

Konstrukcje metalowe

Wykład XIX

Węzły sztywne

Spis treści

Śruby w węzłach → #t / 3

Węzły zakładkowe → #t / 10

Węzły doczołowe → #t / 28

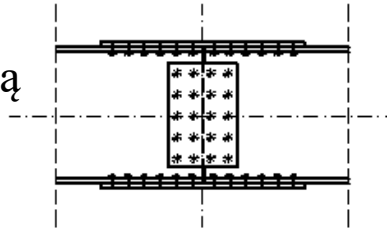
Obciążenie złożone → #t / 84

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 94

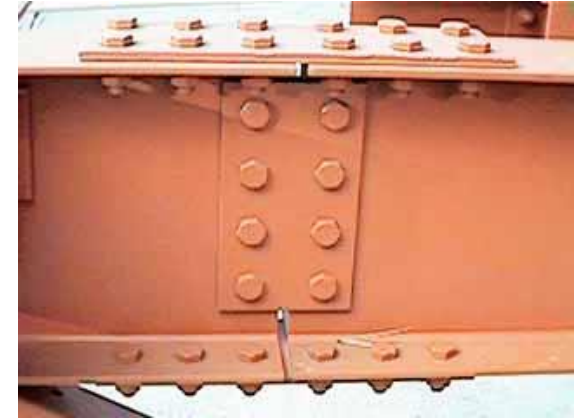
Śruby w węzłach

W konstrukcjach stalowych stosuje się 2 rozwiązania węzłów sztywnych: zakładkowe (uniwersalne) i doczołowe.

Przykład węzła zakładkowego (projekt: ruszt stropu stalowego). Wszystkie siły są przyłożone prostopadle do trzpieni śrub.

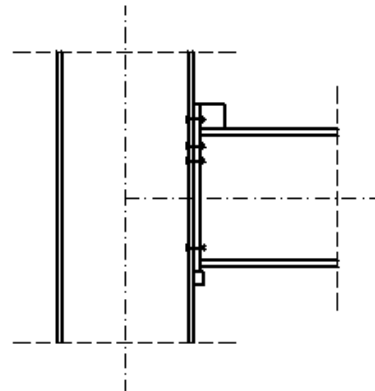


Rys: Autor



Rys: amsd.co.uk

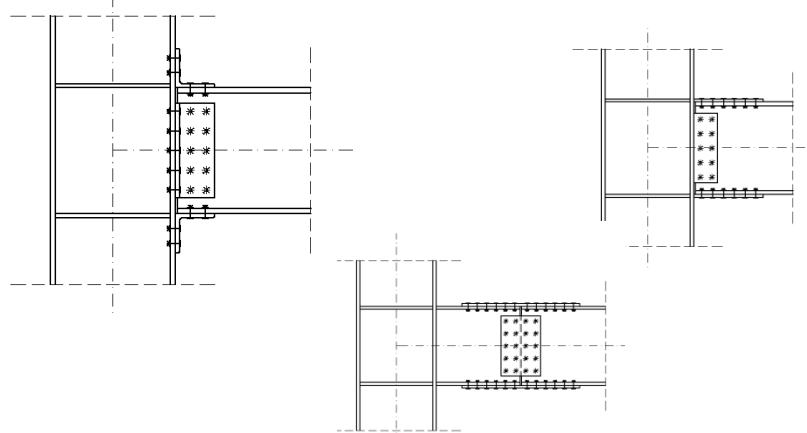
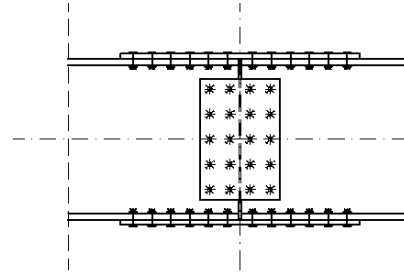
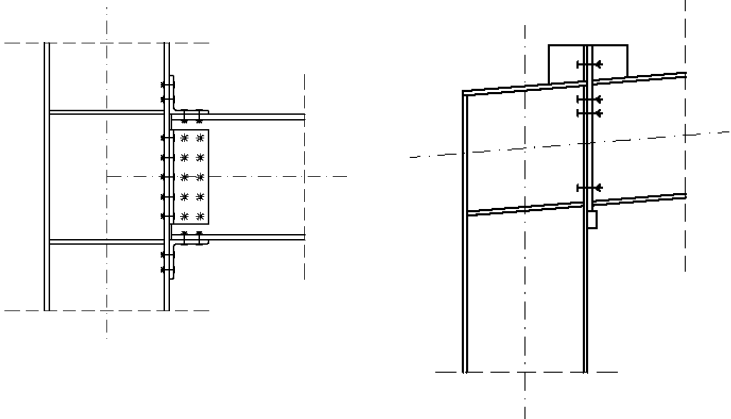
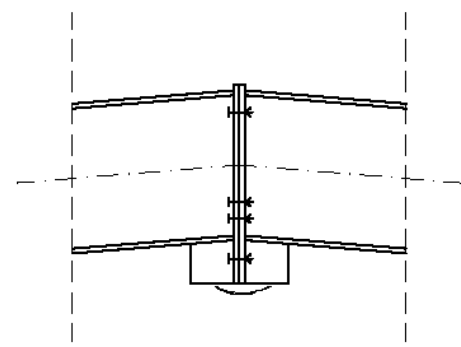
Przykład węzła doczołowego (projekt – hala stalowa). Siły są przyłożone zazwyczaj osiowo do śrub, aczkolwiek są w nim śruby obciążone poprzecznie, a czasami jednocześnie osiowo i poprzecznie.



Rys: Autor



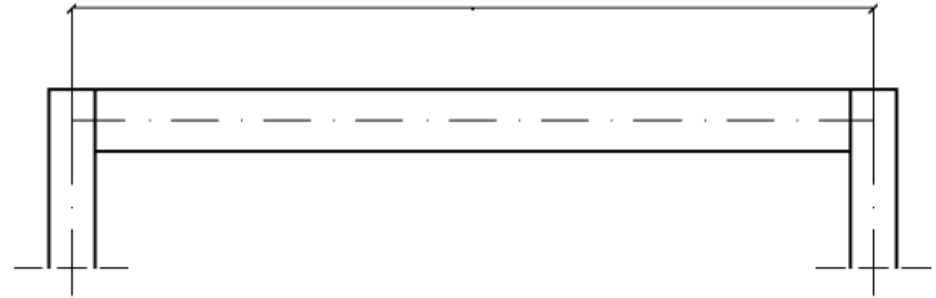
Rys: uwyo.edu

	Belka - słup	Belka - belka
<p>Węzeł uniwersalny (ściananie w śrubach)</p>		
<p>Węzeł doczołowy (rozciąganie w śrubach)</p>		

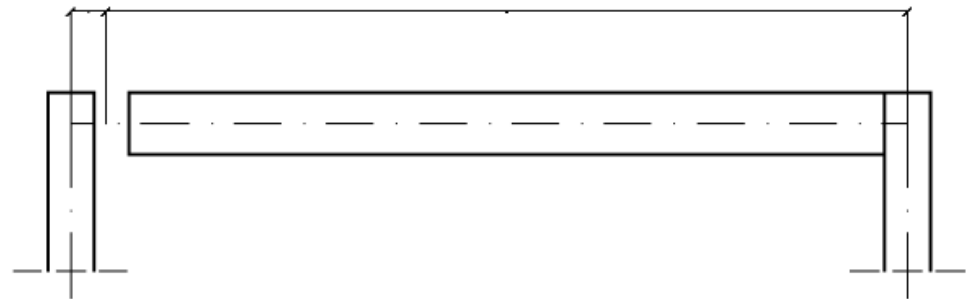
Ze względu na imperfekcje, rzeczywiste położenie i rzeczywiste odległości między słupami mogą być inne niż teoretyczne, podane w projekcie. Długość belki powinna być o kilka milimetrów mniejsza niż odległość teoretyczna, aby uniknąć kolizji między rzeczywistym położeniem słupa a końcem belki.

Rys: Autor

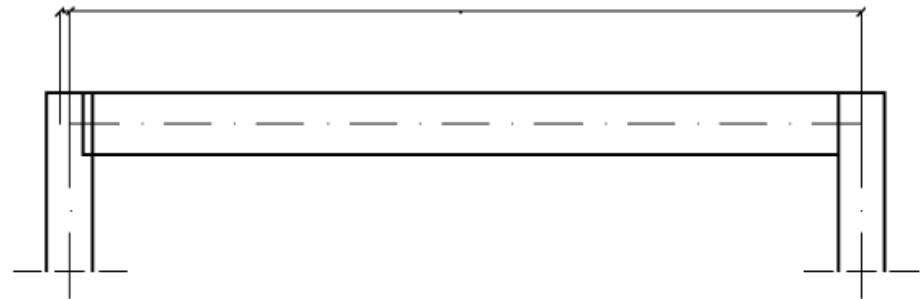
Teoria (sytuacja idealna):







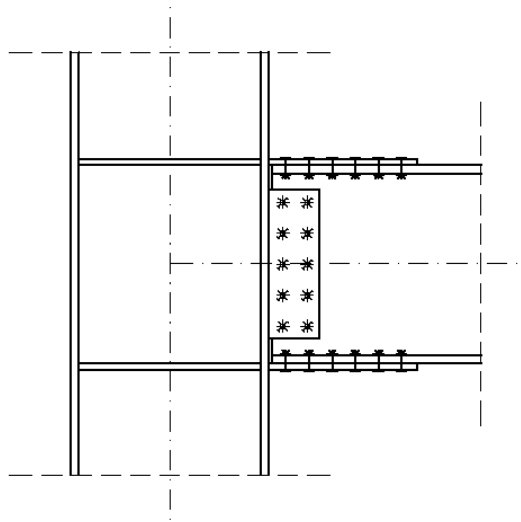
Większa odległość (dodatkowy odstęp):



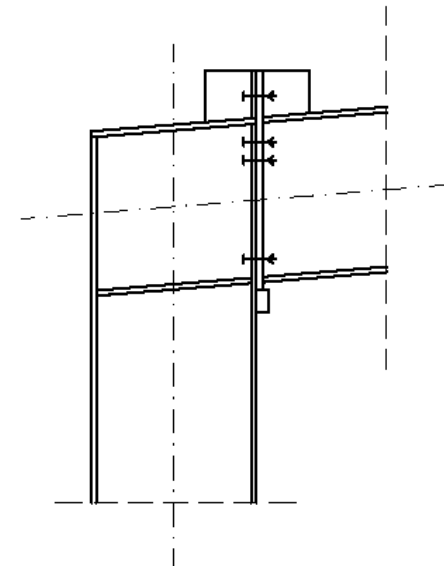
Mniejsza odległość (kolizja):

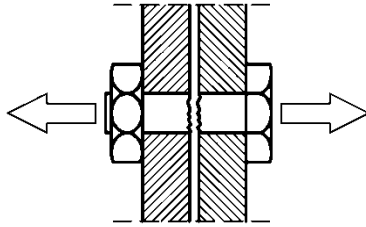


	Imperfekcje	Czas trwania obliczeń	Czas trwania montażu (ilość śrub)
Węzeł uniwersalny	Rzeczywista długość belki może być większa lub mniejsza od teoretycznej		
Węzeł doczołowy	Rzeczywista długość belki może być mniejsza od teoretycznej		

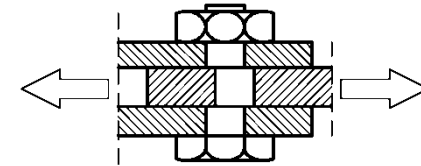


Rys: Autor





$F_{v, Ed}$ – siła ścinająca
 $F_{V, Rd}$ – nośność na ścinanie



$F_{t, Ed}$ – siłą rozciągającą
 $F_{t, Rd}$ – nośność na rozciąganie

Rys: Autor

$$F_{v, Ed} / F_{v, Rd} \leq 1,0$$

lub

$$F_{t, Ed} / F_{t, Rd} \leq 1,0$$

Jeśli obie siły działają równocześnie:

$$F_{v, Ed} / F_{v, Rd} \leq 1,0$$

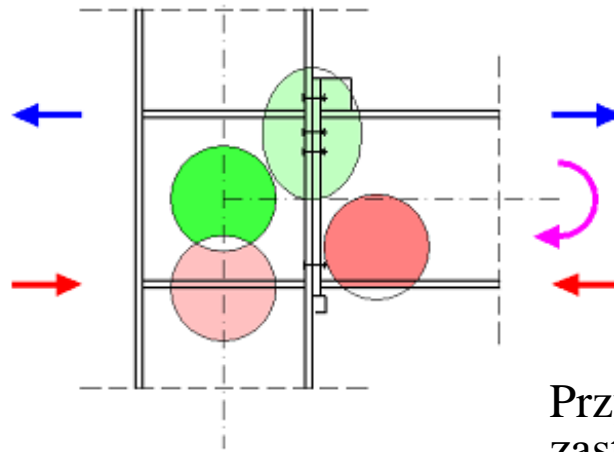
oraz

$$F_{t, Ed} / F_{t, Rd} \leq 1,0$$

oraz

$$F_{v, Ed} / F_{v, Rd} + F_{t, Ed} / (1,4 F_{t, Rd}) \leq 1,0$$

Metoda składnikowa: węzeł jest przedstawiony jako suma podstawowych składników o określonej nośności i sztywności.



→ #14 / 17

Rys: Autor

Przy sprawdzaniu sztywności analizujemy zastępczy układ sprężynek.

O nośności całości decyduje najslabsze ogniwo.



Rys: dynamicbusiness.com.au

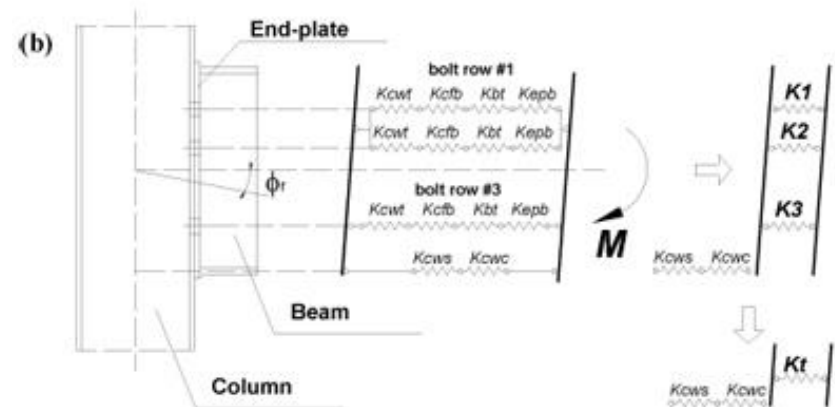
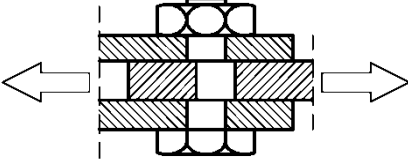
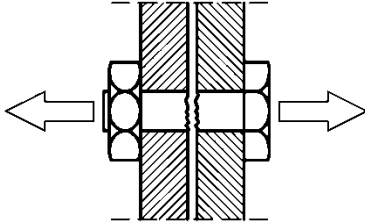


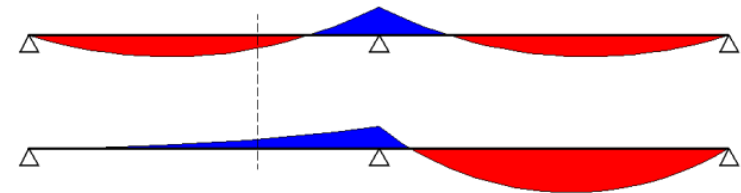
Figure 2. (a) Active components for bolted beam-to-column end-plate connections and (b) joint rotational stiffness according to EC3-1.8 (2003).

Rys: scielo.br

Kategoria połączenia śrubowego i obciążenie

					
Kategoria	A	B	C	D	E
Rodzaj obciążenia	Statyczne i aerodynamiczne bez zmiany zwrotu momentu zginającego	Statyczne i aerodynamiczne ze zmianą zwrotu momentu zginającego	Dynamiczne	Statyczne, aerodynamiczne	Dynamiczne
Rodzaj śruby	„zwykłe”	sprężające		„zwykłe”	sprężające

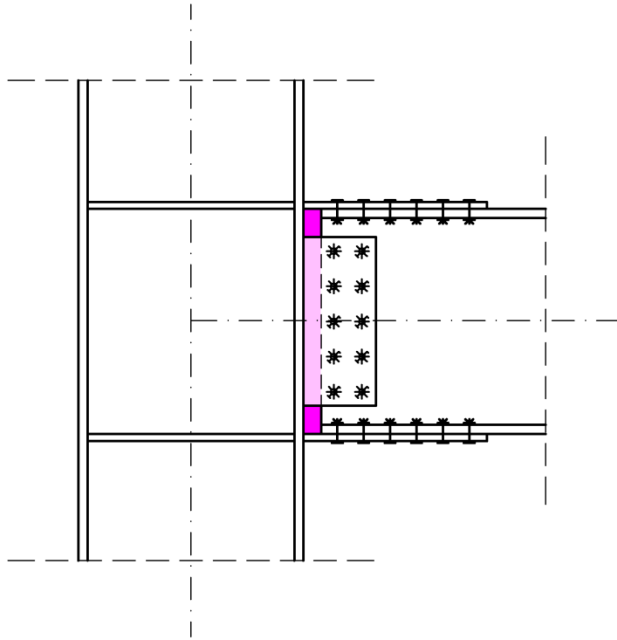
Zmiana zwrotu momentu zginającego w różnych kombinacjach obciążeń



→ #15 / 13

Rys: Autor

Węzły zakładkowe



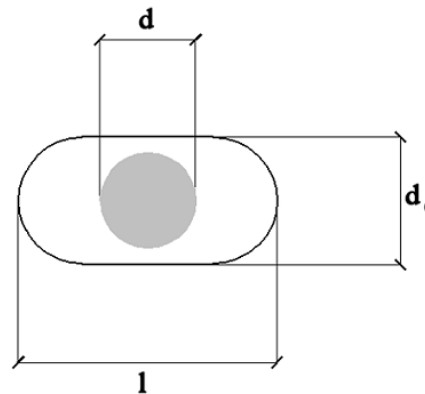
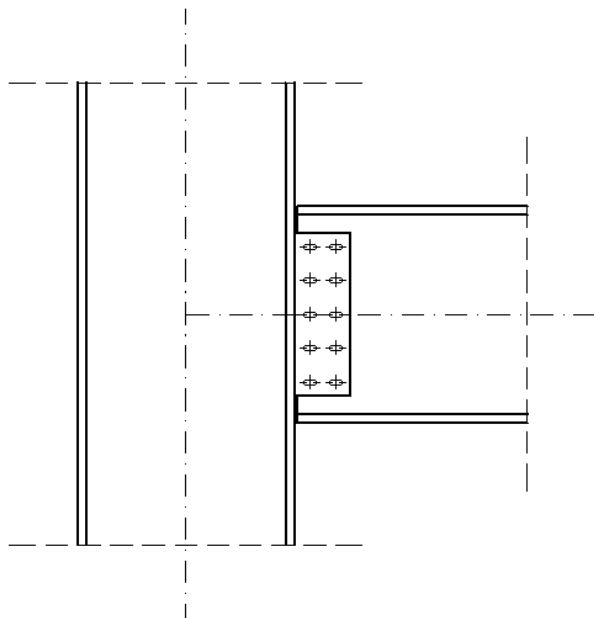
Rys: Autor

Musimy przewidzieć niewielki **odstęp** między belką i słupem. Pozwoli ona na skompensowanie imperfekcji dodatnich (belka trochę dłuższa niż w projekcie); oczywiście belka może być też trochę krótsza (imperfekcje ujemne).

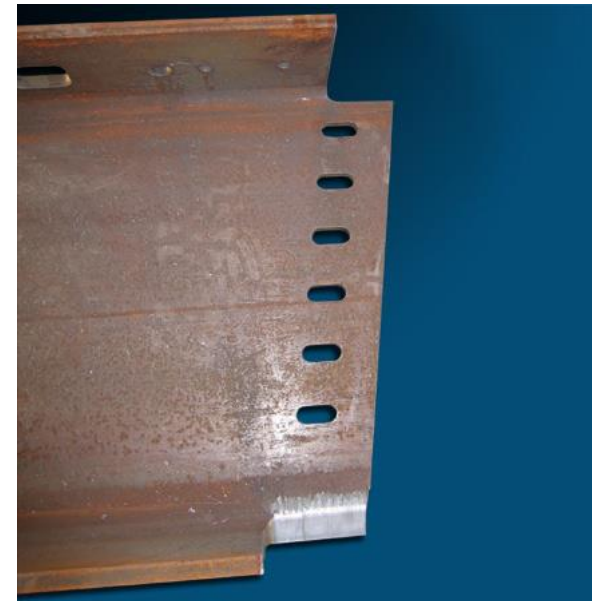
Zgodnie z wynikami eksperymentów możemy założyć, że prawie idealnym przegubem jest węzeł śrubowy:

- Śruby wyłącznie na środku;
- Otwory owalne na śruby.

→ #14 / 42



Rys: Autor

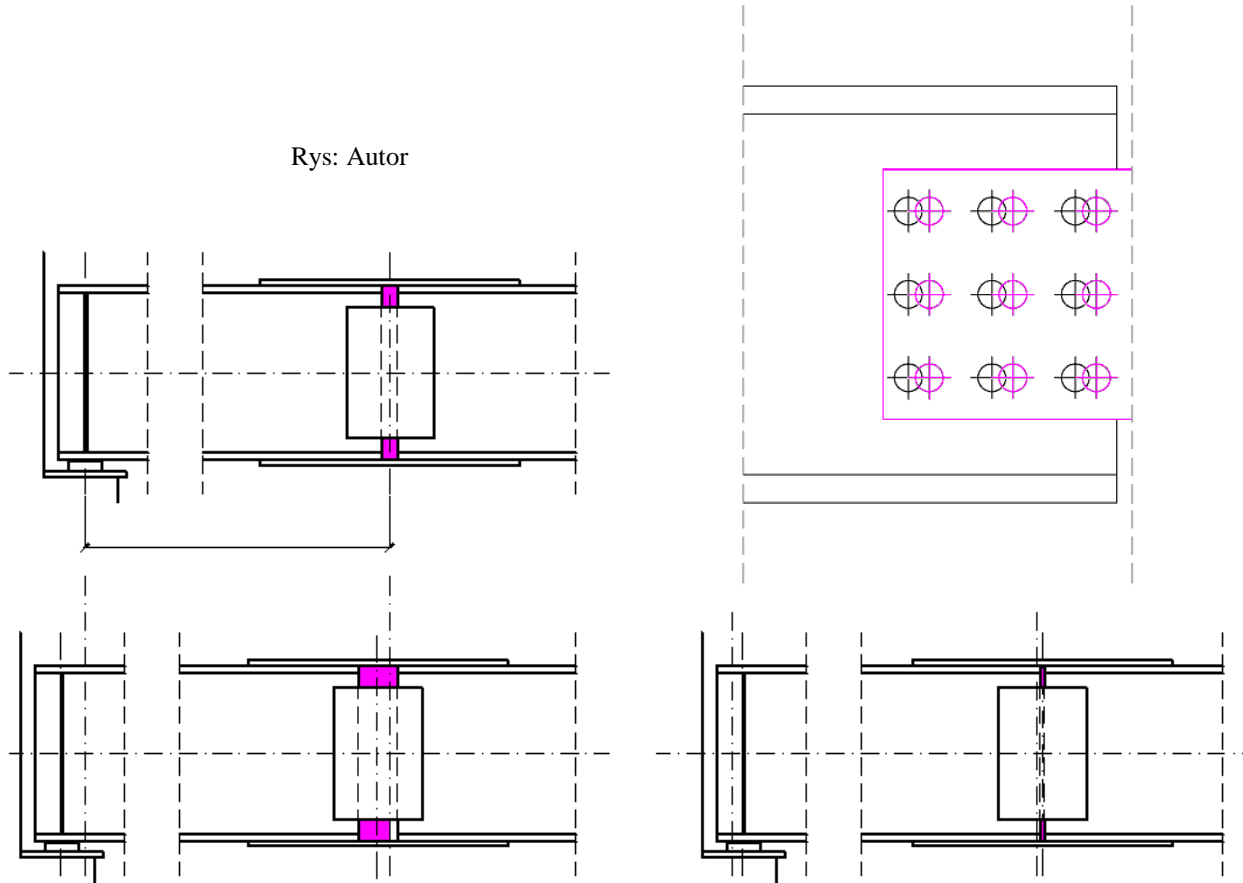


Rys: tekla-detailed-structural-fabrication.com

Oczywiście otwory owalne służą przede wszystkim do kompensacji imperfekcji podczas wznoszenia konstrukcji. Stosowane wówczas rozwiązania techniczne zmierzają w kierunku opracowania sztywnego węzła.

