

# Konstrukcje metalowe II

## Wykład V

### Estakady podsuwnicowe

#### Belki, słupy, stężenia

# Spis treści

Obliczenia zmęczeniowe → #t / 3

Odkształcenia → #t / 19

Połączenia → #t / 29

Słupy → #t / 33

Podstawy słupów → #t / 86

Stężenia → #t / 91

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 94

## Obliczenia zmęczeniowe

EN 1993-1-9

$$\Delta\sigma_E = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\sigma_{\max} = \sigma \text{ (ciężar własny konstrukcji + obciążenia zmienne)}$$

$$\sigma_{\min} = \sigma \text{ (ciężar własny konstrukcji)}$$

$$\Delta\tau_E = \tau_{\max} - \tau_{\min}$$

$$\tau_{\max} = \tau \text{ (ciężar własny konstrukcji + obciążenia zmienne)}$$

$$\tau_{\min} = \tau \text{ (ciężar własny konstrukcji)}$$

EN 1993-1-9 (8.1), (8.2), (8.3)

$$\Delta\sigma_E / (1,5 f_y) \leq 1,0$$

$$\Delta\tau_E / (1,5 f_y / \sqrt{3}) \leq 1,0$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E / (\Delta\sigma_R \gamma_{Mf}) \leq 1,0$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_E / (\Delta\tau_R \gamma_{Mf}) \leq 1,0$$

$$[\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E / (\Delta\sigma_R \gamma_{Mf})]^3 + [\gamma_{Ff} \Delta\tau_E / (\Delta\tau_R \gamma_{Mf})]^5 \leq 1,0$$

EN 1993-1-9 tab. 3.1

$\gamma_{Mf}$

Metoda oceny	Konsekwencje zniszczenia	
	Niskie	Wysokie
Metoda tolerancji uszkodzeń	1,00	1,15
Metoda bezwarunkowej żywotności	1,15	1,35

$\gamma_{Ff} = 1,0$

Określenie „konsekwencje zniszczenia” dotyczy nie tylko klas konsekwencji (CC). Przede wszystkim odnosi się do schematu statycznego konstrukcji. Każde uszkodzenie belki jednoprzęsłowej (lub innej konstrukcji statycznie wyznaczalnej) może spowodować zniszczenie całości.

Konsekwencje	Konstrukcja statycznie wyznaczalna	Konstrukcja statycznie niewyznaczalna
Wysokie	Część główna (np. belka podsuwnicowa)	CC3, CC2
Niskie	Części drugorzędne (np. tężnik hamowny)	CC2, CC1

## EN 1993-1-9 3(7)

### Metoda tolerancji uszkodzeń

- odpowiedni dobór rozwiązań konstrukcyjnych, materiałów i poziomu naprężeń, które w wypadku powstawania pęknięć charakteryzują się małą prędkością propagacji oraz znaczną długością krytyczną;
- zapewnienie wielokrotnych ścieżek przepływu obciążenia;
- zastosowanie rozwiązań powstrzymujących rozwój pęknięć;
- zastosowanie rozwiązań łatwo dostępnych podczas regularnych kontroli;

### Metoda bezwarunkowej żywotności

- dobór rozwiązań konstrukcyjnych i taki poziom naprężeń, które skutkują żywotnością zmęczeniową wystarczającą z punktu widzenia wskaźnika niezawodności  $\beta$  właściwego przy sprawdzaniu stanów granicznych nośności na końcu projektowego okresu użytkowego;

Metoda	Wnioski	Zalecenia
Tolerancji uszkodzeń	Konieczne są regularne przeglądy i naprawy	Kiedy niewielkie uszkodzenia pojawiające się pomiędzy naprawami nie stanowią zagrożenia
Bezwarunkowej żywotności	Brak konieczności przeglądów i napraw	Kiedy nawet niewielkie uszkodzenia są zagrożeniem dla elementów lub całości konstrukcji

Metoda tolerancji uszkodzeń: tańsza konstrukcja, dodatkowe koszty przeglądów i napraw

Metoda bezwarunkowej żywotności: droższa konstrukcja, brak kosztów ponoszonych na naprawy

## EN 1991-3 (2.16)

Naprężenia są obliczane dla specyficznie zdefiniowanego obciążenia zmiennego:

$$\Delta\sigma_E = \sigma_E (\text{ciężar własny konstrukcji} + Q_e) - \sigma_E (\text{ciężar własny konstrukcji}) = \sigma_E (Q_e)$$

$$\Delta\tau_E = \tau_E (\text{ciężar własny konstrukcji} + Q_e) - \tau_E (\text{ciężar własny konstrukcji}) = \tau_E (Q_e)$$

$Q_e \rightarrow$  wyk #3 / 69 - 78








$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$ :

EN 1993-1-9

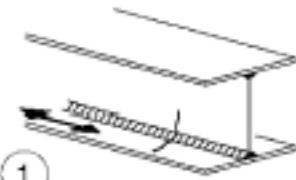
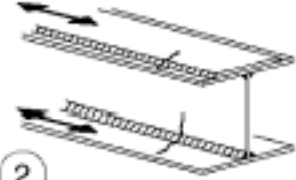

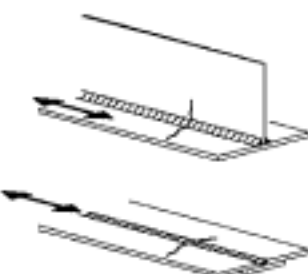
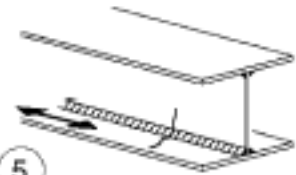
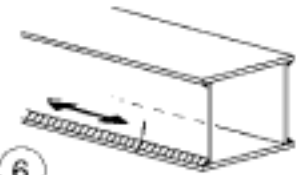
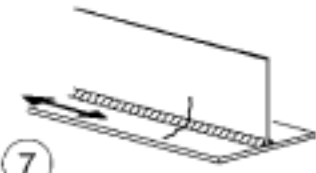

Tab. 8.1	Elementy bez spoin i złącza na łączniki mechaniczne
Tab. 8.2	Kształtownik spawane
Tab. 8.3	Poprzeczne spoiny czołowe
Tab. 8.4	Dospawane blachy węzłowe i żebra
Tab. 8.5	Złącza spawane nośne
Tab. 8.6	Kształtowniki rurowe
Tab. 8.7	Węzły kratownic z kształtowników rurowych
Tab. 8.8	Pomosty ortotropowe – podłużnice o przekroju zamkniętym
Tab. 8.9	Pomosty ortotropowe – podłużnice o przekroju otwartym
Tab. 8.10	Połączenia górnych pasów ze środnikami w belkach podsuwnicowych



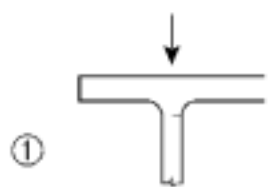
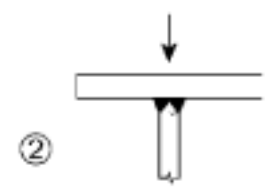
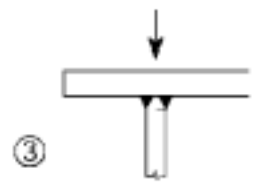
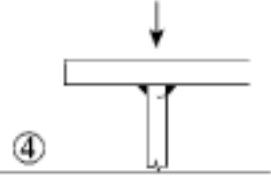
Tab. 8.1 Cięcia elementów

$\Delta\sigma_C$	160	zmęczeniowej.   	2) Kształtowniki wałcowane; 3) Kształtowniki rurowe bez szwu – prostokątne lub okrągłe.	i wały wał obrobione do uzyskania gładkości.
$\Delta\sigma_C$	140		<u>Blachy cięte mechanicznie lub gazowo;</u> 4) Materiał po automatycznym cięciu gazowym lub cięciu mechanicznym, a następnie wyrównany. 5) Materiał po automatycznym cięciu gazowym z płytkami i regularnymi rowkami na powierzchni cięcia; materiał po ręcznym cięciu gazowym, w którym usunięto brzegowe nieciągłości. Automatyczne cięcie gazowe zgodne z wymaganiami EN 1090.	4) Wszystkie nieciągłości zadziory, p Strefy cięć obrobione szlifowane Ewentualnie szlifowanie wyłącznie <u>Szczegóły</u> – Wklęsłość być odpow przez szlifi $\leq 1/4$ ) lub u cą właściw koncentrac – Nie stosi wypełniają
$\Delta\sigma_C$	125			<u>Szczegóły</u>
$\Delta\tau_C$	100 $m = 5$	 	6) i 7) Wyroby walcowane i ciągnięte jak elementy 1, 2 i 3 (przy ścinaniu).	$\Delta\tau$ oblicza $\tau = \frac{V S(t)}{I r}$

Tab. 8.2 Spoiny środkik – półki

			Wzrost spoiny podłużnej	Wzrost
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	125	 	<p>1) Spoiny czołowe wykonywane automatycznie obustronnie.</p> <p>2) Spoiny pachwinowe wykonywane automatycznie. Sprawdzenie nakładek – wg Tablicy 8.5, jak w przypadku elementu 6) lub 7).</p>	Nie że n spek kont
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	112	 	<p>3) Spoiny czołowe lub pachwinowe wykonane automatycznie z obu stron, zawierające kratery.</p> <p>4) Spoiny czołowe wykonywane automatycznie jednostronnie na ciągłej podkładce bez kraterów.</p>	4) G przy.
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	100	 	<p>5) Ręcznie wykonywane spoiny pachwinowe lub czołowe.</p> <p>6) Ręcznie lub automatycznie wykonane spoiny czołowe jednostronnie, w szczególności w dźwigarach skrzynkowych</p>	5), 6 pas znak pow aby uzys bez
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	100		<p>7) Naprawiane automatycznie lub ręcznie spoiny pachwinowe lub czołowe w elementach od 1) do 6).</p>	7) U niez drog i prz kont zach
			<p>8) Przerzywane podłużne spoiny pachwinowe</p>	8) Z pod

Tab. 8.10 Połączenia górnych pasów ze środnikami w belkach podsuwnicowych

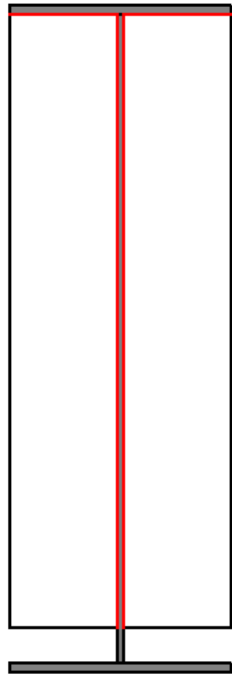
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	160		1) Dw
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	71		2) Złączoł
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	36*		3) Złąc spoin z EN
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	36*		4) Sp

## EN 1993-6 8.2

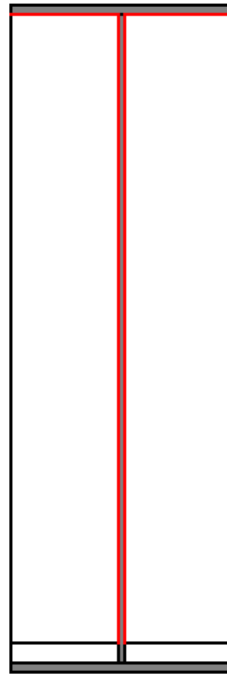
(4) W przypadku suwnic należących do wysokich klas obciążenia (gdy miarodajne jest kryterium zmęczeniowe), żebra poprzeczne lub inne elementy nie powinny być spawane do górnym<sup>N4)</sup> pasów belek podsuwnicowych.

---

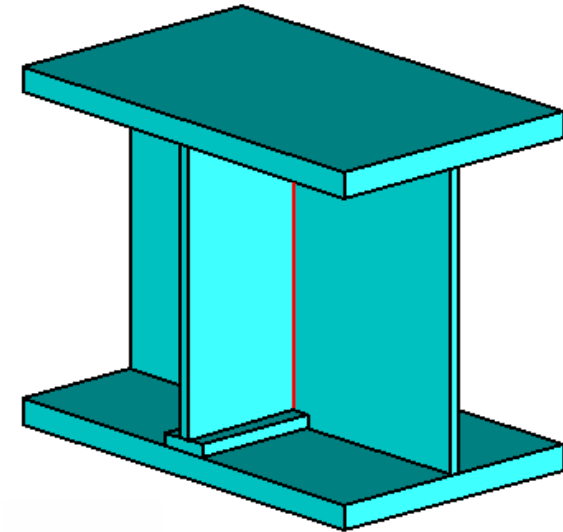
<sup>N4)</sup> Odsyłacz krajowy: Błąd w oryginale: powinno być „ ..nie powinny być spawane do dolnych pasów..”. Chodzi o to, by unikać silnego karbu zmęczeniowego, jakim jest spoina poprzeczna względem kierunku rozciągania.



Rys: Autor



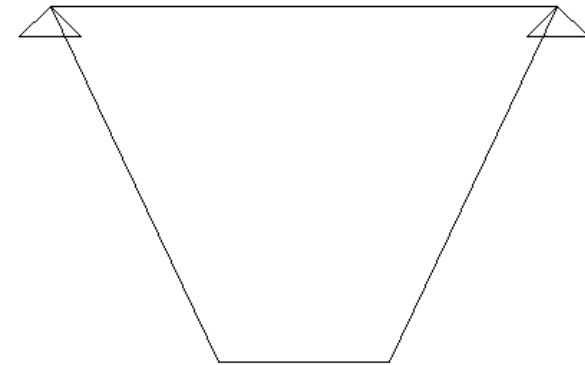
Rys: Autor



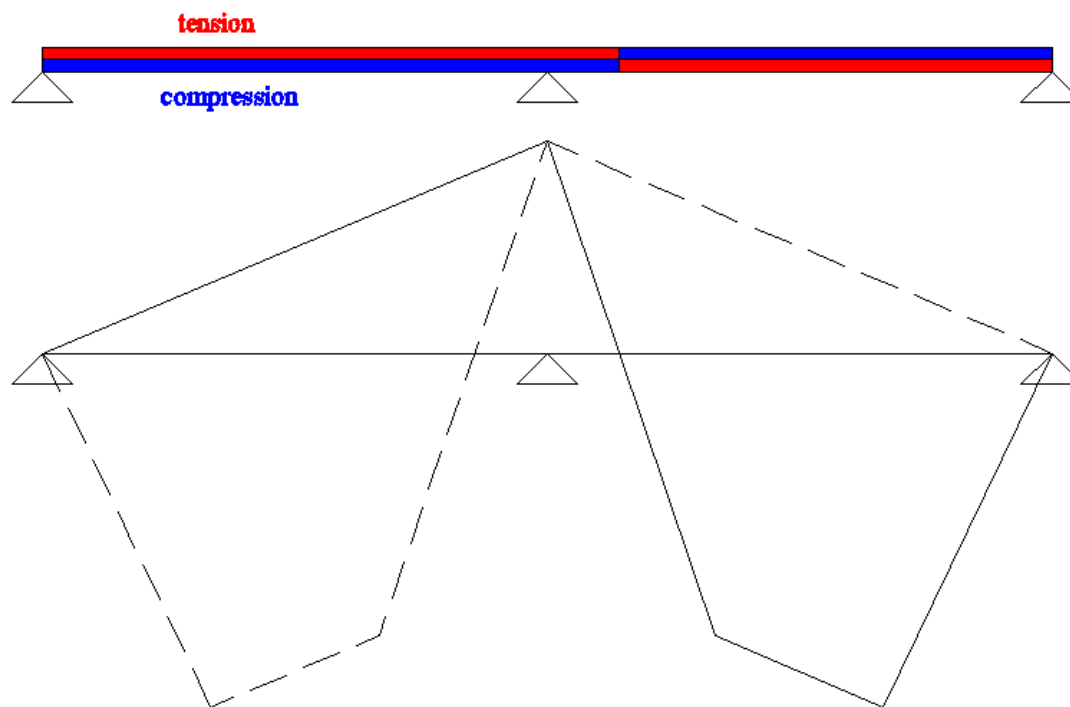
Żebra pionowe nie mogą być spawane do półek dolnych. Stosowane są dwa rozwiązania:

- Wysokość żebra jest mniejsza niż wysokość środków (brak kontaktu żebra z półką dolną)
- Pomiędzy żebrem a półką dolną umieszcza się dodatkową blachę poziomą metodą „na wcisk” (grubość blachy minimalnie większa niż prześwit między żebrem a półką; pełny kontakt między żebrem a półką).

Zalecana jest belka jednoprzęsłowa: bez względu na kombinacje obciążeń, półka górna jest zawsze ściskana a półka dolna zawsze rozciągana.



