

Konstrukcje metalowe

Wykład X

Stężenia

Spis treści

Wprowadzenie → #t / 3

Powód zastosowania → #t / 9

Rodzaje stężeń → #t / 19

Położenie → #t / 32

Obliczenia → #t / 42

Przykład 1 → #t / 52

Przykład 2 → #t / 70

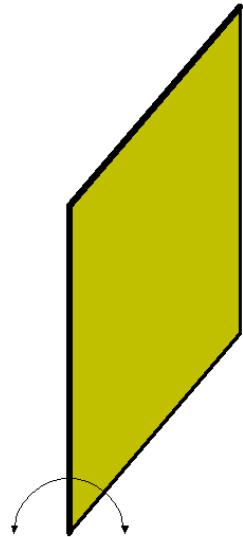
Przykład 3 → #t / 89

Uwagi dodatkowe → #t / 92

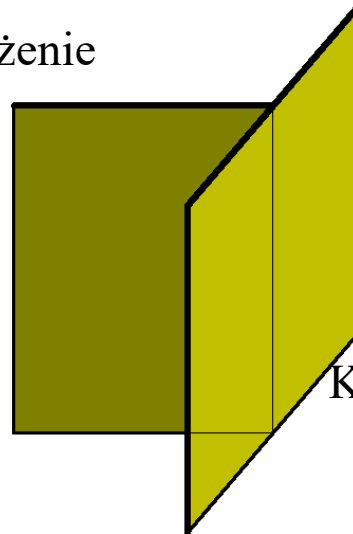
Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 97

Wprowadzenie

Tarcza ma dużą sztywność i nośność (w swojej płaszczyźnie); może przenosić duże obciążenia. Jednakże bez dodatkowej podpory (prostopadle do płaszczyzny) jest niestabilna.



Stężenie



Konstrukcja główna

Niestabilna

Stabilna

Rys: Autor



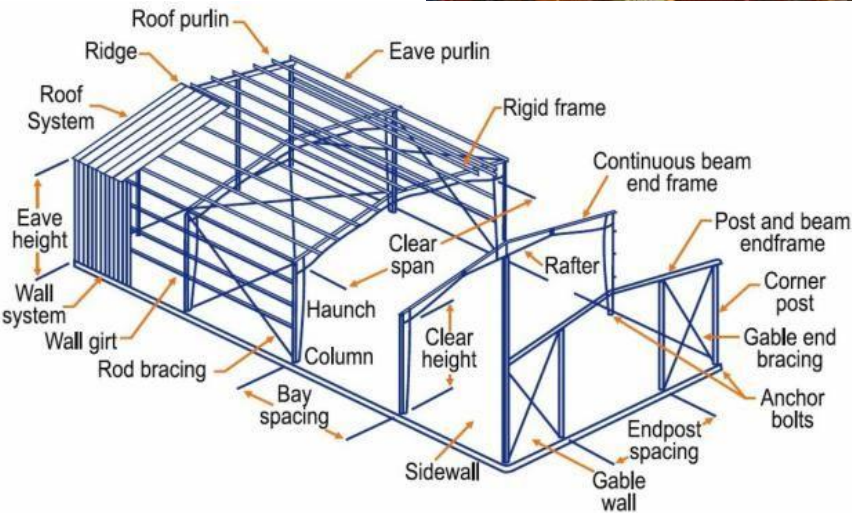
Rys: setrometalgroup.com



Rys: traskostal.pl.

Ogólnie rzecz biorąc, konstrukcje stalowe to zestaw powtarzalnych ram płaskich o dużej nośności w swojej płaszczyźnie. W kierunku prostopadłym konieczne są dodatkowe podparcia pomiędzy ramami.

