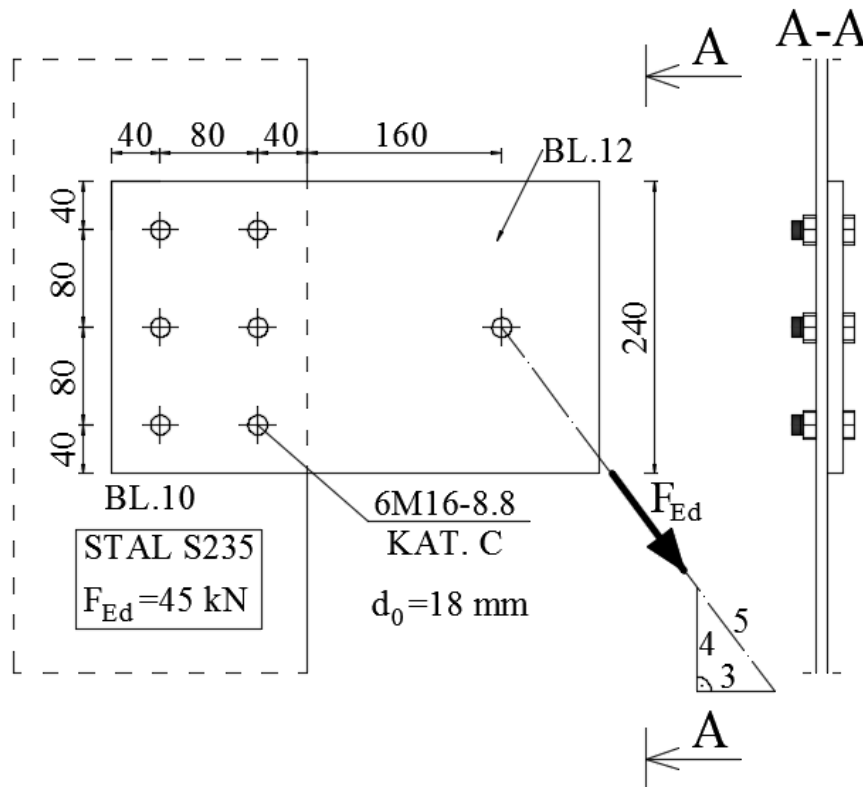


PRZYKŁAD 2:

Sprawdzić prawidłowość zaprojektowania połączenia pokazanego na rysunku:



Obciążenie połączenia: $F_{Ed} = 45 \text{ kN}$

Kategoria połączenia: C → połączenie zakładkowe ciernew stanie granicznym nośności

Klasa powierzchni ciernej: B → współczynnik tarcia $\mu = 0,4$ (sposób przygotowania powierzchni: śrutowanie lub piaskowanie i malowanie farbą krzemianową alkaliczno-cynkową o grubości $0,5 \div 0,8 \text{ }\mu\text{m}$)

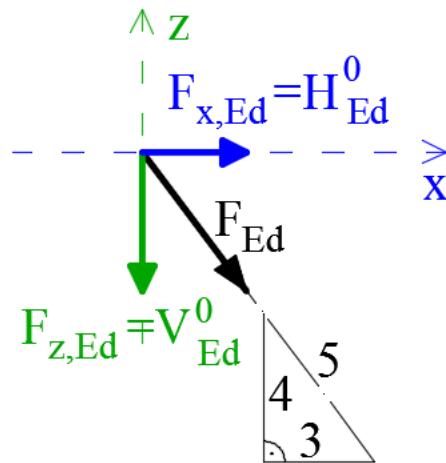
STAL S235: $\rightarrow f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, $\rightarrow f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

ŚRUBY M16-8.8: $\rightarrow d = 16 \text{ mm}$, $d_0 = 18 \text{ mm}$, $\rightarrow A_s = 157 \text{ mm}^2$, $\rightarrow f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$, $\rightarrow f_{yb} = 640 \text{ N/mm}^2$

1. Wyznaczenie siły przypadającej na jedną śrubę:

- redukcja obciążenia do środka ciężkości układu łączników:

- wyznaczenie składowej pionowej i poziomej od obciążenia F_{Ed} :