Rys: Autor

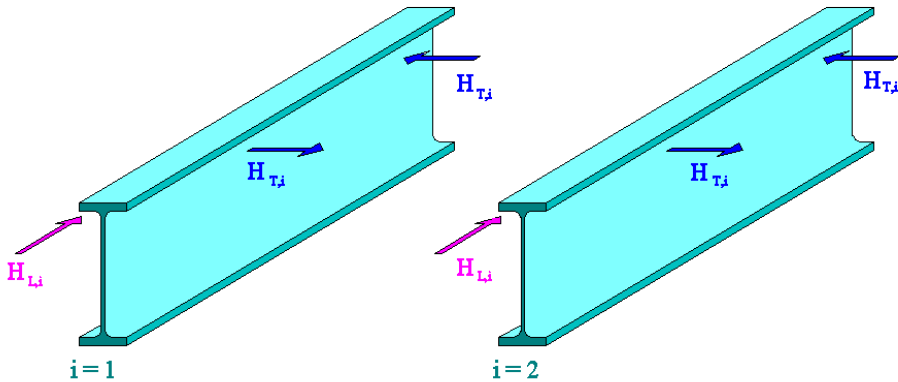


Rys: Autor

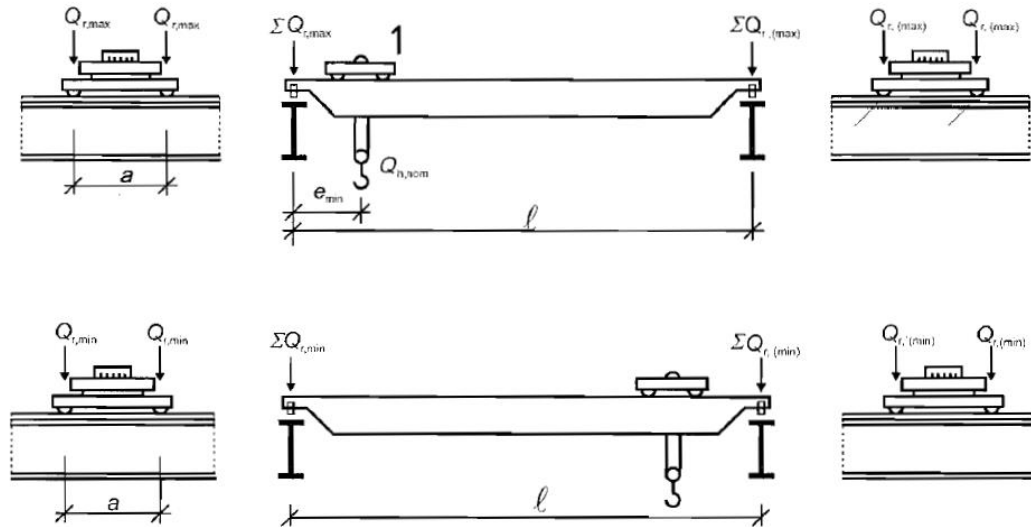
Przy belkach wieloprzęsłowych, w zależności od kombinacji obciążeń pólki mogą być naprzemiennie ściskane i rozciągane.

# Odształcenia

Rys: Autor



Na belki podsuwnicowe działają zarówno obciążenia pionowe jak i poziome. Efektem są dwukierunkowe odkształcenia belek. Przy analizie potrzebne są wartości zarówno minimalnych jak i maksymalnych wartości ugięć, powiązanych z minimalnymi i maksymalnymi wartościami obciążeń.



Rys: EN 1991-3 fig. 2.1

Dla „zwykłych” konstrukcji analizujemy wyłącznie przemieszczenia w pionie i poziomie – wartości dla belek i słupów:

Element	$W_{\max}$ or $w_3$
Dźwigary dachowe (kratowe lub pełnościenne)	$L / 250$
Płatwie	$L / 200$
Blacha profilowana	$L / 150$
Elementy stropów i stropodachów: podciągi	$L / 350$
belki drugorzędne	$L / 250$
Nadproża okien i drzwi	$L / 500$
$W_{\max}$ = netto (całkowite – strzałka odwrotna) $w_3$ = od obciążeń zmiennych $L$ – rozpiętość belki lub 2x wysięg wspornika	

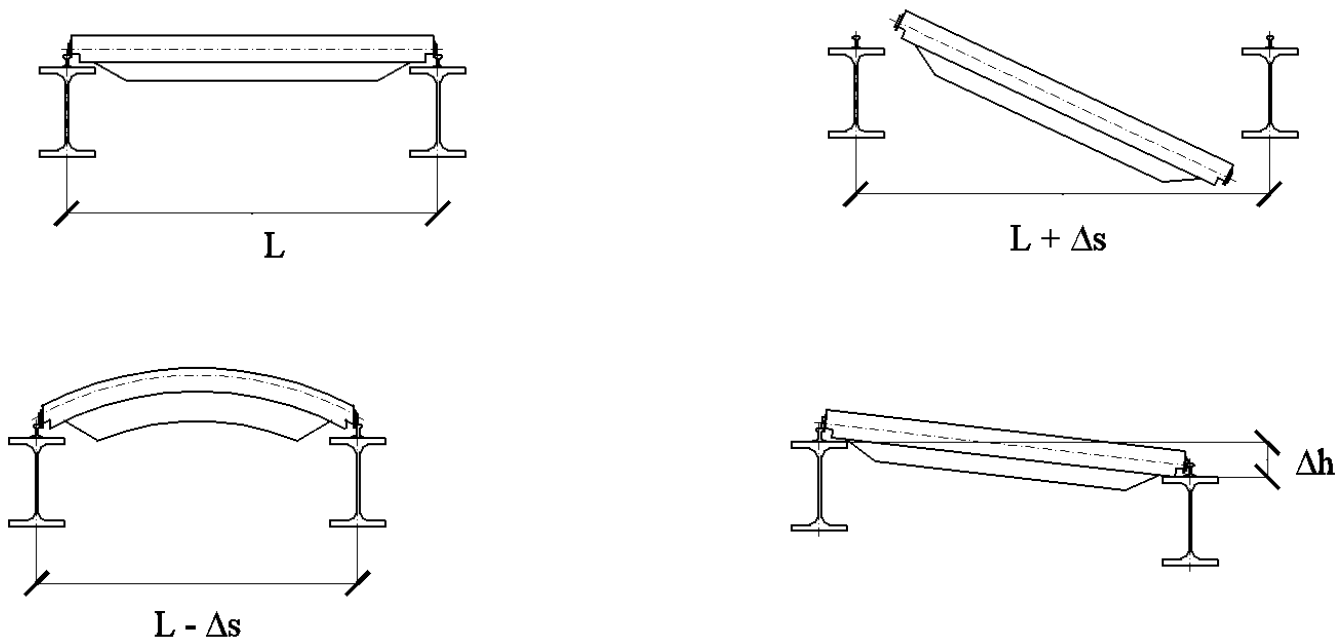
Zaleca się, by przemieszczenia poziome nie przekroczyły wartości:

- $H / 150$  w układach jednokondygnacyjnych bez suwnic
  - $H / 500$  w układach wielokondygnacyjnych
- $H$  – poziom rozpatrywanego rylga względem wierzchu fundamentu

EN 1993-1-1 N.A. 22

Analogicznie podane są warunki dla poziomych i pionowych ugięć belek podsuwnicowych.

Dodatkowo, musimy sprawdzić przemieszczenia wzajemne pary belek podsuwnicowych:

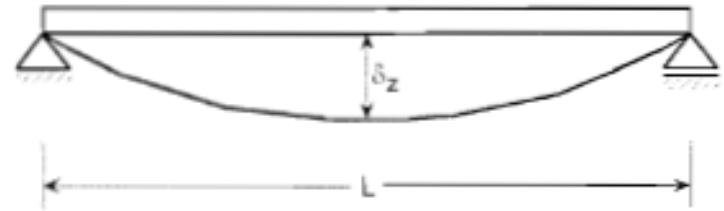


Rys: Autor

Przemieszczenie pionowe, belka  
podsuwnicowa:

$$\delta_z \leq \min( L / 600 ; 25 \text{ mm} )$$

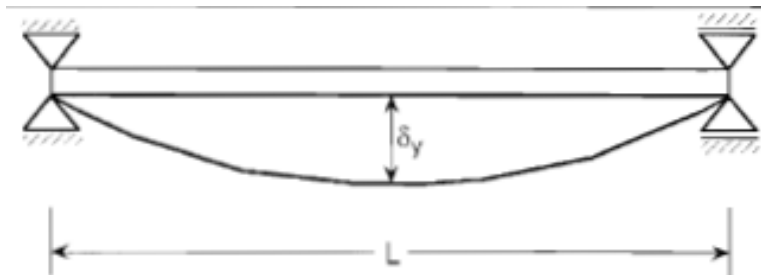
EN 1993-6 tab. 7.1



Przemieszczenie pionowe, belka wciągніка  
jednoszynowego:

$$\delta_{\text{pay}} \leq L / 500$$

Przemieszczenie poziome:



$$\delta_y \leq L / 600$$

EN 1993-6 tab. 7.1

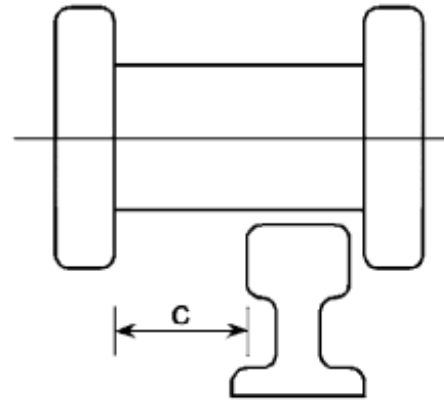
Zmiana odległości poziomej między szynami suwnicy (z uwzględnieniem odkształceń termicznych):



$$\Delta s = \delta_{\text{left}} + \delta_{\text{right}} \leq 10 \text{ mm}$$

## EN 1993-6 tab. 7.1

Poziome ugięcia i odchyłki torów jezdnych rozpatruje się łącznie. Akceptowalne ugięcia i tolerancje są uzależnione od szczegółów konstrukcyjnych i luzów wynikających z elementów prowadzących. Jeśli swoboda przemieszczeń  $c$  między kołnierzem koła i główką szyny lub innymi elementami jest wystarczająco duża ze względu na dopuszczalne odchyłki, to zamawiający i dostawca suwnicy mogą uzgodnić większe wartości graniczne ugięć poziomych.



EN 1993-6 tab. 7.1



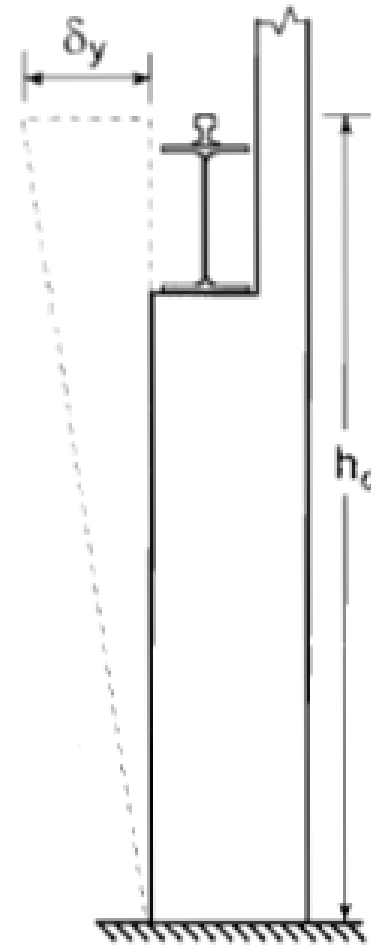
Różnica przemieszczeń pionowych:

$$h_c \leq s / 600$$

EN 1993-6 tab. 7.1

Przechył poziomy słupa estakady / ramy hali,  
podpierającego belkę podsuwnicową:

$$\delta_y \leq h_c / 400$$



Średni wiatr:

→ #3 / 52

20 m /s

EN 1991-3 A.1 (6)

Silny wiatr – zgodnie z EN 1991-1-4:

	V [m/s]
1	22
2	26
3	22

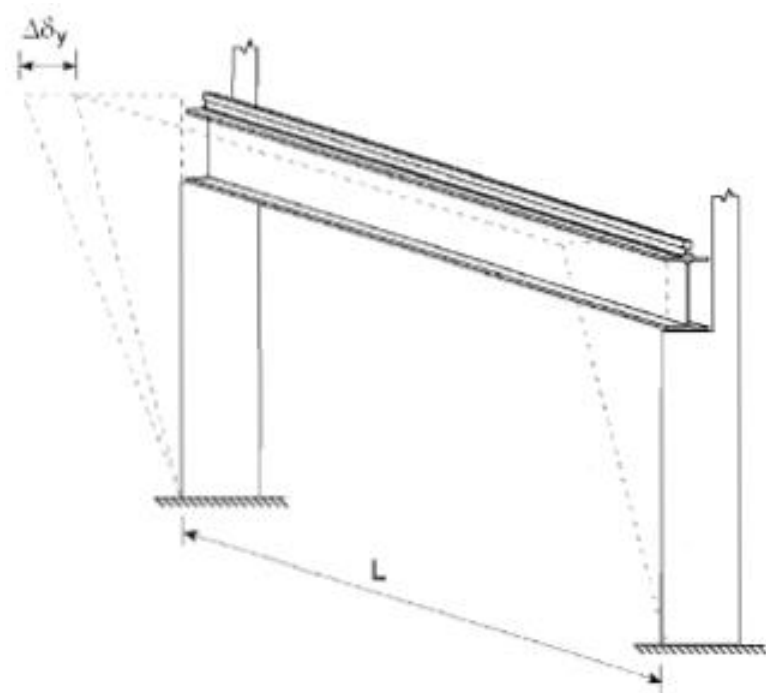


EN 1993-6 tab. 7.1

Różnica przechyłów poziomych dwu  
sąsiednich słupów:

- suwnica w hali (max obciążenie wiatrem);
- suwnica na zewnątrz (wiatr średni);
- kombinacja: wiatr w stanie roboczym + obciążenia poprzeczne od suwnicy;

$$\delta_y \leq L / 600$$



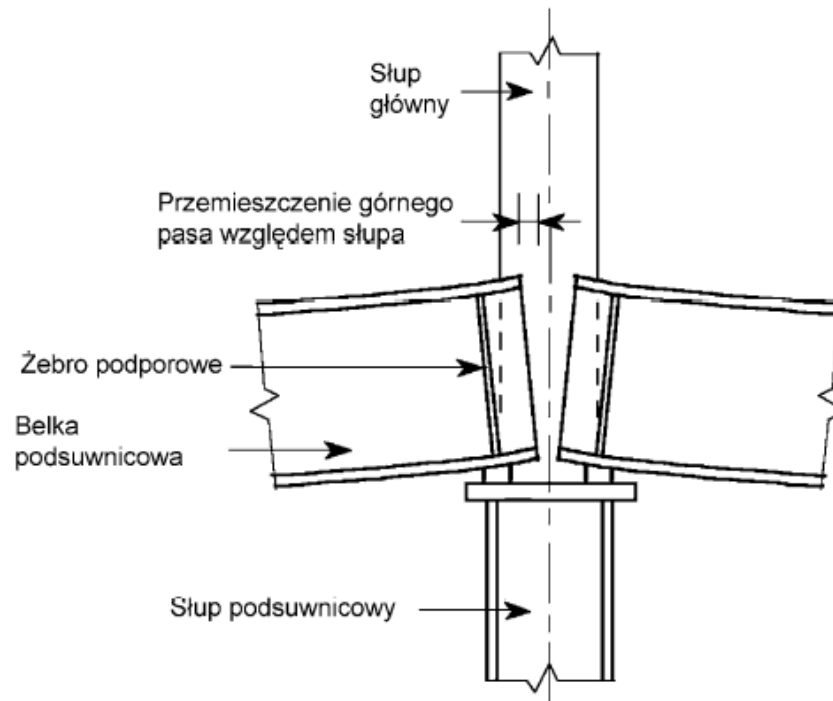
- obciążenie wiatrem w stanie spoczynku suwnicy (max wiatr):

$$\delta_y \leq L / 400$$

## Połączenia

Podporowe elementy złączne, łączące górne pasy belek z konstrukcją wsporczą, powinny w sposób nieskrępowany umożliwiać ruchy związane z obrotami przekrojów końcowych od obciążeń pionowych, obroty pasa górnego od oddziaływań poziomych i ruchy pionowe wynikające z oddziaływań pionowych oraz zużycia i osiadania łożysk belki.

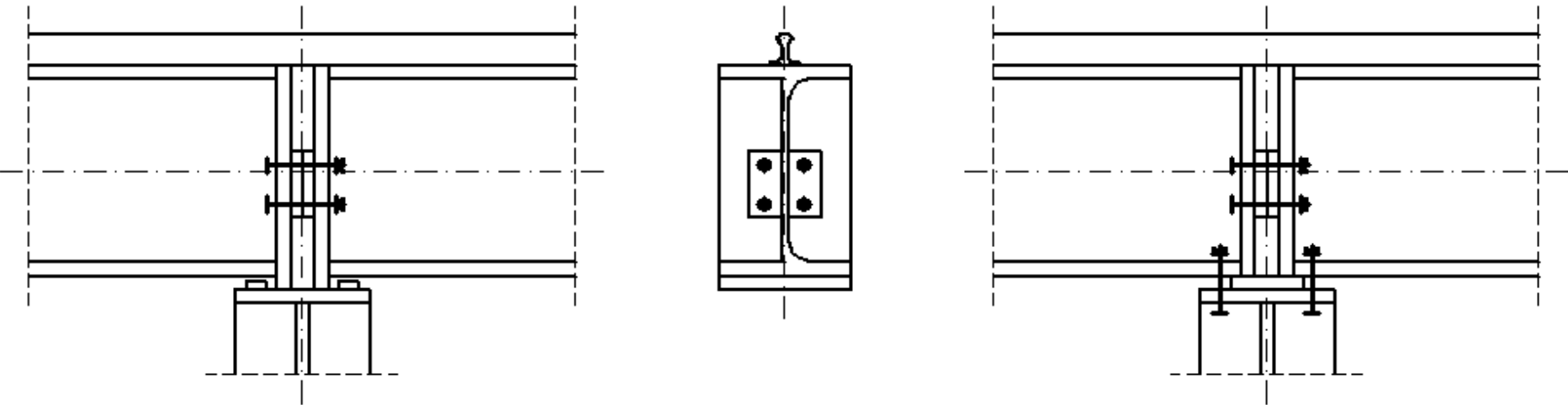
Rys: EN 1993-6 fig. 8.1



Rys: EN 1993-6 fig 8.2



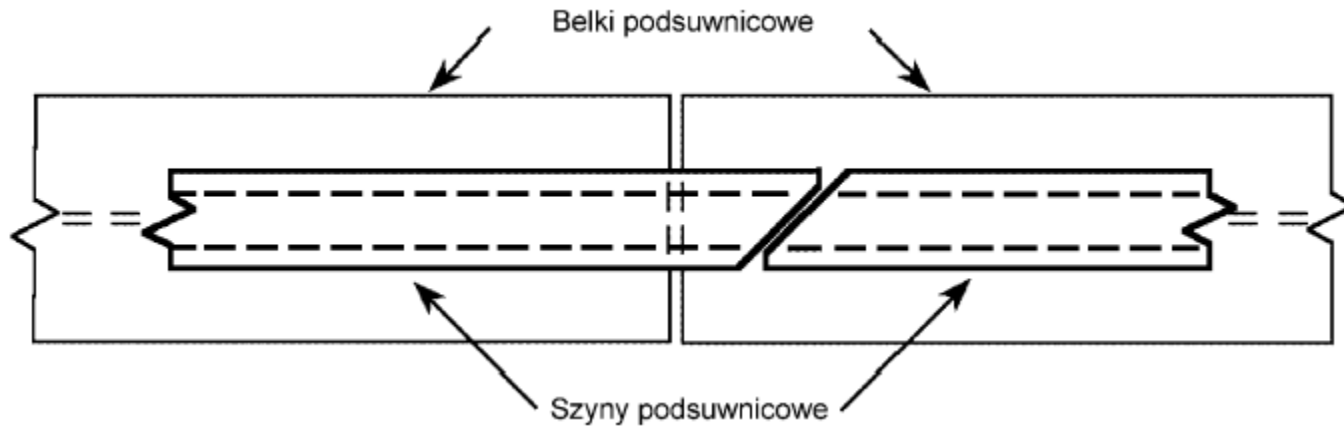
Śruby w połączeniach podłużnych dwu sąsiednich belek powinny być usytuowane nie wyżej niż w osi obojętnej.