Tym niemniej, inne rozwiązania pozwalają uzyskać w ten sposób węzeł przegubowy.

Rys: Autor

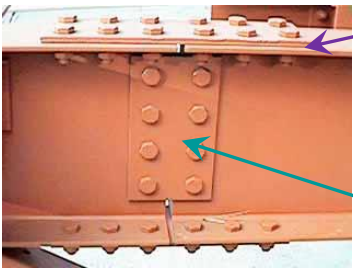


→ #14 / 43

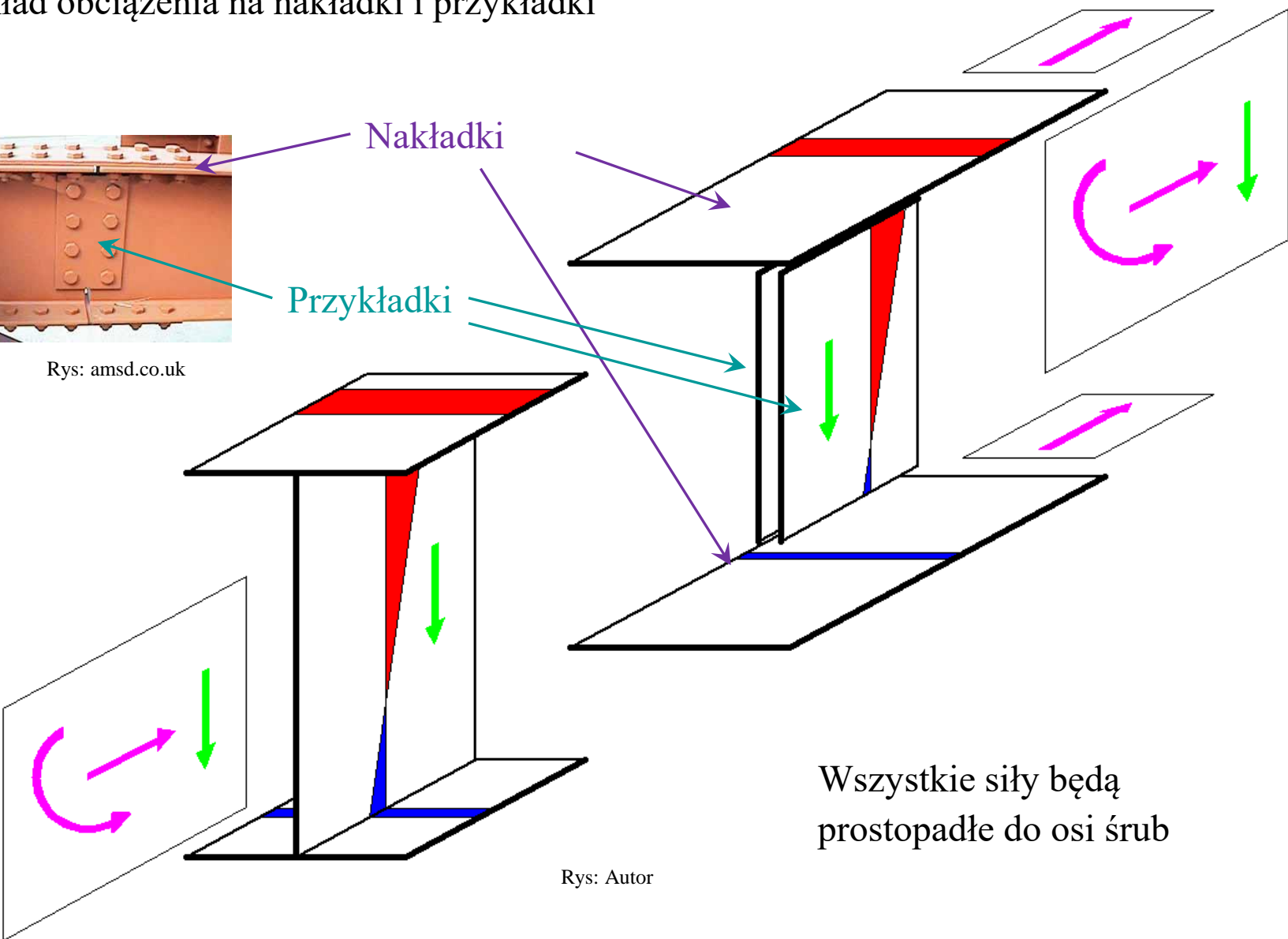


Rys: tekla-detailed-structural-fabrication.com

Rozkład obciążenia na nakładki i przykładki



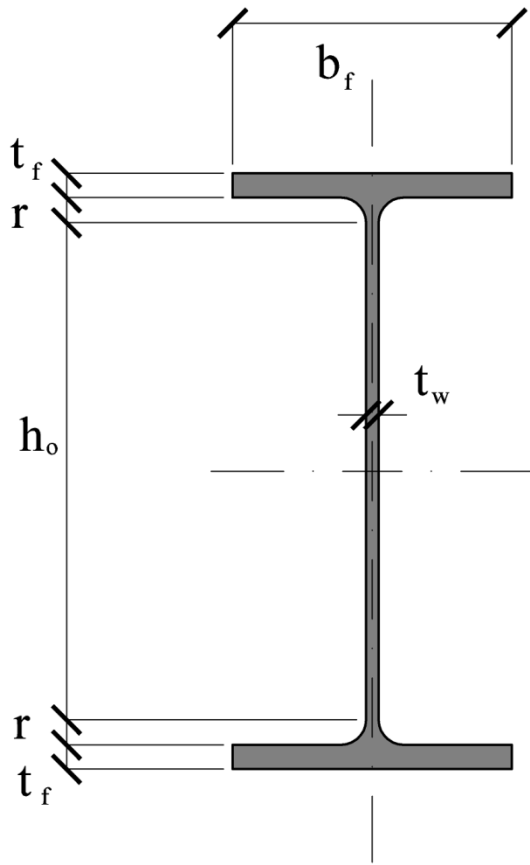
Rys: amsd.co.uk



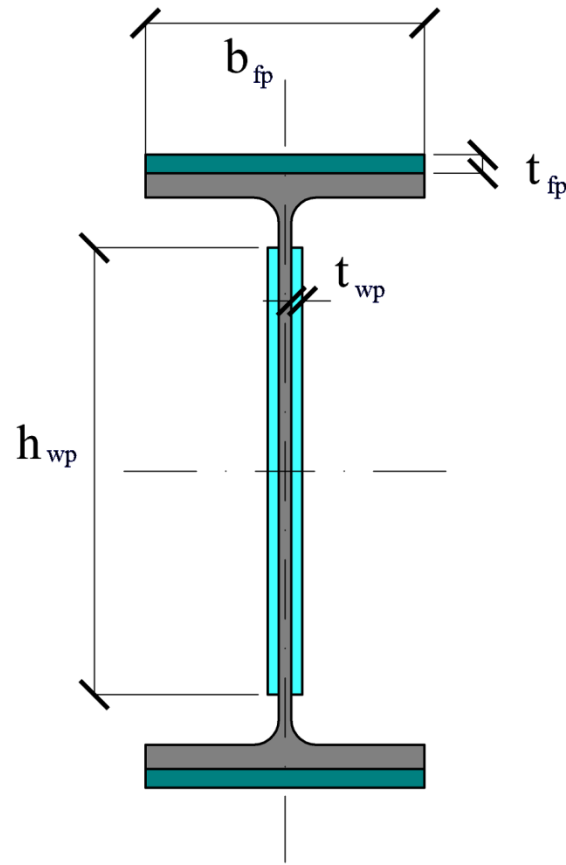
Wszystkie siły będą prostopadłe do osi śrub

Rys: Autor

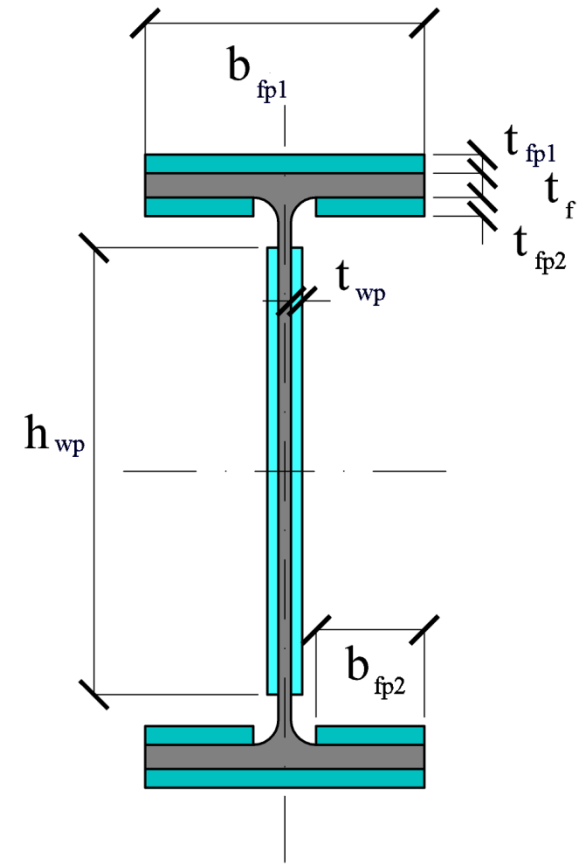
Założenia wstępne na temat geometrii



Rys: Autor



I metoda, II metoda



III metoda, IV metoda

	Brak wpływu niskich temperatur	Istotny wpływ niskich temperatur
Dwie różne metody wstępnego zweryfikowania przyjętej geometrii	I metoda	III metoda
	II metoda	VI metoda

Metoda I i III:

$$0,8 J_{I, y} \leq J_{fp, y}$$

$$J_{fp, y} \geq 10 J_{wp, y}$$

Metoda II i IV:

$$J_{f, y} \approx J_{fp, y}$$

$$J_{w, y} \approx J_{wp, y}$$

Indeksy:

I – cały przekrój dwuteownika

f – charakterystyki geometryczne tylko półek

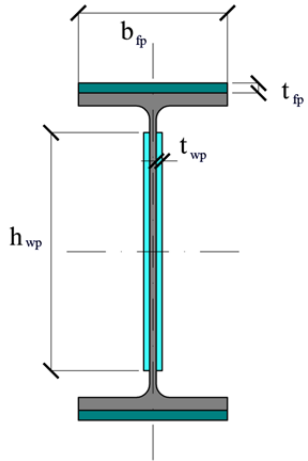
w – charakterystyki geometryczne tylko środka

fp – charakterystyki geometryczne obu / sześciu nakładek

wp – charakterystyki geometryczne obu przykładek

Założenia wstępne:

Metoda I i III (po jednej nakładce na każdej półce)



Rys: Autor

$$b_{fp} = b_f$$

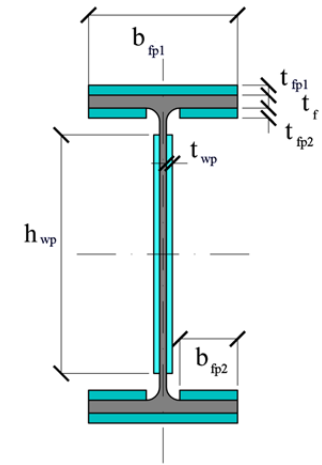
$$t_f \leq t_{fp} \leq 2t_f$$

$$t_{wp} \leq t_w \leq 2t_{wp}$$

$$t_{wp} \geq 8 \text{ mm}$$

$$h_{wp} \approx 0,8 h_0$$

Metoda II i IV
(jedna nakładka zewnętrzna $_{fp1}$ i dwie wewnętrzne $_{fp2}$ dla każdej półki)



$$b_{fp1} = b_f$$

$$b_{fp2} = (b_f - 2r - t_w) / 2$$

$$t_{fp2} = t_{max}$$

$$b_{fp1} t_{fp1} (t_f + t_{fp1}) / 2 = 2 b_{fp2} t_{fp2} (t_f + t_{fp2}) / 2$$

$$t_{wp} \leq t_w \leq 2t_{wp}$$

$$t_{wp} \geq 8 \text{ mm}$$

$$h_{wp} \approx 0,8 h_0$$

Wpływ niskiej temperatury: zbyt grube blachy są nieakceptowalne

Steel grade	Sub-grade	KV		Reference temperature T_{Ed} [°C]																	
		at T [°C]	J_{min}	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20
				$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$							$\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$							$\sigma_{Ed} = 0$			
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	80
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	110
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	150
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30	125	110	95	80
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40	165	145	125	110
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55	200	190	165	140
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70	200	200	190	160
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	10	65	55	45	40	30	25	25	110	95	80	70	
	J0	0	27	60	50	40	35	30	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	90

EN 1993-1-10 tab 2.1

Jeśli:

- konstrukcja jest narażona na wpływ niskich temperatur (brak izolacji termicznej) oraz
- grubość nakładki t_{fp} zgodnie z założeniami wstępnymi ($\rightarrow \#t / 16$, metoda I lub II) jest zbyt duża w porównaniu do wartości akceptowalnej (EN 1993-1-10 tab. 2.1) to należy przyjąć metodę III lub IV.

Redystrybucja globalnych sił przekrojowych (M_{Ed} , N_{Ed} , V_{Ed}) pomiędzy nakładki i przykładki:

$$M_{fp} = M_{Ed} J_{1,y} / (J_{1,y} + J_{2,y})$$

$$M_{wp} = M_{Ed} J_{2,y} / (J_{1,y} + J_{2,y})$$

$$N_{fp} = N_{Ed} A_1 / (A_1 + A_2)$$

$$N_{wp} = N_{Ed} A_2 / (A_1 + A_2)$$

$$V_{fp} = 0$$

$$V_{wp} = V_{Ed}$$

Charakterystyka	Metoda A	Metoda B
$A_1 =$	A_{fp}	A_f
$A_2 =$	A_{wp}	A_w
$J_{1,y} =$	$J_{fp,y}$	$J_{f,y}$
$J_{2,y} =$	$J_{wp,y}$	$J_{w,y}$

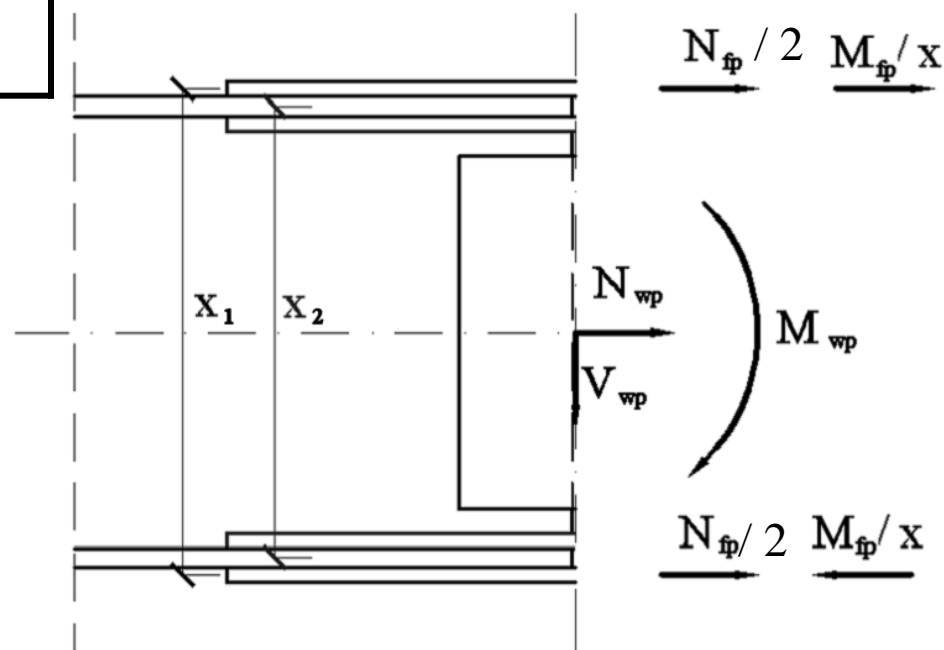
Siła osiowa na nakładkach – ramię działania dla pary sił:

Metoda	A	B
I	$x = x_1$	$x = x_2$
II	$x = x_1$	$x = x_2$
III	$x = x_2$	$x = x_2$
IV	$x = x_2$	$x = x_2$

$$x_1 = h + t_{fp} / 2 + t_f / 2$$

$$x_2 = h - t_f / 2 - t_f / 2$$

Te same zwroty wektorów



$F_{fp} = \max$ (te same zwroty ; przeciwne zwroty) =

$$= \max (F_{fp, top} ; F_{fp, bottom}) =$$

$$= |N_{fp}| / 2 + |M_{fp}| / x$$

Rys: Autor

Przeciwne zwroty wektorów

Węzeł zakładkowy spawany, dodatkowe założenia

Zalecenie:

$$b_1 \approx b - 30 \text{ mm}$$

$$b_2 \approx b + 30 \text{ mm}$$

$$t_1 = t_2 b_2 / b_1$$

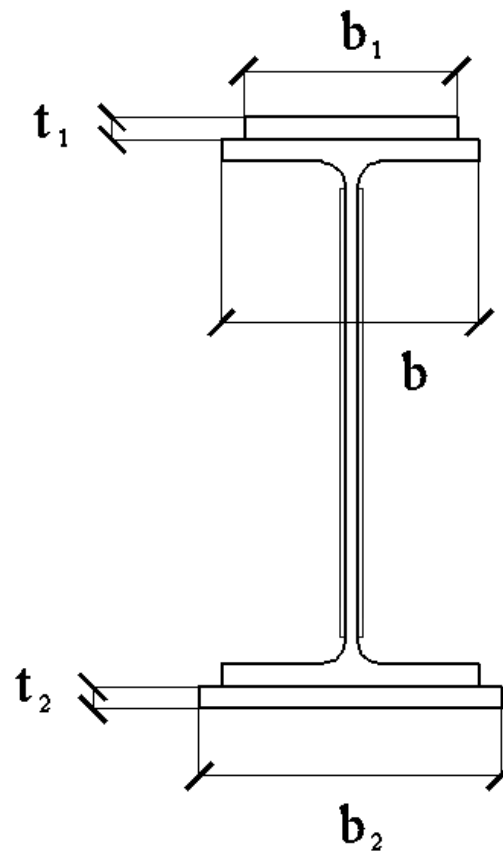
Dla redystrybucji sił przekrojowych:

$$t = (t_1 + t_2) / 2$$

$$b = (b_1 + b_2) / 2$$

$$A_{fp} = t b$$

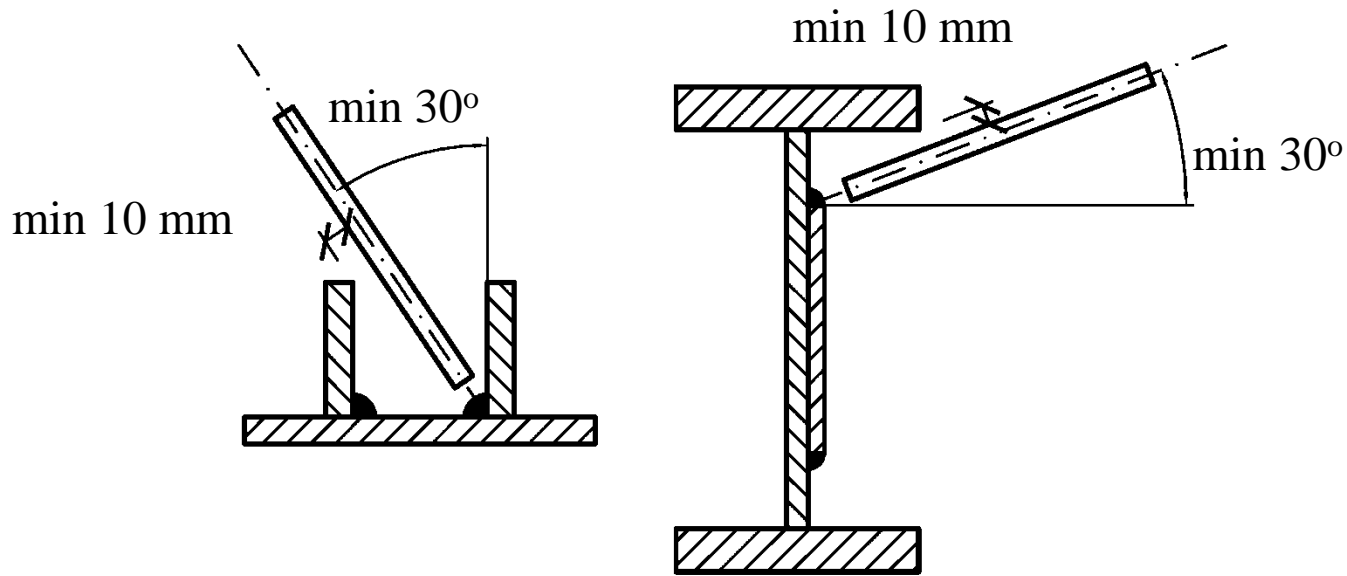
$$J_{fp} = 2 [b t^3 / 12 + b t (h / 2)^2]$$



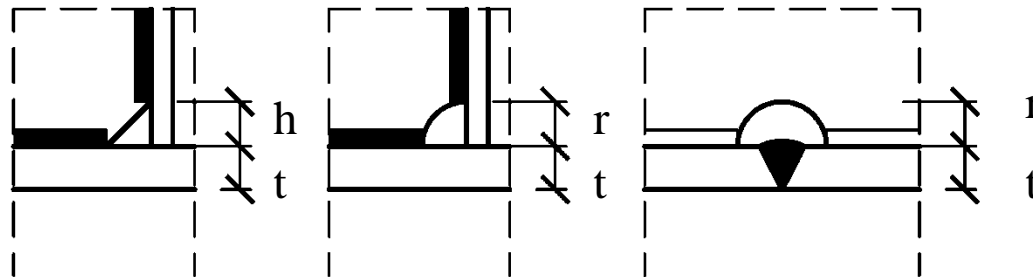
Rys: Autor

Zróżnicowana szerokość blach to efekt ergonomii procesów spawania: najlepszą pozycją elektrody podczas spawania jest kierunek w dół pod kątem 30° – 60°.