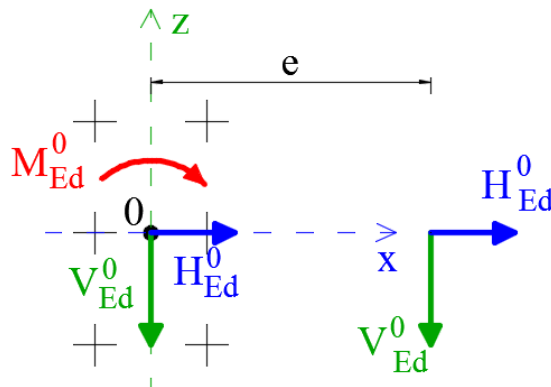
- składowa pozioma:

$$F_{x,Ed} = H_{Ed}^0 = \frac{3}{5} \cdot F_{Ed} = \frac{3}{5} \cdot 45 = 27 \text{ kN}$$

- składowa pionowa:

$$F_{z,Ed} = V_{Ed}^0 = \frac{4}{5} \cdot F_{Ed} = \frac{4}{5} \cdot 45 = 36 \text{ kN}$$

- redukcja obciążenia do środka ciężkości układu łączników:



- mimośród działania obciążenia względem środka ciężkości układu śrub:

$$e = 160 + 40 + \frac{80}{2} = 240 \text{ mm}$$

- obciążenia poziome:

$$H_{Ed}^0 = 27 \text{ kN} = 27 \cdot 10^3 \text{ N}$$

- obciążenie pionowe:

$$V_{Ed}^0 = 36 \text{ kN} = 36 \cdot 10^3 \text{ N}$$

- moment zginający:

$$M_{Ed}^0 = V_{Ed}^0 \cdot e = 36 \cdot 10^3 \cdot 240 = 8640000 \text{ Nmm} = 8,64 \text{ kNm}$$

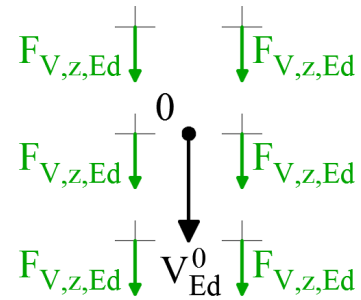
- wyłączenie śrub od obciążenia pionowego V_{Ed}^0 :

- siła przypadająca na jedną śrubę od obciążenia pionowego:

$$F_{V,z,Ed} = \frac{V_{Ed}^0}{n}$$

n – liczba śrub w połączeniu, n=6

$$F_{V,z,Ed} = \frac{36 \cdot 10^3}{6} = 6000 \text{ N}$$

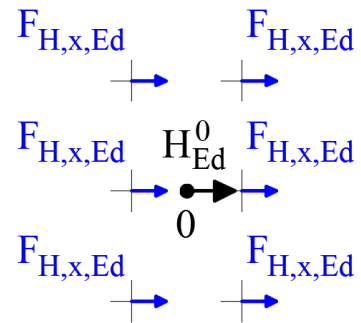


- wyłączenie śrub od obciążenia poziomego H_{Ed}^0 :

- siła przypadająca na jedną śrubę od obciążenia poziomego:

$$F_{H,x,Ed} = \frac{H_{Ed}^0}{n}; n=6$$

$$F_{H,x,Ed} = \frac{27 \cdot 10^3}{6} = 4500 \text{ N}$$



- wyłączenie śrub od momentu skręcającego M_{Ed}^0 :

Wyłączenie śrub od działania momentu skręcającego nie jest jednakowe dla wszystkich śrub w połączeniu. Zależy od odległości śruby od środka ciężkości układu łączników (im dłuższa promienia wodzącego większa tym większa siła w śrubie od momentu).