Rys: Autor

## Styk szyn

Styk szyn – najlepiej ukośny i przesunięty w stosunku do podpory



Rys: EN 1993-6 fig. 8.3

# Słupy

Rys: stabud.eu



Rys: konar.eu

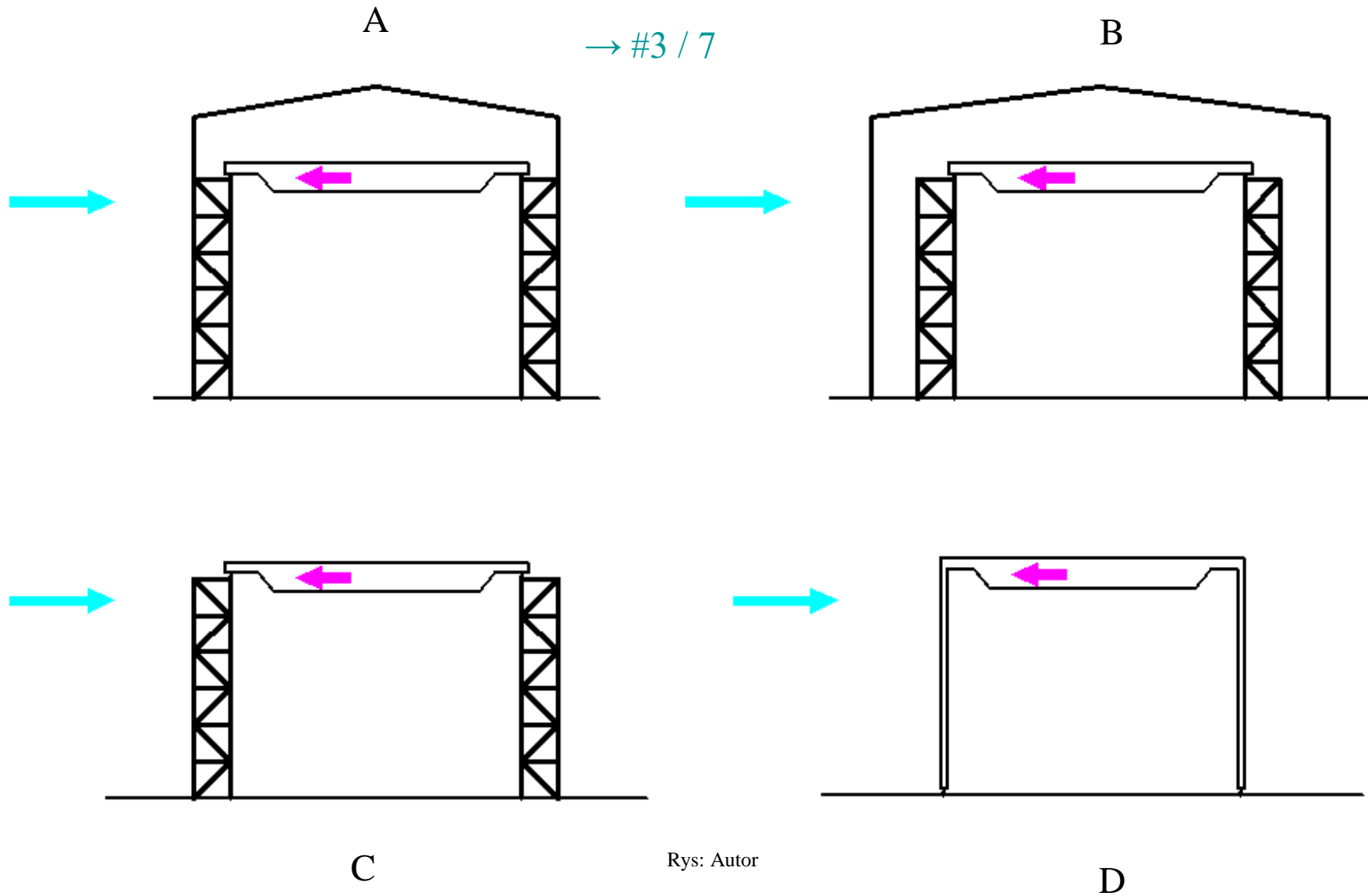


Rys: zksgrzelak.eu

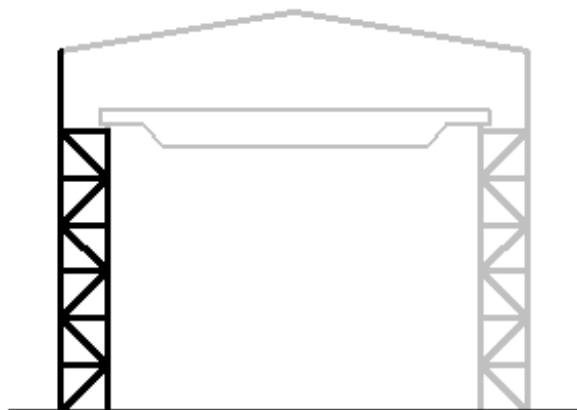
Słupy dwuteowe (spawane / gorąco walcowane)

Słupy z przewiązkami

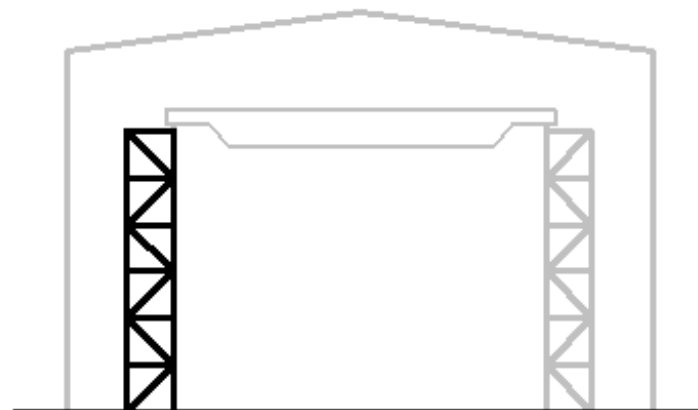
Słupy skratowane



Dodatkowa część słupa ponad suwnicą.



Brak dodatkowej części słupa.



Rys: Autor



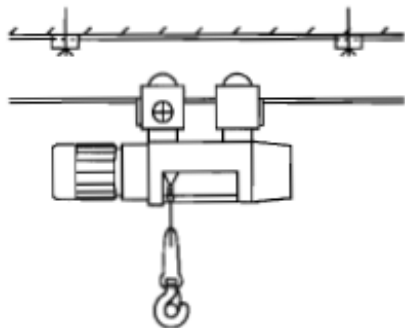
Brak dodatkowej części słupa.



Brak słupa.

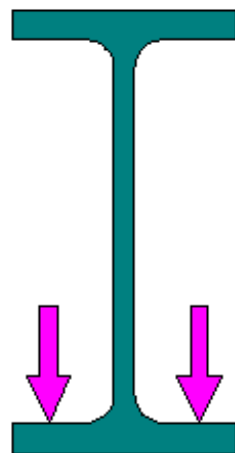
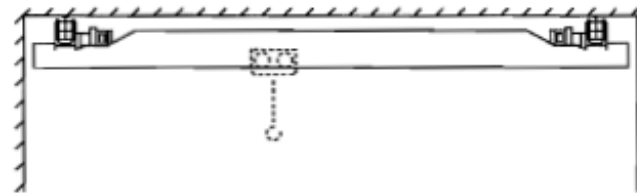
## Wciągnik jednoszynowy

Rys: EN 1991-3 fig.1.2



## Suwnica pomostowa podwieszona

Rys: EN 1991-3 fig.1.3



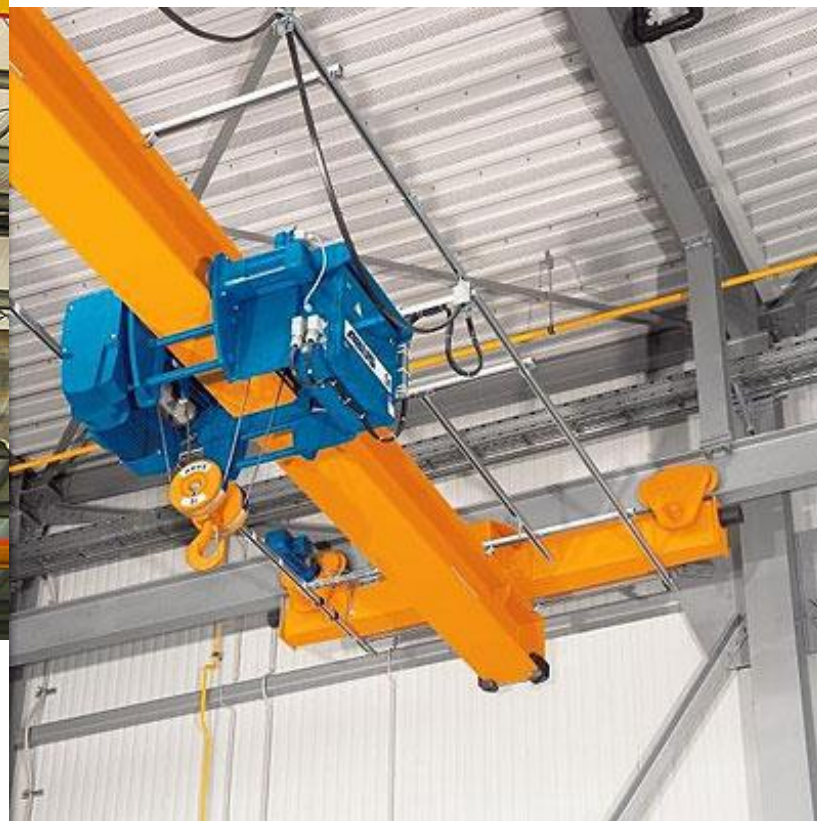
Rys: Autor

Belka podsuwnicowa jest podwieszona do konstrukcji.

Dla wciągników i suwnic podwieszonych najpopularniejszym rozwiązaniem jest podwieszenie belek do konstrukcji głównej lub pomocniczej.



Rys: crsranesystems.com



Rys: abuscranes.pl

Rys: abuscranes.pl



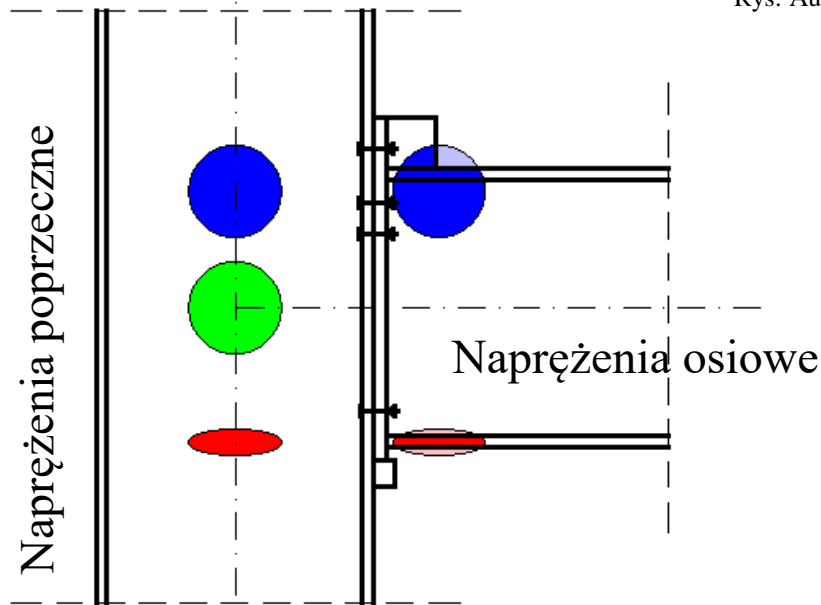
Rys: pelloby.com



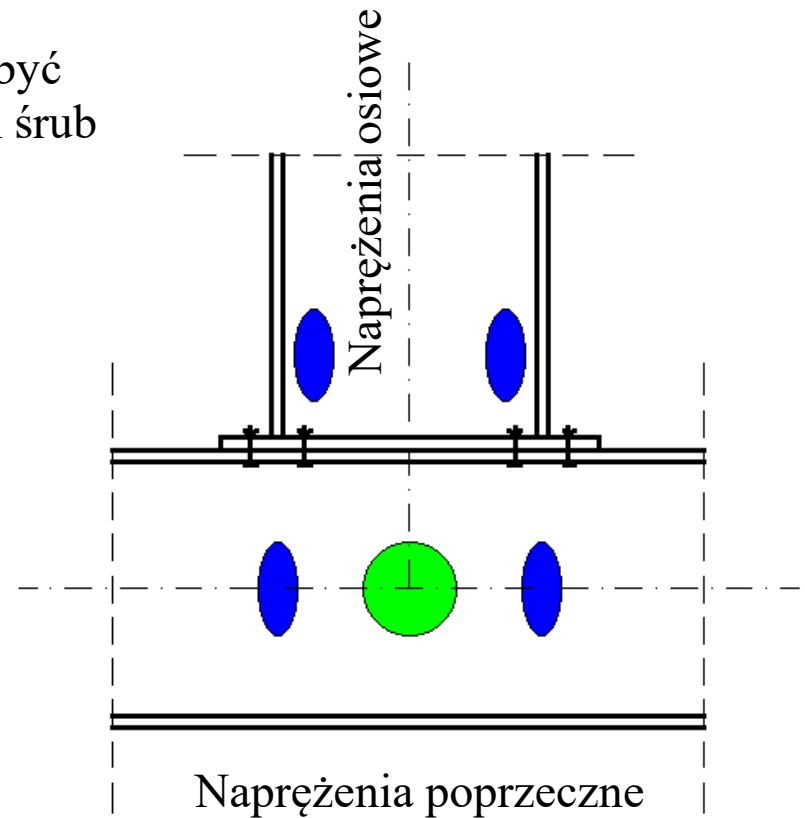
Belki połączone są z wieszakami najczęściej przy pomocy śrub przechodzących przez górną półkę. Zachowanie takiego węzła jest podobne do połączenia śrubowego rygiel-słup,

Rys: resources.scia.net

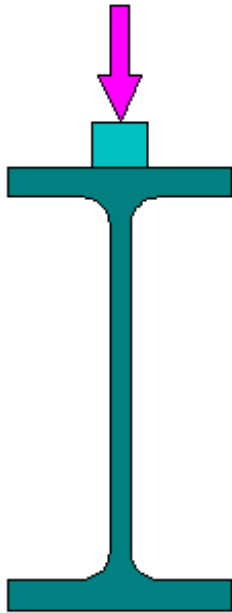
W belce podsuwnicowej pojawiają się wyłącznie **naprężenia rozciągające**. Lokalne **ściananie** może być efektem nierównomiernego wyężenia w grupach śrub po lewej i prawej stronie.



Rys: Autor



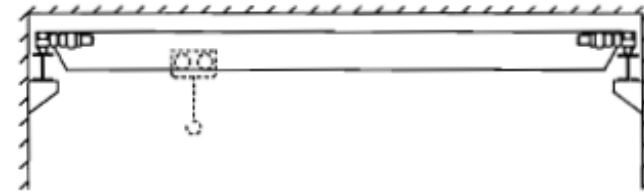
Przy sprawdzaniu belki podsuwnicowej należy użyć wzorów dla słupa w węźle rygiel-słup – w obu przypadkach mamy do czynienia z naprężeniami prostopadłymi do osi elementu. Naprężenia osiowe – jak w ryglu – występują w wieszaku.



Rys: Autor

## Suwnica pomostowa natorowa

Rys: EN 1991-3 fig.1.4



Belka podsuwnicowa podparta przez słup.

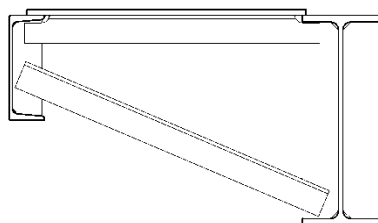
# Suwnica natorowa

Rys: Autor



Słup: dwuteownik gorącowalcowany  
Słup: dwuteownik spawany (półki z blach płaskich)

Słup: dwuteownik gorącowalcowany  
Słup: dwuteownik spawany (półki z blach płaskich)  
Oparcie na wsporniku i / lub zmiana przekroju słupa



Słup: dwuteownik spawany (półki z blach płaskich, ceowników lub dwuteowników)  
Słup skratowany  
Słup z przewiązkami

Słup: dwuteownik spawany (półki z blach płaskich, ceowników lub dwuteowników)  
Słup skratowany  
Słup z przewiązkami  
Zmiana przekroju słupa



Oparcie belki podsuwnicowej na wsporniku + zmiana przekroju słupa w części nadsuwnicowej.