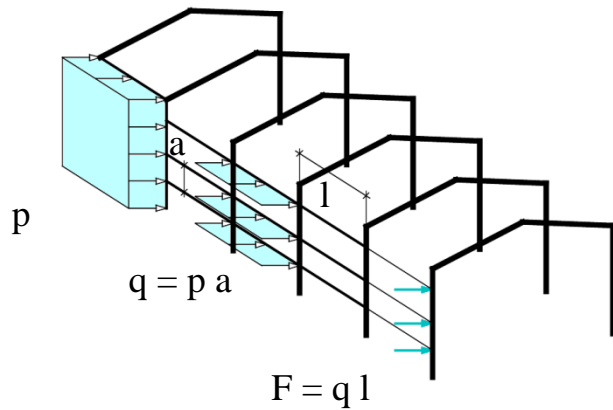
→ #8 / 44



Słupki ścienne, płatwie, stężenia dachu i stężenia ścian bocznych tworzą razem układ przejmujący parcie wiatru na ściany szczytowe. Słupki ściany szczytowej, płatwie i stężenia dachowe powinny łączyć się w tych samych punktach. Podobnie rygielki ściany szczytowej i bocznej.

Rys: greenterrahomes.com

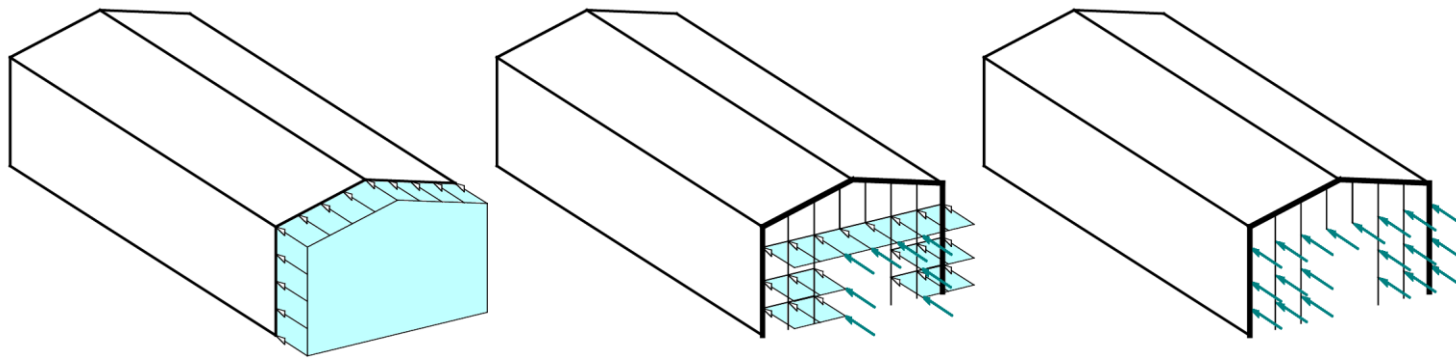
Rys: Autor



Parcie wiatru na ściany boczne (p , [kN / m²]): obudowa jest oparta na rygielkach; obciążenie z obudowy działa na rygielki jako obciążenie ciągłe (q , kN / m). Rygielki są zginane (jedno lub dwuosiowo). Obciążenie z rygielków jest przekazywane na kolumny jako siły skupione w punktach połączenia rygielków i słupów.

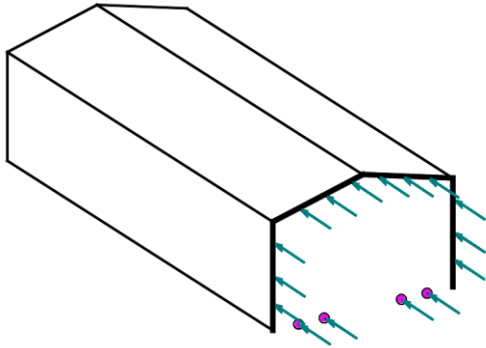
→ #8 / 45

Rys: Autor

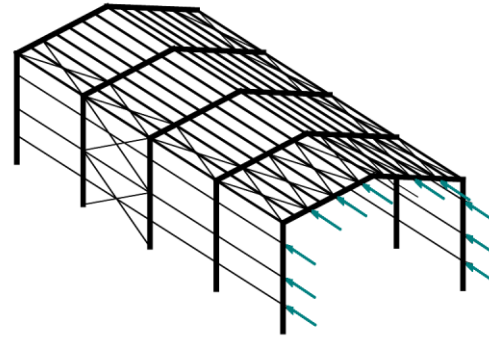


Parcie wiatru na ściany szczytowe: takie samo przeliczenie $p \rightarrow q \rightarrow F$. Siły są przyłożone do ram głównych (prostopadle do ich płaszczyzny) i do słupków w ścianach szczytowych. W przypadku drzwi (w ścianie szczytowej / bocznej) parcie wiatru na drzwi ostatecznie przekłada się na obciążenie rygielków i słupków.