- siła przypadająca na jedną śrubę od momentu M_{Ed}^0 :

- składowa pozioma:

$$F_{M,x,Ed} = M_{Ed}^0 \cdot \frac{z_m}{\sum x_i^2 + \sum z_i^2}$$

- suma kwadratów odległości wszystkich śrub od środka układu śrub:

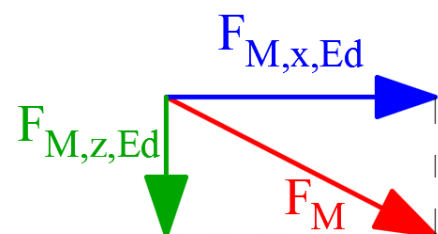
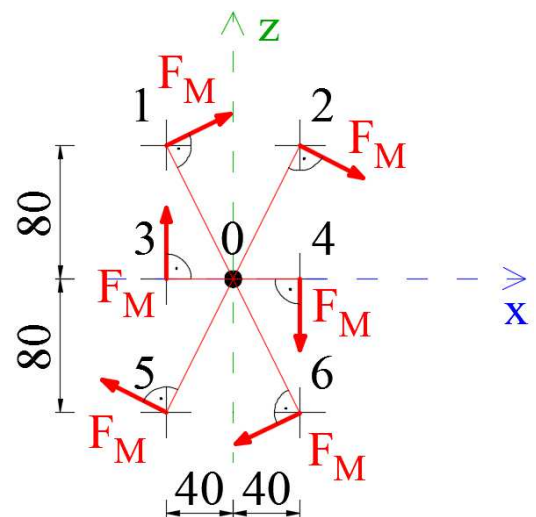
$$\sum x_i^2 + \sum z_i^2 = (-40)^2 \cdot 3 + 40^2 \cdot 3 + (-80)^2 \cdot 2 + 0^2 \cdot 2 + 80^2 \cdot 2 = 35200 \text{ mm}^2$$

$$F_{M,x,Ed} = 8640000 \cdot \frac{80}{35200} = 19636 \text{ N}$$

- składowa pionowa:

$$F_{M,z,Ed} = M_{Ed}^0 \cdot \frac{x_m}{\sum x_i^2 + \sum z_i^2}$$

$$F_{M,z,Ed} = 8640000 \cdot \frac{40}{35200} = 9818 \text{ N}$$

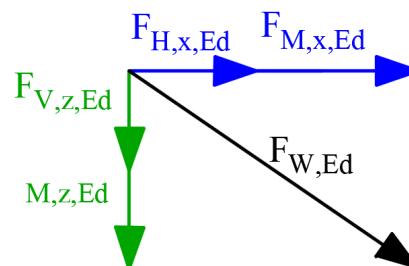


- siła wypadkowa działająca na jedną śrubę w połączeniu zakładkowym obciążonym siłami i momentem:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{(F_{V,z,Ed} + F_{M,z,Ed})^2 + (F_{H,x,Ed} + F_{M,x,Ed})^2}$$

- siła wypadkowa w śrubie nr 2:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{(6000 + 9818)^2 + (4500 + 19636)^2} \\ = 28857 \text{ N} = \mathbf{28,86 \text{ kN}}$$



2. Sprawdzenie warunków stanu granicznego nośności:

- nośność śruby na poślizg styku:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,Cd}$$

- siła sprężająca śrubę:

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87920 \text{ N} = 87,92 \text{ kN}$$

- nośność na poślizg:

$k_s = 1,0$ – śruby w otworach normalnych (okrągłych)

$\mu = 0,4$ – współczynnik tarcia

$n = 1$ – liczba styków ciernych

$A_s = 157 \text{ mm}^2$ – pole powierzchni przekroju czynnego śruby przy sprężaniu

$$F_{s,Rd} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,4}{1,25} \cdot 87,92 = 28,13 \text{ kN}$$

- sprawdzenie warunku nośności śruby na poślizg:

$$F_{w,Ed} \leq F_{s,Rd}$$

$$F_{w,Ed} = \mathbf{28,86 \text{ kN}} > F_{s,Rd} = 28,13 \text{ kN} \text{ – obliczeniowy warunek nośności}$$

pojedynczej śruby na poślizg jest niespełniony

Należy przyjąć wyższą klasę przygotowania powierzchni ze względu na niespełnienie warunku nośności na poślizg. Zastosować należy **klasę A**, w której współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,5$, wówczas

$$F_{s,Rd} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5}{1,25} \cdot 87,92 = \mathbf{35,17 \text{ kN}} > F_{w,Ed} = \mathbf{28,86 \text{ kN}}$$

Warunek stanu granicznego nośności został spełniony.