Oparcie belki podsuwnicowej na wsporniku bez zmiany przekroju słupa w części nadsuwnicowej.



Rys: udhavind.com

Słup spawany ze zmiana przekroju dla części nadsuwnicowej.

Słup z przewiązkami, zmiana przekroju.



Rys:hak.com.pl

Słup skratowany.

Rys: zksgrzelak.eu

Rys: stabud.eu



Rys: konar.eu



Rys: konar.eu

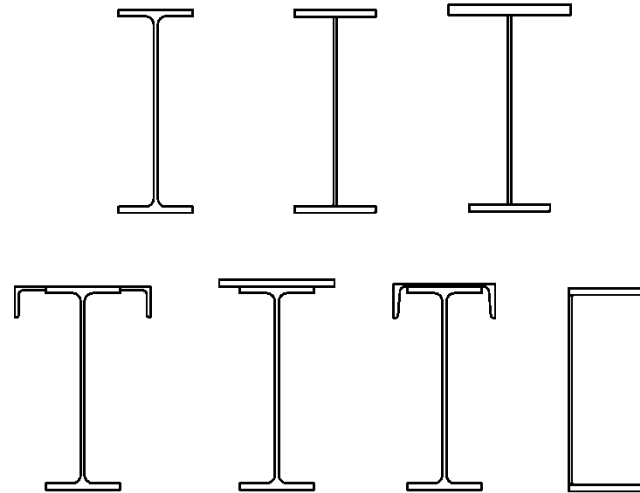


Rys: konar.eu

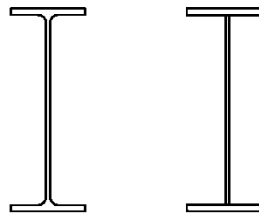


Krótki wspornik to jedyny przypadek belki, w której siły ścinające są ważniejsze od momentu zginającego. Obciążenia pionowe z suwnicy mają dużą wartość, ale wspornik jest zbyt krótki, by wystąpiło w nim istotnej wartości zginanie.

Belka



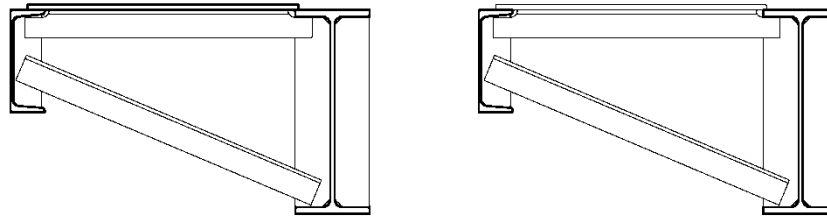
Słup



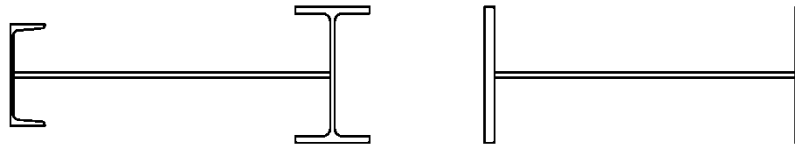
Rys: Autor

Małe siły poziome poprzeczne działające na belkę → małe momenty zginające działające na słup → wysokość przekroju poprzecznego słupa nie musi być duża.

Belka



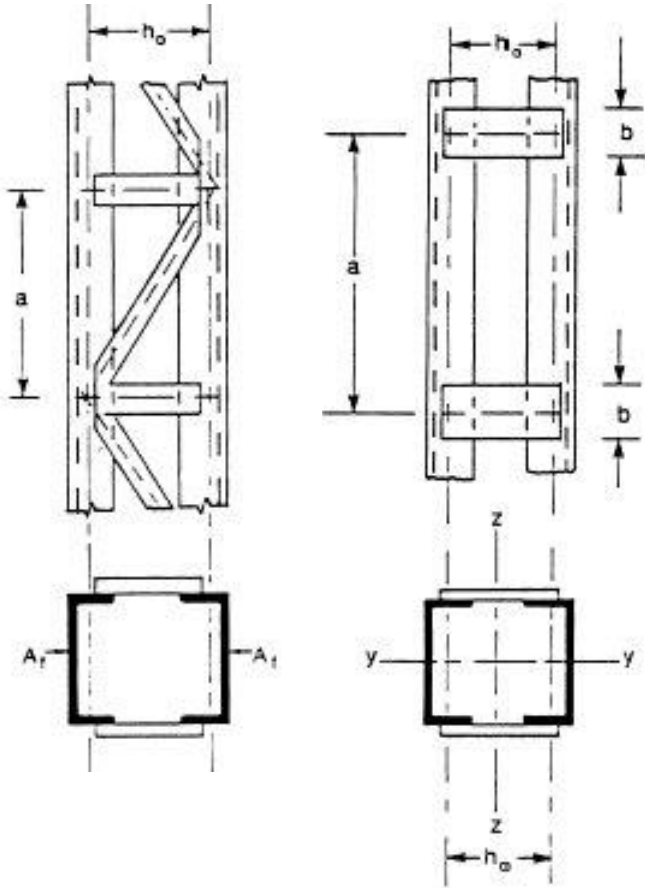
Słup



Rys: Autor

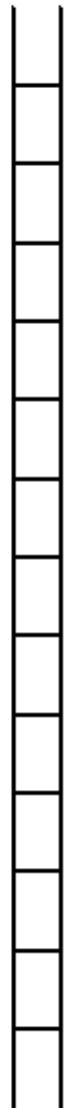
Lub słup z przewiązkami / skratowany

Duże siły poziome poprzeczne działające na belkę → duże momenty zginające działające na słup → potrzebna duża wysokość przekroju poprzecznego słupa.



Rys: zksgrzelak.eu

Dla liczenia tego typu słupów stosujemy specjalną procedurę.



Procedura wynika z uproszczeń,  
zastosowanych w modelu numerycznym.

Oczywiście możliwe jest wprowadzenie  
pełnego schematu konstrukcji, ale  
wywołuje to kilkudziesięciokrotny  
wzrost liczby elementów.

$n = 29$



$n = 41$

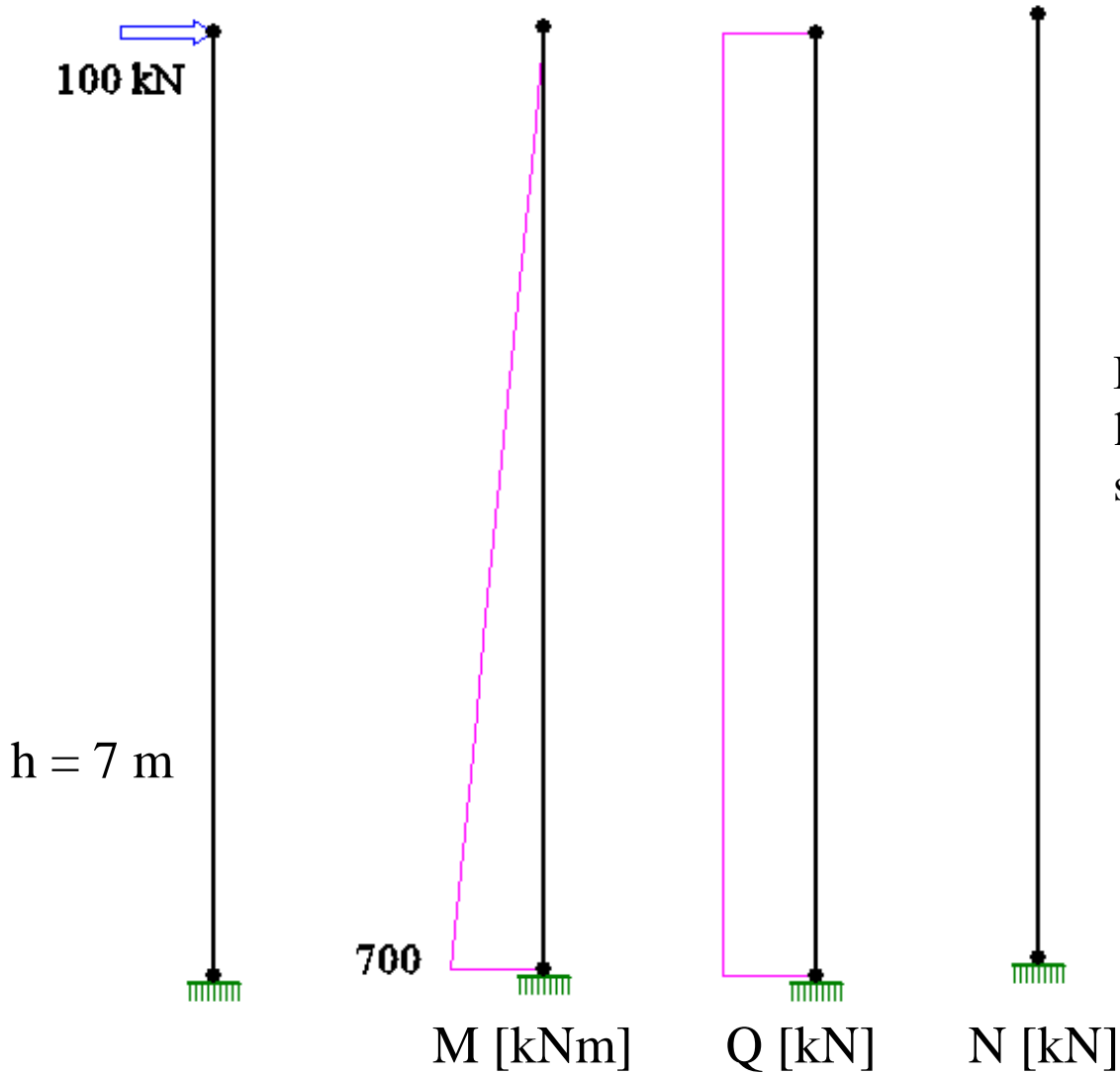
Rys: Autor

Rys: Autor

Bardzo szybko dochodzimy w ten sposób do setek tysięcy elementów, które trzeba wprowadzić i które następnie są obrabiane numerycznie (czas, czas, czas...).



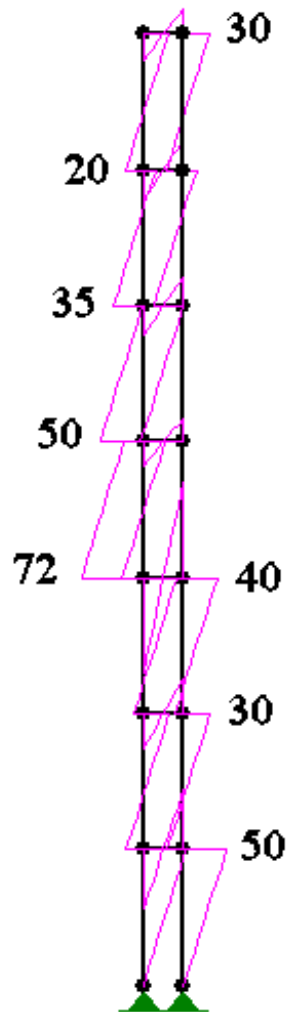
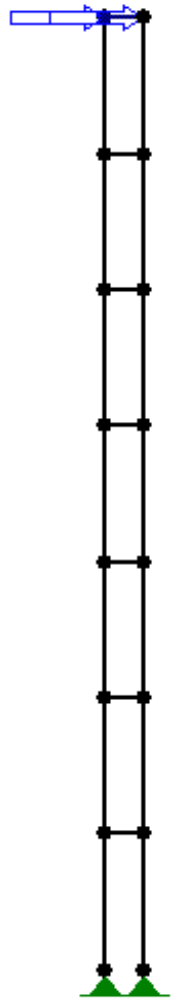
Rys: s9.flog.pl



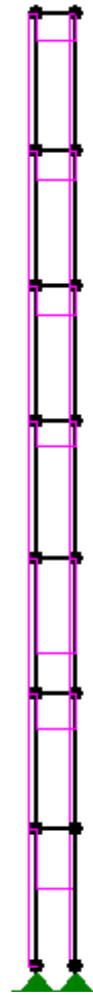
Różnice w wynikach dla wspornika litego, z przewiązkami i skratowanego.

Rys: Autor

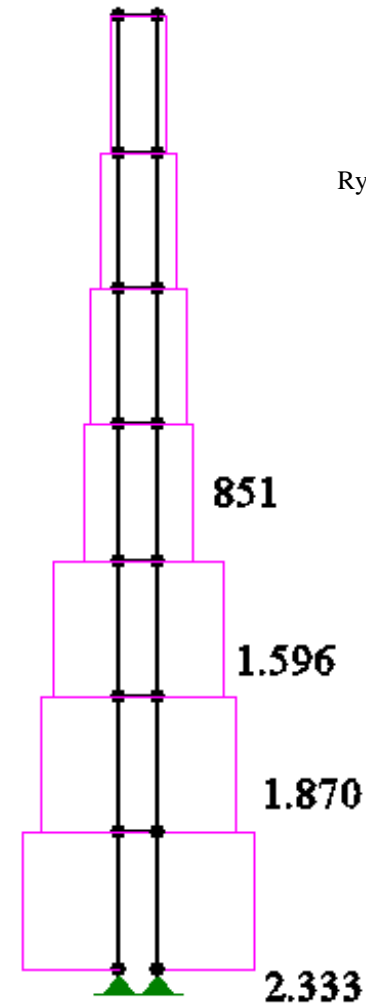
2 x 50 kN



M [kNm]



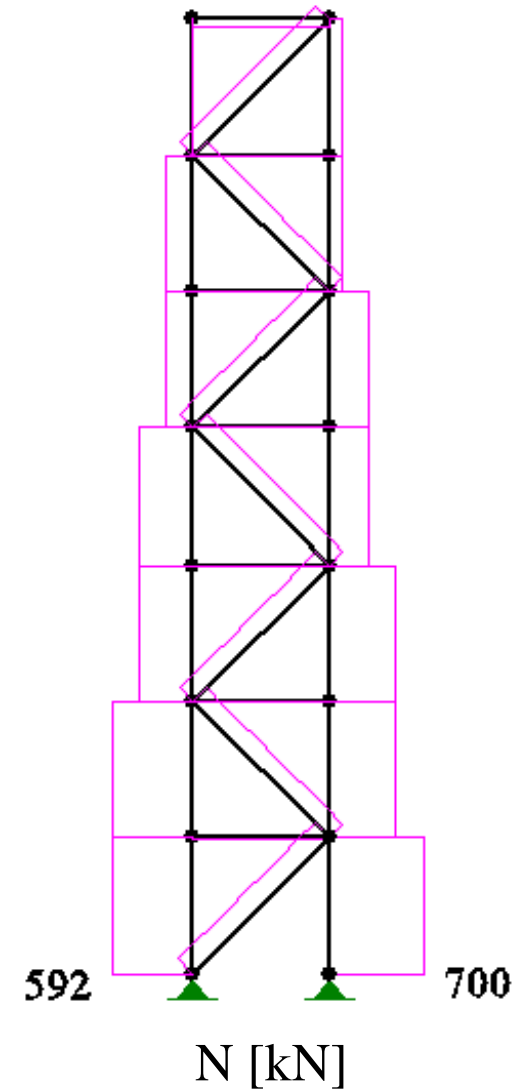
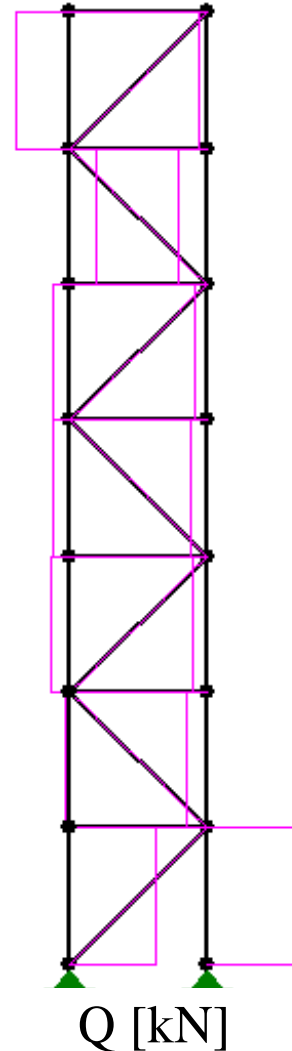
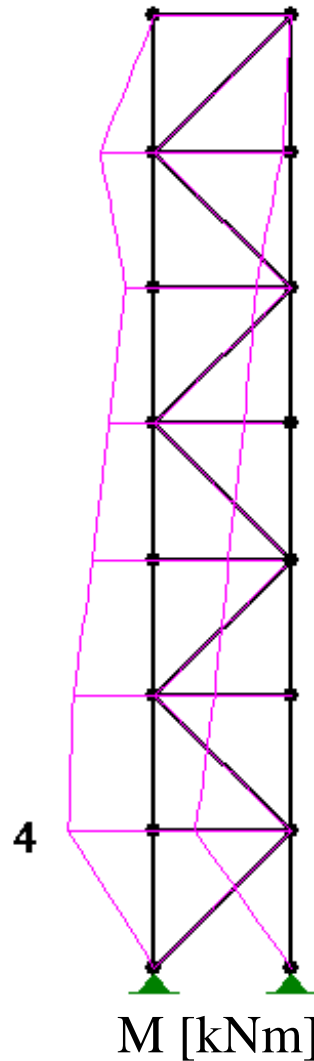
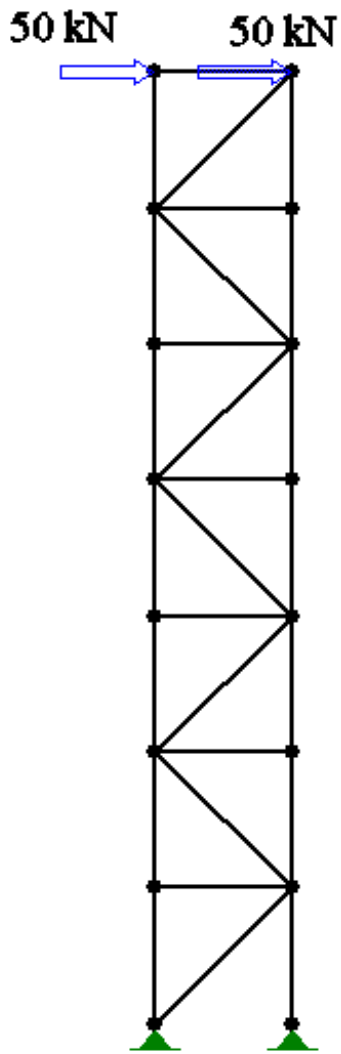
Q [kN]



N [kN]

Rys: Autor

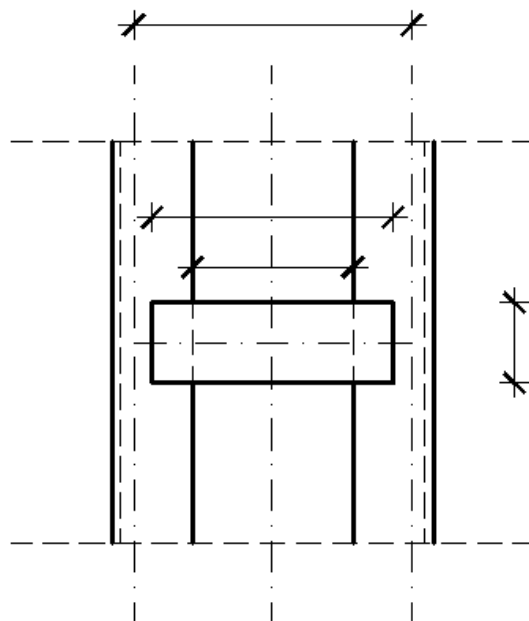
$h_0 = 30 \text{ cm}$



Rys: Autor

Problemem w złożonego modelu prętowego są wymiary przewiązek. Odległość między przecięciami osi gałęzi słupów i przewiązki, realna długość przewiązki i długość przewiązki z świetle między gałęziami słupów to trzy różne wartości. W pełni poprawne obliczenia możliwe będą tylko w programie, udostępniającym stosowanie offsetów (przesunięć węzłów i końców elementów).