→ #16 / 30



Rys: Autor

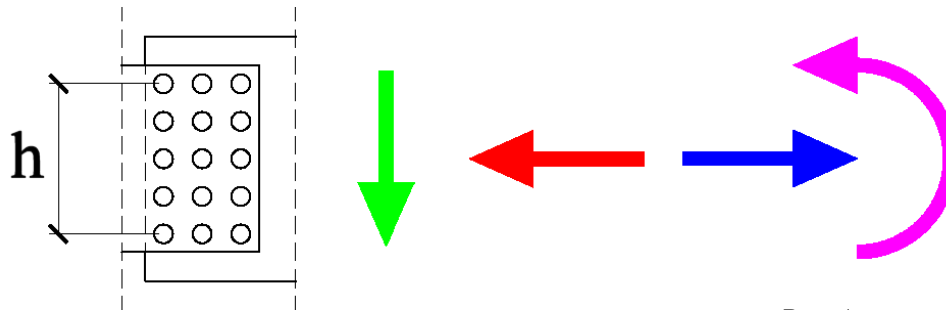


$h \geq 25 \text{ mm}; h \geq 3 t$

$r \geq 25 \text{ mm}; r \geq 3 t$

Założenia wstępne na temat geometrii różnych węzłów

Ilość śrub, wymiary blach



Rys: Autor

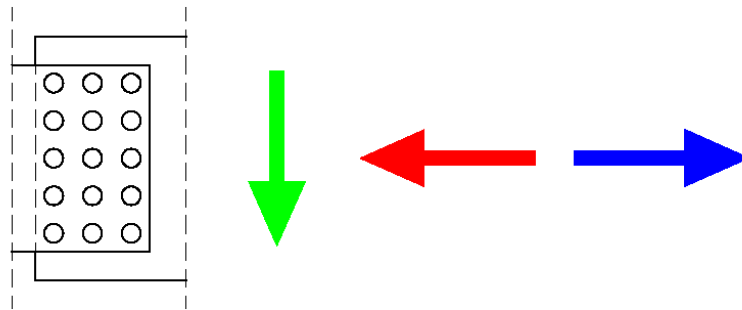
$$n = \max [5,2 M_{Ed} / (h F_{Rd}) ; 4]$$

F_{Rd} = nośność na ścinanie dla kategorii A i B; nośność na poślizg dla kategorii C

Jeśli $M_{Ed} = 0$, n może być mniejsze niż 4, ale nie mniejsze niż 2.

Węzeł zakładkowy – równomierne obciążenie wszystkich śrub;
Siła działająca na pojedynczą śrubę = siła globalna / ilość śrub;
Nośność łącznika i nośność węzła możemy liczyć niezależnie od siebie.

Rys: Autor



$$F_{V, \text{bolt}} = F_V / n$$

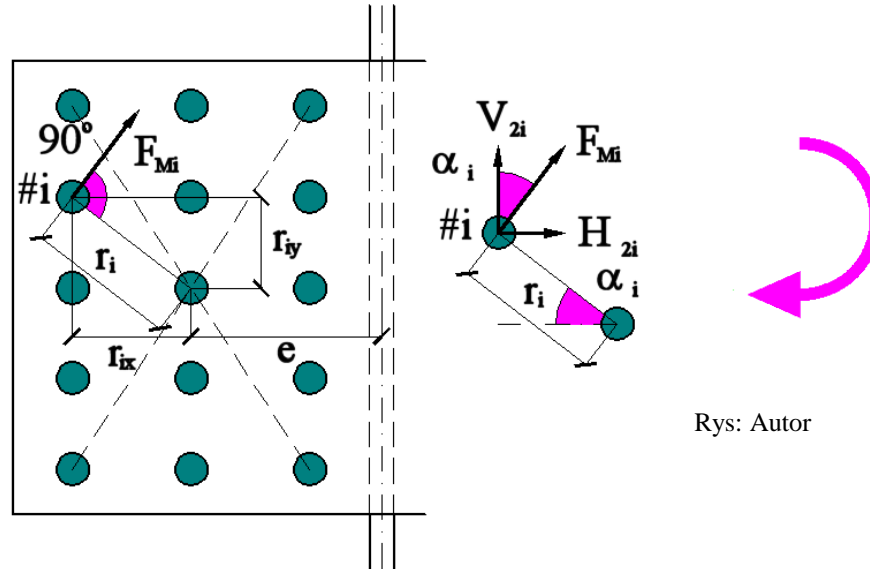
$$F_{H, \text{bolt}} = F_H / n$$

Węzeł zakładkowy – moment obciąża śruby nierównomiernie;

Siła działająca na śrubę #1 jest proporcjonalna do odległości śruby od środka ciężkości grupy śrub;

Środek ciężkości grupy śrub \neq środek ciężkości blachy;

Nośność łącznika i nośność węzła możemy liczyć niezależnie od siebie.



Rys: Autor

$$F_i = \alpha r_i ; F_i \perp r_i \quad (\text{na podstawie doświadczeń i eksperymentów})$$

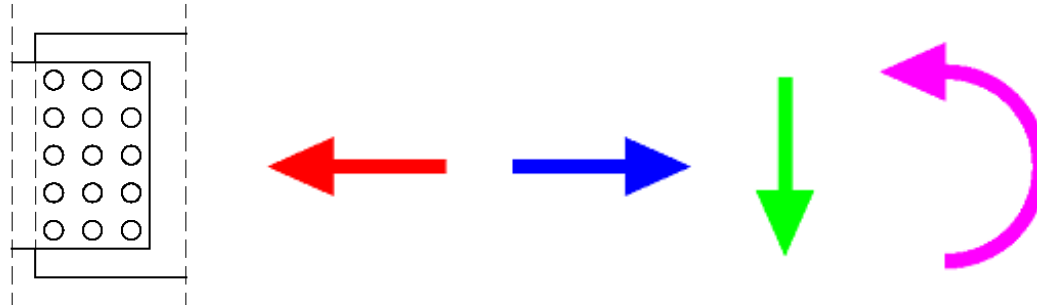
$$M_i = F_i r_i = \alpha (r_i)^2$$

$$M_{Ed} = \sum M_i = \alpha \sum (r_i)^2 \rightarrow \alpha = M_{Ed} / \sum (r_i)^2$$

$$F_i = \alpha r_i = M_{Ed} r_i / \sum (r_i)^2 \rightarrow F_{V, M, bolt} = F_i \sin \alpha ; F_{H, M, bolt} = F_i \cos \alpha$$

Węzeł zakładkowy – równoczesne działanie sił i momentu;
Obciążenie daje składową poziomą i pionową;
Nośność łącznika i nośność węzła możemy liczyć niezależnie od siebie.

Rys: Autor



$$F_{V, \text{total, bolt}} = F_{V, \text{bolt}} + F_{V, M, \text{bolt}}$$

$$F_{H, \text{total, bolt}} = F_{H, \text{bolt}} + F_{H, M, \text{bolt}}$$

Analiza najsłabszego ognia w węźle:

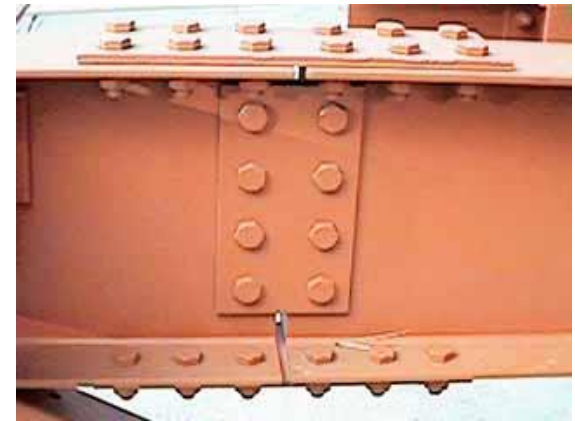
Siły działające na jedną śrubę są porównywane z nośnością tej śruby na ścinanie. Jeśli nośność jest zbyt mała, należy wziąć pod uwagę większą średnicę śruby lub wyższą klasę śruby.

Siły działające na jedną śrubę są porównywane z nośnością blachy na docisk. Jeśli nośność jest zbyt mała, należy wziąć pod uwagę grubszą blachę lub inne rozmieszczenie śrub.

Siły działające na jedną śrubę są porównywane z nośnością na poślizgi. Jeśli nośność jest zbyt mała, należy wziąć pod uwagę wyższy współczynnik tarcia lub większą siłę sprężającą (dla większego sprężenia konieczna jest większa średnica śruby lub wyższa klasa śruby).

Siła sprężająca jest porównywana z nośnością na przeciągnięcie łba. Jeśli nośność jest za mała, należy przyjąć grubszą blachę.

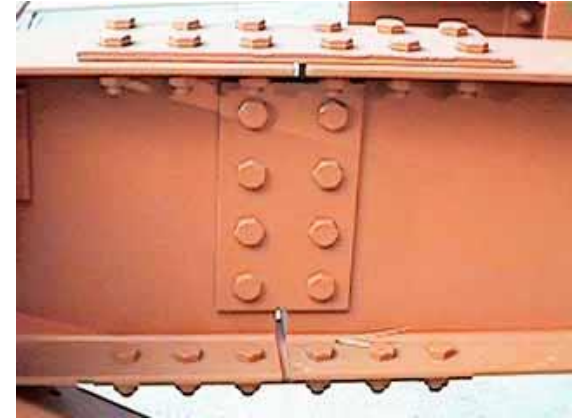
Siły globalne są porównywane z nośnością przekroju netto / na rozerwanie blokowe. Jeśli nośność jest zbyt mała, należy wziąć pod uwagę grubsze blachy lub mniejsze średnice otworów (mniejsza średnica otworów oznacza mniejszą wytrzymałość śrub; w tym przypadku należy zastosować wyższą klasę).



Rys: amsd.co.uk

Wiele warunków do sprawdzenia. Mogą one łatwo być podzielone na grupy

- nośność połączenia (nośność trzpienia na ścinanie);
- nośność śruby w kontakcie z elementami (docisk, przeciąganie łąba);
- nośność elementu bez kontaktu ze śrubą (poślizg, netto, rozerwanie blokowe).

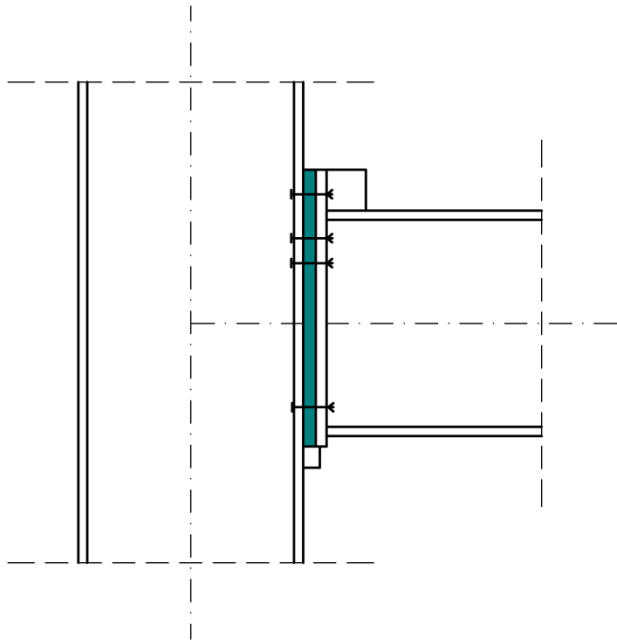


Rys: amsd.co.uk

Dla każdego warunku bardzo łatwo jest wskazać najsłabszy element i bardzo łatwo znaleźć sposób na zwiększenie jego nośności.

Węzły doczołowe

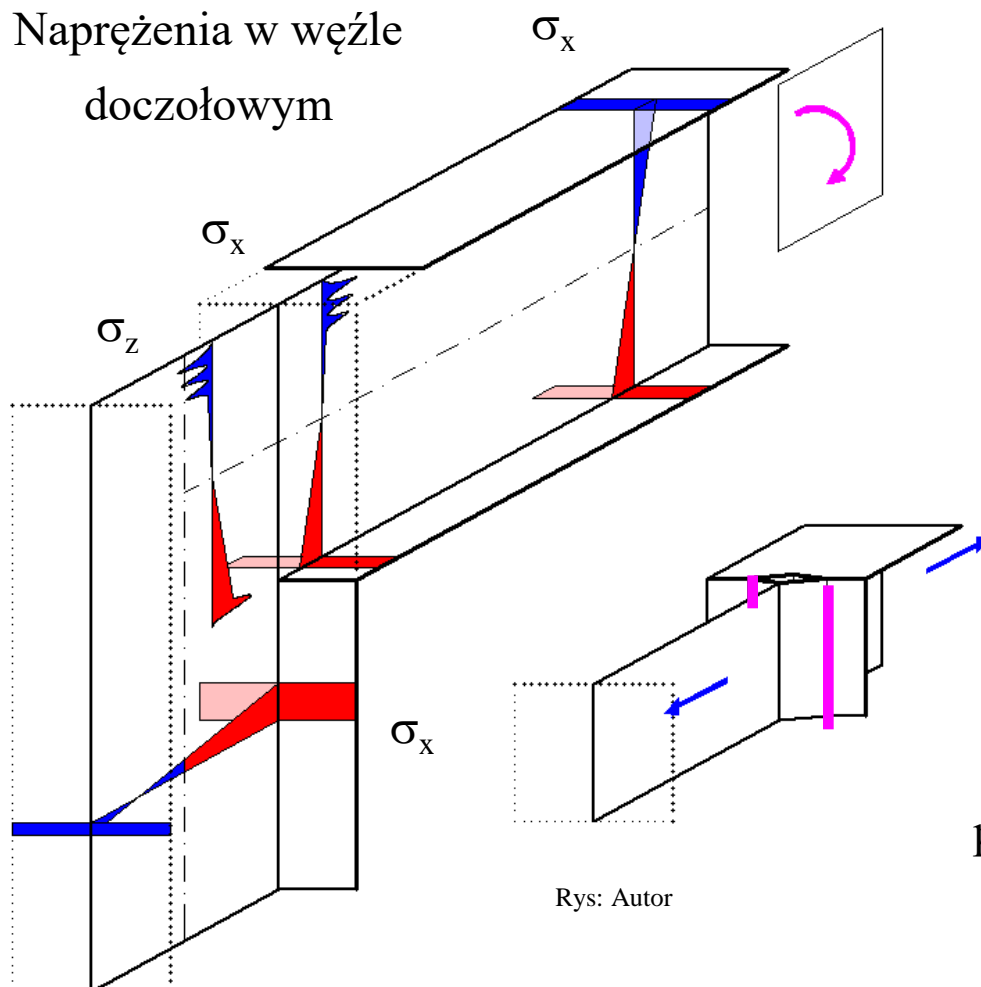
Rys: Autor



Podstawowy wymóg dla tego typu węzłów: pełny kontakt między słupem (półką) a belką (blachą czołową). Imperfekcje „+” są niwelowane przez wypełnienie szczeliny **przekładkami**. Grubość przekładek jest ustalana na montażu, po pomierzeniu rzeczywistej odległości między słupami i rzeczywistej długości belki.

Zalecenie dla węzła doczołowego: belki powinny być nieco krótsze niż teoretyczna odległość między słupami, aby skompensować niedoskonałość „-” podczas montażu słupa.

Naprężenia w węźle doczołowym



Rys: Autor

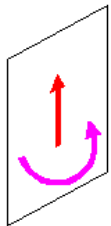
W węźle wystąpi pełen zestaw sił przekrojowych: M_{Ed} , N_{Ed} , V_{Ed} .

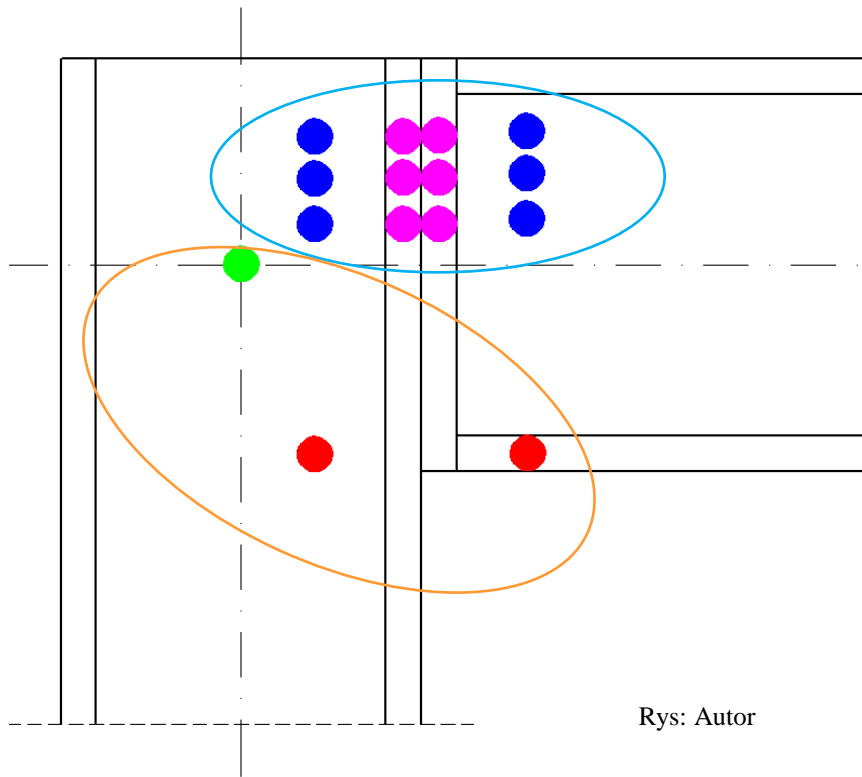
Siła osiowa jest brana pod uwagę jako wytyczna dla dobrania przekroju belki: EN 1993-1-8 6.2.7.1 (2) nie może przekroczyć 5% nośności belki; wówczas można ją pominąć w analizie.

Siła ścinająca z rygla jest tradycyjnie przykładana tylko do strefy ściskanej węzła.

→ #15 / 15

Siła ścinająca w słupie nie ma istotnego znaczenia dla węzła.





Rys: Autor

Różne nośności dla różnych rzędów śrub:

- Lokalne rozciąganie środnika słupa; I, II, III;
- Lokalne zginanie półki słupa; I, II, III;
- Lokalne zginanie blachy czołowej; I, II, III;
- Lokalne rozciąganie środnika belki; I, II, III;

Taka sama nośność dla wszystkich rzędów śrub:

- Lokalne ściskanie półki belki;
- Lokalne ściskanie poprzeczne środnika słupa w warunkach dużego ściskania osiowego;
- Lokalne ścinanie środnika słupa jako wtórny efekt na styku strefy ścisanej i rozciąganej;

Strefa rozciągana

Strefa ścinana jest traktowana jako część strefy rozciąganej.

→ #15 / 16

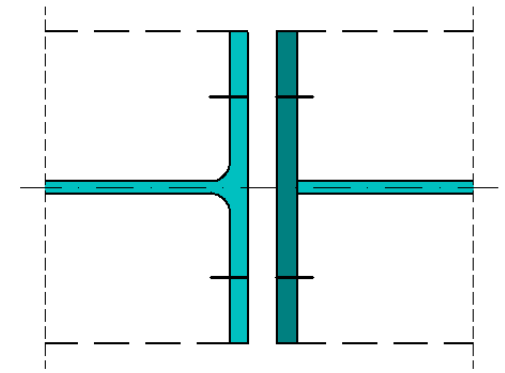
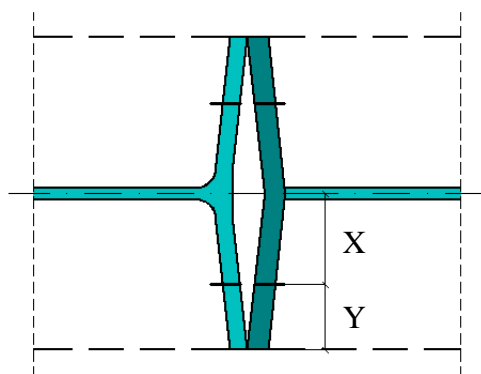
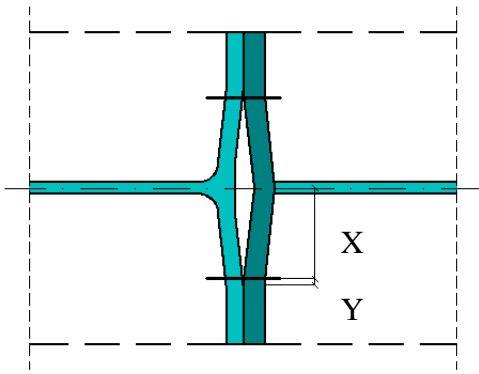
Model 1 – całkowite uplastycznienie blachy / pasa

Model 2 – częściowe uplastycznienie blachy / pasa ze zniszczeniem śrub

Model 3 – zniszczenie śrub

Cienka blacha / pas słupa – mechanizm dźwigni

Gruba blacha / pas słupa



Siła w śrubie = P

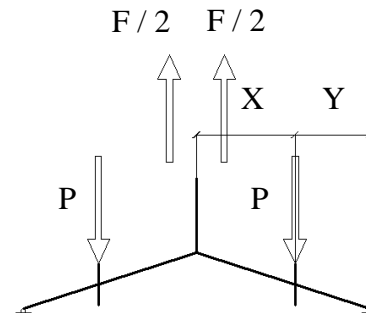
Całkowita siła w strefie rozciąganej = F

$$P Y = (F / 2) (X + Y)$$

→ #15 / 17

$$P = (F / 2) (X + Y) / Y$$

$$(X + Y) / Y > 2 \rightarrow P > F \quad (!!!)$$



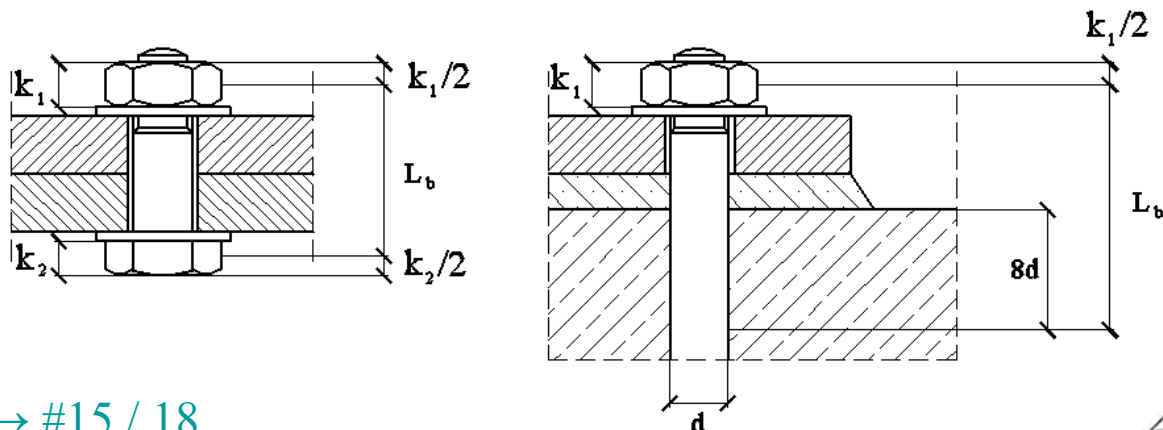
Siła w śrubie = P
Całkowita siła w strefie rozciąganej = F

$$P = F / 2$$

Kiedy tak się dzieje?