- **SPRAWDZENIE WARUNKU NOŚNOŚĆ ŚRUBY NA DOCISK:**

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

- nośność na docisk do blachy gr. 10 mm w przypadku składowej poziomej (kierunek x):

- śruba skrajna:

- współczynnik uwzględniający model zniszczenia złącza α_b :

$$\alpha_{b,x}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2,22 \\ 1,00 \end{array} \right\} = 0,74$$

- współczynnik uwzględniający rozstaw śrub w kierunku prostopadłym do obciążenia:

$$k_{1,x}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,70 = \text{nie miarodajne} \\ 1,4 \cdot \frac{P_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{80}{18} - 1,7 = 4,52 \\ 2,50 \end{array} \right\} = 2,50$$

- nośność na docisk dla śruby skrajnej dla składowej poziomej:

$$F_{b,x,Rd}^S = F_{b,x,Rd} = \frac{2,50 \cdot 0,74 \cdot 360 \cdot 16 \cdot 10}{1,25} = 85248 \text{ N} = \mathbf{85,25 \text{ kN}}$$

- nośność na docisk do blachy gr. 10 mm w przypadku składowej pionowej (kierunek z):

W dalszych rozważaniach zostanie przedstawiony skrajny szereg śrub dla składowej pionowej ze względu, że największe obciążenie przypada na śrubę nr 2 znajdującą się w tym szeregu.

- śruba skrajna:

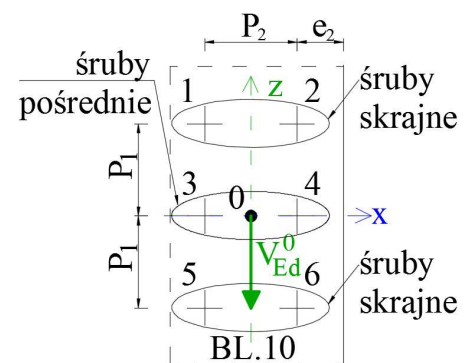
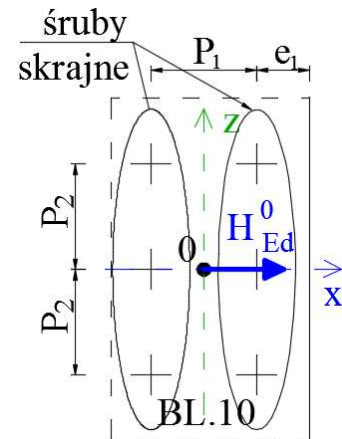
- współczynnik uwzględniający model zniszczenia złącza α_b :

$$\alpha_{b,z}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3d_0} = \text{nie miarodajne} \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2,22 \\ 1,00 \end{array} \right\} = 1,00$$

- współczynnik uwzględniający rozstaw śrub w kierunku prostopadłym do obciążenia:

$$k_{1,z}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,70 = 2,8 \cdot \frac{40}{18} - 1,70 = 4,52 \\ 1,4 \cdot \frac{P_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{80}{18} - 1,7 = 4,52 \\ 2,50 \end{array} \right\} = 2,50$$

- nośność na docisk na obciążenie poziome:



$$F_{b,z,Rd}^S = F_{b,z,Rd} = \frac{2,50 \cdot 1,00 \cdot 360 \cdot 16 \cdot 10}{1,25} = 115200 \text{ N} = \mathbf{115,20 \text{ kN}}$$

- warunek nośności na docisk do blachy gr. 10 mm:

$$\sqrt{\left(\frac{F_{w,x,Ed}}{F_{b,x,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{w,z,Ed}}{F_{b,z,Rd}}\right)^2} \leq 1,0$$

- składowa pozioma obciążenia na docisk:

$$F_{w,x,Ed} = F_{M,x,Ed} + F_{H,x,Ed}$$

$$F_{w,x,Ed} = 19636 + 4500 = 24136 \text{ N} = 24,14 \text{ kN}$$

- składowa pionowa obciążenia na docisk:

$$F_{w,z,Ed} = F_{M,z,Ed} + F_{V,z,Ed}$$

$$F_{w,z,Ed} = 9818 + 6000 = 15818 \text{ N} = 15,82 \text{ kN}$$

- sprawdzenie warunku na docisk do blachy gr.10 mm:

$$\sqrt{\left(\frac{24,14}{85,25}\right)^2 + \left(\frac{15,82}{115,20}\right)^2} = \mathbf{0,31} < 1,0 - \text{obliczeniowy warunek nośności na docisk do}$$

blachy gr. 10 mm spełniony

- nośność na docisk do blachy gr. 12 mm w przypadku składowej poziomej (kierunek x):