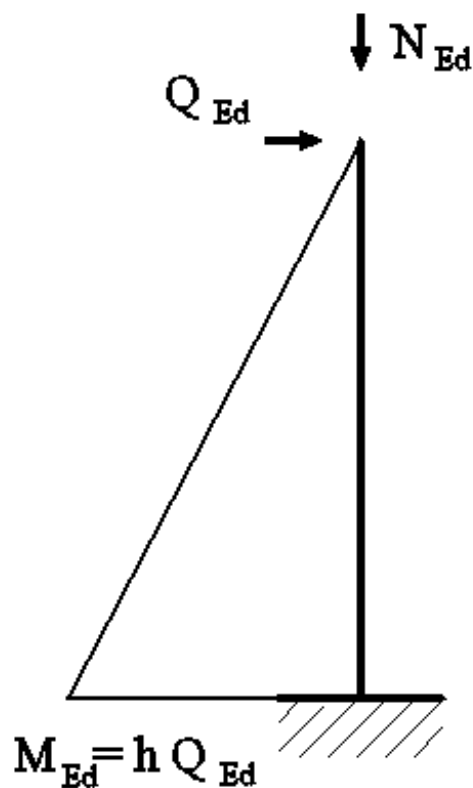
W dodatku proporcje wymiarów przewiązki (długość / szerokość) czynią z niej raczej element płytowy niż belkowy.



Rys: Autor

Biorąc to wszystko pod uwagę, stosujemy metodę uproszczoną jak następuje:

# Ogólny algorytm obliczania słupów złożonych:

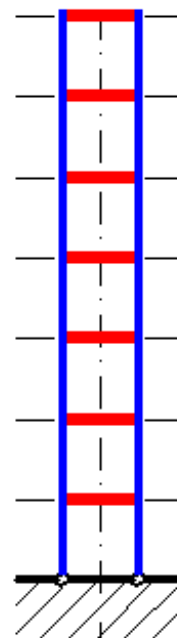


Rys: Autor

Przeliczenie

przewiązki

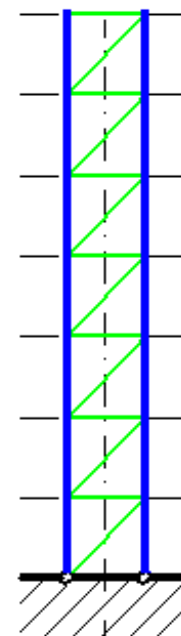
$M_{b, Ed}$   
 $V_{b, Ed}$



gałęzie

$M_{ch, Ed}$   
 $N_{ch, Ed}$   
 $V_{ch, Ed}$

Laces:  
 $N_{l, Ed}$



Globalne wartości sił przekrojowych  $M_{Ed}$ ,  $V_{Ed}$ ,  $N_{Ed}$  obliczane są jak dla klasycznego wspornika

Lokalne wartości sił przekrojowych  $M_{ch, Ed}$ ,  $M_{b, Ed}$ ,  $V_{ch, Ed}$ ,  $V_{b, Ed}$ ,  $N_{ch, Ed}$ ,  $N_{l, Ed}$

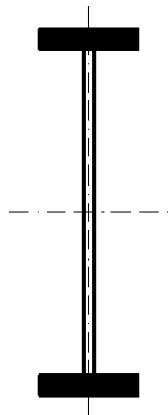
Przeliczenie oparte jest o kilka najważniejszych zasad:

- Sztywność własna pojedynczego pasa słupa jest pomijalna przy zgnianiu (#t / 56-57);
- Ważna staje się sztywność postaciowa (na ścinanie) (#t / 58-60);
- Pod uwagę muszą być wzięte wstępne imperfekcje wygięciowe (#t / 61);
- Należy policzyć wartości lokalnych sił w pasach, przewiązkach i skratowaniu (#t / 62-69);
- Należy rozważyć specyficzne formy utraty stateczności (#t / 70-73);
- Pojawia się zagadnienie nośności i stateczności przewiązek i skratowania (#t / 74-78);
- Należy przeanalizować interakcję wyboczenia i zwichrzenia (#t / 79-81)

# Wpływ sztywności własnej oraz Twierdzenia Steinera na sztywność efektywną:

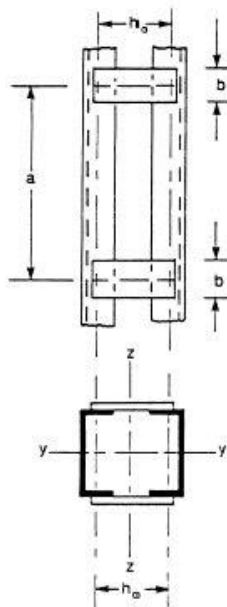
$$J_{\text{eff}} = 2 (h_0 / 2)^2 A_{\text{ch}} + 2 \mu_{\text{eff}} J_{\text{ch}} = 0,5 h_0^2 A_{\text{ch}} + 2 \mu_{\text{eff}} J_{\text{ch}}$$

Rys: Autor



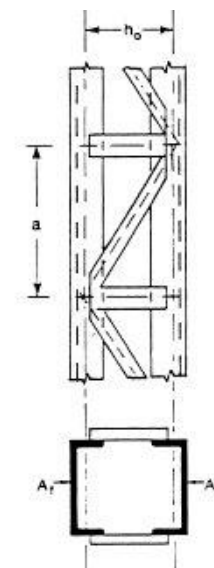
$$\mu_{\text{eff}} = 1$$

(sztywne połączenie pól w każdym przekroju)



$$0 \leq \mu_{\text{eff}} \leq 1$$

(sztywne połączenie pól tylko w niektórych przekrojach, „średnie”  $h_0$ )



$$\mu_{\text{eff}} = 0$$

(sztywne połączenie pól tylko w niektórych przekrojach, „duże”  $h_0$ )

Rys: EN 1993-1-1 fig 6.7

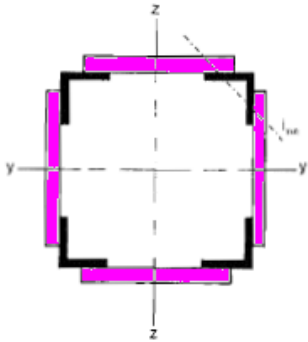
$$J = 0,5 h_0^2 A_{ch} + 2 J_{ch}$$

$$\lambda = \mu L / i_0$$

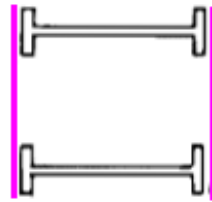
$$i_0 = \sqrt{[ J_1 / ( 2 A_{ch} ) ]}$$

$$J_{eff} = 0,5 h_0^2 A_{ch} + 2 \mu_{eff} J_{ch}$$

Rys: Autor



$n = 4$



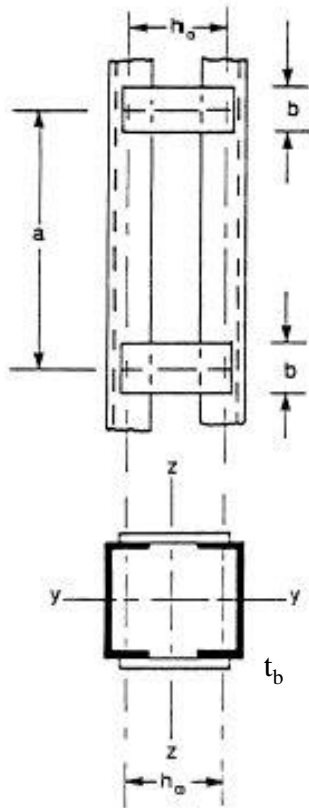
$n = 2$

$n$  – ilość płaszczyzn skratowania /  
przewiązek

$\lambda$	$\mu_{eff}$
$\geq 150$	0
75 - 150	$2 - \lambda / 75$
$\leq 75$	1,0

EN 1993-1-1 tab. 6.8

Rys: EN 1993-1-1 fig 6.7



## Sztywność postaciowa

### Słup z przewiązkami

$$S_V = \min \left\{ 24 \Xi / [1 + 2 J_{ch} h_0 / (n J_b a)] \quad ; \quad 2 \pi \Xi \right\}$$

$$\Xi = E J_{ch} / a^2$$

Efektywny moment bezwładności:

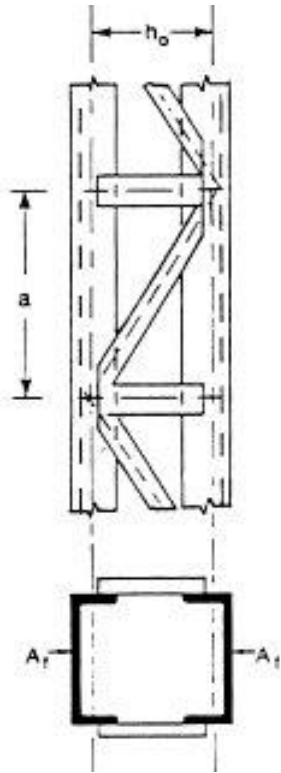
$$J_{eff} = 0,5 h_0^2 A_{ch} + 2 \mu_{eff} J_{ch}$$

$A_{ch}$  ,  $J_{ch}$  – charakterystyki pojedynczego pasa

$J_b$  – moment bezwładności przekroju przewiązek

$$J_b = b^3 t_b / 12$$

## Słup skratowany



$$S_V =$$

$\Lambda / 2$	$\Lambda$	$\Lambda / [ 1 + A_d h_0^3 / A_v d^3 ]$

Rys: EN 1993-1-1 fig 6.9

$$\Lambda = n E A_d a h_0^2 / d^3$$

Efektywny moment bezwładności:

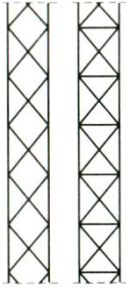
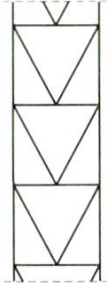
$$J_{\text{eff}} = 0,5 h_0^2 A_{\text{ch}}$$

$A_{\text{ch}}$ ,  $J_{\text{ch}}$  – charakterystyki pojedynczego pasa

$A_d$ ,  $A_v$  – pola powierzchni prętów skratowania

## Dodatkowe informacje w literaturze

$$S_v =$$

	
$2 \Lambda$	$\Lambda / 2 [ 1 + A_d h_0^3 / 8 A_v d^3 ) ]$

Rys: Sz. Pałkowski, Konstrukcje stalowe, PWN Warszawa 2010

$$\Lambda = n E A_d a h_0^2 / d^3$$

Efektywny moment bezwładności:

$$J_{\text{eff}} = 0,5 h_0^2 A_{\text{ch}}$$

Symbole te same co poprzednio

Efekt imperfekcji wstępnych  $e_0$  (identycznie dla słupa skratowanego i z przewiązkami) dla sił przekrojowych:

$$N_{ch, Ed} = N_{Ed} / 2 + M_{Ed}^{II} z_s A_{ch} / J_{eff}$$

$$M_{Ed}^{II} = (N_{Ed} e_0 + M_{z, Ed}) / [1 - (N_{Ed} / N_{cr}) - (N_{Ed} / S_V)]$$

$$e_0 = L / 500$$

$$N_{cr} = \pi^2 E J_{eff} / (\mu L)^2$$

Liczba odcinków pomiędzy przewiązkami lub skratowaniem  $\geq 3$

Równa długość tych odcinków

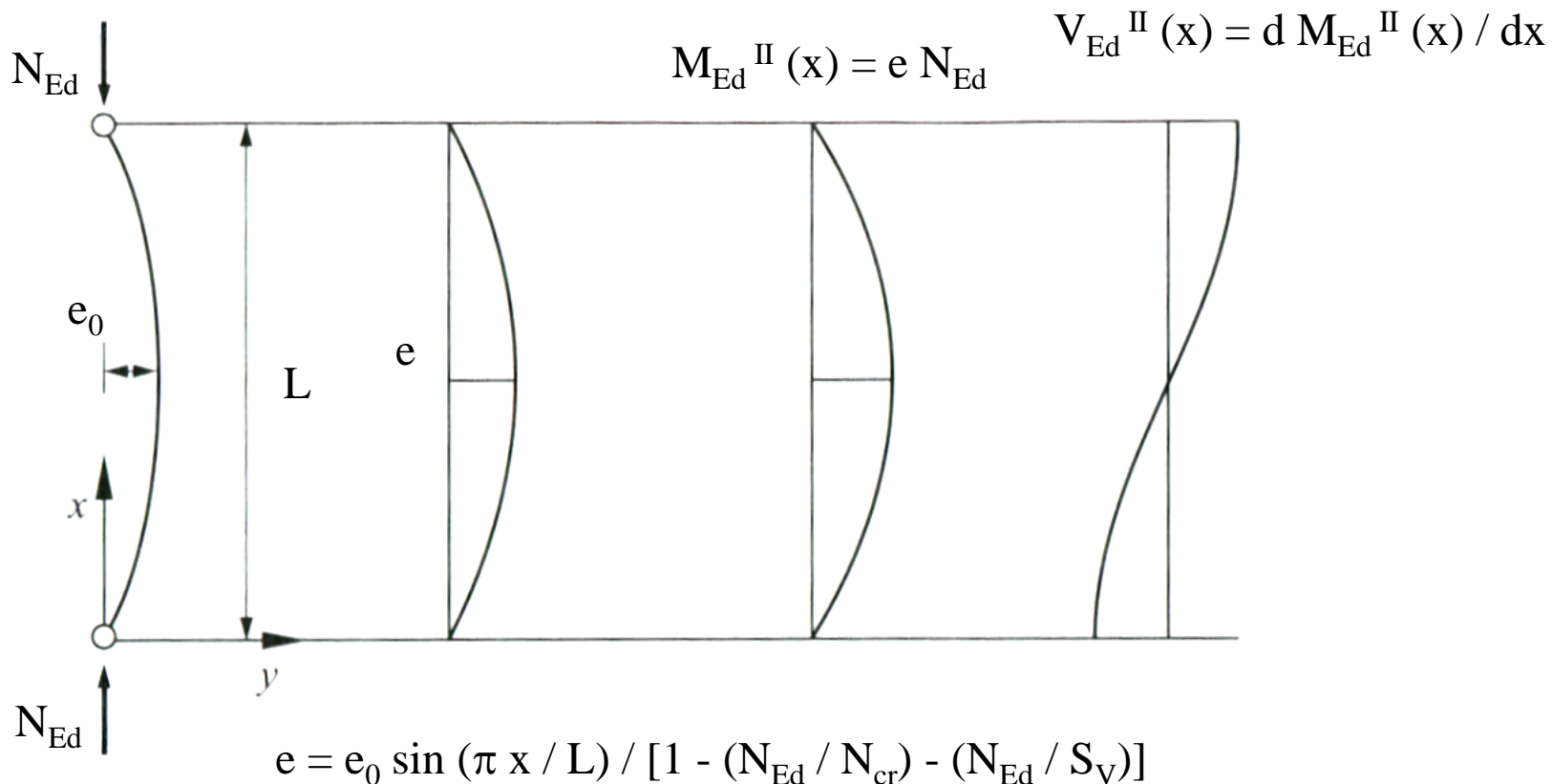
Zalecana nieparzysta liczba odcinków

EN 1993-1-1 6.4.1

W Eurokodzie pojawia się istotna niekonsekwencja: zgodnie z EN 1993-1-1 p.6.4.1.(1) - informacje ogólne - według przedstawionej procedury można obliczać tylko pręty ściskane. W takiej sytuacji moment zginający pochodzi wyłącznie z imperfekcji początkowej ( $M_{Ed}^{II}$ ). Z drugiej strony w EN 1993-1-1 p.6.4.1.(6) moment zginający od oddziaływań zewnętrznych jest analizowany wspólnie z momentem zginającym od imperfekcji – zatem element w ogólności może być nie tylko ściskany ale i zginany.