Rys: Autor

EN 1993-1-8 tab. 6.2



→ #15 / 18

$L_b \leq L_b^* \rightarrow$ Efekt dźwigni

$L_b > L_b^* \rightarrow$ Brak efektu dźwigni

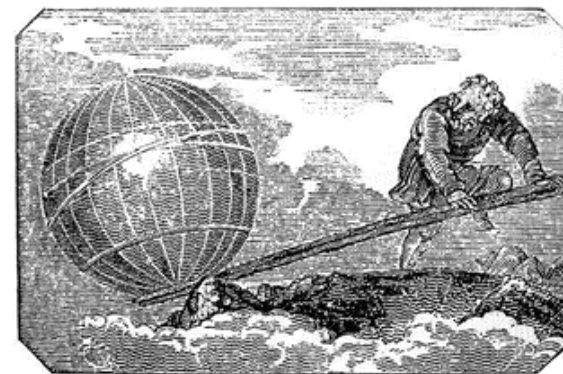
$$L_b^* = 8,8 \text{ m}^3 A_s / (\sum l_{\text{eff}} t_f^3)$$

A_s – pole przekroju śruby w strefie nagwintowanej

t_f – grubość najcieńszej blachy

$$m \rightarrow \#t / 6$$

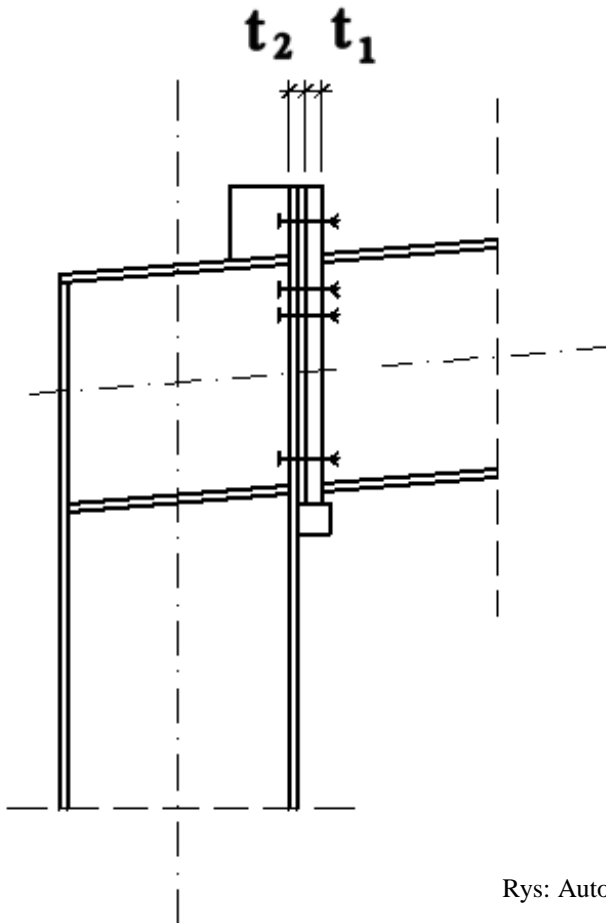
$$\sum l_{\text{eff}} \rightarrow \#t / 23 - 25, \#t / 27$$



Rys: physics.weber.edu

Dajcie mi punkt podparcia a poruszę Ziemię

Węzeł doczołowy – grubość blachy czołowej (t_1) i sumaryczna grubość półki oraz blachy wzmacniającej ($t_2 = t_{\text{półka}} + t_{\text{blacha}}$)



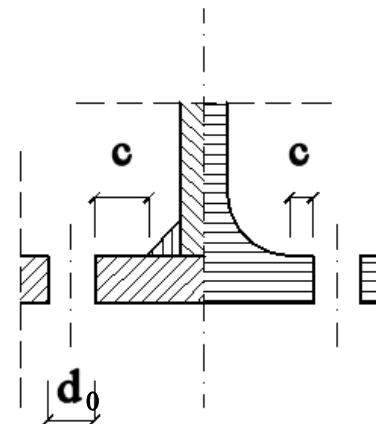
$$\min(t_1 ; t_2) \geq t$$

Kategoria D:

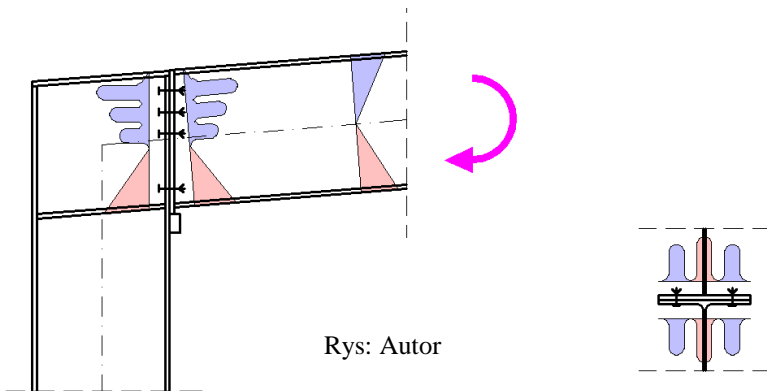
$$t = 2,0 \sqrt{\{c F_{t,Rd} / [f_y (2c + d_0)]\}}$$

Kategoria E:

$$t = 1,67 d \sqrt[3]{\{f_{ub} / 1\,000 \text{ [MPa]}\}}$$

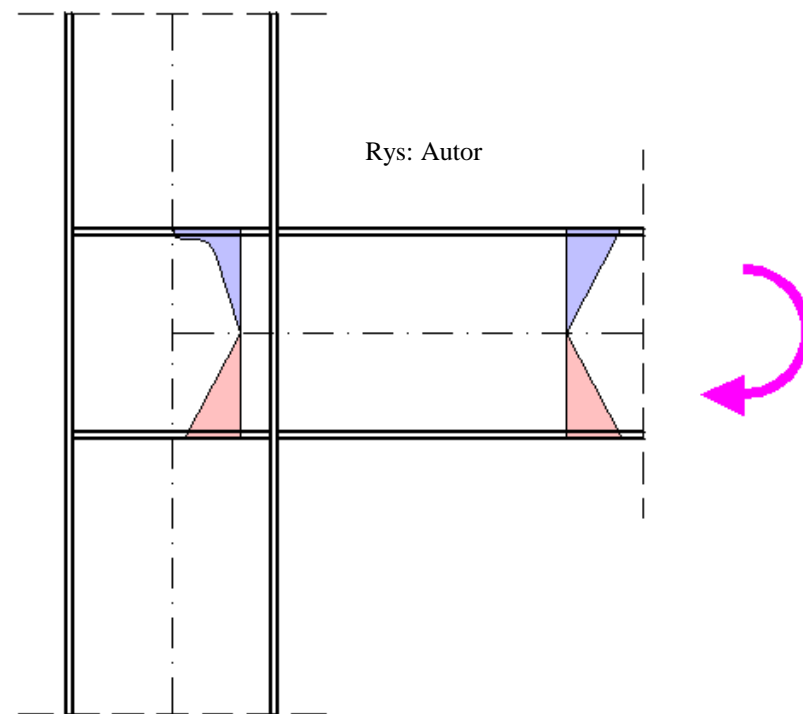


Rys: Autor



Rys: microstran.com.au

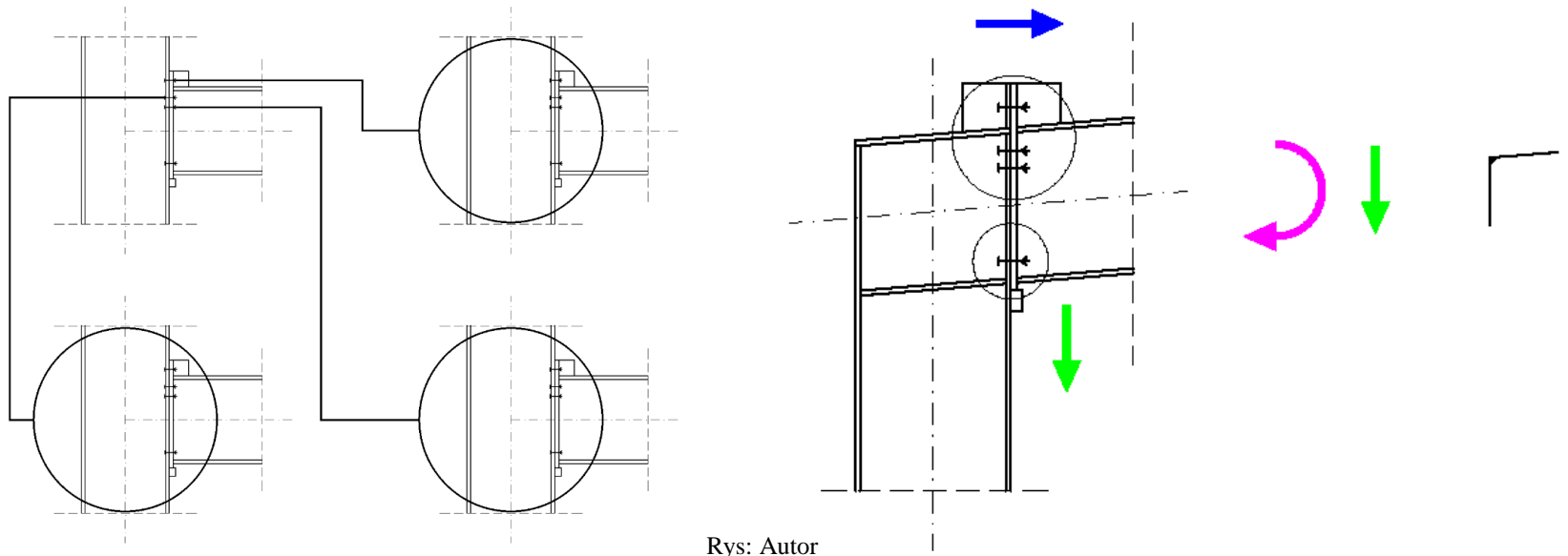
Węzeł spawany – inna forma lokalnej koncentracji naprężeń, niż dla węzła na śruby.



Założenia ogólne przy obliczaniu nośności węzeł doczołowego:

Dla zginania ze ścinaniem:

- zginanie jest przenoszone jako para sił przez rozciąganie i ściskanie węzła;
- ścinanie przenoszą śruby w części ściskanej;
- nośność na zginanie jest liczona na podstawie nośności zastępczych kolejnych szeregów śrub;
- nośność na ścinanie zależy od kategorii (D / E);

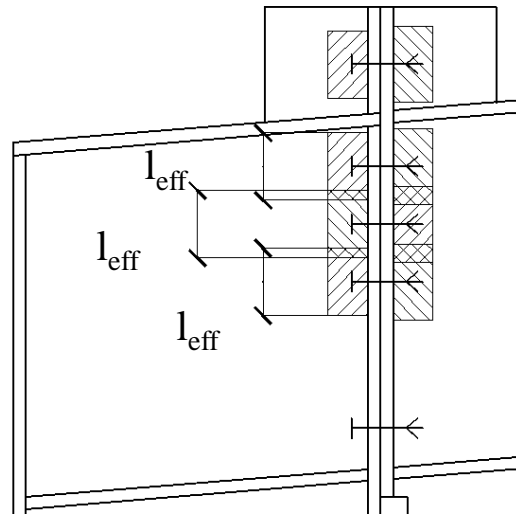


Rys: Autor

Model obliczeniowy: efektywny obszar koncentracji naprężeń - długość efektywna

Półka, blacha $\rightarrow l_{\text{eff}}$

Środek $\rightarrow b_{\text{eff}}$ (inny symbol, ale ten sam sens i sposób obliczenia jak dla półki / blachy l_{eff})



\rightarrow #15 / 19

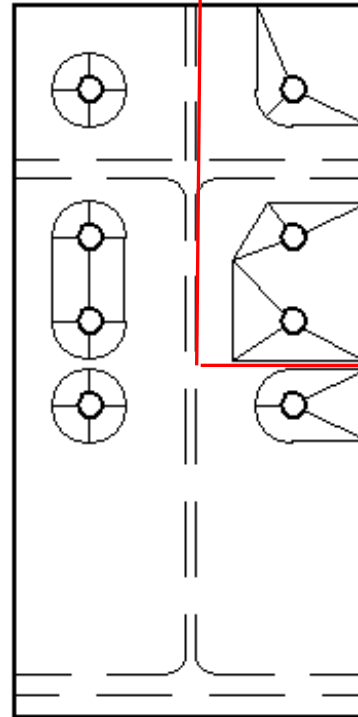
Rys: Autor

Jest możliwe, że strefy efektywne sąsiednich śrub nałożą się na siebie. W takim przypadku należy brać pod uwagę Σl_{eff} , a nie pojedyncze l_{ef} .

Σl_{eff} jest ważne tylko dla sprawdzenia nośności, l_{ef} jest ważne zarówno dla nośności jak i sztywności.

Załamanie blachy / półki podczas zginania może przyjąć jedną z dwu form:

Zniszczenie w mechanizmie niekołowym



Niekołowe mechanizmy zniszczeń

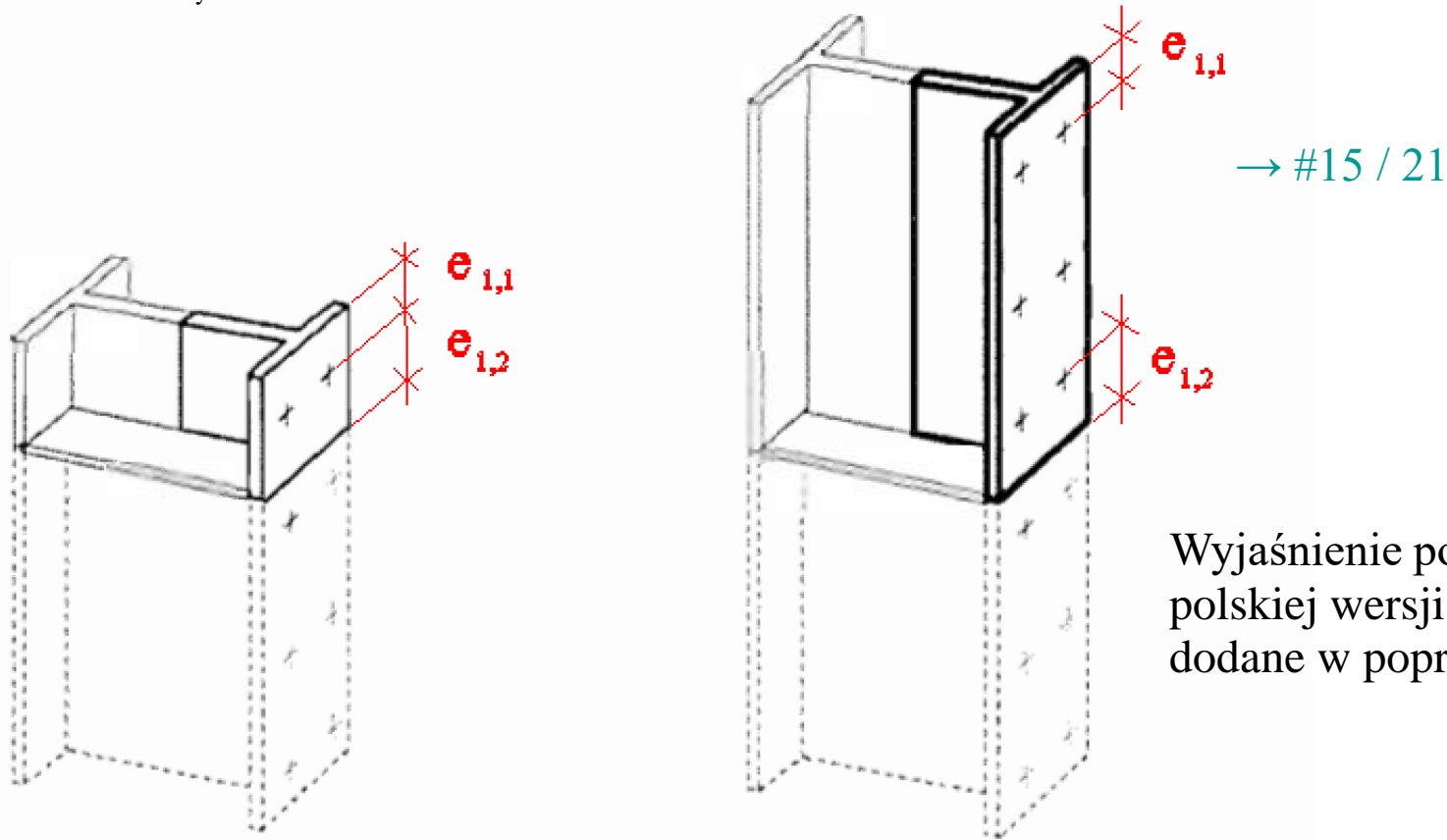
→ #15 / 20

Rys: Autor

Dwa dwu różnych mechanizmów długości l_{eff} są różne. Należy policzyć oba przypadki l_{eff} i w dalszych obliczeniach uwzględnić mniejszą z nich.

$e_{1,1}$ – Odległość od osi śruby do końca półki słupa

Rys: Autor



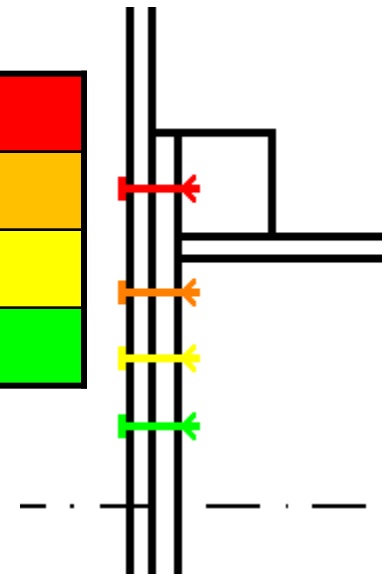
Wyjaśnienie pominięte w polskiej wersji Eurokodu, dodane w poprawce.

$e_{1,2}$ – najmniejsza odległość od osi śruby do najbliższego żebra na słupie

Informacje podane w Eurokodzie: (nazwa rzędu śruby) ↔ (położenie) nie są do końca jasne; literaturze spotyka się różne interpretacje

Analiza literatury i Eurokodu wskazuje na istnienie czterech różnych obciążonych rzędów śrub. Dla tych czterech rzędów są podane najczęściej spotykane interpretacje opisów z EN 1993-1-8:

Najwyższy szereg, ponad półką belki
Pierwszy pod półką belki
Kolejny pod półką belki
Najniższy pod półką belki



Najczęściej w grę wchodzi jedno z dwu rozwiązań:

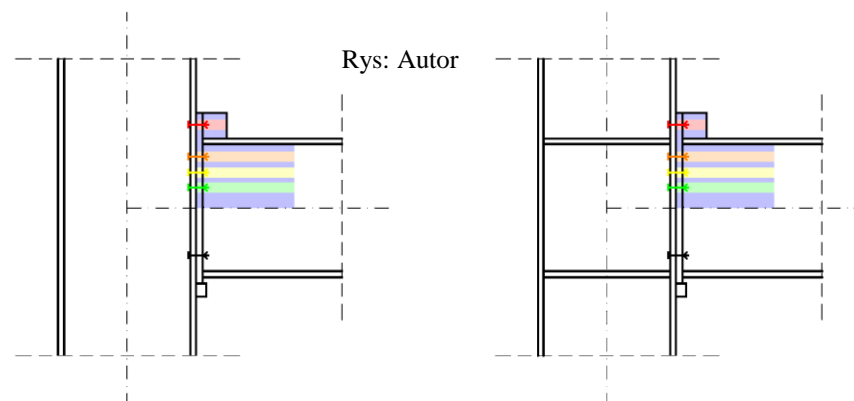


→ #15 / 22

Rys: Autor

Blacha czołowa / średnik belki

EN 1993-1-8 tab. 6.6

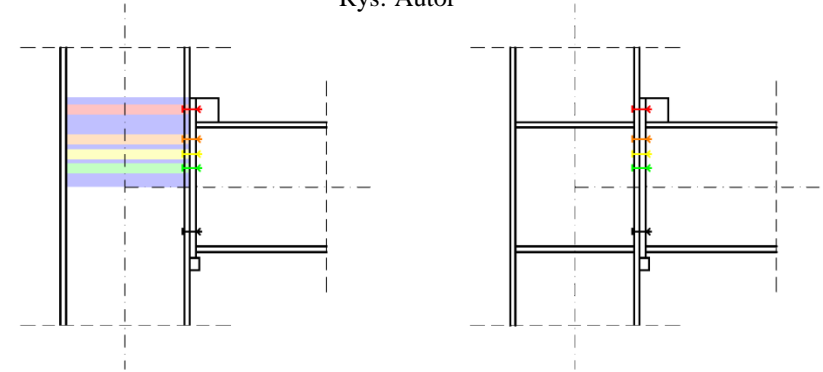


Szereg śrub	Szeregi rozważane indywidualnie		Grupy szeregów	
	Kołowy $l_{\text{eff, cp}}$	Niekołowy $l_{\text{eff, nc}}$	Kołowy $l_{\text{eff, cp}}$	Niekołowy $l_{\text{eff, nc}}$
Szereg śrub poza pasem rozciągającym	$\min (2\pi m_x ; \pi m_x + w ; \pi m_x + 2e)$	$\min (4m_x + 1,25e_x ; e + 2m_x + 0,625e_x ; 0,5b_p ; 0,5w + 2m_x + 0,625e_x)$	-	-
Pierwszy poniżej pasa rozciąganego	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - 2m - 0,625e$
Inny wewnętrzny	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Inny skrajny	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$

→ #15 / 23

Słup nieuźebrowany: średnik i półka

Rys: Autor



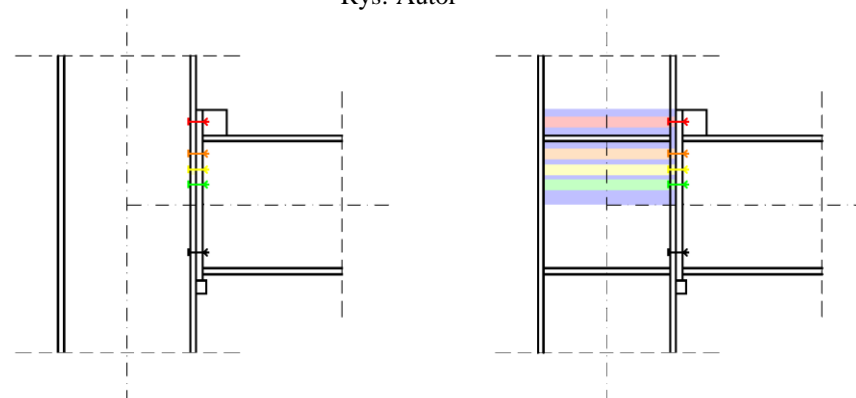
EN 1993-1-8 tab. 6.4

Szereg śrub	Szeregi rozważane indywidualnie		Grupy szeregów	
	Kołowy $l_{\text{eff, cp}}$	Niekołowy $l_{\text{eff, nc}}$	Kołowy $l_{\text{eff, cp}}$	Niekołowy $l_{\text{eff, nc}}$
(Górny) skranjy	$\min(2\pi m ; \pi m + 2e_{1,1})$	$\min(4m + 1,25e ; 2m + 0,625e + 2e_{1,1})$	$\min(\pi m + p ; 2e_{1,1} + p)$	$\min(2m + 0,625e + 0,5p ; e_{1,1} + 0,5p)$
Wewnętrzny	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
(Dolny) skrajny	$\min(2\pi m ; \pi m + 2e_{1,b})$	$\min(4m + 1,25e ; 2m + 0,625e + 2e_{1,b})$	$\min(\pi m + p ; 2e_{1,b} + p)$	$\min(2m + 0,625e + 0,5p ; e_{1,b} + 0,5p)$

Część nie całkiem jasna w Eurokodzie; $e_{1,1}$ według to #15 / 22 ; $e_{1,b}$ można by prawdopodobnie przyjąć jako odległość do dolnego końca słupa lub do węzła na niższym poziomie ramy

Słup uźebrowany: środnik i półka

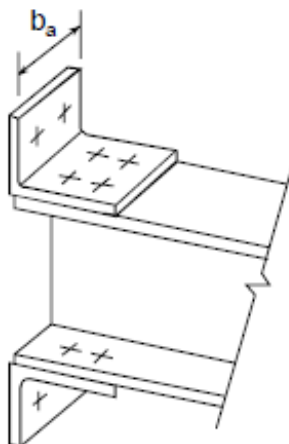
EN 1993-1-8 tab. 6.5



Szereg śrub	Szeregi rozważane indywidualnie		Grupy szeregów	
	Kołowy $l_{eff, cp}$	Niekołowy $l_{eff, nc}$	Kołowy $l_{eff, cp}$	Niekołowy $l_{eff, nc}$
Skrajny w pobliżu żebra	$\min(2\pi m ; \pi m + 2e_{1,1})$	$\min(e_{1,1} + \alpha m - 2m - 0,625e ; \alpha m)$	-	-
W pobliżu żebra	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - 2m - 0,625e$
Inny wewnętrzny	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Inny skrajny	$\min(2\pi m ; \pi m + 2e_{1,2})$	$\min(4m + 1,25e ; 2m + 0,625e + 2e_{1,2})$	$\min(\pi m + p ; 2e_{1,2} + p)$	$\min(2m + 0,625e + 0,5p ; e_{1,2} + 0,5p)$

