 234,0 \text{ mm}$$

### Efektywne charakterystyki przekroju



Rys. 2.1 Schemat do wyznaczenia efektywnych charakterystyk kształtownika

Efektywne pole przekroju:

$$A_{\text{eff}} = t \cdot (c_p + b_{p,2} + h_1 + h_2 + b_{\text{eff},1} + (b_{\text{eff},2} + c_{\text{eff}}) \cdot \chi_d) = 2,0 \cdot (27,94 + 80,87 + 42,16 + 234 + 38,33 + (38,33 + 27,94) \cdot 0,72) = 941,98 \text{ mm}^2$$

Położenie osi obojętnej w stosunku do pasa ściskanego:

$$z_c = \frac{t \cdot \left( c_p \cdot \left( h_p - \frac{c_p}{2} \right) + b_{p,2} \cdot h_p + h_2 \cdot \left( h_p - \frac{h_2}{2} \right) + h_1 \cdot \left( \frac{h_1}{2} + g_r + \frac{t}{2} \right) + \chi_d \cdot c_{eff} \cdot \left( c_{eff} + g_r + \frac{t}{2} \right) \right)}{A_{eff}} =$$

$$\frac{2 \cdot \left( 27,94 \cdot \left( 348 - \frac{27,94}{2} \right) + 80,87 \cdot 348 + 234 \cdot \left( 348 - \frac{234}{2} \right) + 42,16 \cdot \left( \frac{42,16}{2} + 1,06 + \frac{2}{2} \right) + 0,72 \cdot 27,94 \cdot \left( 27,94 + 1,06 + \frac{2}{2} \right) \right)}{941,98} =$$

197,69 mm

$$z_t = h_p - z_c = 348 - 197,69 = 150,31 \text{ mm}$$

Moment bezwładności przekroju współpracującego:

$$I_{eff,y} = \frac{t \cdot h_1^3}{12} + \frac{t \cdot h_2^3}{12} + \frac{b_{p,2} \cdot t^3}{12} + \frac{t \cdot c_p^3}{12} + \frac{b_{eff,1} \cdot t^3}{12} + \frac{b_{eff,2} \cdot (\chi_d \cdot t)^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 \cdot (\chi_d \cdot t)}{12} + c_p \cdot t \cdot$$

$$\left( z_t - \frac{c_p}{2} \right)^2 + b_{p,2} \cdot t \cdot z_t^2 + h_2 \cdot t \cdot \left( z_t - \frac{h_2}{2} \right)^2 + h_1 \cdot t \cdot \left( z_c - \frac{h_1}{2} \right)^2 + b_{eff,1} \cdot t \cdot z_c^2 + b_{eff,2} \cdot$$

$$(\chi_d \cdot t) \cdot z_c^2 + c_{eff} \cdot (\chi_d \cdot t) \cdot \left( z_c - \frac{c_{eff}}{2} \right)^2$$

$$I_{eff,y} = \frac{2 \cdot 42,16^3}{12} + \frac{2 \cdot 234^3}{12} + \frac{80,87 \cdot 2^3}{12} + \frac{2 \cdot 27,94^3}{12} + \frac{38,33 \cdot 2^3}{12} + \frac{38,33 \cdot (0,72 \cdot 2)^3}{12} + \frac{25,65^3 \cdot (0,7 \cdot 2)}{12} +$$

$$27,94 \cdot 2 \cdot \left( 150,31 - \frac{27,94}{2} \right)^2 + 80,87 \cdot 2 \cdot 150,31^2 + 234 \cdot 2 \cdot \left( 150,31 - \frac{234}{2} \right)^2 + 42,16 \cdot$$

$$2 \cdot \left( 213,2 - \frac{42,16}{2} \right)^2 + 38,33 \cdot 2 \cdot 197,69^2 + 38,33 \cdot (0,72 \cdot 2) \cdot 197,69^2 + 27,94 \cdot$$

$$(0,72 \cdot 2) \cdot \left( 197,69 - \frac{27,94}{2} \right)^2 = 1650,86 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźniki wytrzymałości na zginanie:

W odniesieniu do pasa ściskanego:

$$W_{eff,y,c} = \frac{I_{eff,y}}{z_c} = \frac{1650,86 \cdot 10^4}{197,69} = 83,51 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{eff,y,t} = \frac{I_{eff,y}}{z_t} = \frac{1650,86 \cdot 10^4}{150,31} = 109,83 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{eff,y,min} = \min(W_{eff,y,c}; W_{eff,y,t}) = \min(83,51 \cdot 10^3; 109,83 \cdot 10^3) = 83,51 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

**Nośność przekroju na zginanie**

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,y,min} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{83,51 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 29,65 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 26,13 \text{ [kNm]}$$

## 1.1. SGN Przekrój poddany ściskaniu

**Efektywne szerokości pasów**

Krok pierwszy

Na podstawie pkt. 4.4 PN-EN 1993-1-5

Efektywne szerokości pasa górnego i dolnego

Dla  $\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$  (równomierne ściskanie) parametr niestateczności miejscowej  $k_\sigma = 4,0$ .