Wpływ imperfekcji początkowej oblicza się na podstawie modelu **jednoprzęsłowego pręta przegubowo podpartego**. W Eurokodzie nie ma informacji o innym rodzaju podparcia słupa (np. wspornikowym jak w przypadku konstrukcji nośnej suwnicy). Brak także jasnych wytycznych w literaturze.

Wpływ początkowej imperfekcji jest obliczany na podstawie modelu dla słupa jednoprzęsłowego podpartego przegubowo. Wtórny moment zginający i wtórna siła ścinająca, pochodzące z imperfekcji, mają rozkład sinusoidalny wzdłuż słupa. Efekt imperfekcji jest mnożony przez efekty niestabilności ( $N_{cr}$ ) i sztywności przy ścinaniu ( $S_V$ ).



Rys: Sz. Pałkowski, Konstrukcje stalowe, PWN Warszawa 2010

EN 1993-1-1 6.4.1

## Lokalne siły przekrojowe w pasach i przewiązkach

$$V_{Ed} = \pi M_{Ed}^{II} / (n L)$$

$$h_0 = 2 z_s$$

Dla gałęzi słupa:

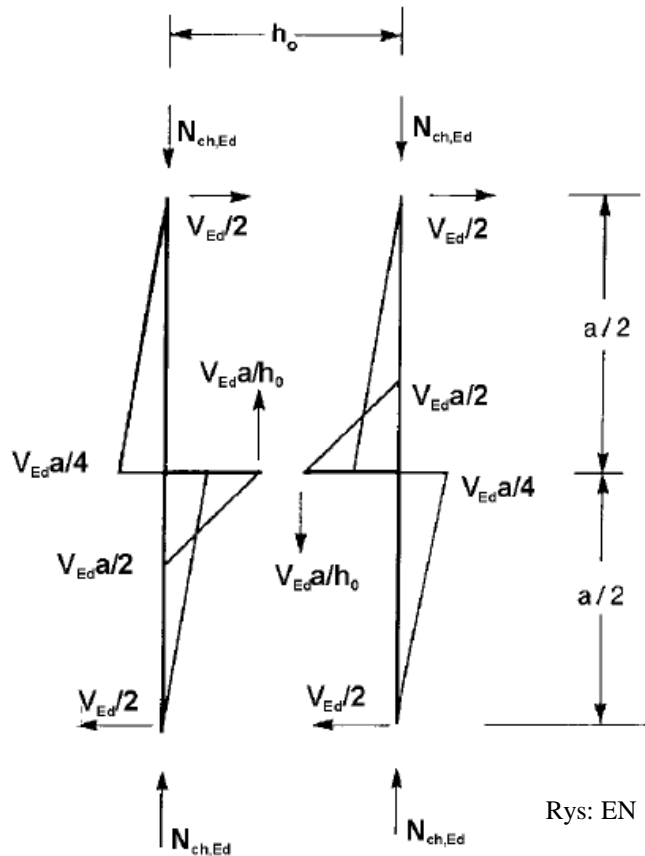
$$V_{ch, Ed} = V_{Ed} / 2$$

$$M_{ch, Ed} = a V_{Ed} / 4$$

Dla przewiązek:

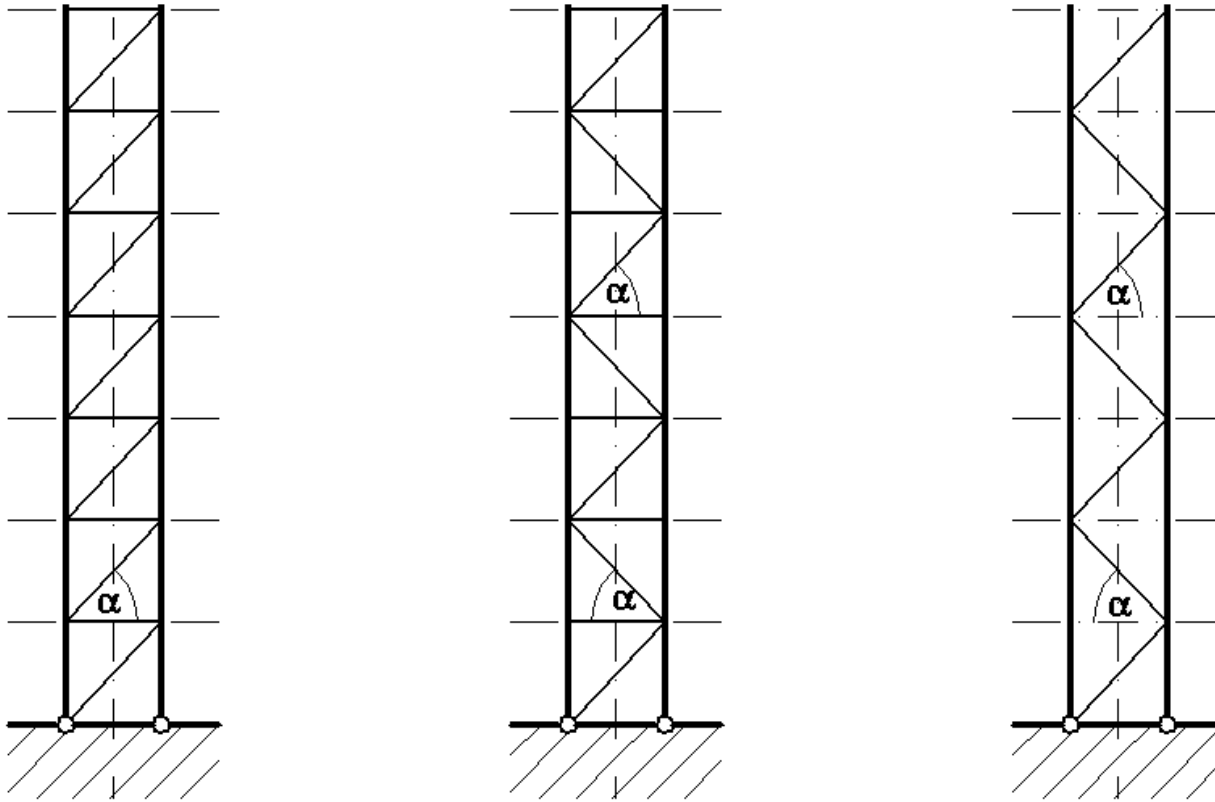
$$V_{b, Ed} = V_{Ed} a / (2 h_0)$$

$$M_{b, Ed} = a V_{Ed} / 2$$



Rys: EN 1993-1-1 fig 6.11

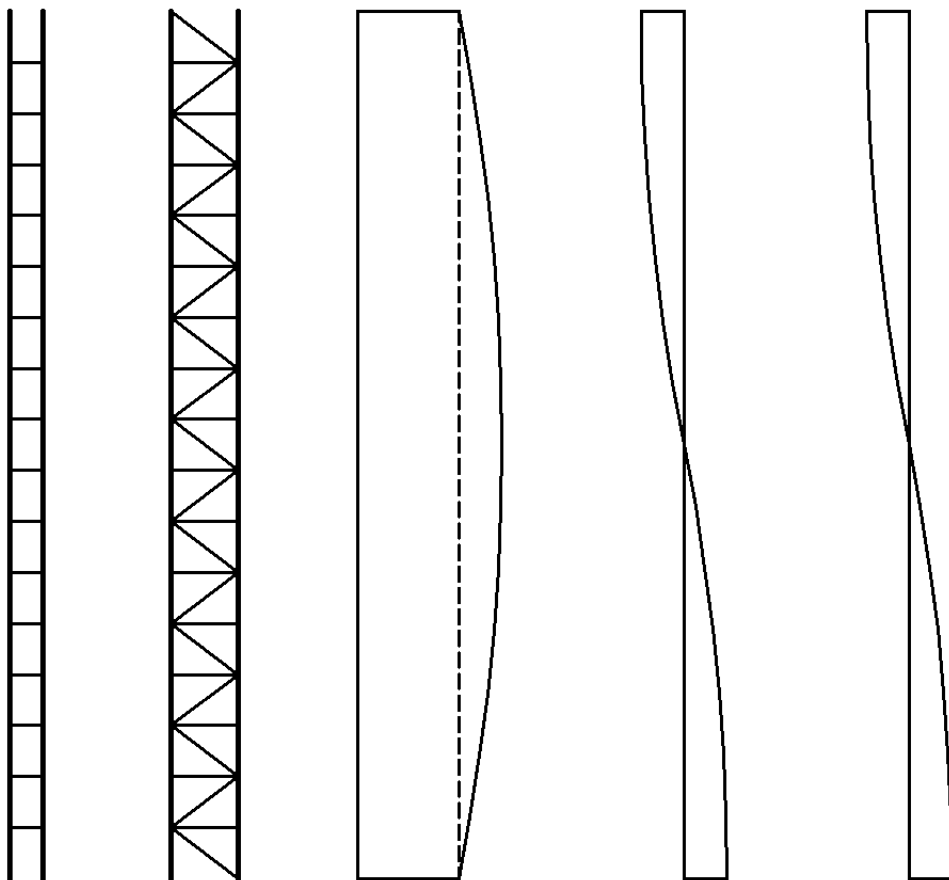
Rys: Autor



Dla prętów skratowania:

$$V_{Ed} = \pi M_{Ed} / (n L)$$

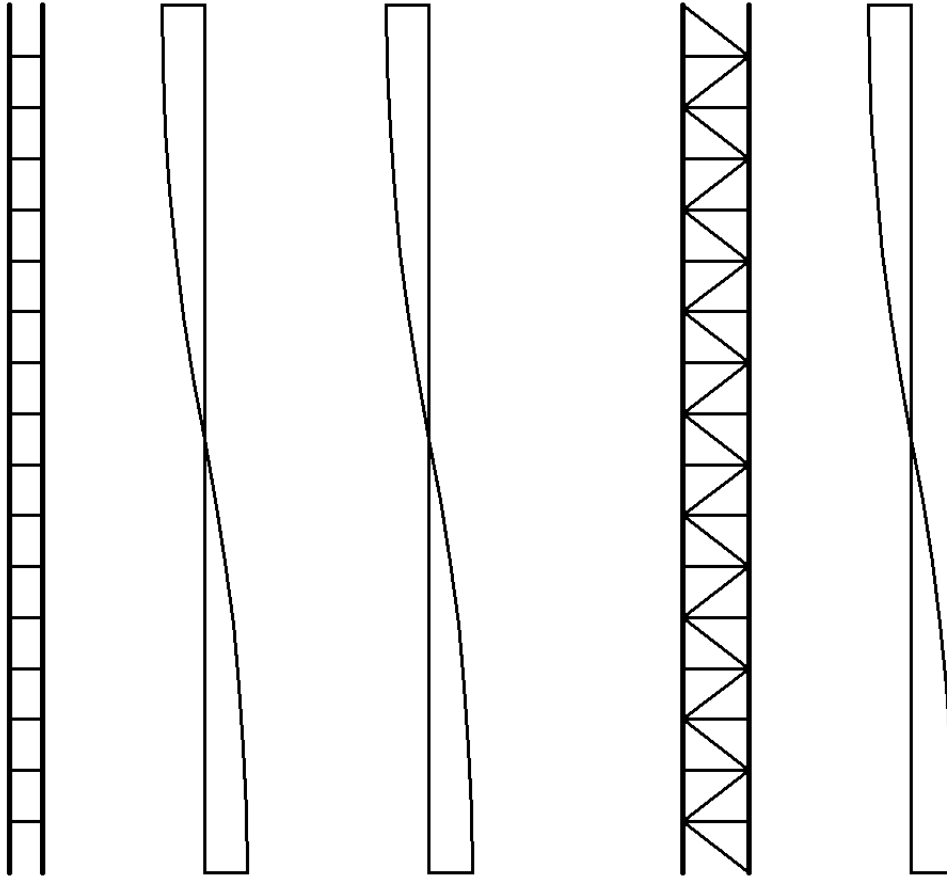
$$N_{l, Ed} = V_{Ed} / \cos \alpha = \pi M_{Ed} / (n L \cos \alpha)$$

$N_{ch, Ed}$  $M_{ch, Ed}$  $V_{ch, Ed}$ 

W przypadku pasa, dwa przekroje  
będą ważne dla obliczeń:

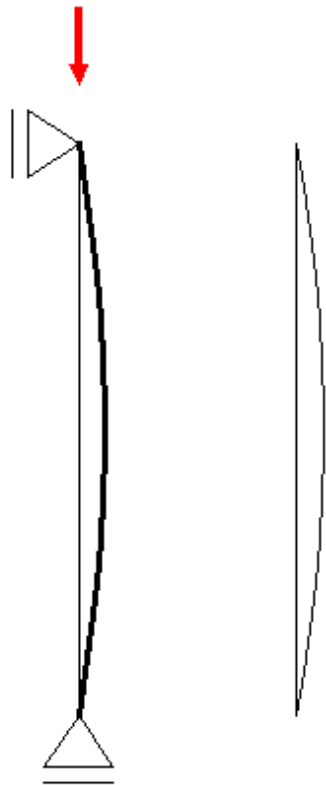
- W połowie długości:  $\max N_{ch, Ed}$  ,  
0 dla  $M_{ch, Ed}$  ,  $V_{ch, Ed}$
- Na górnym lub dolnym końcu:  
 $\max$  dla  $M_{ch, Ed}$  i  $V_{ch, Ed}$  ,  
mniejsza wartość dla  $N_{ch, Ed}$

Rys: Autor

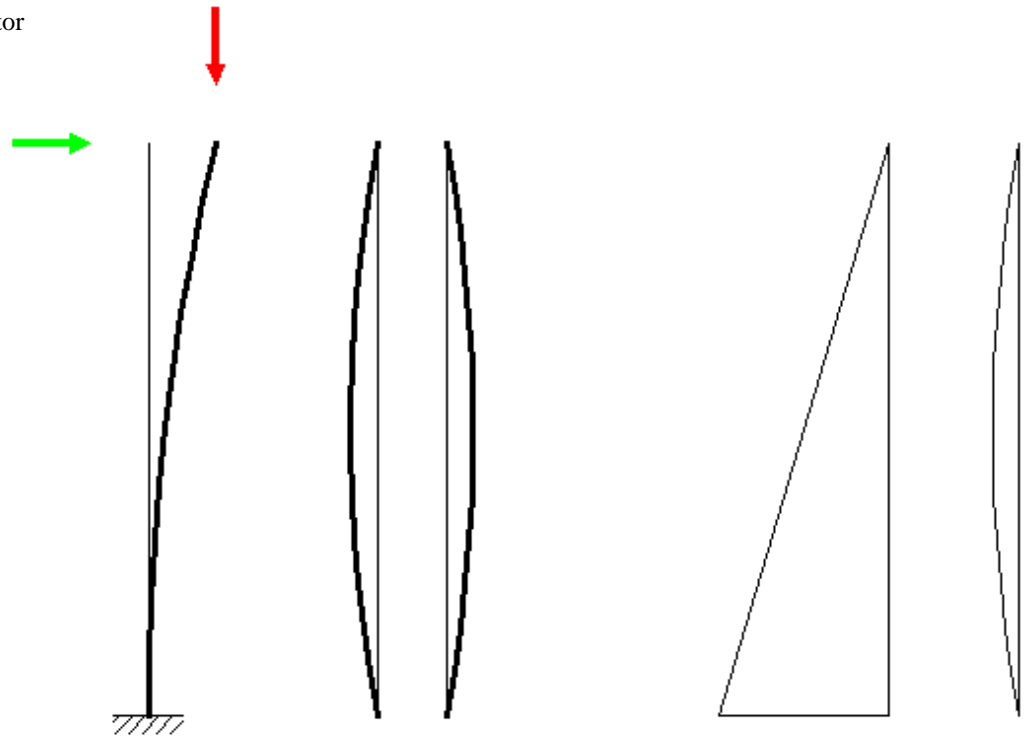
$M_{b, Ed}$  $V_{b, Ed}$  $N_{l, Ed}$ 

Dla przewiązek i prętów skratowania, maksymalne wartości pojawią się na górze i na dole.

Rys: Autor



Rys: Autor



Imperfekcja wstępna powoduje powstanie momentu zginającego dla słupa o przegubowo podpartego z siłą osiową.

Dla wspornika ważniejszy jest moment zginający od **siły poziomej**. Moment zginający od imperfekcji wstępnej jest znacznie mniejszy.

W takim przypadku max siły przekrojowe będą usytuowane w okolicy utwierdzenia wspornika.