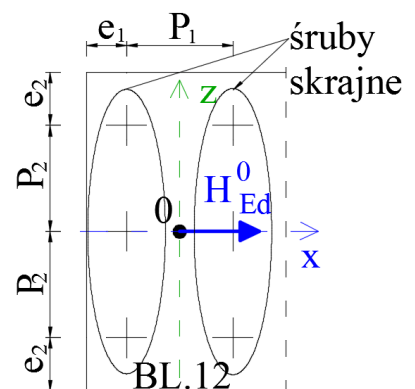
- śruba skrajna:

- współczynnik uwzględniający model zniszczenia złącza α_b :

$$\alpha_{b,x}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2,22 \\ 1,00 \end{array} \right\} = 0,74$$

- współczynnik uwzględniający rozstaw śrub w kierunku prostopadłym do obciążenia:

$$k_{1,x}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,70 = 2,8 \cdot \frac{40}{18} - 1,70 = 4,54 \\ 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{80}{18} - 1,7 = 4,52 \\ 2,50 \end{array} \right\} = 2,50$$



- nośność na docisk dla śruby skrajnej dla składowej poziomej:

$$F_{b,x,Rd}^S = F_{b,x,Rd} = \frac{2,50 \cdot 0,74 \cdot 360 \cdot 16 \cdot 12}{1,25} = 102297 \text{ N} = \mathbf{102,30 \text{ kN}}$$

- nośność na docisk do blachy gr. 12 mm w przypadku składowej pionowej (kierunek z):

W dalszych rozważaniach zostanie przedstawiony skrajny szereg śrub dla składowej pionowej ze względu, że największe obciążenie przypada na śrubę nr 2 znajdującą się w tym szeregu.

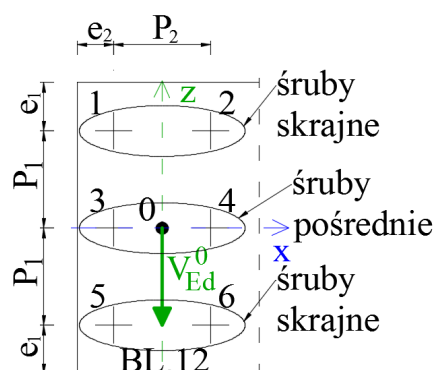
- śruba skrajna:

- współczynnik uwzględniający model zniszczenia złącza α_b :

$$\alpha_{b,z}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2,22 \\ 1,00 \end{array} \right\} = 0,74$$

- współczynnik uwzględniający rozstaw śrub w kierunku prostopadłym do obciążenia:

$$k_{1,z}^S = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{40}{18} - 1,70 = 4,52 \\ 1,4 \cdot \frac{P_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{80}{18} - 1,7 = 4,52 \\ 2,50 \end{array} \right\} = 2,50$$



- nośność na docisk na obciążenie poziome:

$$F_{b,z,Rd}^S = F_{b,z,Rd} = \frac{2,50 \cdot 0,74 \cdot 360 \cdot 16 \cdot 12}{1,25} = 102297 \text{ N} = \mathbf{102,30 \text{ kN}}$$

- sprawdzenie warunku na docisk do blachy gr.12 mm:

$$\sqrt{\left(\frac{24,14}{102,30}\right)^2 + \left(\frac{15,82}{102,30}\right)^2} = \mathbf{0,28} < 1,0 - \text{obliczeniowy warunek nośności na docisk do}$$

blachy gr. 12 mm spełniony

3. Sprawdzenie nośności przekroju osłabionego otworami:

- nośność na rozciąganie blachy gr. 12 mm:

$$N_{t,Rd} = N_{net,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

- pole przekroju netto przy rozciąganiu:

$$A_{net} = (h_b - 3 \cdot d_0) \cdot t_b$$

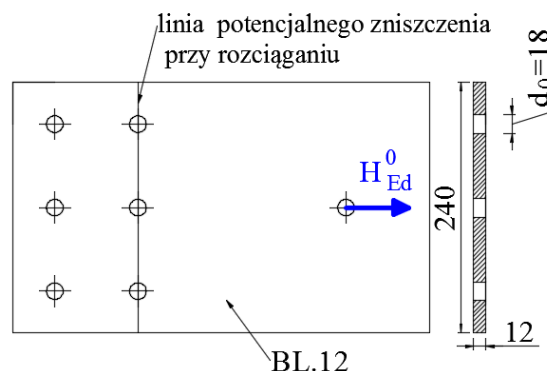
$$A_{net} = (240 - 3 \cdot 18) \cdot 12 = 2232 \text{ mm}^2$$