Tab. 4.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{80,87/2,0}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{4,0}} = 0,875 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\Psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot 1,0} = 0,673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\Psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,875 - 0,055(3+1,0)}{0,875^2} = 0,856$$

Szerokość współpracująca ścianki:  $b_e = \rho \cdot b_p = 0,856 \cdot 80,87 = 69,19 \text{ mm}$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_e = 0,5 \cdot 69,19 = 34,59 \text{ mm}$$

Efektywne szerokości fałdy krawędziowej dolnej i górnej

$$\frac{c_p}{b_{p1}} = \frac{27,94}{80,87} = 0,35 < 0,35 \rightarrow k_\sigma = 0,5$$

Smukłość względna ścianki:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{c_p/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{27,94/2,0}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{0,5}} = 0,855 > 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,855 - 0,188}{0,855^2} = 0,912$$

Współpracująca szerokość ścianki:

$$c_{\text{eff}} = \rho \cdot c_p = 0,912 \cdot 27,94 = 25,49 \text{ mm}$$

Efektywny przekrój usztywnienia krawędziowego

$$A_s = t \cdot (c_{\text{eff}} + b_{e2}) = 2,0 \cdot (25,49 + 34,59) = 120,17 \text{ mm}^2$$

### Krok drugi

Używając początkowego efektywnego przekroju usztywnienia, określa się współczynnik redukcyjny, uwzględniając efekt ciągłego stężenia sprężystego.

Odległość od środka do środka efektywnego pola przekroju usztywnienia w strefie ściskanej:

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} \cdot t \cdot \frac{b_{e2}}{2}}{(b_{e2} + c_{\text{eff}}) \cdot t} = 80,87 - \frac{34,59 \cdot 2 \cdot \frac{34,59}{2}}{(34,59 + 25,49) \cdot 2} = 70,91 \text{ mm}$$

$$k_f = \frac{A_{s1}}{A_{s2}} = 1,0 \text{ -element osiowo ściskany}$$

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 b_2 h_w k_f} = \frac{210000 \cdot 2,0^3}{4 \cdot (1-0,3^2)} \cdot \frac{1}{70,91^2 \cdot 345,88 + 7,91^3 + 0,5 \cdot 70,91 \cdot 70,91 \cdot 345,88 \cdot 1} = 0,1556 \text{ N/mm}^2$$

Moment bezwładności usztywnienia:



$$I_s = \frac{b_{e2} \cdot t^3}{12} + \frac{t \cdot c_{eff}^3}{12} + \left( b_{e2} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff})} \right)^2 \right) + c_{eff} \cdot t \cdot \left( \frac{c_{eff}}{2} - \frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff})} \right)^2 = \frac{34,59 \cdot 2^3}{12} + \frac{2 \cdot 25,49^3}{12} + \left( 34,59 \cdot 2 \cdot \left( \frac{25,49^2}{2 \cdot (34,59 + 25,49)} \right)^2 \right) + 25,49 \cdot 2 \cdot \left( \frac{25,49}{2} - \frac{25,49^2}{2 \cdot (34,59 + 25,49)} \right)^2 = 7553 \text{ mm}^4$$

Naprężenia krytyczne przy wyboczeniu sprężystym usztywnienia brzegowego:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \sqrt{KEI_s}}{A_s} = \frac{2 \sqrt{0,177 \cdot 210000 \cdot 7553}}{120,17} = 261,47 \text{ N/mm}^2$$

Współczynnik redukcyjny wg. 5.5.3.1(7)

Smukłość względna:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} = \sqrt{355 / 261,47} = 1,17$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 1,17 < 1,38 \rightarrow \chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,17 = 0,628$$

### Krok trzeci

Iteracja 1.:

$$\sigma_{com,Ed} = \chi_{d,1} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 0,628 \cdot \frac{355}{1,0} = 223 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_{p,red,p}(\bar{\lambda}_p) = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}$$