Zalecenie z literatury

Nakładka z kątowników



Rys: EN 1993-1-8 fig. 6.12

$$l_{\text{eff}} = b_a / 2$$

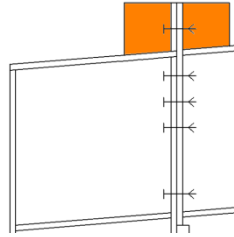


Rys: Behaviour of stiffened flange cleat joints, D. Skejic, D. Dujmovic, D. Beg

→ #15 / 27

Nieformalne zalecenie dotyczące żeberek

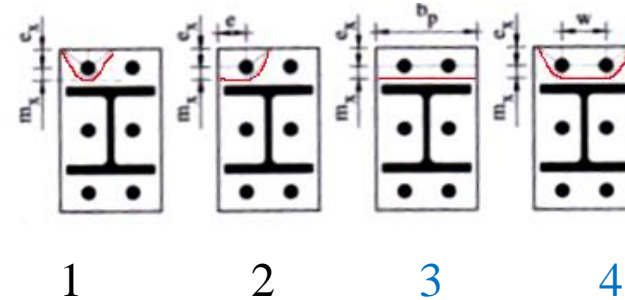
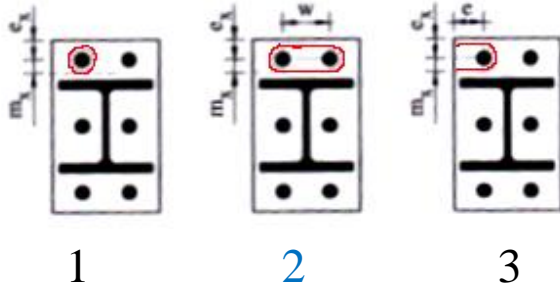
→ #15 / 26



Rys: Autor

Mechanizmy kołowe

Mechanizmy niekołowe



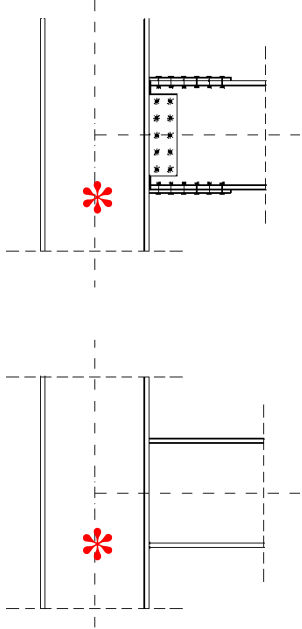
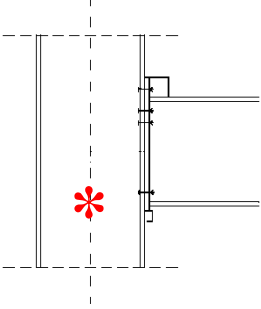
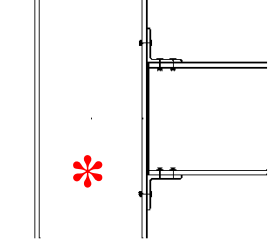
Rys: J. Goczek, Ł. Supeł, M. Gajdzicki, Przykłady obliczeń konstrukcji stalowych, Politechnika Łódzka 2011

Podane w tabeli wzory na efektywne długości odnoszą się do konkretnych mechanizmów zniszczenia. Wzmocnienie blachy nad półką belki za pomocą pionowego żebrza (→ #15 / 4) czyni **drugi mechanizm kołowy** ($\pi m_x + w$) oraz **trzeci** i **czwarty niekołowy** ($e + 2m_x + 0,625e_x$; $0,5b_p$) niemożliwymi (żebro uniemożliwia równoczesne załamanie się blachy wokół obu śrub). Te przypadki można pominąć w obliczeniach.

Szerokość efektywna w strefie ściskanej

→ #15 / 28

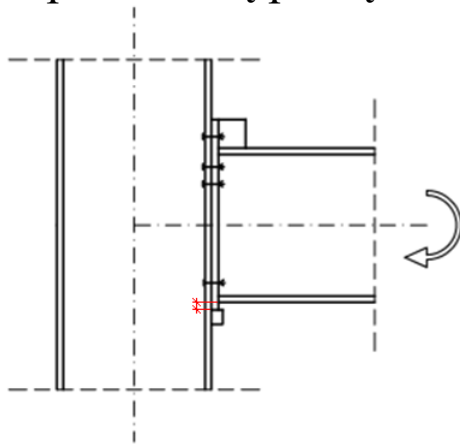
EN 1993-1-8 6.2.6.2

			
$b_{\text{eff, c, wc}}$	$t_{\text{fb}} + 2\sqrt{2} a_b + 5(t_{\text{fc}} + s)$	$t_{\text{fb}} + 2\sqrt{2} a_p + 5(t_{\text{fc}} + s) + s_p$	$2t_a + 0,6 r_a + 5(t_{\text{fc}} + s)$

Rys: Autor

Słup:	s_p	s	d_{wc}
Spawany	min ($t_p + c$; $2t_p$)	$\sqrt{2} a_c$	$h_c - 2(t_{fc} + \sqrt{2} a_c)$
Gorącowalcowany		r_c	$h_c - 2(t_{fc} + r_c)$

c – długość płyty czołowej poza dolną półką belki



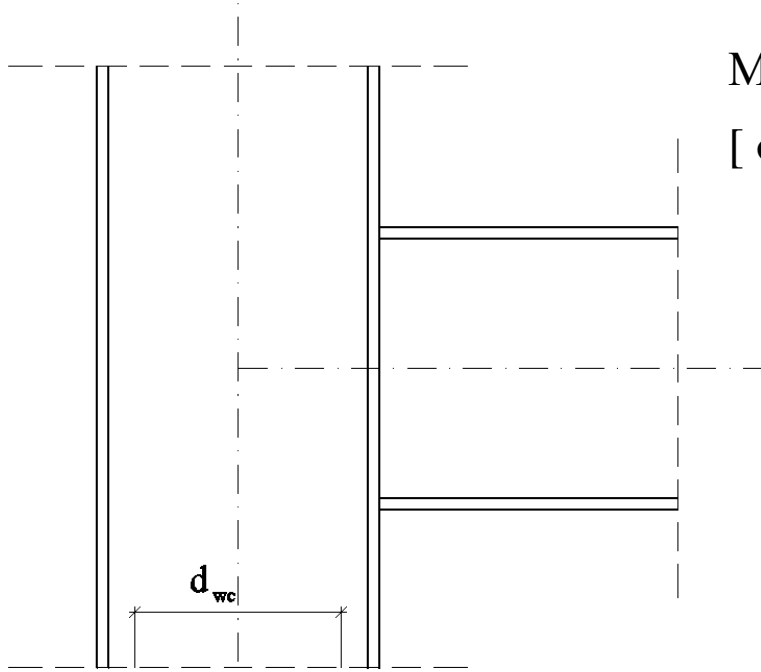
Rys: Autor

EN 1993-1-8 6.2.6.2

$\bar{\lambda}_p$	ρ
$\leq 0,72$	1,0
$> 0,72$	$(\bar{\lambda}_p - 0,2) / (\bar{\lambda}_p)^2$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{ [(b_{\text{eff}, t, wc} d_{wc} f_{y, wc}) / (E t_{wc}^2)] }$$

ρ – uproszczona metoda analizy ściskanej strefy środka – zamiast współczynnika utraty stateczności (χ) liczymy współczynnik redukcji

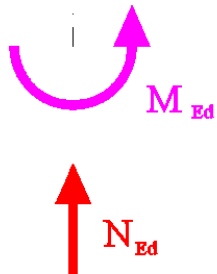


Maksymalne ściskanie w płaskiej części środnika (d_{dwc}):

$$[\sigma (N_{ed} + M_{Ed})]_{dwc} = \sigma_{com, Ed}$$

$\sigma_{com, Ed} / f_{y, wc}$	k_{wc}
$\leq 0,7$	1,0
$> 0,7$	$1,7 - \sigma_{com, Ed} / f_{y, wc}$

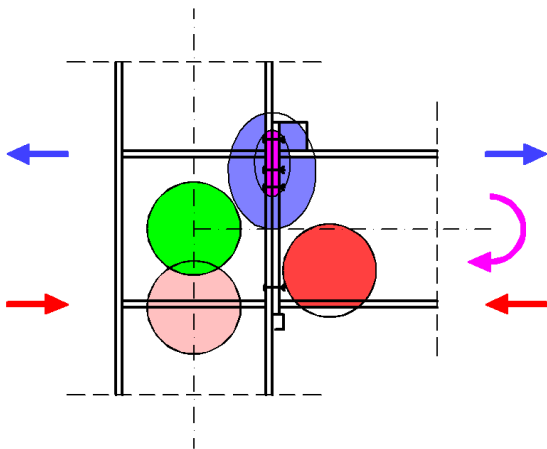
EN 1993-1-8 6.2.6.2



k_{wc} – wpływ równoczesnego – poprzecznego i podłużnego – ściskania środnika

Rys: Autor

Części składowe węzła

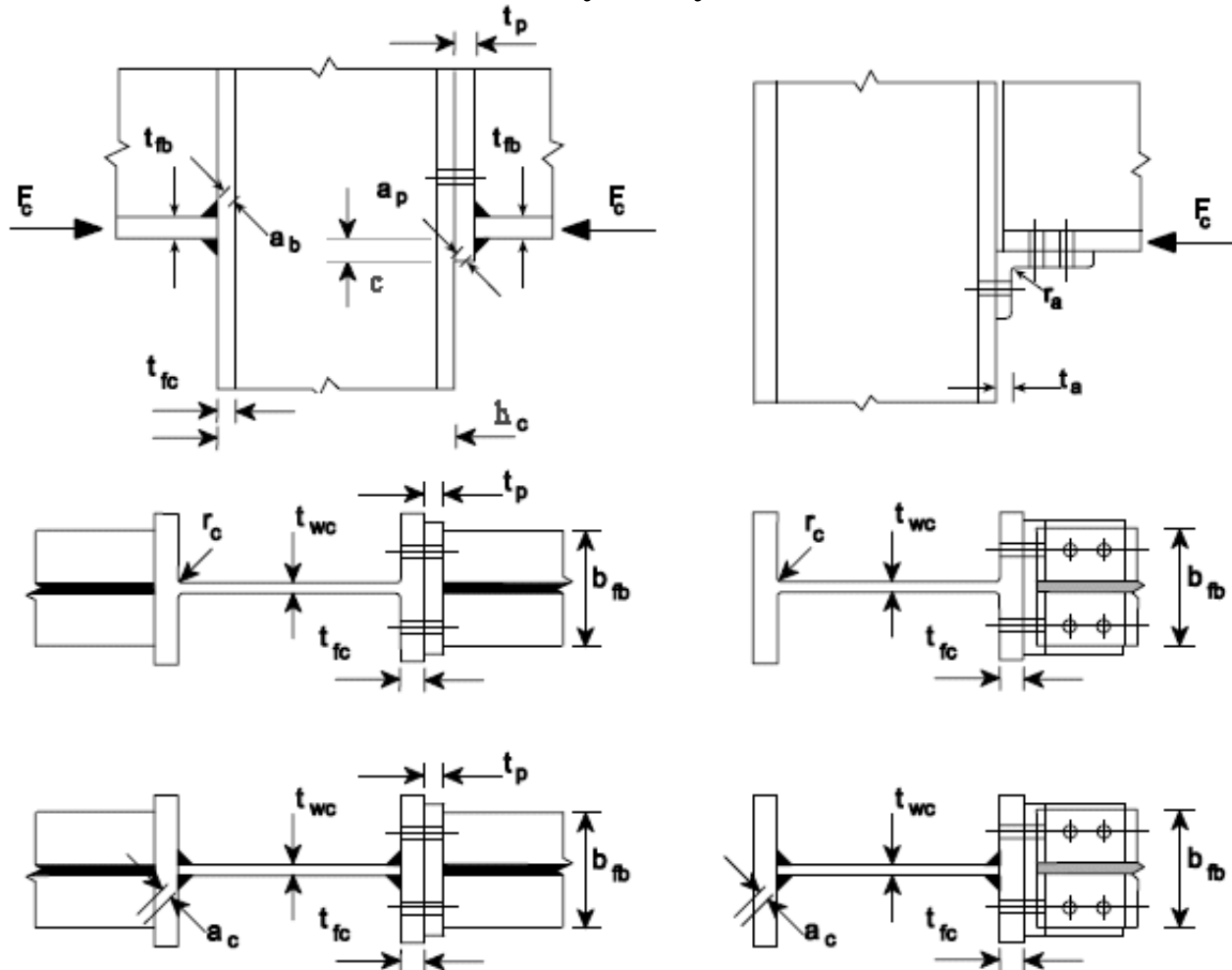


Dla tych części liczone są nośności zastępcze:

Rys: Autor

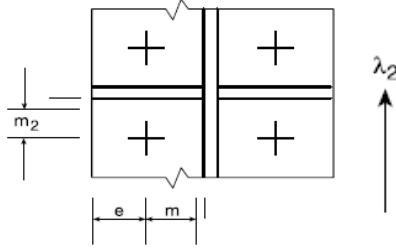
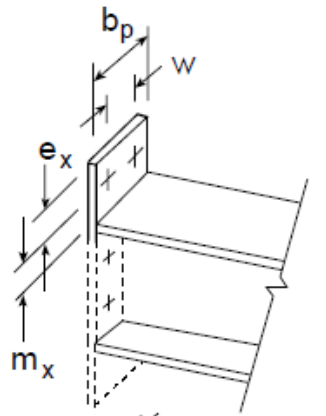
Węzeł na śruby	Węzeł spawany
Lokalne rozciąganie poprzeczne środnika słupa → #t / 58-60	Lokalne rozciąganie poprzeczne środnika słupa → #t / 59-60
Rozciąganie środnika belki → #t / 761	
Lokalne zginanie półki słupa → #t / 62-65	Lokalne zginanie półki słupa → #t / 66
Lokalne zginanie blachy czołowej → #t / 67	
Środnik słupa przy lokalnym ścinaniu → #t / 55-57	
Środnik słupa przy lokalnym ściskaniu poprzecznym → #t / 54	
Półka i środnik belki przy ściskaniu → #t / 53	

Wymiary



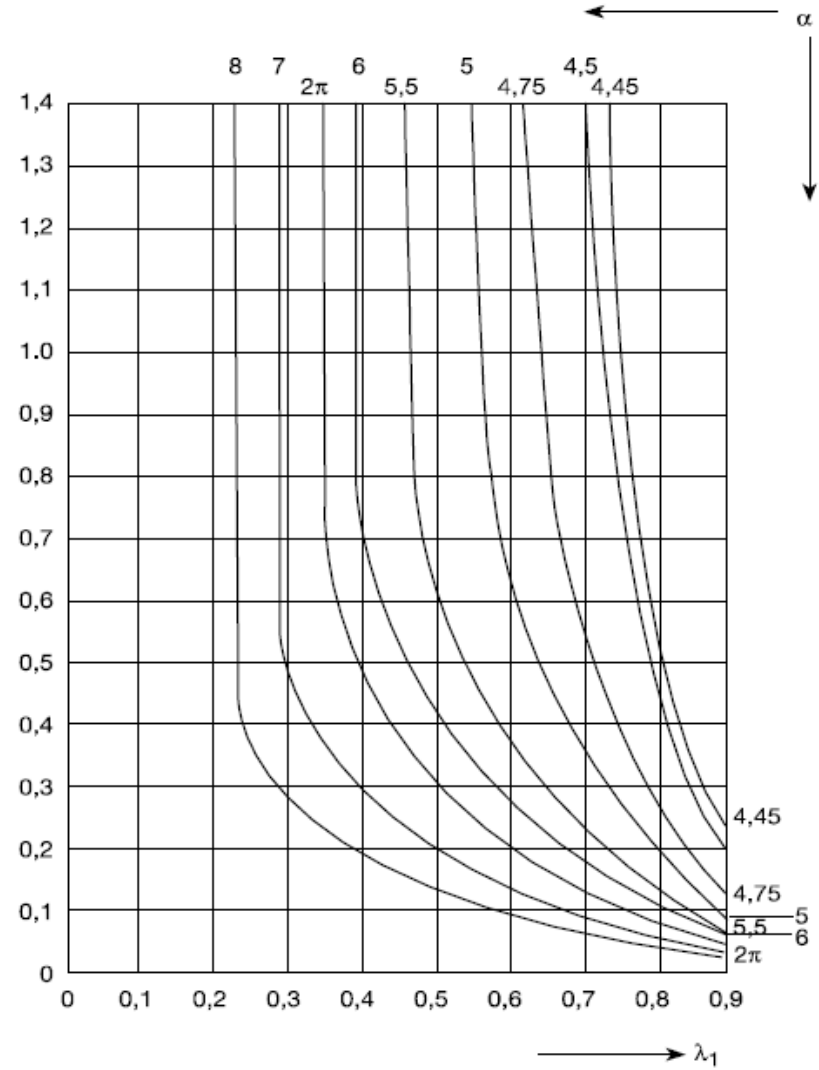
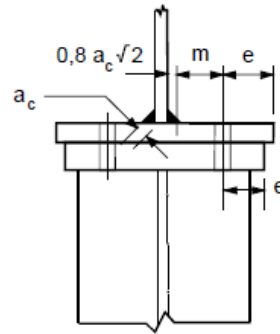
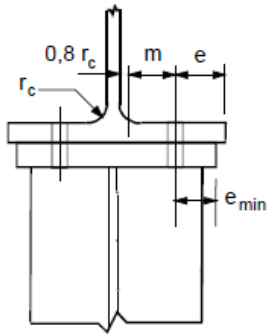
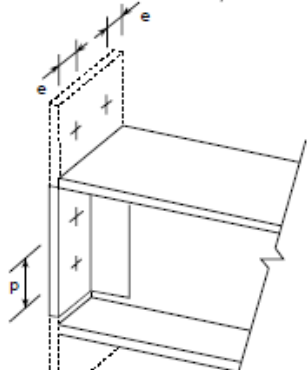
Rys: EN 1993-1-8 fig. 6.6

Wymiary

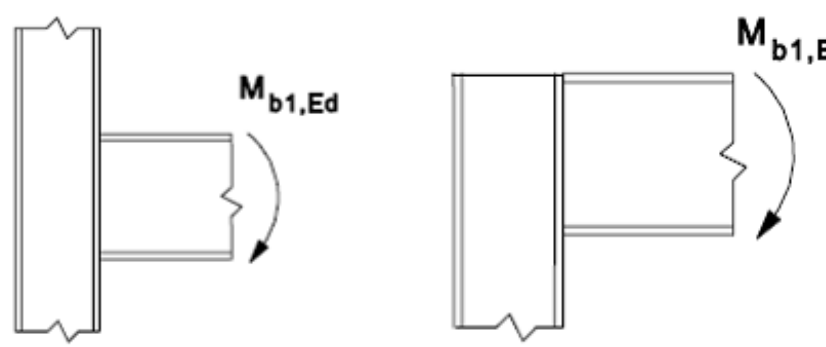
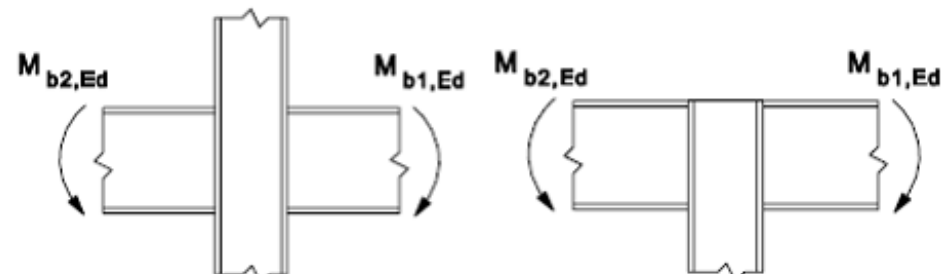


$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e}$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m + e}$$



Rys: EN 1993-1-8 fig 6.8, 6.10. 6.11

Konfiguracja	Oddziaływanie	Parametr transformacji β
	$M_{b1, Ed}$	$\beta \approx 1$
	$M_{b1, Ed} = M_{b2, Ed}$	$\beta = 0$ *)
	$M_{b1, Ed} = M_{b2, Ed} > 0,0$	$\beta \approx 1$
	$M_{b1, Ed} = M_{b2, Ed} < 0,0$	$\beta \approx 2$
	$M_{b1, Ed} + M_{b2, Ed} = 0,0$	
<p>*) w tej sytuacji wartość β jest raczej dokładna a nie przybliżona</p>		

β	ω
$0,0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1,0$
$0,5 \leq \beta < 1,0$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(1 - \omega_1)$
$\beta = 1,0$	$\omega = \omega_1$
$1,0 < \beta < 2,0$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2,0$	$\omega = \omega_2$

$$\omega_1 = 1 / \sqrt{[1 + 1,3(b_{\text{eff, c, wc}} t_{\text{wc}} / A_{\text{vc}})^2]}$$

$$\omega_2 = 1 / \sqrt{[1 + 5,2(b_{\text{eff, c, wc}} t_{\text{wc}} / A_{\text{vc}})^2]}$$

$$A_{\text{vc}} = A_{\text{vc, column}} (\approx h_w t_w)$$

β , ω – dwa sposoby uwzględnienia kształtu węzła (jedna lub dwie belki do słupa)

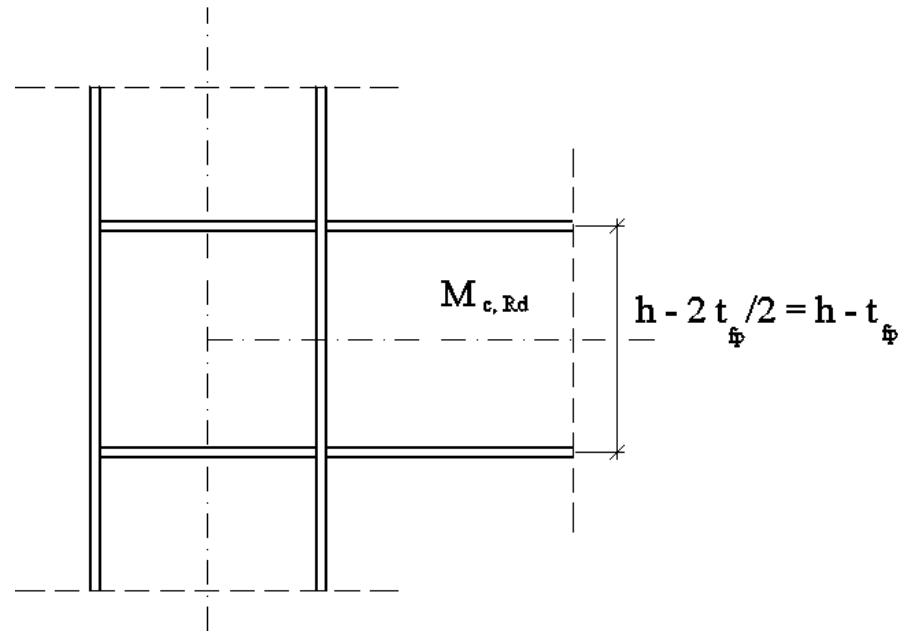
Półka i środnik belki przy ściskaniu

Te same reguły dla węzła spawanego i na śruby

EN 1993-1-8 (6.21)

$$F_{c, fb, Rd} = M_{c, Rd} / (h - t_{fp})$$

$M_{c, Rd}$ – nosność belki



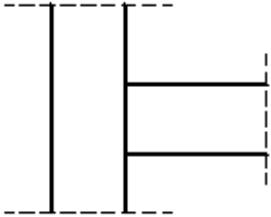
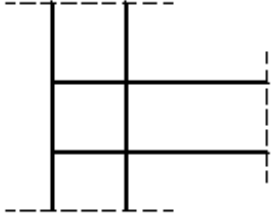
Rys: Autor