- nośność na rozciąganie:

$$N_{t,Rd} = N_{net,Rd} = \frac{2232 \cdot 235}{1,0} = 524520 \text{ N} = \mathbf{524,52 \text{ kN}}$$

- sprawdzenie warunku nośności na rozciąganie:

$$H_{Ed}^0 \leq N_{net,Rd}$$



$H_{Ed}^0 = 27 \text{ kN} < N_{net,Rd} = 524,52 \text{ kN}$ – obliczeniowy warunek nośności na rozciąganie

blachy 12 mm spełniony

- nośność na ścinanie blachy gr. 12 mm:

$$V_{u,Rd} = \frac{A_{v,net} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

- pole przekroju netto przy ścinaniu:

$$A_{net} = (h_b - 3 \cdot d_0) \cdot t_b$$

$$A_{net} = (240 - 3 \cdot 18) \cdot 12 = 2232 \text{ mm}^2$$

- nośność na ścinanie:

$$V_{u,Rd} = \frac{2232 \cdot \frac{235}{\sqrt{3}}}{1,0} = 302832 \text{ N} = \mathbf{302,832 \text{ kN}}$$

$$\tau_{V,Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_{v,net}} = \frac{36 \cdot 10^3}{2232} = 16,129 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- sprawdzenie warunku nośności na ścinanie:

$$V_{Ed}^0 \leq V_{u,Rd}$$

$V_{Ed}^0 = 36 \text{ kN} < V_{u,Rd} = 302,832 \text{ kN}$ – obliczeniowy warunek nośności na ścinanie

jest spełniony

- nośność na zginanie blachy gr. 12 mm:

$$M_{u,Rd} = \frac{W_{el,net} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$I_{y,net} = I_y - I_{y,otw.}$$

$$I_{y,otw.} = t_b \cdot d_0 \sum_{i=1}^{n_t} z_i^2 = 12 \cdot 18 \cdot 80^2 = 1382400 \text{ mm}^4$$

n_t - liczba otworów w strefie rozciąganej

$$I_y = \frac{t_b \cdot h_b^3}{12} = \frac{12 \cdot 240^3}{12} = 13824000 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,net} = 13824000 - 1382400 = 12441600 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,net} = \frac{2 \cdot I_{y,net}}{h_b} = \frac{2 \cdot 12441600}{240} = 103680 \text{ mm}^3$$

- nośność na zginanie:

$$M_{u,Rd} = \frac{103680 \cdot 235}{1,0} = 24364800 \text{ Nmm} = \mathbf{24,36 \text{ kNm}}$$

- sprawdzenie warunku nośności na zginanie:

$$M^{1-1}_{Ed} \leq M_{u,Rd}$$

$M^{1-1}_{Ed} = 36 \times 0,2 = 7,2 \text{ kNm} < M_{u,Rd} = 24,36 \text{ kN}$ – obliczeniowy warunek nośności na zginanie jest spełniony ze znacznym zapasem.

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M^{1-1}_{Ed}}{W_{el,net}} + \frac{H^0_{Ed}}{A_{net}} = \frac{7,20 \cdot 10^6}{103680} + \frac{27 \cdot 10^3}{2232} = 81,54 \frac{N}{mm^2}$$

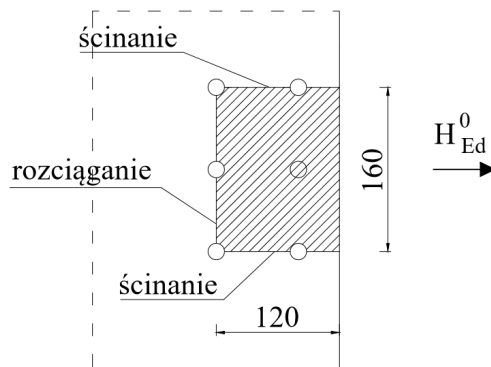
- złożony stan naprężenia:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{V,Ed}}{f_y} \right)^2 \leq 1,0$$

$$\left(\frac{81,54}{\frac{235}{1,0}} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{16,129}{\frac{235}{1,0}} \right)^2 = 0,134 \leq 1,0 - \text{warunek spełniony ze znacznym zapasem.}$$