- Efektywne szerokości pasa ściskanego

$$\bar{\lambda}_{p,1} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} = 0,875 \cdot 0,792 = 0,69$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,69 - 0,055(3 + 1,0)}{0,69^2} = 0,98$$

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,98 \cdot 80,87 = 79,64 \text{ mm}$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 77,64 = 39,82 \text{ mm}$$

- Efektywne szerokości fałdy krawędziowej

$$\bar{\lambda}_{p,1} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} = 0,855 \cdot 0,792 = 0,677 < 0,748$$

$$\rho = 1,0$$

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p = 1,0 \cdot 27,94 = 27,94 \text{ mm}$$

Efektywny przekrój usztywnienia krawędziowego

$$A_s = t \cdot (c_{eff} + b_{eff,2}) = 2,0 \cdot (27,94 + 39,82) = 135,52 \text{ mm}^2$$

$$b_1 = 69,17 \text{ mm}$$

$$K = 0,232 \text{ N/mm}^2$$

$$I_s = 10067 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = 327,14 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = 1,04$$

$$\chi_{d,1} = 0,717$$

Iteracja 2.:

Jak w iteracji pierwszej.

$$\sigma_{com,Ed} = \chi_{d,1} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 0,717 \cdot \frac{355}{1,0} = 254 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cr,s} = 329,54 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = 1,04$$

$$\chi_{d,2} = 0,720$$

Iteracja 3.:

Jak w iteracji pierwszej.

$$\sigma_{com,Ed} = \chi_{d,1} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 0,72 \cdot \frac{355}{1,0} = 255 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cr,s} = 329,62 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = 1,04$$

$$\chi_{d,3} = 0,720$$

$$\chi_{d,3} = 0,720 \approx \chi_{d,2} = 0,720, \text{ lecz } \chi_{d,3} = 0,720 \leq \chi_{d,2} = 0,720 \rightarrow \text{kończymy iteracje}$$

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p = 1,0 \cdot 27,94 = 27,94 \text{ mm}$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 38,33 \text{ mm}$$

$$t_{red} = t \cdot \chi_d = 2,0 \cdot 0,720 = 1,44 \text{ mm}$$

### **Efektywne charakterystyki przekroju środnika**

Smukłość względna:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{h_w/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{345,88/2,0}{28,4 \cdot 0,81\sqrt{4,0}} = 3,74 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,5 +$$

$$\sqrt{0,085 - 0,055 \cdot 1,0} = 0,673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{3,74 - 0,055(3+1)}{3,74^2} = 0,25$$

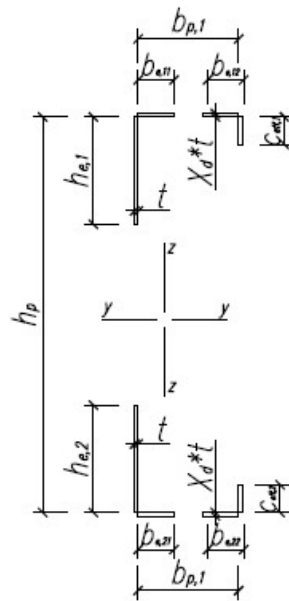
Efektywna wysokość środnika:

$$h_{eff} = \rho \cdot h_w = 0,25 \cdot 345,88 = 86,99 \text{ mm}$$

Przy pasie ściskanym:

$$h_{e1} = h_{e2} = 0,5 \cdot h_{eff} = 0,5 \cdot 86,99 = 43,5 \text{ mm}$$

## Efektywne charakterystyki przekroju



Rys. 2.3 Schemat do wyznaczenia efektywnych charakterystyk kształtownika

Efektywne pole przekroju:

$$A_{\text{eff}} = t \cdot (b_{e,1} + b_{e,2} + h_{e,1} + h_{e,2} + (b_{e,1} + b_{e,2} + 2 \cdot c_{\text{eff}}) \cdot \chi_d) = 2,0 \cdot (38,33 + 38,33 + 43,5 + 43,5 + (38,33 + 38,33 + 2 \cdot 27,94) \cdot 0,72) = 518,08 \text{ mm}^2$$

### Nośność przekroju przy ściskaniu osiowym

$$A_{\text{eff}} < A_g \text{ (redukcja przekroju):}$$

$$N_{C,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{518,08 \cdot 355}{1,0} = 183,92 \cdot 10^3 \text{ N} = 183,92 \text{ kN}$$