Srodnik słupa przy lokalnym ściskaniu poprzecznym

Te same reguły dla węzła spawanego i na śruby

EN 1993-1-8 6.2.6.2

Rys: Autor

		
$F_{c, wc, Rd}$	$\min (\omega \cdot k_{wc} \cdot b_{eff, c, wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y, wc} / \gamma_{M0} ; \rho \cdot \omega \cdot k_{wc} \cdot b_{eff, c, wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y, wc} / \gamma_{M0})$	\rightarrow nośność żeber (wykład #21)

$b_{eff, c, wc}$ – szefokość efektywna ściskanego srodnika $\rightarrow \#t / 45$

ρ – współczynnik redukcji przy zginaniu $\rightarrow \#t / 46$

k_{wc} – współczynnik redukcji przy podłużnym ściskaniu $\rightarrow \#t / 47$

ω – współczynnik interakcji $\rightarrow \#t / 52$

t_{wc} – grubość srodnika

$\gamma_{M0} = 1,0$

Środek słupa przy lokalnym ścinaniu

Te same reguły dla węzła spawanego i na śruby

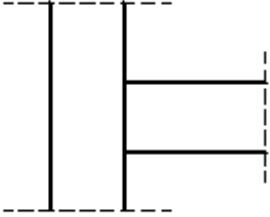
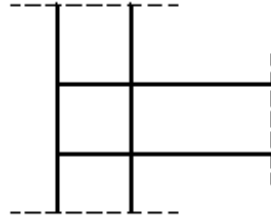
EN 1993-1-8 6.2.6.1

$$V_{wp, Rd} = [(0,9 f_{y, wc} A_{vc}) / (\gamma_{M0} \sqrt{3})] + V_{wp, add, Rd}$$

$$V_{wp, Rd}^* = V_{wp, Rd} / \beta$$

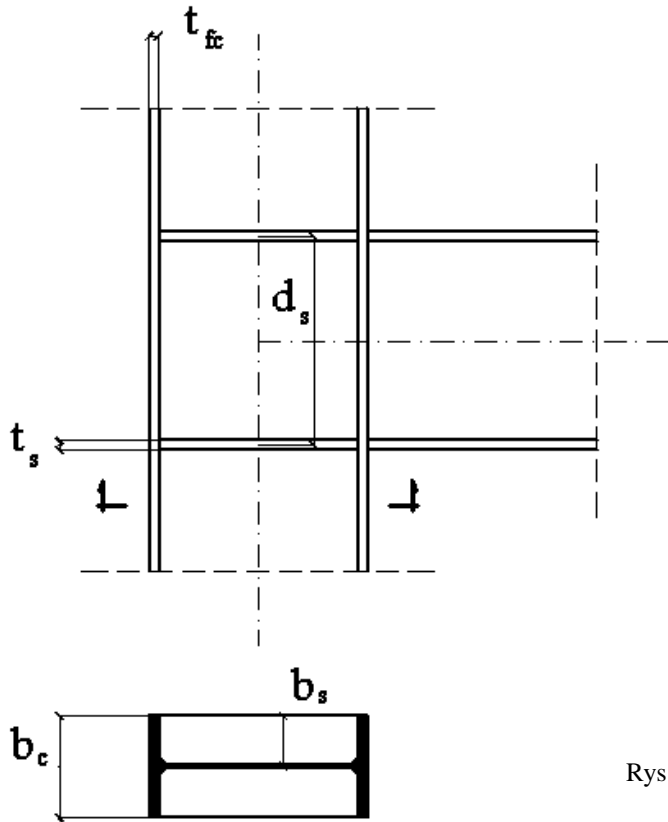
$$\beta \rightarrow \#t / 52-52$$

A_{vc} – pole środka przy ścinaniu $\rightarrow \#t / 52$

			Rys: Autor
$V_{wp, add, Rd}$	0	$\min [4M_{pl, fc, Rd} / d_s ; (2M_{pl, fc, Rd} + 2M_{pl, st, Rd}) / d_s]$	

$$M_{pl, fc, Rd}, M_{pl, st, Rd} \rightarrow \#t / 56$$

EN 1993-1-8 6.2.6.1



$$M_{pl, fc, Rd} = 0,25 b_c t_{fc}^2 f_{y, fc} / \gamma_{M0}$$

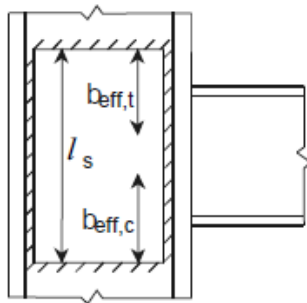
$$M_{pl, st, Rd} = 0,50 b_s t_s^2 f_{y, s} / \gamma_{M0}$$

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

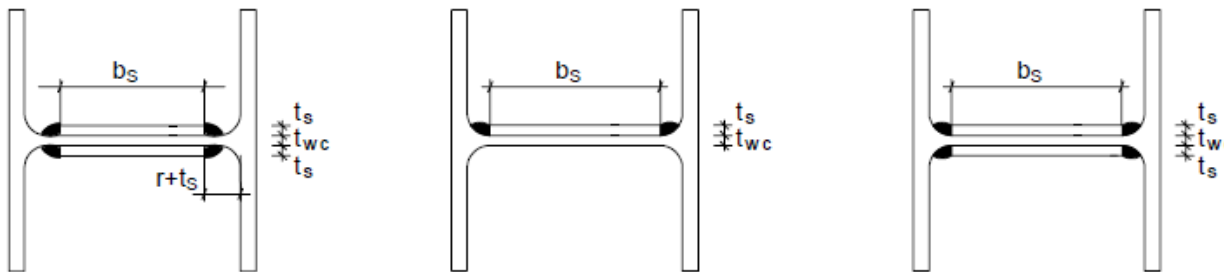
Rys: Autor

$d_{wc} / t_{wc} > 69e \rightarrow$ konieczne są dodatkowe blachy wzmacniające środnik

EN 1993-1-8 6.2.6.1



Rys: EN 1993-1-8 fig. 6.5



Wymagania dotyczące blach:

$$b_s / t_s \leq 40\epsilon;$$

$$b_s \geq d_{wc}$$

$$t_s \geq t_{wc}$$

$$f_{y,s} = f_{y,wc}$$

Wpływ na obliczenia: zawsze bieżę się pod uwagę tylko jedną blachę:

$$A_{vc, new} = A_{vc} + b_s t_{wc}$$

Rozciągany środek słupa

Te same zasady dla węzła śrubowego i spawanego

EN 1993-1-8 6.2.6.3

Węzeł śrubowy:

$$F_{t, wc, Rd} = \omega b_{eff, t, wc} t_{wc} f_{y, wc} / \gamma_{M0}$$

$$b_{eff, t, wc} = l_{eff, c} \rightarrow \#t / 41, 42$$

$$\omega \rightarrow \#t / 52$$

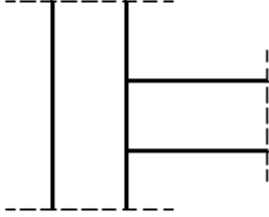
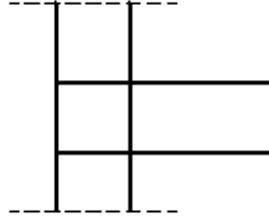
t_{wc} – grubość środnika słupa

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

Węzeł spawany:

EN 1993-1-8 6.2.6.3

Rys: Autor

		
$F_{t, wc, Rd}$	$\omega \cdot b_{eff, t, wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y, wc} / \gamma_{M0}$	$t_s \geq t_{fb} \text{ i } R_{web} \geq R_s \rightarrow \infty$ (\rightarrow wyk #21)

$$b_{eff, t, wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2} a_b + 5(t_{fc} + s)$$

$$\omega \rightarrow \#t / 52$$

t_{wc} – grubość środnika słupa

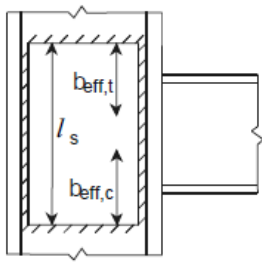
$$\gamma_{M0} = 1,0$$

t_{fb} – grubość półki belki

a_b – grubość spoiny

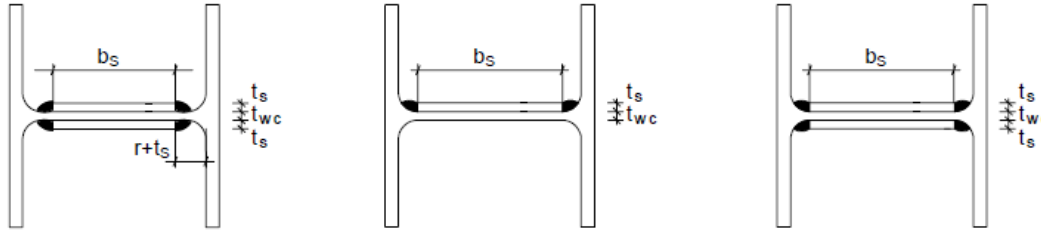
$$s \rightarrow \#t / 46$$

t_{fc} – grubość półki słupa



Środek słupa przy zastosowaniu blach wzmacniających

EN 1993-1-8 6.2.6.3



Nowa grubość #t / 68:	Blacha wzmacniająca:	Spoina czołowa z pełnym przetopem między średnikiem a blachą, $a \geq t_s$	Spoina pachwinowa między średnikiem a blachą, $a \geq t_s / \sqrt{2}$	
			S235, S275, S355	S420, S460
$t_{w, eff} =$	Z jednej strony	$1,5 t_{wc}$	$1,4 t_{wc}$	$1,3 t_{wc}$
	Z obu stron	$2,0 t_{wc}$		

Takie same zasady dla węzłów śrubowych i spawanych

Rozciągany środek belki

Część istotna tylko dla węzła śrubowego

EN 1993-1-8 6.2.6.3

$$F_{t, wb, Rd} = \omega b_{eff, t, wb} t_{wb} f_{y, wb} / \gamma_{M0}$$

$$b_{eff, t, wb} = l_{eff, b} \rightarrow \#t / 40$$

$$\omega \rightarrow \#t / 58$$

t_{wb} grubość środka belki

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

Lokalne zginanie półki słupa

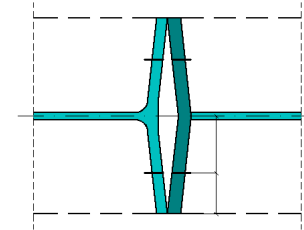
Różne reguły dla węzła spawanego i na śruby

Węzeł na śruby:

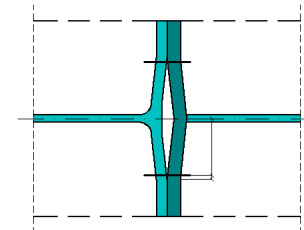
Musimy rozważyć trzy mechanizmy zniszczenia blachy ze względu na efekt dźwigni

Trzy mechanizmy zniszczenia; 1. i 2. z efektem dźwigni lub bez efektu dźwigni, 3. bez efektu dźwigni.

Mechanizm 2 – zniszczenie blachy, półki i śrub

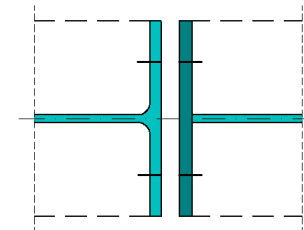


Mechanizm 1 – zniszczenie blachy i półki

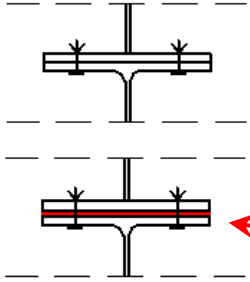
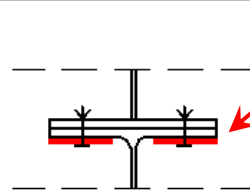


Rys: Autor

Mechanizm 3 – zniszczenie śrub

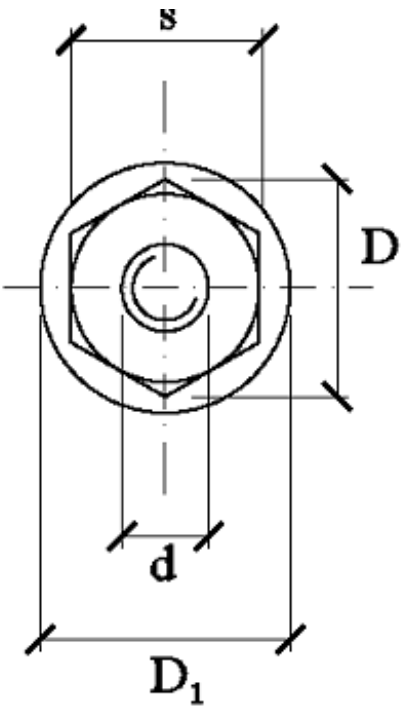


Możliwe są dwa sposoby wzmocnienia półki słupa przez dodatkowe blachy.

	Efekt dźwigni		Bez efektu dźwigni: $F_{T, 1-2, Rd}$
Mechanizm 1: $F_{T, 1, Rd} = \min(1.1; 1.2)$	Metoda 1.1	Metoda 1.2	$2 M_{pl, 1, Rd} / m$
	$4 M_{pl, 1, Rd} / m$	$(8n - 2e_w) 4 M_{pl, 1, Rd} / [2mn - e_w(m + n)]$	
	$(4 M_{pl, 1, Rd} + 2M_{bp, Rd}) / m$	$[(8n - 2e_w) 4 M_{pl, 1, Rd} + 4n M_{bp, Rd}] / [2mn - e_w(m + n)]$	
Mechanizm 2: $F_{T, 2, Rd}$	$(2 M_{pl, 2, Rd} + n \Sigma F_{t, Rd}) / (m + n)$		
Mechanizm 3: $F_{T, 3, Rd}$	$\Sigma F_{t, Rd}$		

EN 1993-1-8 tab 6.2

Symbole → #t / 65



$$m \rightarrow \#t / 56$$

$$n = \min (e_{\min} ; 1,25m)$$

$$e_w = d_w / 4$$

$$d_w = D \text{ or } D_1$$

$$l_{\text{eff}, 1} = \min (l_{\text{eff}, \text{cp}} ; l_{\text{eff}, \text{nc}})$$

$$\Sigma l_{\text{eff}, 1} = \min (\Sigma l_{\text{eff}, \text{cp}} ; \Sigma l_{\text{eff}, \text{nc}})$$

$$l_{\text{eff}, 2} = l_{\text{eff}, \text{nc}}$$

$$\Sigma l_{\text{eff}, 2} = \Sigma l_{\text{eff}, \text{nc}}$$

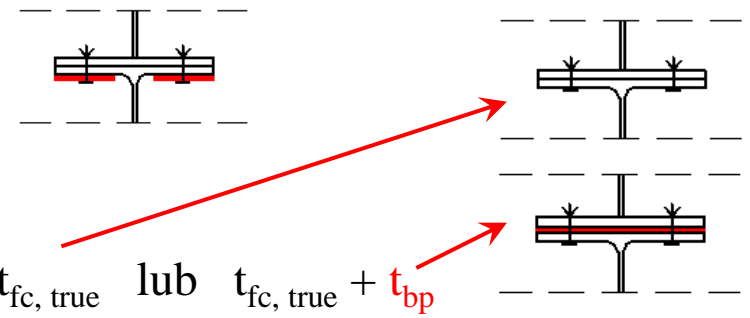
$$\Sigma F_{t, \text{Rd}} \rightarrow \#t / 52$$

t_{fc} – grubość półki słupa

t_{bp} – grubość **dodatkowej blachy**

$$l_{\text{eff}} \rightarrow \#t / 41, 42$$

$$\Sigma l_{\text{eff}} \rightarrow \#t / 41, 42$$

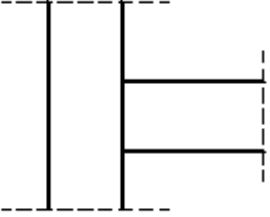
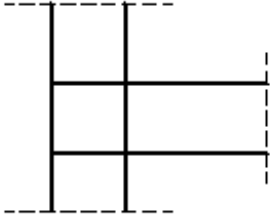


$$t_{\text{fc}} = t_{\text{fc}, \text{true}} \text{ lub } t_{\text{fc}, \text{true}} + t_{\text{bp}}$$

	Pojedynczy szereg śrub	Grupa szeregów
$M_{\text{pl}, 1, \text{Rd}}$	$0,25 l_{\text{eff}, 1} t_f^2 f_y / \gamma_{\text{M0}}$	$0,25 \Sigma l_{\text{eff}, 1} t_f^2 f_y / \gamma_{\text{M0}}$
$M_{\text{pl}, 2, \text{Rd}}$	$0,25 l_{\text{eff}, 2} t_f^2 f_y / \gamma_{\text{M0}}$	$0,25 \Sigma l_{\text{eff}, 2} t_f^2 f_y / \gamma_{\text{M0}}$
$M_{\text{bp}, \text{Rd}}$	$0,25 l_{\text{eff}, 1} t_{\text{bp}}^2 f_{y, \text{bp}} / \gamma_{\text{M0}}$	$0,25 \Sigma l_{\text{eff}, 1} t_{\text{bp}}^2 f_{y, \text{bp}} / \gamma_{\text{M0}}$

EN 1993-1-8 tab 6.2

Węzeł spawany

		
$F_{t, wc, Rd}$	$b_{eff, b, fc} t_{fc} f_{y, fc} / \gamma_{M0}$	$t_s \geq t_{fb} \text{ i } R_{web} \geq R_s \rightarrow \infty$ (\rightarrow wyk #21)

EN 1993-1-8 4.10

$$b_{eff, t, fc} = t_{wc} + 2s + 7 k t_{fc}$$

$$k = \min [(t_{fc} / t_{bp})(f_{y, f} / f_{y, p}) ; 1,0]$$

$$s \rightarrow \#t / 46$$

t_{fc} – grubość półki słupa

t_{bp} – grubość blachy czołowej

Zginanie blachy czołowej

Część ważna tylko dla węzła śrubowego.

Te same zasady co dla zginanej półki słupa;

Zmiany:

- l_{eff} , Σl_{eff} zgodnie z $\#t / 40$;
- Zamiast t_{fc} (grubość półki słupa) jest t_p (grubość blachy czołowej);
- Brak wpływu wzmocnienia środka.

Analiza najsłabszego elementu węzła doczołowego jest bardziej skomplikowana niż dla węzła zakładkowego.

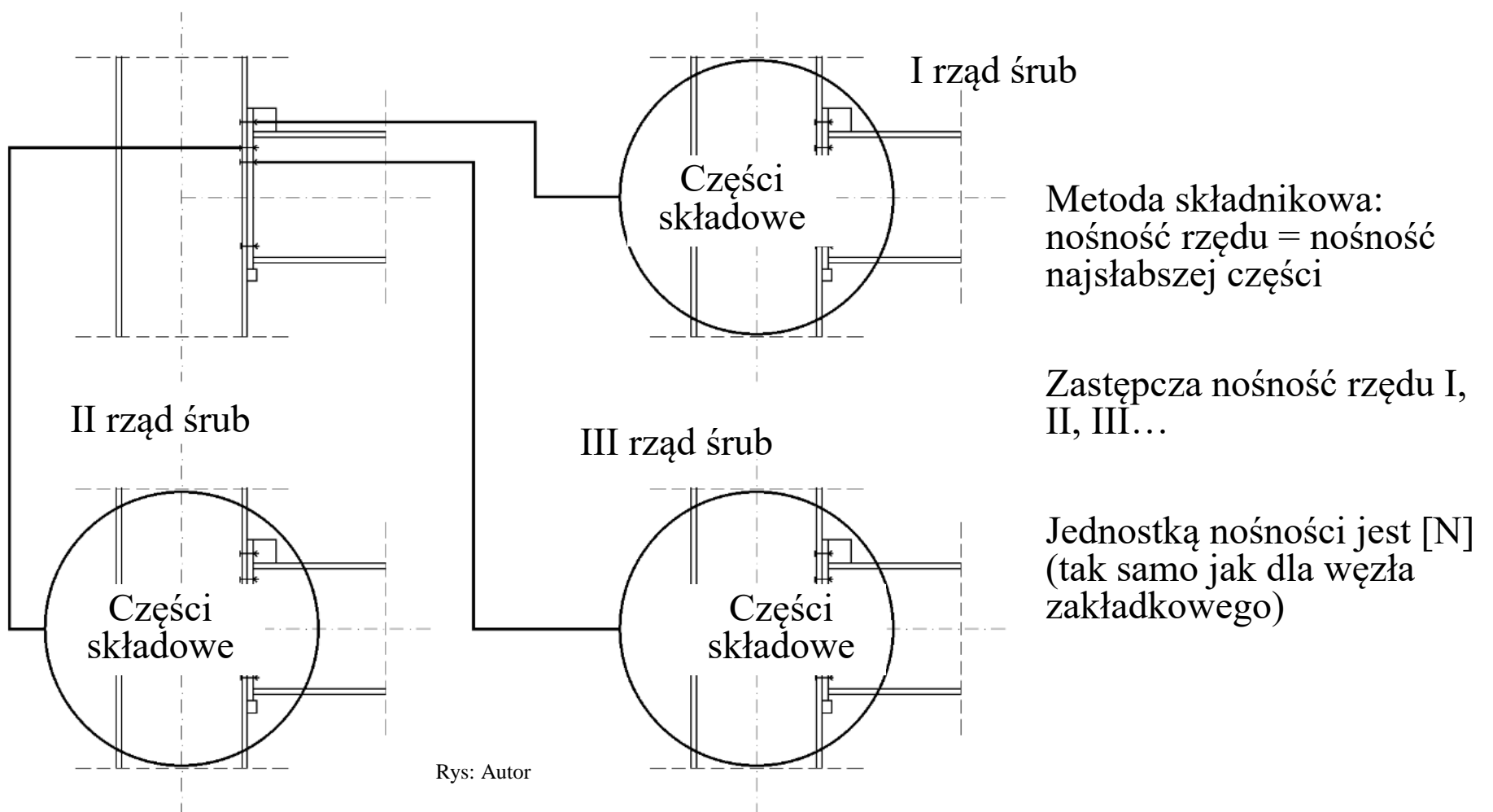
Współpraca składników węzła doczołowego jest zupełnie inna niż w przypadku węzła zakładkowego. W przypadku węzła doczołowego nie możemy podzielić wymagań na nośność trzpienia (połączenia) oraz nośność kontaktu lub nośność elementów.



Rys: uwyo.edu

Dla węzła doczołowego:

- bierzemy pod uwagę rzędy śrub (najczęściej składające się z dwóch śrub);
- dla każdego rzędu śrub analizujemy te części składowe węzła, które współpracują bezpośrednio z rozpatrywanym rzędem;
- dla każdej z tych części (trzpień śrub, blach, elementów...) analizujemy ich wytrzymałość;
- najsłabsza część (najmniejsza nośność) jest zastępczą nośnością rozpatrywanego rzędu śrub.