$N_{Ed}$  – globalna siła osiowa na górnym końcu słupa

$V_{Ed}$  – globalna siła poprzeczna na górnym końcu słupa

$$S_1 = 1 - (N_{Ed} / N_{cr}) - (N_{Ed} / S_V)]$$

$$N_{ch, Ed, max} = N_{Ed} / 2 + L V_{Ed} z_s A_{ch} / (S J_{eff})$$

$$V_{ch, Ed, max} = (\pi N_{Ed} e_0 + L V_{Ed}) / (2 L n S_1)$$

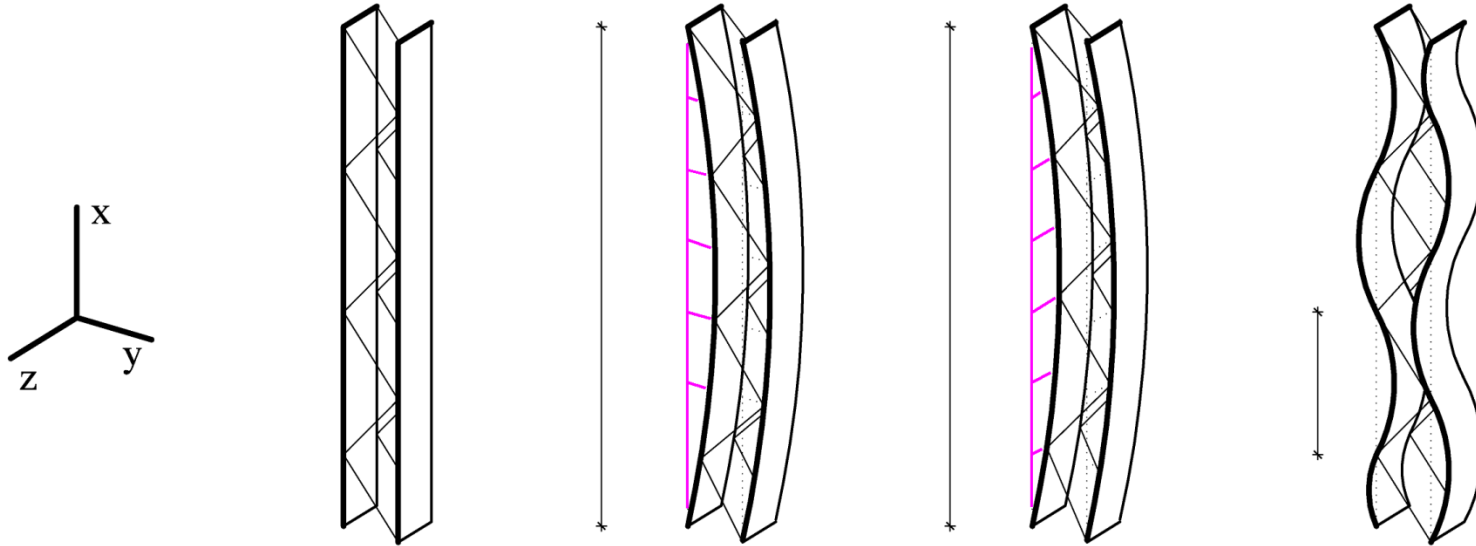
$$M_{ch, Ed, max} = a (\pi N_{Ed} e_0 + L V_{Ed}) / (4 L n S_1)$$

$$V_{b, Ed, max} = a (\pi N_{Ed} e_0 + L V_{Ed}) / (2 L h_0 n S_1)$$

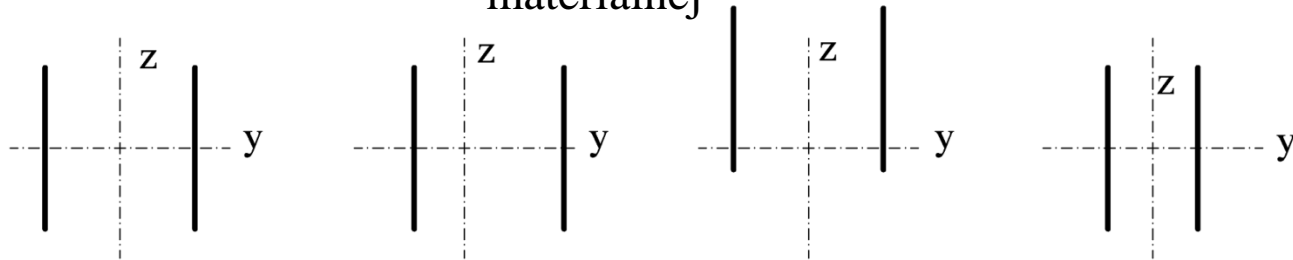
$$M_{b, Ed, max} = a (\pi N_{Ed} e_0 + L V_{Ed}) / (2 L n S_1)$$

$$N_{l, Ed} = (\pi N_{Ed} e_0 + L V_{Ed}) / (L n S_1 \cos \alpha)$$

Pod uwagę należy wziąć kilka specyficznych postaci utraty stateczności:



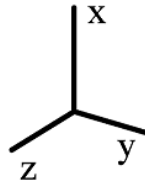
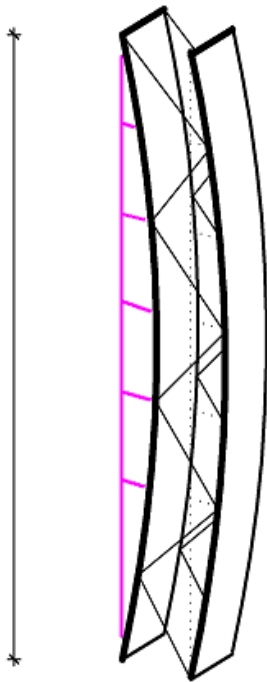
Globalna względem osi materialnej



Globalna względem osi niematerialnej

Lokalna

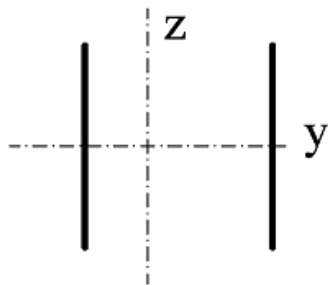
Rys: Autor

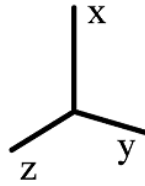
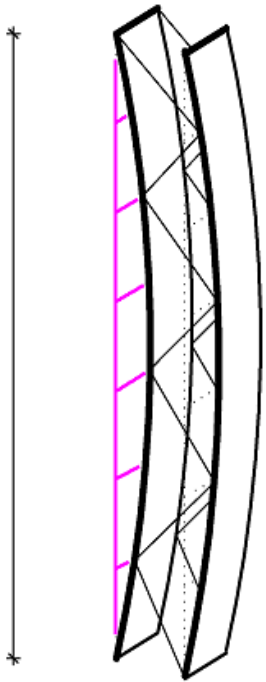


Rys: Autor

Wyboczenie giętnie względem z – niematerialnej (przechodzi poza materiałem przekroju słupa):

- Bez imperfekcji;
- Globalna siła osiowa  $N_{Ed}$ ;
- Długość krytyczna wynika z długości słupa i warunków podparcia;
- Moment bezwładności przekroju słupa = moment efektywny;

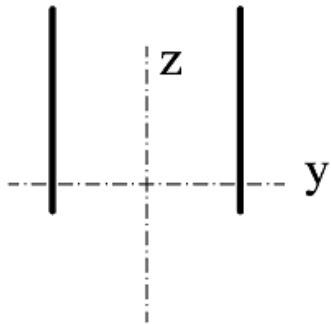


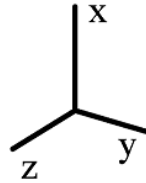
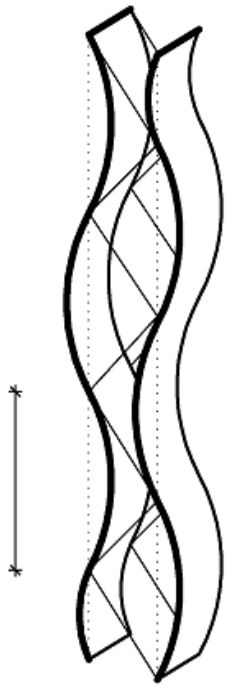


Rys: Autor

Wyboczenie giętnie względem  $y$  - materialnej (przechodzi przez materiał słupa):

- Bez imperfekcji;
- Globalna siła osiowa  $N_{Ed}$ ;
- Długość krytyczna wynika z długości słupa i warunków podparcia;
- Moment bezwładności przekroju słupa =  $2 \cdot$  moment bezwładności pojedynczego pasa;

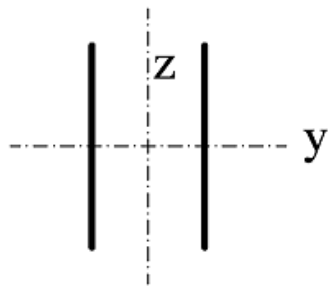




Rys: Autor

Wyboczenie względem osi lokalnej  $y_1$  przekroju jednego pasa:

- Wstępna imperfekcja wygięciowa;
- Lokalna siła w pasie  $N_{ch, Ed}$  ;
- Drugorzędny moment zginający do imperfekcji;
- Długość krytyczna = odległość między przewiązkami lub skratowaniem;
- Moment bezwładności = moment bezwładności przekroju pojedynczego pasa;





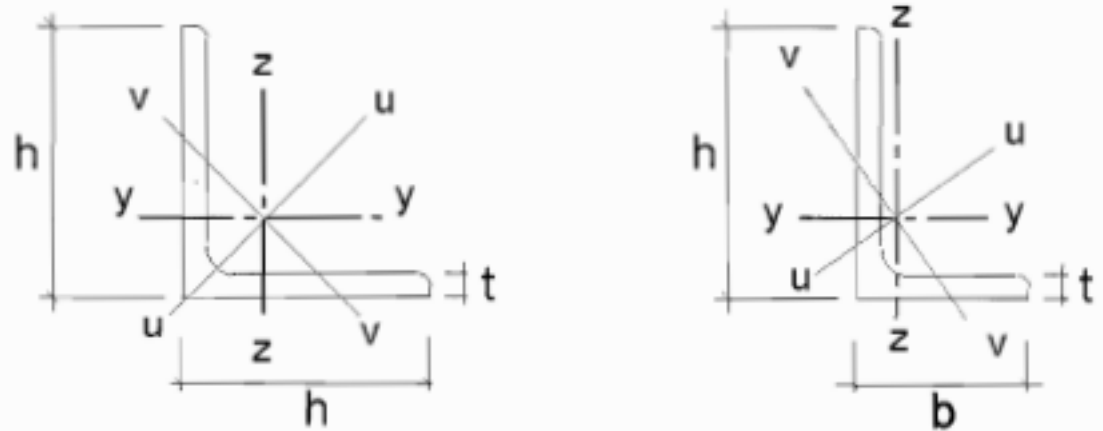
Rys: pks.p.lodz.pl

## Przewiązki i skratowanie

W przewiązce występuje moment zginający i siła ścinająca. Najczęściej stosowany prostokątny przekrój przewiązki (blacha prostokątna) nie został przedstawiony w EN 1993-1-1. tab. 5; oznacza to, że nie wiemy, jaka jest klasa przekroju i jaka jest nośność na moment zginający. Zgodnie z literaturą obliczenia dla przewiązki należy wykonać w zakresie sprężystym (sprężysty wskaźnik wytrzymałości jako podstawa dla  $M_{b, Re}$ ). Oddziaływanie momentu zginającego i siły ścinającej należy obliczyć jako efektywne naprężenie z twierdzenia H-M-H.



Rys: EN 1993-1-1 fig. 1.1



Skratowanie najczęściej jest wykonywane z kątowników. Kątownik ma jedną oś symetrii lub nie ma osi symetrii. Należy przeanalizować cztery typy niestabilności pod wpływem siły osiowej: wyboczenie giętne wokół u-u, wyboczenie giętne wokół v-v, wyboczenie skrętne i wyboczenie giętno-skrętne.

Rys: Hasheela P., Behaviour of Single Laced Columns versus Double Laced Columns, Faculty of Engineering and Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg 2013

$$\chi = \min(\chi_y ; \chi_z ; \chi_T ; \chi_{z,T})$$

Wyboczenie giętkie, oś u  $N_{cr, u} = \pi^2 E J_u / (\mu_u l_{0u})^2$

Wyboczenie giętkie, oś v  $N_{cr, v} = \pi^2 E J_v / (\mu_v l_{0v})^2$

Wyboczenie skrętne  $N_{cr, T} = [\pi^2 E J_w / (\mu_w l_{0w})^2 + G J_t] / i_s^2$

Wyboczenie skrętno-giętkie  $N_{cr, z-T} = \{N_{cr, v} + N_{cr, T} - \sqrt{[(N_{cr, v} + N_{cr, T})^2 - 4 N_{cr, v} N_{cr, T}]}\} / (2 \xi)$

$$\xi = 1 - (\mu z_s^2 / i_s^2)$$

$$\mu = \min [\sqrt{(\mu_z / \mu_T)} ; \sqrt{(\mu_T / \mu_z)}]$$

$$i_0 = \sqrt{(i_u^2 + i_v^2)}$$

$$i_s = \sqrt{(i_0^2 + z_s^2)}$$

$z_s$  – odległość środka ciężkości od środka ścinania ( $z_s \geq 0$ )

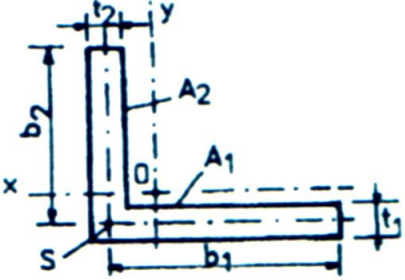
$J_u, J_v$  – momenty bezwładności

$i_u, i_v$  – promienie bezwładności

$E, G$  – moduły Younga i Kirchhoffa

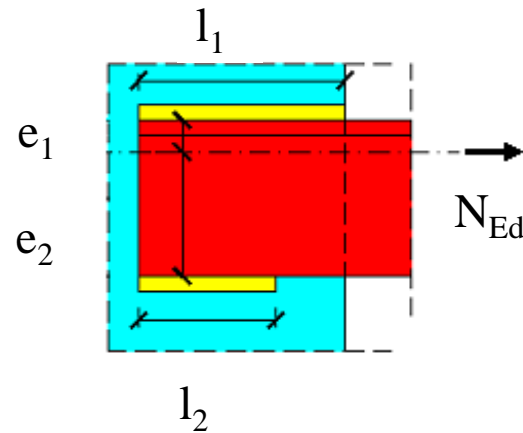
$J_t$  – moment bezwładności przy skręcaniu

$J_w$  – wycinkowy moment bezwładności

Przekrój	Cechy geometryczne
	$y_s = e_y - \frac{t}{2}$ $I_w = \frac{A_1^3 + A_2^3}{36}$ $I_r = \frac{1}{3} (b_1 t_1^3 + b_2 t_2^3)$
Oznaczenia:	
<p>O — środek ciężkości  S — środek ścinania  <math>I_1</math> <math>I_2</math> (<math>I_3</math>) — momenty bezwładności pól (środnika) względem osi symetrii  <math>I_y</math> — moment bezwładności figury względem osi symetrii</p>	

Ptoto: J. Żmuda, „Podstawy projektowania konstrukcji metalowych”, TiT Opole 1992

Oś kątownika nie leży w połowie szerokości ramienia. Jest mocno przesunięta w kierunku połączenia obu ramion. Długość spoin musi być różna, aby uniknąć różnicy między środkiem ciężkości przekroju poprzecznego a środkiem ciężkości spoin. Taka różnica - jeśli istnieje - powoduje powstanie wtórnych momentów zginających w połączeniach jako efekt mimośrodowy.



Rys: Autor

$$e_1 l_1 = e_2 l_2$$

Należy przeanalizować interakcję wyboczenia bocznego i wyboczenia giętnego dla pręta pod wpływem momentu zginającego i osiowej siły ściskającej. Zgodnie z literaturą nie można obliczyć prętów wielokordowych, w oparciu o EN 1993-1-1 6.3.3.

~~$$N_{Ed} / (\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}) + k_{yy} (M_{y, Ed} + \Delta M_{y, Ed}) / (\chi_{LT} M_{y, Rk} / \gamma_{M1}) + k_{yz} (M_{z, Ed} + \Delta M_{z, Ed}) / (M_{z, Rk} / \gamma_{M1}) \leq 1,0$$~~

EN 1993-1-1 (6.61), (6.62)

~~$$N_{Ed} / (\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}) + k_{zy} (M_{y, Ed} + \Delta M_{y, Ed}) / (\chi_{LT} M_{y, Rk} / \gamma_{M1}) + k_{zz} (M_{z, Ed} + \Delta M_{z, Ed}) / (M_{z, Rk} / \gamma_{M1}) \leq 1,0$$~~

Ten punkt jest używany w przypadku prętów pojedynczych. W przypadku zwichrzenia ważna jest specyficzna charakterystyka geometryczna: wycinkowy moment bezwładności. Jego obliczenie jest możliwe jedynie dla przekroju jednospójnego. W innym przypadku można go jedynie oszacować jako pewną wartość matematyczną o wątpliwej interpretacji fizycznej.

Z tego powodu elementy wielogałęziowe oblicza się według EN 1993-1-1 6.3.4. Punkt ten przeznaczony jest dla *elementów pojedynczych lub złożonych*.

Zgodnie z EN 1993-1-1 6.3.4. dla interakcji między wyboczeniem giętym a zwichrzeniem należy sprawdzić (EN 1993-1-1 (6.64)):

$$\chi_{op} \alpha_{ult, k} / \gamma_{M1} \geq 1,0$$

**Tak, to nie pomyłka:  $\geq 1,0$**

$\chi_{op} = \chi(\lambda_{op})$  liczone jak dla wyboczenia lub zwichrzenia

$$\lambda_{op} = \sqrt{(\alpha_{ult, k} / \alpha_{cr, op})}$$

$\alpha_{ult, k}$  - minimalny mnożnik obciążeń obliczeniowych, przy którym przekrój krytyczny osiąga nośność charakterystyczną w warunkach płaskiego stanu deformacji z uwzględnieniem właściwych imperfekcji geometrycznych;

$\alpha_{cr, op}$  - minimalny mnożnik obciążeń obliczeniowych, przy którym rozpatrywana część konstrukcji osiąga wartość obciążenia krytycznego przy niestateczności sprężystej z płaszczyzny układu;

Wartości  $\alpha_{ult, k}$  oraz  $\alpha_{cr, op}$  powinny być przyjmowane z analizy numerycznej.

Zgodnie z EN 1993-1-1 6.3.4.(4) wzory mogą być uproszczone do postaci:

$$1 / \alpha_{ult, k} = N_{Ed} / N_{Rk} + M_{y, Ed} / M_{y, Rk}$$

Wartość  $\alpha_{ult, k}$  jest liczona dla każdego przekroju. Wartość ostateczna jest najmniejszą ze wszystkich (dotyczy przekroju najbardziej wyężonego).

Zgodnie z EN 1993-1-1 (5.1),  $\alpha_{cr, op}$  może być przedstawiona jako:

$$\alpha_{cr, op} = N_{cr} / N_{Ed}$$

Analogicznie do  $\alpha_{ult, k}$ , ostateczna wartość  $\alpha_{cr, op}$  jest najmniejszą spośród wszystkich postaci niestateczności wchodzących w grę.