Rys: Autor

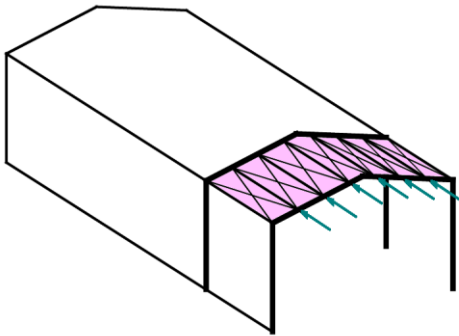


Obciążenie przyłożone do słupków ściany szczytowej przekazywane jest na fundamenty słupków i ramy główne, prostopadłe do ich płaszczyzny. Potencjalnie wywołuje do dwukierunkowe zginanie rygli dachowych i słupów ram głównych.



Ramy główne są podparte w kierunku prostopadłym stężeniami, płatwiami i rygielkami ścian bocznych. To zapobiega dwukierunkowemu zginaniu ram głównych.

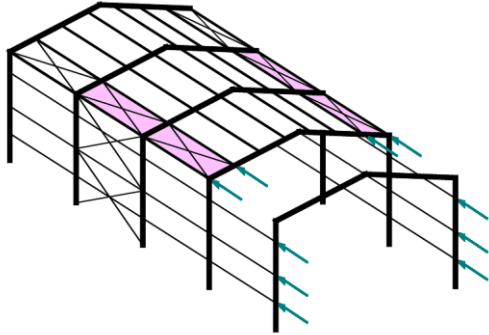
Rys: Autor



→ #8 / 46

Stężenia dachowe i płatwie tworzą razem specyficzną kratownicę poziomą. Rygle dachowe są jej pasami. W efekcie obciążenie ze ściany szczytowej, przyłożone do takiej kratownicy, spowoduje powstanie dodatkowych sił osiowych w dźwigarach dachowych i płatwiach.

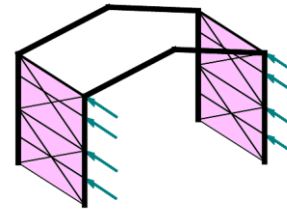
Rys: Autor



Dach: obciążenia są przekazywane wzdłuż hali przez stężenia połaciowe podłużne..

Ściany boczne: obciążenia są przekazywane wzdłuż hali przez rygielki obudowy..

→ #8 / 47

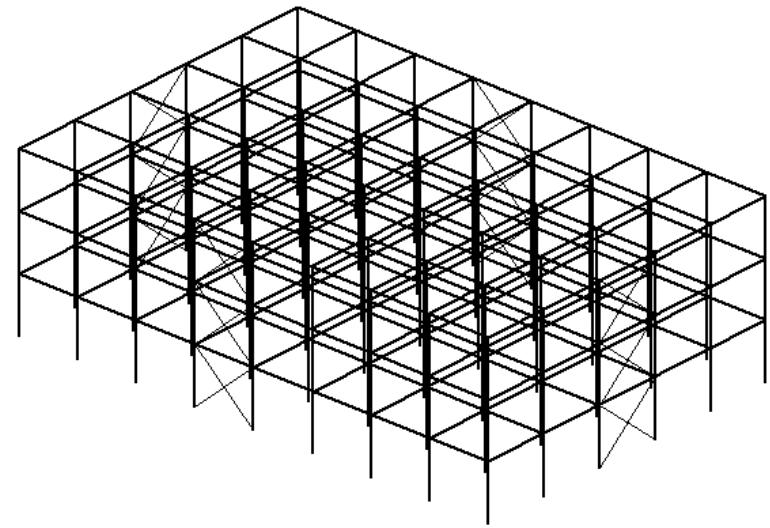
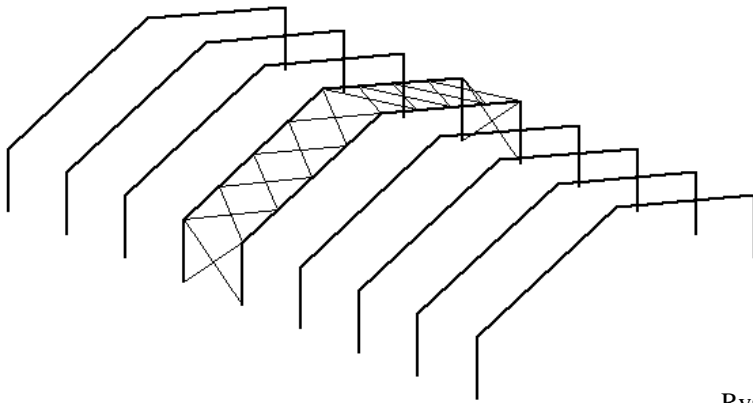