Nośność węzła = $\Sigma [(zastępcza\ nośność\ szeregu\ n) \cdot (ramię\ działania\ szeregu\ n)]$

Globalny moment zginający / Nosność $\leq 1,0$

Wymiary

Ramię działania:

→ #15 / 8

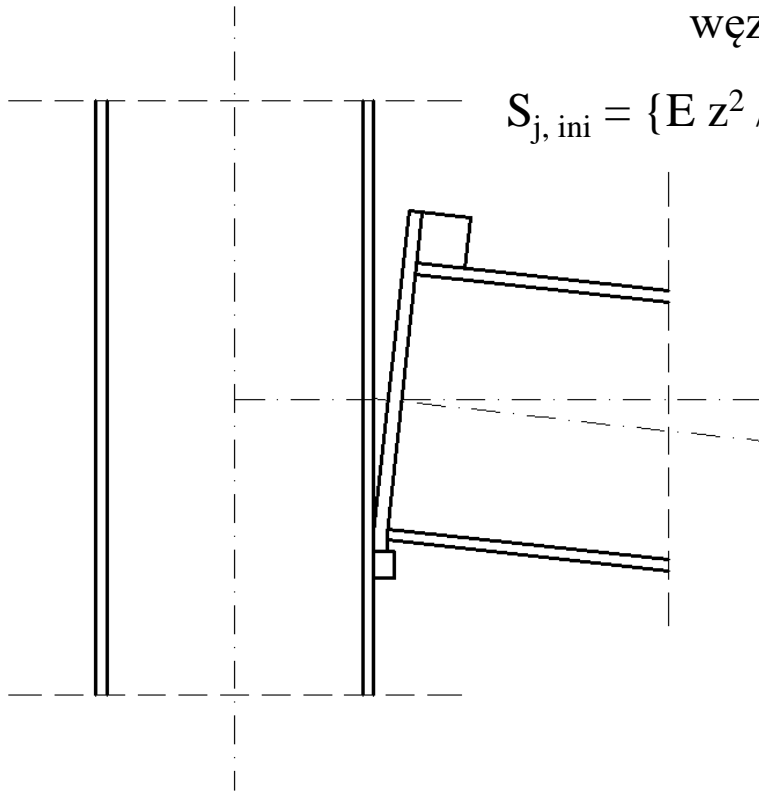
węzły ramowe:

$$S_{j, ini} = E z^2 / [\Sigma (1 / k_i)]$$

węzły podporowe:

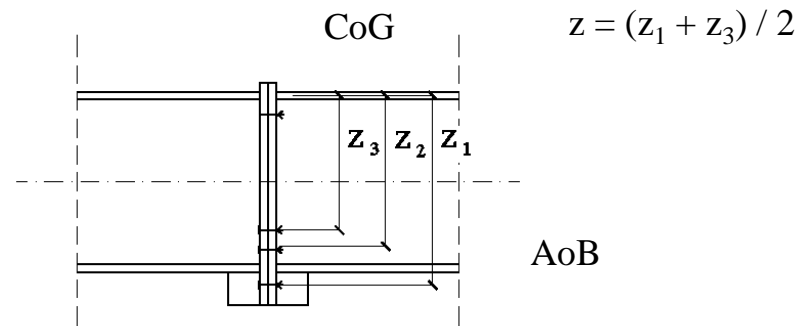
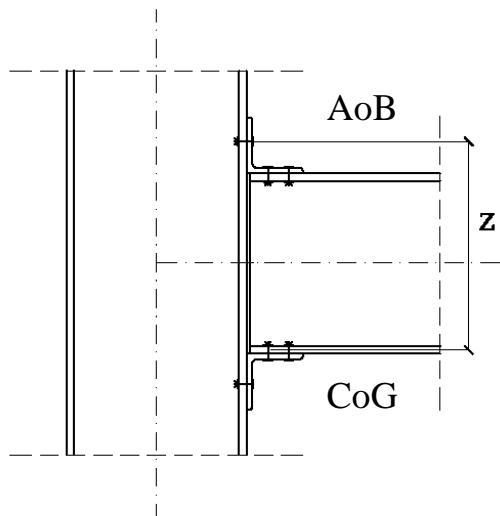
$$S_{j, ini} = \{E z^2 / [\Sigma (1 / k_i)]\} e / (e + e_k)$$

Rys: Autor

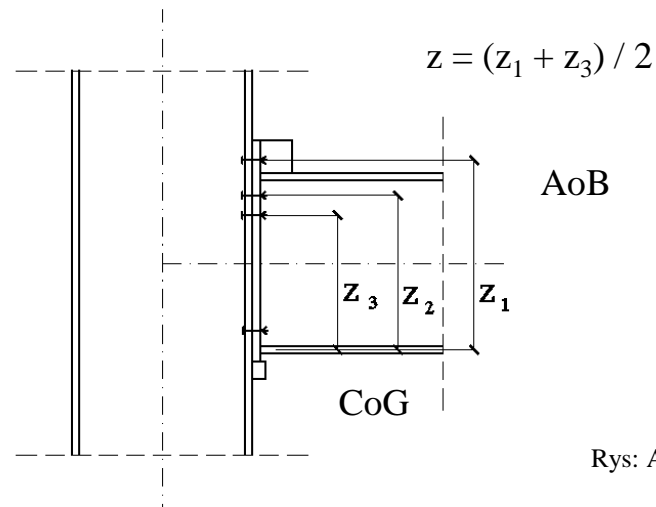
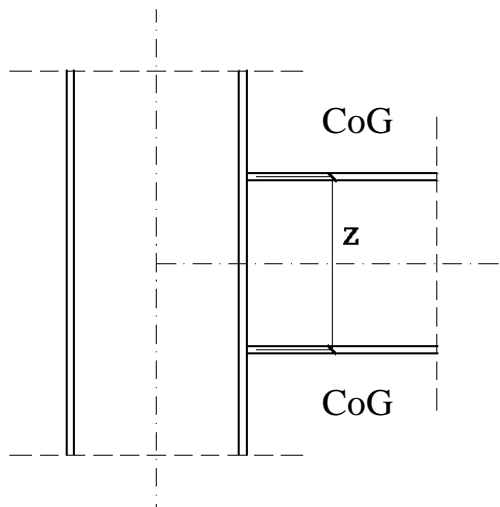


Sytuacja teoretyczna: brak śrub w przegubie - obrót belki wokół dolnej części strefy ściskanej. Teoretyczna oś obrotu: środek ciężkości (CoG) półki belki ściskanej.

Ramię działania z definiuje się jako odległość między CoG dolnej półki a CoG górnej półki lub osi śruby (AoB):



→ #15 / 9



Rys: Autor

Częstym błędem podczas obliczania węzła doczołowego jest utożsamienie **zastępczej nośności** szeregu śrub z **rzeczywistą nośnością** dwu śrub w szeregu.



Rys: uwyo.edu

Nośność zastępcza = min (**rzeczywistej nośności** śrub, nośności średnika słupa, nośności półki słupa, nośności blachy czołowej, nośności półki belki, nośności średnika belki...)

Rzeczywista nośność śrub może być dużo większa niż ich **nośność zastępcza**. Nośnością zastępczą śrub może być na przykład nośność średnika słupa (jeśli średnik słupa jest najsłabszym ogniwem). W takiej sytuacji zwiększenie nośności śrub nie spowoduje zwiększenia nośności węzła: mała nośność średnika nadal będzie mała.

Węzeł zakładkowy – wiele prostych warunków ($\rightarrow \#t / 26$), najsłabsze ogniwo jest łatwe do identyfikacji już podczas sprawdzania kolejnych warunków.

Węzeł doczołowy – jeden złożony warunek (moment zginający / nośność). Niespełnienie tego warunku zostanie zauważone dopiero na samym końcu obliczeń. Oznacza to, że najsłabszy element zostanie zidentyfikowany dopiero na końcu.

Nośność równoważna = min (rzeczywista nośność rzędu śrub, nośność środника słupa, nośność półki słupa, nośność blachy czołowej, nośność środnika belki...)

Nośność równoważna: najczęściej NIE JEST TO wytrzymałość śruby

Dla różnych części węzła ważne są różne zjawiska. Na wykładzie #18 szczegółowo przedstawiono dwa zjawiska dotyczące bezpośrednio nośności węzła doczołowego: wytrzymałość na rozciąganie trzpienia śruby oraz wytrzymałość na przeciąganie łba. W chwili obecnej przedstawione zostaną informacje dotyczące miejscowego zginania półki słupa i blachy czołowej oraz miejscowego rozciągania środników słupa i belki. W przypadku analizy zginania miejscowego bardzo ważny jest efekt dźwigni.

Zasady dodatkowe

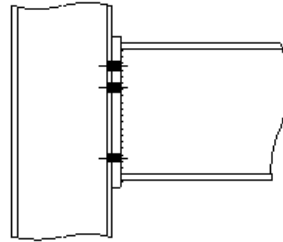
Możliwe jest różnie rozmieszczenie śrub wokół półek belek:



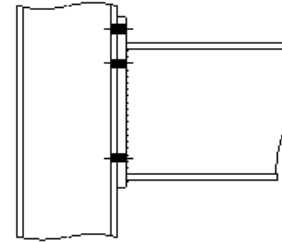
Rys: uwoyo.edu



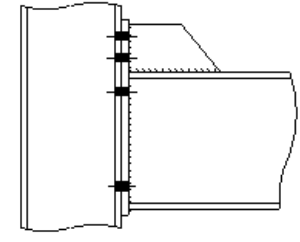
Rys: lusas.com



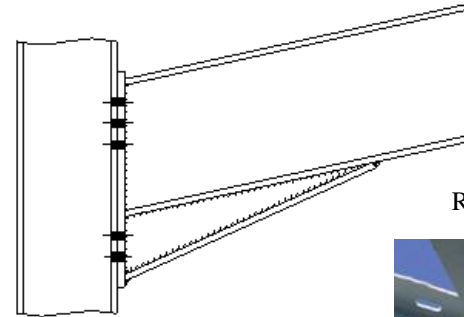
Full depth end plate



Extended end plate



Stiffened depth end plate

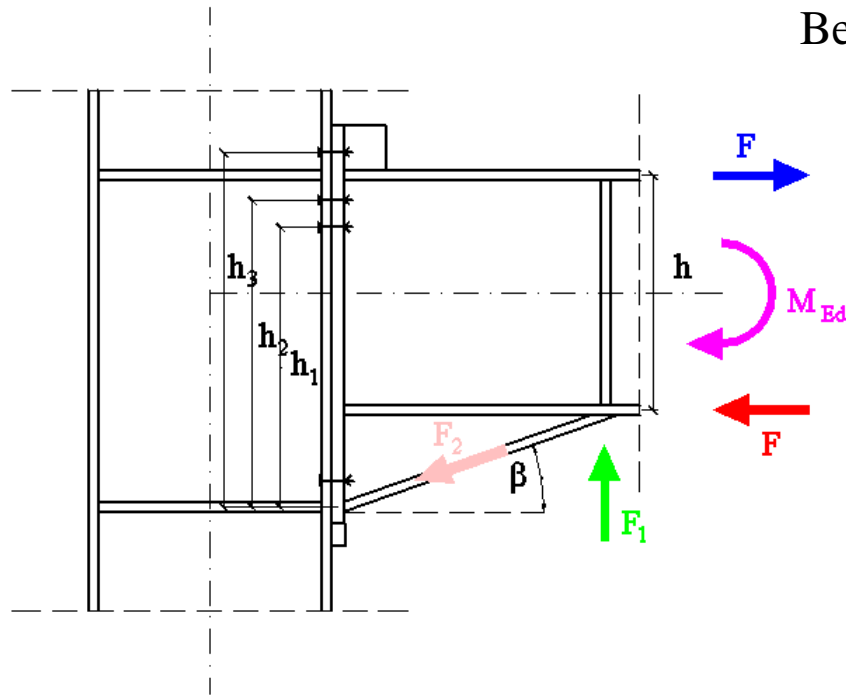


Haunched beam (may also be exten

Rys: steelconstruction.info



Rys: gic-edu.com



Belka ze skosem → większe ramię działania
→ większa nośność węzła

Wymagania:

$$\beta \leq 45^\circ$$

EN 1993-1-8 p.6.2.6.7

Dodatkowo pojawia się poprzeczne ściskanie środka belki (F_1) i ściskanie półki skosu (F_2):

$$F = M_{Ed} / h$$

$$F_1 = F \operatorname{tg} \beta$$

$$F_2 = F / \cos \beta$$

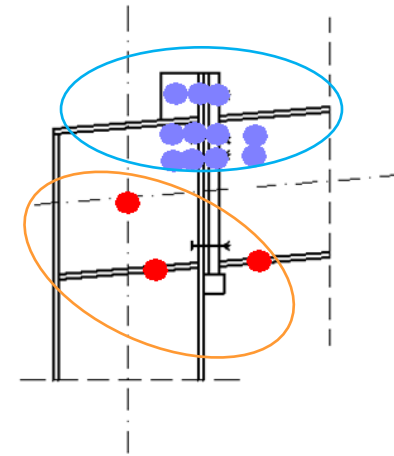
Obliczenia prowadzone są tak samo, jak dla poprzecznego ściskania środka słupa i ściskania półki belki.

Równowaga między nośnością części **ściskanej** i **rozciąganej**:

$$\Sigma F_{t, Rd} \leq F_{c, Rd} = \min (F_{c, wc, Rd} ; F_{c, fb, Rd} ; V_{wp, Rd} / \beta)$$

$\Sigma F_{t, Rd}$ = sumaryczna nośność wszystkich śrub w części rozciąganej, to jest:

$\Sigma_{i=1-3} \min$ (średnik słupa rozciągany wokół rzędu i; półka słupa zginana wokół rzędu i; blacha czołowa zginana wokół rzędu i; średnik belki rozciągany wokół rzędu i)



Rys: Autor

Jeśli warunek nie jest spełniony, redukujemy stopniowo zastępczą nośność śrub, poczynając od śruby najbliższej strefie ściskanej:

$$F_{t, 3, Rd} = F_{c, Rd} - F_{t, 1, Rd} - F_{t, 2, Rd}$$

lub nawet

$$F_{t, 3, Rd} = 0 ; F_{t, 2, Rd} = F_{c, Rd} - F_{t, 1, Rd}$$

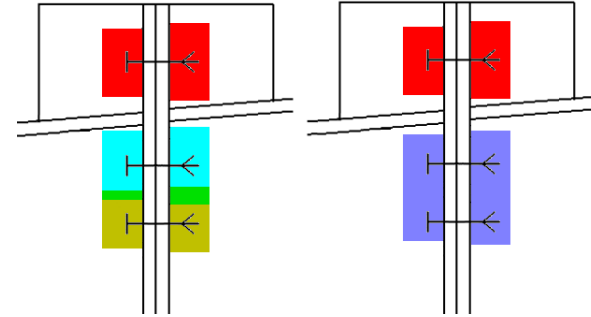
EN 1993-1-8 6.2.7.2 (8)

Warunek dla śrub w części rozciąganej:

$$\sum F_{t,r,Rd}(\text{individual}) \leq F_{t,r,Rd}(\text{group})$$

$$F_{t,r,Rd}(\text{individual}) = F_{t,r,Rd}(l_{\text{eff}})$$

$$F_{t,r,Rd}(\text{group}) = F_{t,r,Rd}(S l_{\text{eff}})$$



Rys: Autor

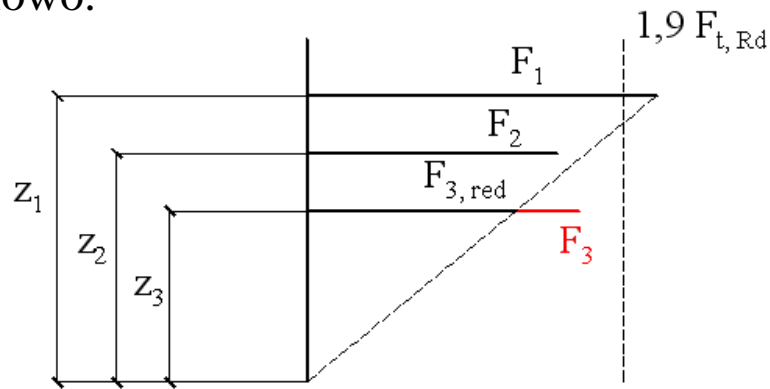
Jeśli warunek nie jest spełniony, redukujemy stopniowo zastępczą nośność śrub, poczynając od śruby najbliższej strefie ściskanej:

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{t,r,Rd}(\text{group}) - F_{t,1,Rd} - F_{t,2,Rd}$$

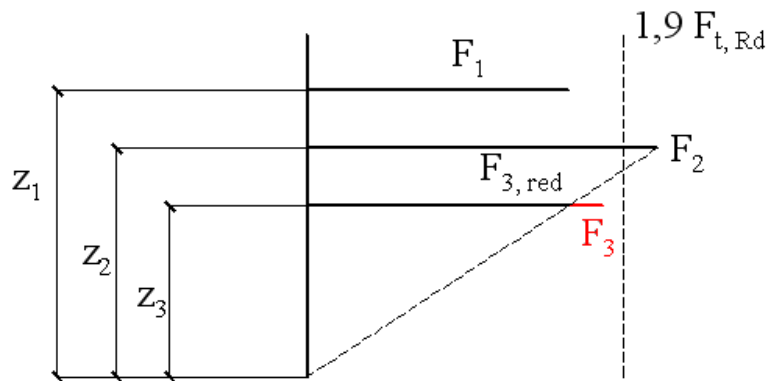
lub nawet

$$F_{t,3,Rd} = 0 \quad ; \quad F_{t,2,Rd} = \sum F_{t,r,Rd}(\text{group}) - F_{t,1,Rd}$$

Jeśli dla dowolnego rzędu śrub jego nośność zastępcza jest większa niż 1,9 nośności śruby na siłę osiową, zastępcze nośności niższych szeregów śrub należy zmniejszyć liniowo.



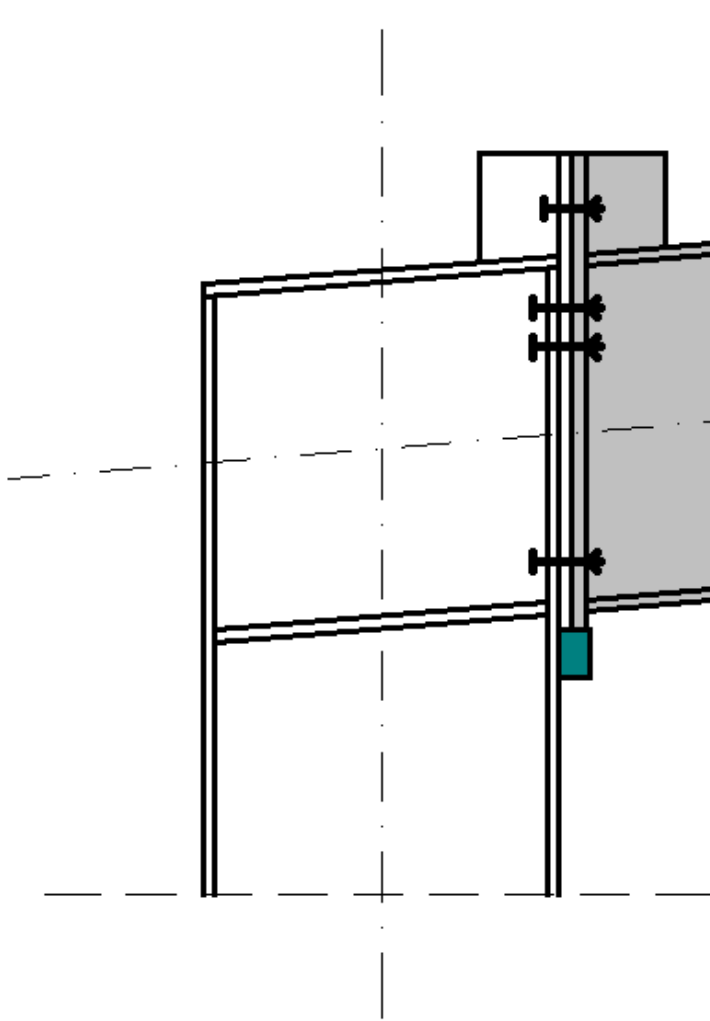
$$F_{3, \text{red}} = F_1 z_3 / z_1$$



$$F_{3, \text{red}} = F_2 z_3 / z_2$$

Rys: Autor

Stolik montażowy



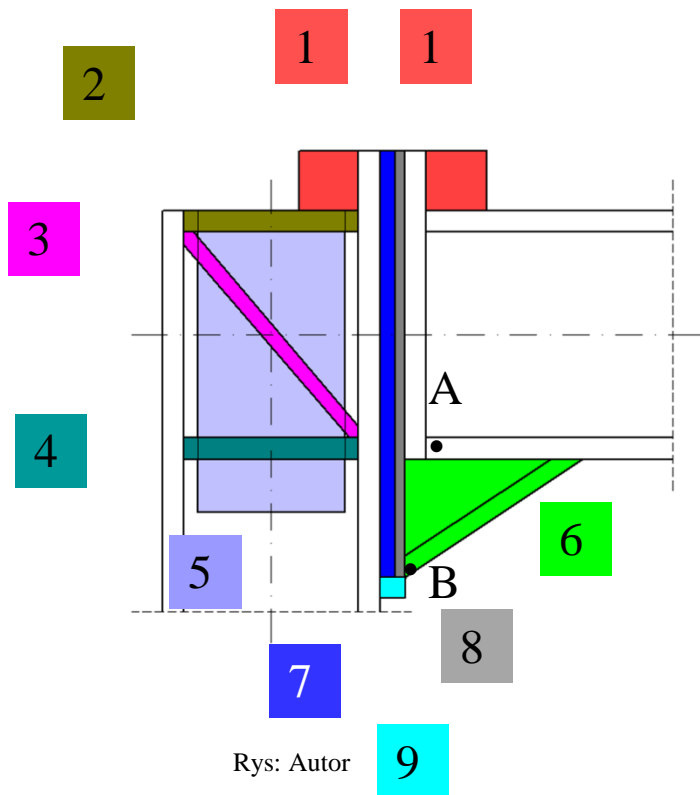
Gruby pręt prostokątny, przyspawany poprzecznie do półki słupa. To jest stolik montażowy dla belek i dźwigarów. Podpiera belkę w czasie zakładania śrub. Belka jest nieruchoma - unikamy kołysania belki zawieszonyj na dźwigu.

Rozwiązanie popularne > 20 lat temu, obecnie rzadko stosowane.

Rys: Autor

Kategoria	D	E
Zjawiska	Ściskanie półki rygla, ściskanie środka słupa, ścinanie środka słupa, rozciąganie środka słupa, zginanie półki słupa (efekt dźwigni), zginanie blachy czołowej (efekt dźwigni), rozciąganie środka rygla	
Część rozciągana (siły równoległe do osi trzpieni śrub)	<p>Wzór \rightarrow #t / 65:</p> $\Sigma F_{t, Rd} = \Sigma \min (F_{t, Rd} ; B_{p, Rd})$ <p>(nośność na rozciąganie ; nośność na przeciąganie)</p>	<p>Wzór \rightarrow #t / 65:</p> $\Sigma F_{t, Rd} = \Sigma \min (F_{p, C} ; B_{p, Rd})$ <p>(siłą sprężającą; nośność na przeciąganie)</p>
Część ściskana przenosi ścinanie (siły prostopadłe do osi śrub)	Jak dla kategorii A (ścięcie, docisk, rozerwanie...);	Jak dla kategorii C (docisk, poślizg, przeciąganie, rozerwanie...);
Uwagi dodatkowe	Tylko 3 najwyższe rzędy są brane pod uwagę przy sprawdzaniu sztywności i nośności.	Śruby rozmieszczone są równomiernie po całej wysokości węzła (może być znacznie więcej niż 3 rzędy); Tylko 3 najwyższe rzędy są brane pod uwagę przy sprawdzaniu sztywności i nośności.

Elementy wychodzące poza „zestaw standardowy” (słup – blacha czołowa – rygiel) wpływają w różny sposób na sztywność i nośność węzła.