4. Rozerwania blokowe:

- blacha grubości 10 mm:



$$N_{b,Rd} = V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$$

$$\gamma_{M2} = \min \left\{ 0,9 \cdot \frac{f_u}{f_y} = \frac{1,1}{235} = 0,9 \cdot 360 = 1,38 \right\} = 1,1$$

$$A_{nt} = 10 \cdot (160 - 2 \cdot 18) = 1240 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = 2 \cdot 10 \cdot (120 - 1,5 \cdot 18) = 1860 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{\frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}} = \frac{360 \cdot 1240}{1,1} + \frac{\frac{235}{\sqrt{3}} \cdot 1860}{1,0} = 658,18 \cdot 10^3 \text{ N} = 658,18 \text{ kN} >$$

$$H_{Ed}^0 = 27 \text{ kN} - \text{warunek spełniony}$$

- blacha grubość 12 mm:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{\frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

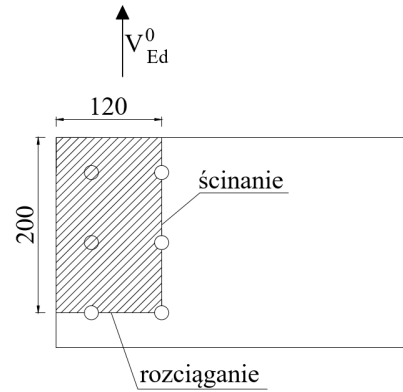
$$A_{nt} = 12 \cdot (120 - 1,5 \cdot 18) = 1116 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = 12 \cdot (200 - 2,5 \cdot 18) = 1860 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{\frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}} =$$

$$\frac{0,5 \cdot 360 \cdot 1116}{1,1} + \frac{\frac{235}{\sqrt{3}} \cdot 1860}{1,0} = 434,98 \cdot 10^3 \text{ N} = 434,98 \text{ kN} > V_{Ed}^0 = 36 \text{ kN} - \text{warunek}$$

spełniony



6. Niestateczność dystorsyjna:

$$\sigma_w = 235 \cdot 81 \cdot \left(\frac{t}{x}\right)^2$$

$$x = 200 \text{ mm}$$

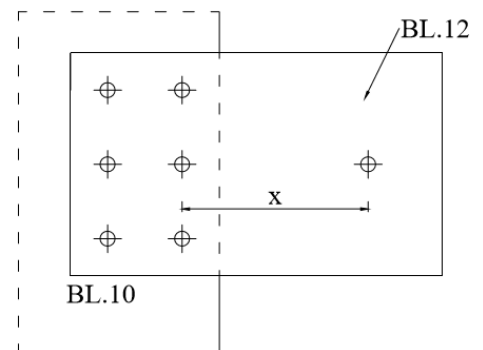
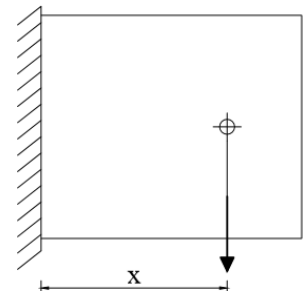
$$\sigma_w = 235 \cdot 81 \cdot \left(\frac{12}{200}\right)^2 = 68,526 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$V_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot \sigma_w}{x \cdot \gamma_{M1}}$$

$$W_{el} = \frac{t \cdot h^2}{6} = \frac{12 \cdot 240^2}{6} = 115200 \text{ mm}^3$$

$$V_{Rd} = \frac{115200}{200} \cdot \frac{68,526}{1,0} = 39,47 \cdot 10^3 \text{ N} =$$

$$39,47 \text{ kN} > V_{Ed} = 36 \text{ kN} - \text{warunek spełniony}$$



Przykład opracowali:

mgr inż. Damian KUKLA

mgr inż. Adrian SZPYRKA