Rys: Autor

Ostatecznie oba rodzaje obciążeń są przejęte przez stężenia ścian bocznych, tworzące specyficzne kratownice pionowe. Słupy ram głównych są ich pasami. W zależności od położenia stężeń pionowych jest możliwe lokalne zginanie dwukierunkowe słupów, jeśli rygielki przejmujące obciążenia nie będą umieszczone w węzłach kratownic pionowych.

Powód zastosowania

Najważniejszą zasadą usztywnień jest podparcie konstrukcji w „kierunku prostopadłym” do jej „płaszczyzny głównej”. W przypadku konstrukcji opartej na płaskich ramach, „płaszczyzna główna” i „kierunek prostopadły” mają charakter intuicyjny. W przypadku konstrukcji szkieletowej, usztywnienia mogą być stosowane w obu kierunkach.



Rys: Autor

„Konstrukcja wsporcza” pełni dwie funkcje:

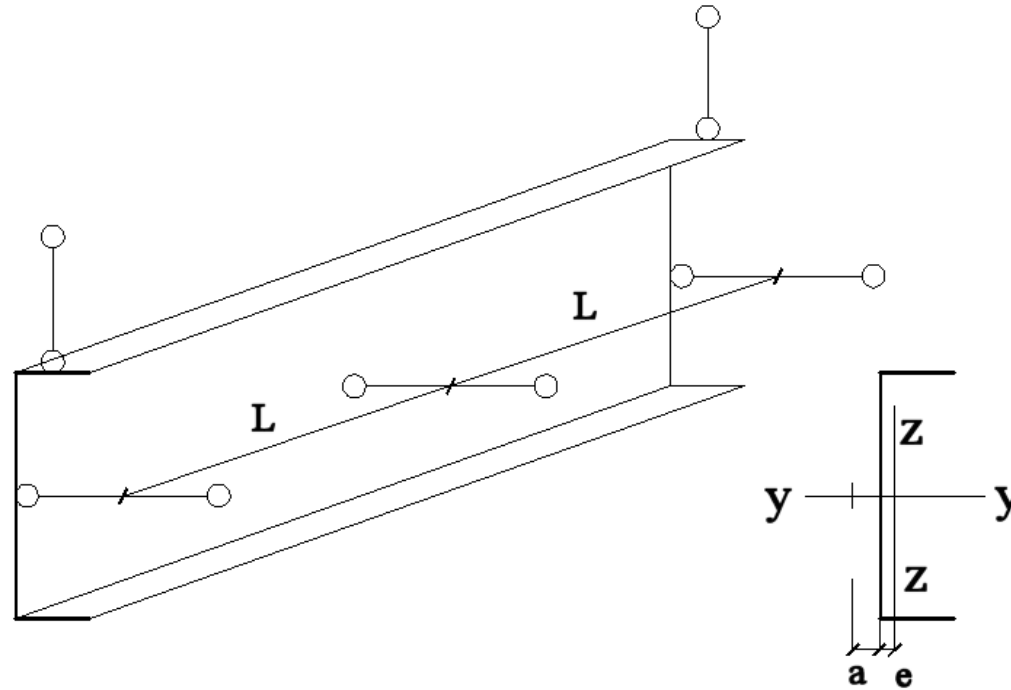
- tworzenie podpór dla elementów w analizie niestateczności ($\rightarrow \#t / 10 - 14$);
- przyjmowanie obciążeń przyłożonych w „kierunku prostopadłym” ($\rightarrow \#t / 15 - 17$);