1. Żeberka usztywniające blachę czołową / półkę słupa nad pasem górnym rygla;
2. Żebro poziome na słupie, przedłużające półkę górną rygla;
3. Żebro ukośne na słupie;
4. Żebro poziome na słupie, przedłużające półkę dolną rygla;
5. Blacha „na płask” wzmacniająca środek słupa;
6. Skos pod belką;
7. Blacha zwiększająca grubość półki słupa;
8. Przekładka;
9. Stolik montażowy

Element	Wpływ na sztywność i nośność
1	<p>Nieformalnie – zapobiega pojawieniu się konkretnych mechanizmów kołowych i niekołowych; odpowiadające im długości efektywne nie są brane pod uwagę w obliczeniach. W Eurokodzie, niekonsekwentnie, podano dla blachy czołowej długości bez zebra pionowego a dla pasa słupa z elementem pionowym (żebrem / dalszą częścią średnika). W przypadku zebra nad rygłem należy pominąć część długości efektywnych. W przypadku słupa z pasem niepodpartym średnikiem (rzadka acz spotykana sytuacja) należy uwzględnić dodatkowe mechanizmy, na wzór tych dla blachy czołowej.</p>
2	<p>Zmienia słup z nieżebrowanego na żebrowany; odmiennie liczy się długości efektywne wokół śrub. W literaturze opisane sprzecznie; niektóre źródła dopuszczają dodanie nośności zebra do nośności strefy rozciąganej, co jednak wydaje się nieskazane (oś zebra nie pokrywa się z osiami śrub).</p>
3	<p>Rola niejasna, nieopisana w Eurokodzie i słabo rozpoznana w literaturze. Prawdopodobnie tylko łączna obecność 2+3+4 pozwala na przyjęcie sztywności strefy ścinanej średnika słupa dążącej do nieskończoności; w przypadku nośności należy chyba doliczyć nośność zebra do nośności strefy ścinanej. W układzie pokazanym na rysunku \ jest ściskane; wzmacnia efektywniej niż rozciągane /.</p>

Element	Wpływ na sztywność i nośność
4	Rola niejasna, mętnie opisana w Eurokodzie i różnie przedstawiona w literaturze. Prawdopodobnie obecność elementu pozwala na przyjęcie sztywności strefy ściskanej środkiem słupa dążącej do nieskończoności; w przypadku nośności należy chyba doliczyć nośność żebra do nośności strefy ściskanej.
5	Zwiększa grubość środkiem w strefie ścinanej i rozciąganej (aczkolwiek w różny sposób się to w obu strefach uwzględnia); zwiększa sztywność i nośność środkiem w tych strefach. Powinna obejmować strefę poprzecznie ściskaną (jeśli istnieje 6 – dużo niżej niż na rysunku); Eurokod nie precyzuje czy wzmacnia tę strefę. Możliwe do zastosowania tylko alternatywnie: $5 \Leftrightarrow (2, 3, 4)$.
6	Zwiększa ramię działania dla kolejnych szeregów śrub (teoretyczna oś obrotu przesuwa się z punktu A do B); łatwy sposób na zwiększenie sztywności i nośności węzła.
7	Zwiększa grubość półki słupa, może zapobiec efektowi dźwigni; zwiększa sztywność i nośność zginanej półki słupa.
8	Likwiduje szczeliny związane z imperfekcjami wymiarów ryglu i położenia słupa; bez wpływu na sztywność i nośność.
9	Podparcie belki / ryglu w czasie montażu

Obciążenie złożone

Powyższa procedura dotyczy sytuacji, gdy na węzeł działa tylko moment zginający. Co się stanie, gdyby na węzeł działała tylko siła osiowa / siła osiowa i moment zginający?

Zgodnie z EN 1993-1-8 6.2.7.1 (2), możemy liczyć węzeł w powyższy sposób tylko gdy $N_{Ed} \leq 0,05 N_{Rd}$ belki. Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, nie można stosować powyższych wzorów. Brak jednak w Eurokodzie informacji, co wówczas należy zrobić.

Jest tylko niejasna wzmianka w EN 1993-1-8 6.2.7.1 (2), że gdy $N_{Ed} > 0,05 N_{Rd}$ nośność węzła sprawdzana jest ze wzoru:

$$M_{j, Ed} / M_{j, Rd} + N_{j, Ed} / N_{j, Rd} \leq 1,0$$

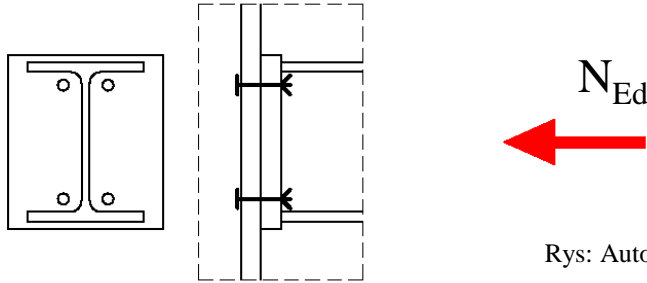
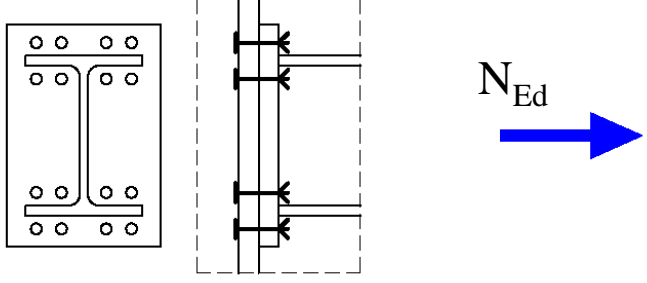
Nie jest jednak wytłumaczone co znaczy $N_{j, Rd}$ oraz czy $M_{j, Rd}$ jest liczone tak samo jak dla przypadku $N_{Ed} \leq 0,05 N_{Rd}$.

Założenia dla $N_{Ed} > 0,05 N_{Rd}$:

Propozycja pierwsza: węzeł jako całość

$M_{j, Rd}$ jest liczone tak samo jak dla $N_{Ed} \leq 0,05 N_{Rd}$;

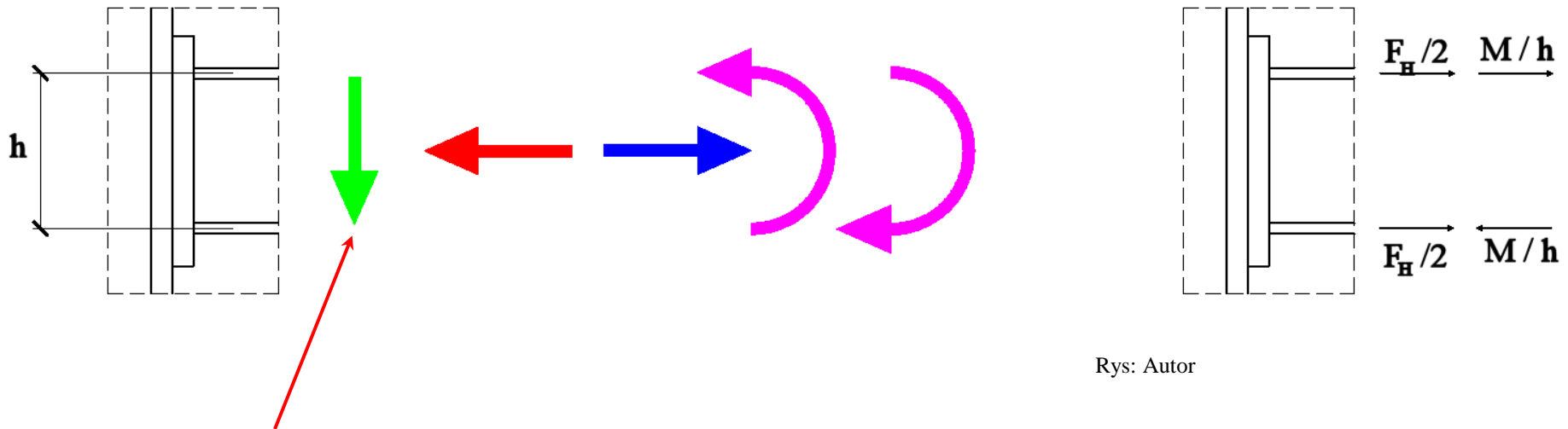
$N_{j, Rd}$ zależy od zwrotu siły :

 <p>Rys: Autor</p>	
<p>$N_{j, Rd} = \min$ (ściskana półka belki, ściskany środek słupa, ścinany środek słupa);</p> <p>Efekt nierównomiernego ściskania / rozciągania</p>	<p>$N_{j, Rd} = \min$ [$\min_{\text{I rząd śrub}}$ (rozciągany środek słupa, zginana półka słupa, zginana blacha czołowa, rozciągany środek belki) + $\min_{\text{II rząd śrub}}$ (...) + ... + $\min_{\text{III rząd śrub}}$ (...), ścinany środek słupa]</p>

Propozycja druga: odrębne obliczenia dla grup śrub wokół górnej i dolnej półki

Siła osiowa i moment zginający są redukowane do sił w środkach ciężkości półek.

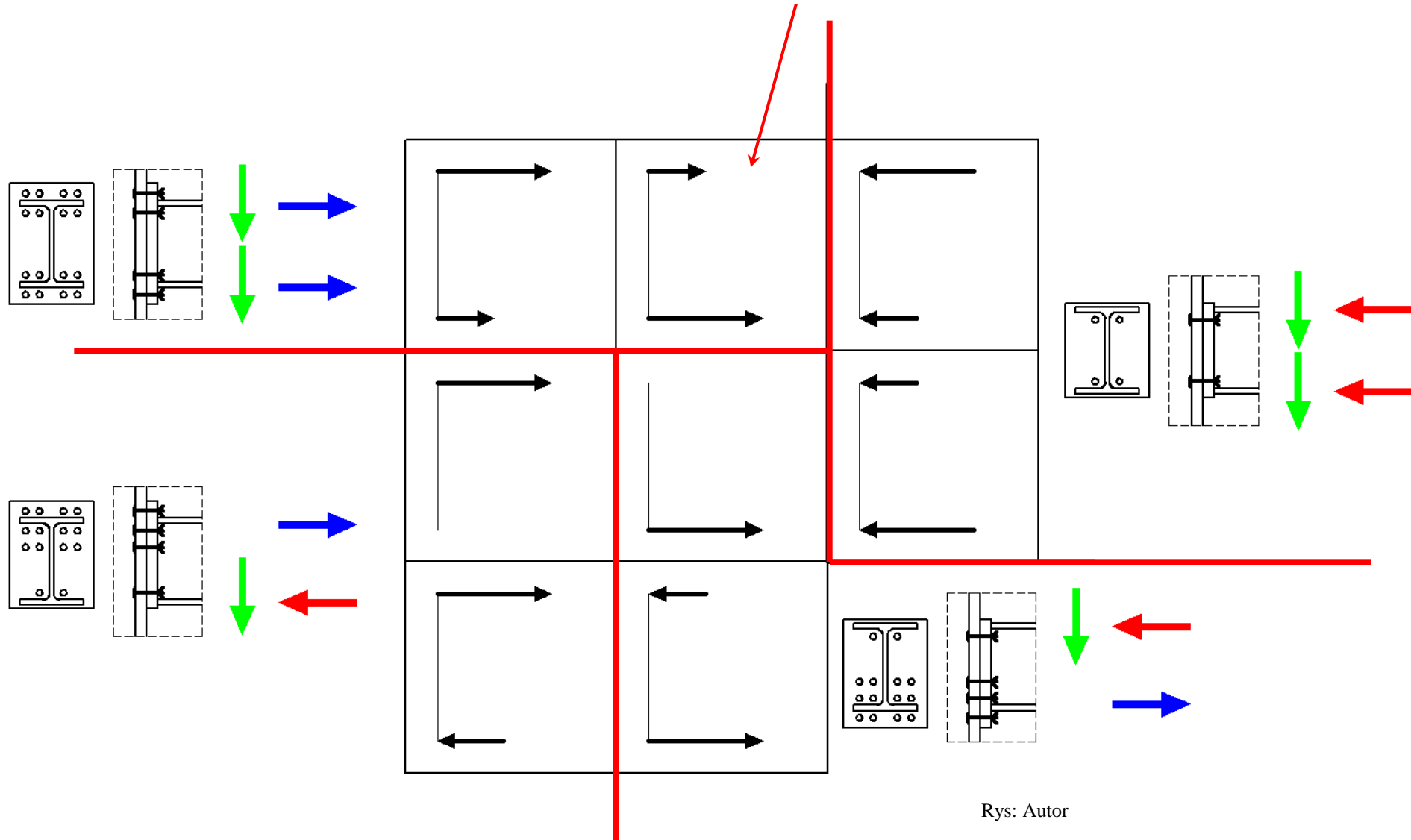
Nośność obu części (górnej i dolnej) jest obliczana oddzielnie (jak dla tylko części rozciąganej i tylko części ściskanej). Nośność obu części jest obliczana w taki sam sposób, jak na poprzedniej stronie.



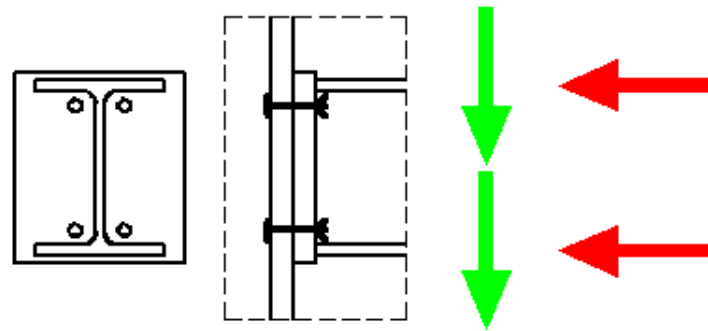
Rys: Autor

Siła ścinająca zawsze istniała w tego typu połączeniach. Jest to efekt grawitacji i ciężaru własnego elementów.

Moment zginający, siła osiowa, siła ścinająca: moment zginający i siła osiowa przyłożone do półek belki (#t / 85). Następny krok zależy od wartości sił w obu półkach:



- Węzeł rozciągany - tylko siła ścinająca lub siła ścinająca + siła ściskająca;
- Górna i dolna część węzła obliczane oddzielnie (różne żebra poziome?);
- Siła ścinająca dla jednej śruby = globalna siła ścinająca / liczba śrub;
- Siła ściskająca nie działa na śruby.

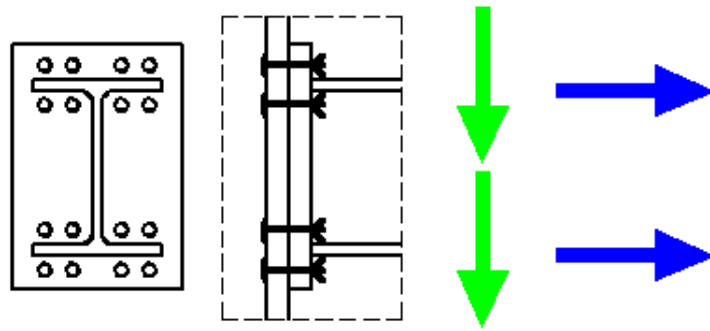


Rys: Autor

Siła ściskająca: nośność węzła obliczona zgodnie z #t / 84

Dodatkowo dla siły ścinającej nośność zgodnie z #t / 53

- Węzeł rozciągany - siła ścinająca i siła rozciągająca;
- Górna i dolna część węzła obliczana oddzielnie (różna liczba śrub?);
- Siła ścinająca dla jednej śruby = globalna siła ścinająca / liczba śrub;
- Siła rozciągająca dla jednej śruby = globalna siła rozciągająca / liczba śrub.



Rys: Autor

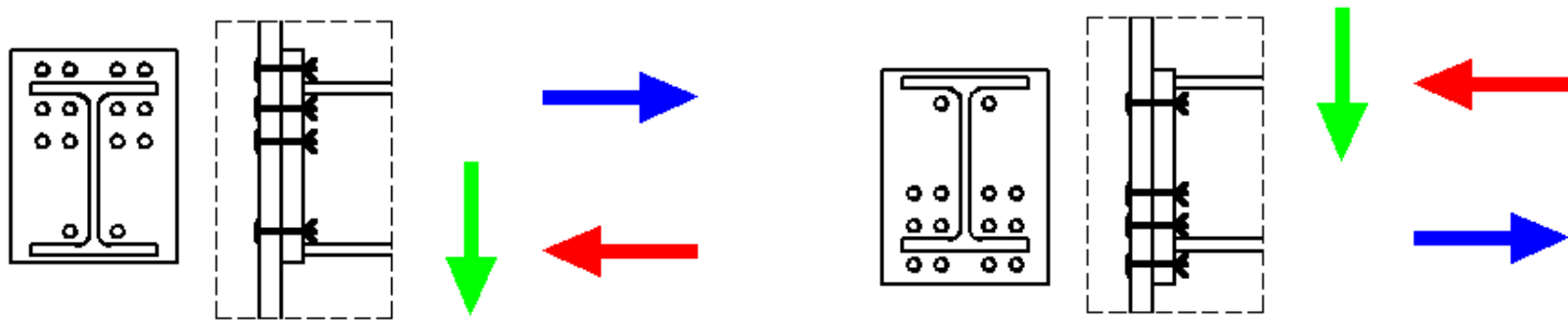
Siła rozciągająca: nośność połączenia obliczona zgodnie z #t / 84

Dodatkowo dla siły ścinającej nośność zgodnie z #t / 53

Dodatkowo, ze względu na działanie obu sił na śrubę, sprawdzany jest trzon śruby (EN 1993-1-8 tab. 3.4):

$$F_{v, Ed} / F_{v, Rd} + F_{t, Ed} / (1,4 F_{t, Rd}) \leq 1,0$$

- Węzeł zginany - siła ścinająca, siły rozciągające i ściskające;
- Górna i dolna część węzła obliczane oddzielnie (rozciąganie / ściskanie);
- Siła ścinająca dla jednej śruby = globalna siła ścinająca / liczba śrub;
- Siła rozciągająca dla jednej śruby = globalna siła rozciągająca / liczba śrub.



Rys: Autor

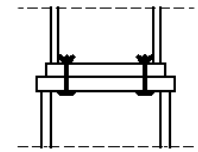
Siła rozciągająca: nośność połączenia obliczona zgodnie z #t / 84

Siła ściskająca: nośność połączenia obliczona zgodnie z #t / 84

Dodatkowo dla siły ścinającej nośność zgodnie z #t / 53

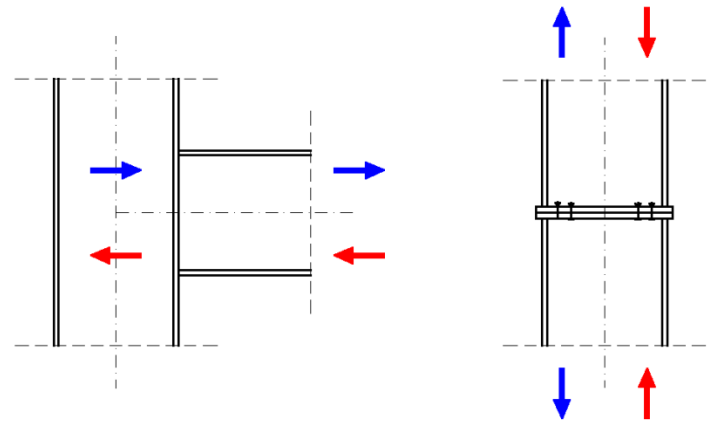
Węzeł doczołowy w słupie wymaga odmiennego podejścia.

Rys: steelconstruction.info



Rys: Autor

Słup-słup – brak belki.

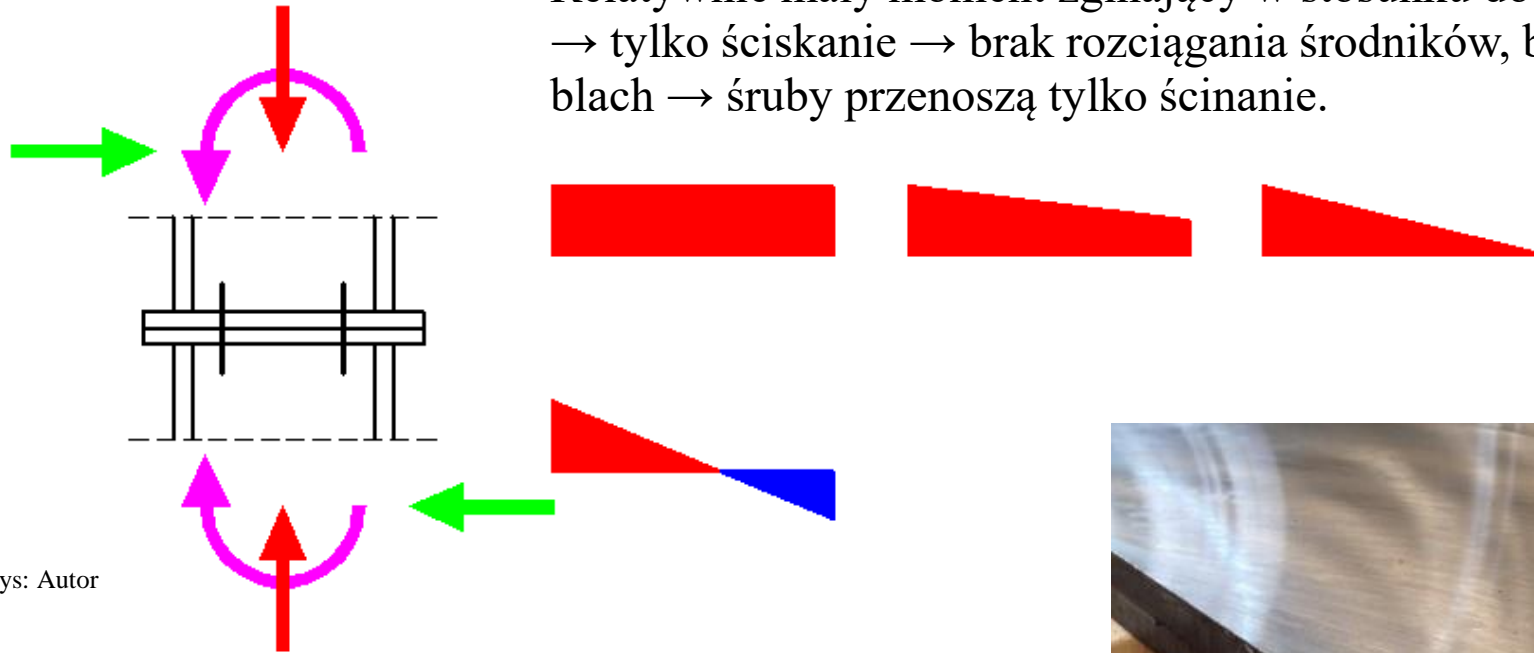


Rys: Autor

W węzłach śrubowych belka-słup siły są przykładane wzdłużnie do belki i poprzecznie do słupa. W węzle słup-słup siły są przykładane wzdłużnie do obu części słupa. Ze względu na ten sposób przyłożenia siły, nośność tego typu węzła obliczana jest na podstawie wzorów dla belek (nośność środka belki przy rozciąganiu, nośność półki belki na ściskanie, blacha kontaktowa przy zginaniu miejscowym).

Obliczenia zależą od rozkładu naprężeń w węźle.

Relatywnie mały moment zginający w stosunku do siły ściskającej
→ tylko ściskanie → brak rozciągania środków, brak zginania blach
→ śruby przenoszą tylko ścinanie.



Rys: Autor

Relatywnie duży moment zginający w stosunku do siły ściskającej → ściskanie i rozciąganie → klasyczny węzeł doczołowy → śruby przenoszą rozciąganie i ścinanie.



Rys: hoverdale.com

Obie powierzchnie blach czołowych należy zeszlifować na gładko, aby zapewnić pełny kontakt w ściskanej części węzła.

Ważna informacja: przy różnych kombinacjach działań możliwe są różne rozkłady sił w pasach górnym i dolnym.



Rys: Autor

Zagadnienia egzaminacyjne

Węzły zakładkowe i doczołowe – podobieństwa i różnice

Redystrybucja obciążeń w węźle zakładkowym

Podobieństwa i różnice węzłów śrubowych kategorii D, E

Parametry ważne dla nośności węzła kategorii D, E

Części składowe węzła

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@usk.pk.edu.pl