## Algorytm obliczeń:

- Obliczenia wstępne

$$N_{Ed}, M_{Ed}, V_{Ed}, S_v, J_{eff}, e_0, M_{Ed}^{II}, N_{ch, Ed}, M_{ch, Ed}, V_{ch, Ed}$$

- Nośność całego przekroju słupa w utwierdzeniu

$$N_{Ed}, M_{Ed}, V_{Ed}, \alpha_{ult, k, both}$$

- Nośność pojedynczej gałęzi w utwierdzeniu

$$N_{ch, Ed}, M_{ch, Ed}, V_{ch, Ed}, \alpha_{ult, k, one}$$

- $\alpha_{ult, k} = \min (\alpha_{ult, k, both} ; \alpha_{ult, k, one} )$

- Globalna niestateczność giętna względem osi materialnej

Przekrój całego słupa,  $J_{\text{material}}$ ,  $L_{\text{cr}} = H$

$$\alpha_{\text{cr, op, 1}} = N_{\text{cr, mat}} / N_{\text{Ed}}$$

- Globalna niestateczność giętna względem osi niematerialnej

Przekrój całego słupa,  $J_{\text{eff}}$ ,  $L_{\text{cr}} = H$

$$\alpha_{\text{cr, op, 2}} = N_{\text{cr, immat}} / N_{\text{Ed}}$$

- Utrata stateczności na odcinku między przewiązkami na dole wspornika

Dwuteowy przekrój gałęzi	Ceowy przekrój gałęzi
Przekrój pojedynczej gałęzi, $J_y, L_{cr} = a$ $\alpha_{cr, op, 3} = N_{cr, y} / N_{ch, Ed}$	Przekrój pojedynczej gałęzi, $J_y, L_{cr} = a$ $\alpha_{cr, op, 3} = N_{cr, y} / N_{ch, Ed}$
Przekrój pojedynczej gałęzi, $J_z, L_{cr} = a$ $\alpha_{cr, op, 4} = N_{cr, z} / N_{ch, Ed}$	Przekrój pojedynczej gałęzi, $J_z, L_{cr} = a$ $\alpha_{cr, op, 4} = N_{cr, z} / N_{ch, Ed}$
	Przekrój pojedynczej gałęzi, $J_w, J_t, L_{cr} = a$ $\alpha_{cr, op, 5} = N_{cr, T} / N_{ch, Ed}$
	Przekrój pojedynczej gałęzi, $J_z, J_w, J_t, L_{cr} = a$ $\alpha_{cr, op, 5} = N_{cr, T-z} / N_{ch, Ed}$
Pojedyncza gałąź jest lokalnie zginana względem osi słabej → brak zwichrzenia	

- $\alpha_{cr, op} = \min (\alpha_{cr, op, 1} ; \alpha_{cr, op, 2} ; \dots)$
- $\lambda_{op} = \sqrt{(\alpha_{ult, k} / \alpha_{cr, op})}$
- $\chi_{op} = \chi(\lambda_{op})$  liczone jak dla wyboczenia (brak zwichrzenia)
- $\chi_{op} \alpha_{ult, k} / \gamma_{M1} \geq 1,0$

- Dla słupa z przewiązkami: nośność przewiązek

$$M_{b, Ed} , V_{b, Ed}$$

- Dla słupa skratowanego: nośność kratowania

$$N_{1, Ed}$$

- Nośność spoin wokół przewiązek lub skratowania
- Deformacje słupa

## Stopy słupów

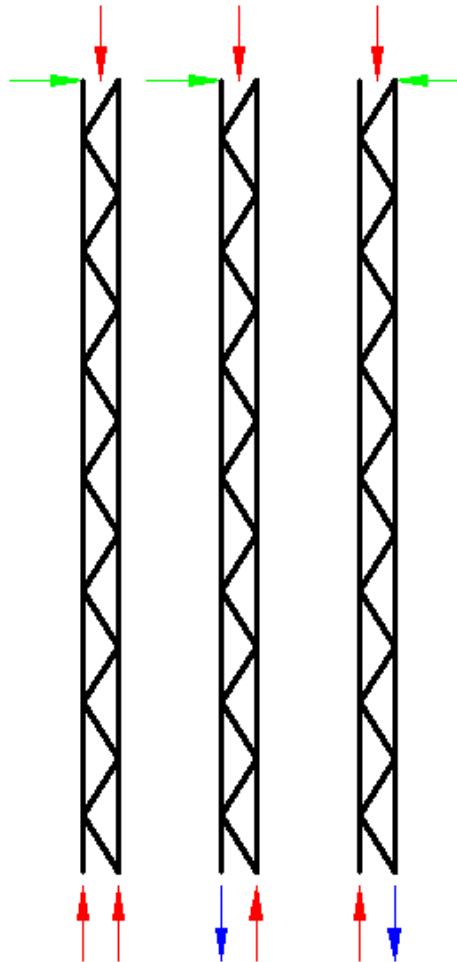
W tego typu słupach stosuje się dwie odrębne blachy stopowe.



Rys: quatronsteel.com



Rys: inzynierbudownictwa.pl

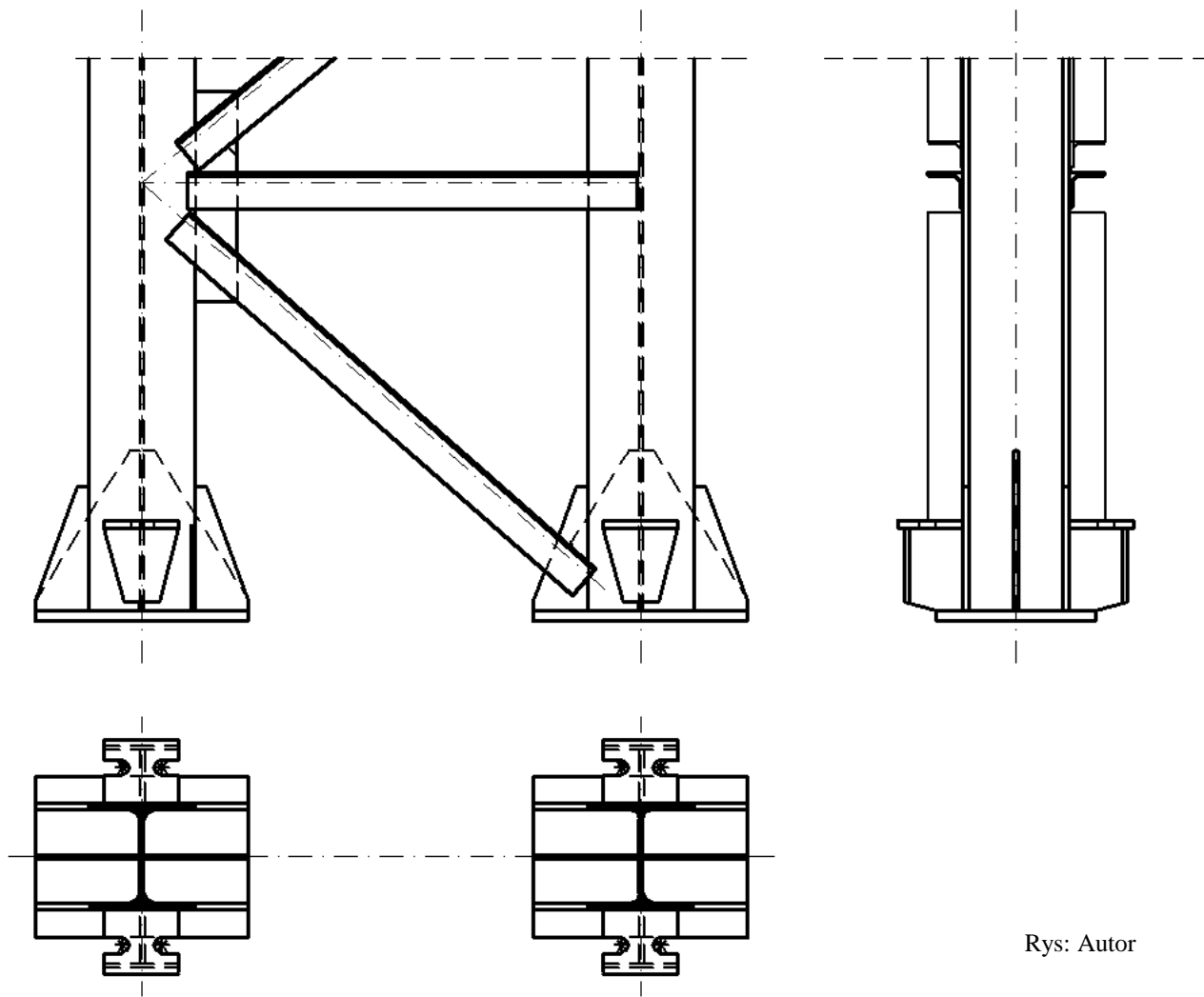


Rys: Autor

Pod każdą gałęzią słupa występuje tylko siła osiowa i pozioma.

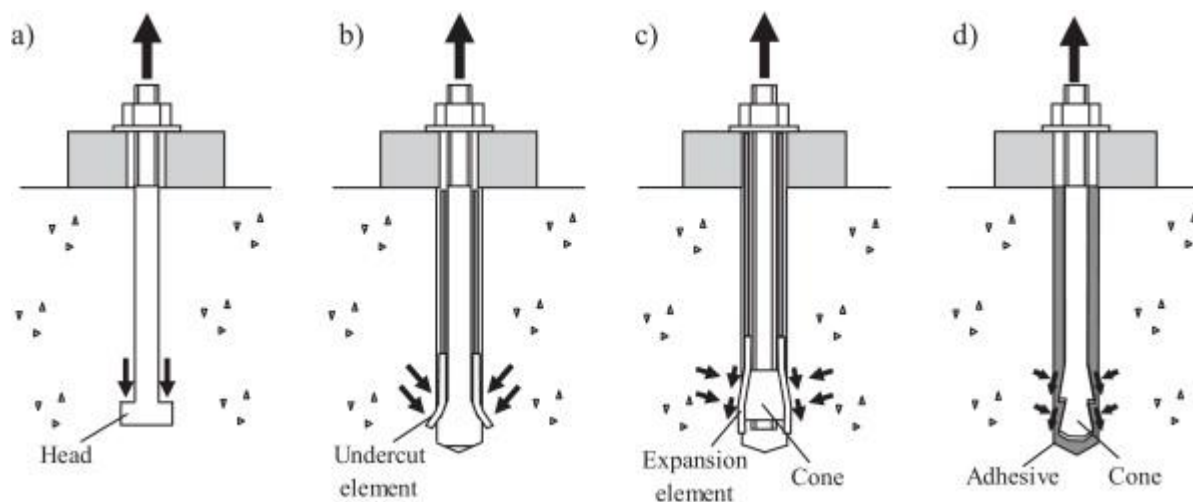
Efektom analizy rozmaitych kombinacji obciążeń są różne przypadki reakcji pod blachami stopowymi. Nośność blach stopowych powinna być sprawdzana dla dwu przypadków: **nośność na docisk do polewki** oraz **nośność kotwi rozciąganych i lokalne zginanie blachy wokół kotwi**.

Potrzebne mogą się okazać masywne zakotwienia gałęzi słupów w fundamentach. Rozwiązanie konstrukcyjne stóp musi umożliwiać przeniesienie dużych wartości sił z kotwi.



Rys: Autor

Zakotwienie w fundamentach betonowych rozwiązywane jest w rozmaity sposób. Najprostszy – dla małych wartości sił – to przeniesienie obciążenia przez tarcie na pobocznicę kotwi i opór przy wyrywaniu jej rozbudowanego zakończenia.



Rys: Post-installed concrete anchors in nuclear power plants: Performance and qualification, Ph. Mahrenholtz, R. Eligehausen Nuclear Engineering and Design 287 / 2015

Dla dużych wartości sił stosuje się kotwie fajkowe. Mogą one dodatkowo być przyspawane do zbrojenia.



Rys: civil-engg-world.blogspot.com



Stosuje się także kotwiące blachy oporowe, zabetonowane w fundamentach.

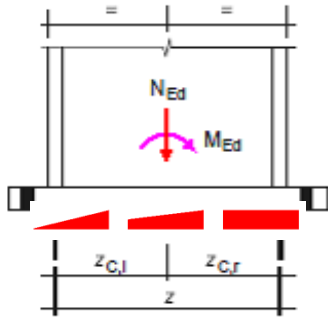
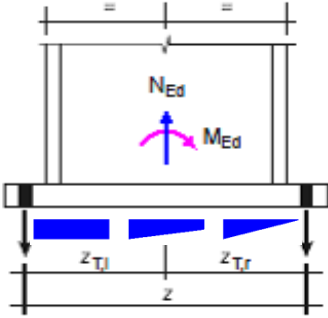


Rys: homemadetools.net



Rys: strongtie.com

Nośność jest liczona dla stałej wartości naprężeń pod stopą.

Obciążenie	Ramie	Nośność $M_j, R_d$	
<p>Po lewej i prawej ściskanie:</p> <p><math>M_{Ed} &gt; 0</math> ; <math>N_{Ed} &lt; 0</math></p> 	<p><math>z = z_{C,l} + z_{C,r}</math></p> <p><math>e = M_{Ed} / N_{Ed}</math></p>	<p><math>N_{Ed} \leq 0</math>    <math>0 &lt; e &lt; z_{C,l}</math></p>	<p><math>N_{Ed} \leq 0</math>    <math>-z_{C,r} &lt; e \leq 0</math></p>
		<p><math>\min [ -z F_{C,l,Rd} / (1 + z_{C,r} / e)</math>  <math>-z F_{C,r,Rd} / (-1 + z_{C,l} / e) ]</math></p>	<p><math>\min [ -z F_{C,l,Rd} / (1 + z_{C,r} / e)</math>  <math>-z F_{C,r,Rd} / (-1 + z_{C,l} / e) ]</math></p>
<p>Po lewej i prawej rozciąg.:</p> <p><math>M_{Ed} &gt; 0</math> ; <math>N_{Ed} &gt; 0</math></p> 	<p><math>z = z_{T,l} + z_{T,r}</math></p> <p><math>e = M_{Ed} / N_{Ed}</math></p>	<p><math>N_{Ed} &gt; 0</math>    <math>0 &lt; e &lt; z_{T,l}</math></p>	<p><math>N_{Ed} &gt; 0</math>    <math>-z_{T,r} &lt; e \leq 0</math></p>
		<p><math>\min [ z F_{T,l,Rd} / (1 + z_{T,r} / e)</math>  <math>z F_{T,r,Rd} / (-1 + z_{T,l} / e) ]</math></p>	<p><math>\min [ z F_{T,l,Rd} / (1 + z_{T,r} / e)</math>  <math>z F_{T,r,Rd} / (-1 + z_{T,l} / e) ]</math></p>

EN 1993-1-8 tab. 6.7

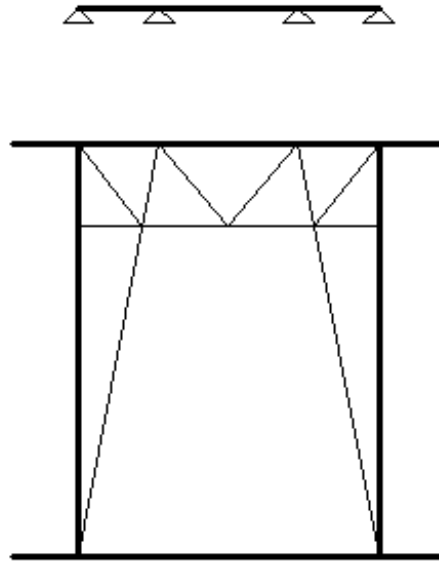
## Stężenia



Rys: konar.eu

Zalecane rozwiązanie stężeń w ścianach hali / między słupami estakady: stężenia nie są połączone z belką podsuwnicową.

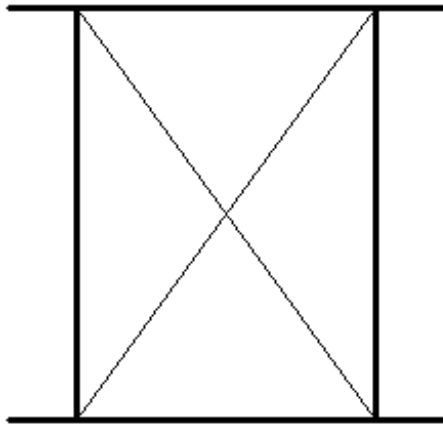
Połączenie stężeń z belką podsuwnicową → belka podsuwnicowa belką wieloprzęsłową.



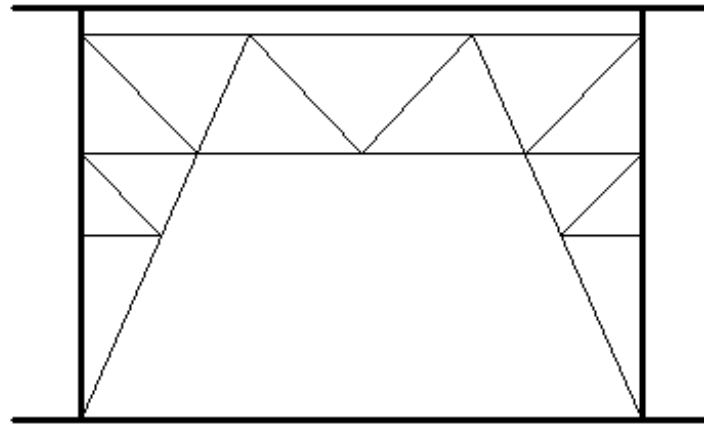
Z punktu widzenia obliczeń zmęczeniowych zalecane są belki jednoprzęsłowe (#t / 17 - 18).  
Dodatkowo, w tym przypadku na stężenia działają ogromne siły bezpośrednio z suwnicy.

Rys: Autor

## Zalecane kształty stężeń



Odległość między słupami  $\leq 6,0$  m



Odległość między słupami  $> 6,0$  m

Rys: Autor

## Zagadnienia egzaminacyjne

Obliczenia zmęczeniowe belek podsuwnicowych

SGU estakad podsuwnicowych

Słupy skratowane i z przewiązkami – podobieństwa i różnice

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

[tmichal@pk.edu.pl](mailto:tmichal@pk.edu.pl)