Przykład 1

C 300p

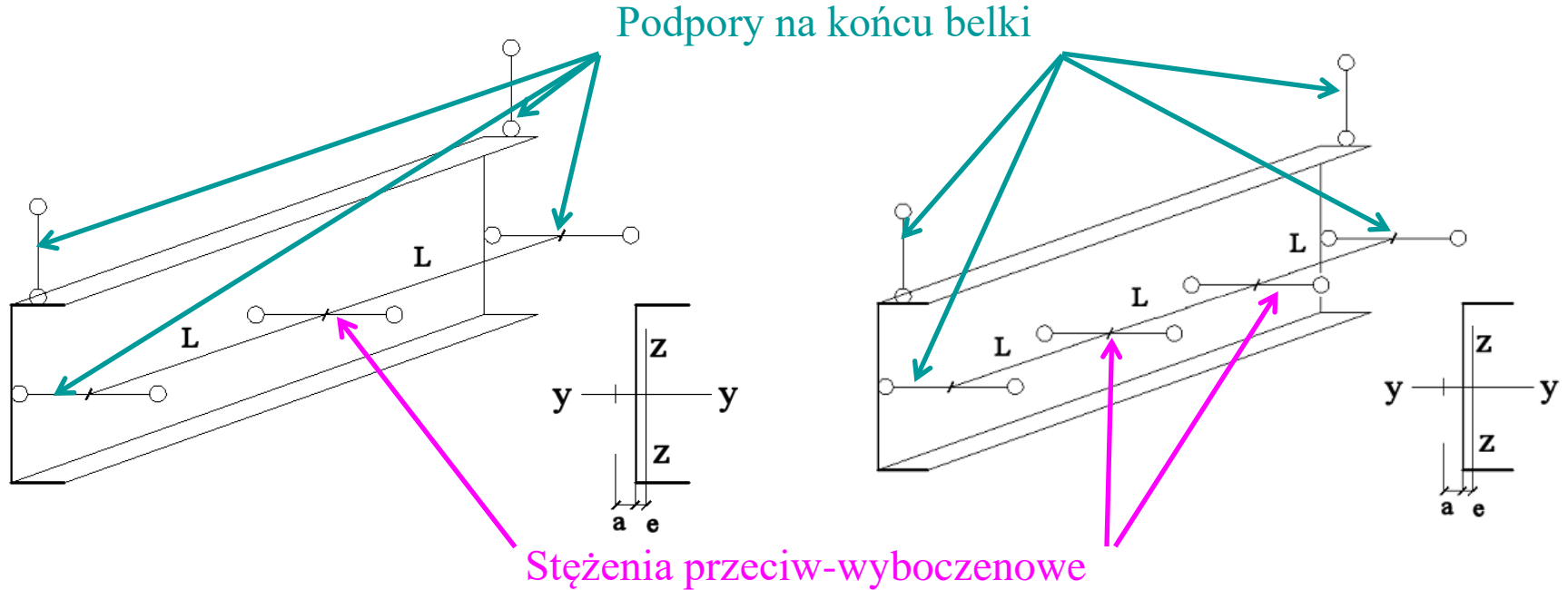
S235 → $f_y = 235 \text{ MPa}$ $L = 3,00 \text{ m}$ $E = 210 \text{ GPa}$ $G = 81 \text{ GPa}$ $A = 52,5 \text{ cm}^2$ $J_y = 7640 \text{ cm}^4$ $J_z = 473 \text{ cm}^4$ $J_w = 66\,500 \text{ cm}^6$ $J_T = 33,9 \text{ cm}^4$ $a = 3,12 \text{ cm}$ $e = 2,89 \text{ cm}$ $i_y = 12,1 \text{ cm}$ $i_z = 3,01 \text{ cm}$ $y_s = a + e = 6,01 \text{ cm}$

tutaj:

 $z_s = y_s = 6,01 \text{ cm}$ $N_{Ed} = 700 \text{ kN}$ 

Rys: Autor

Przykład pokazany na wykładzie #5 pokazuje różnicę między belką stężoną i niestężoną



Długość wyboczeniowa względem z:

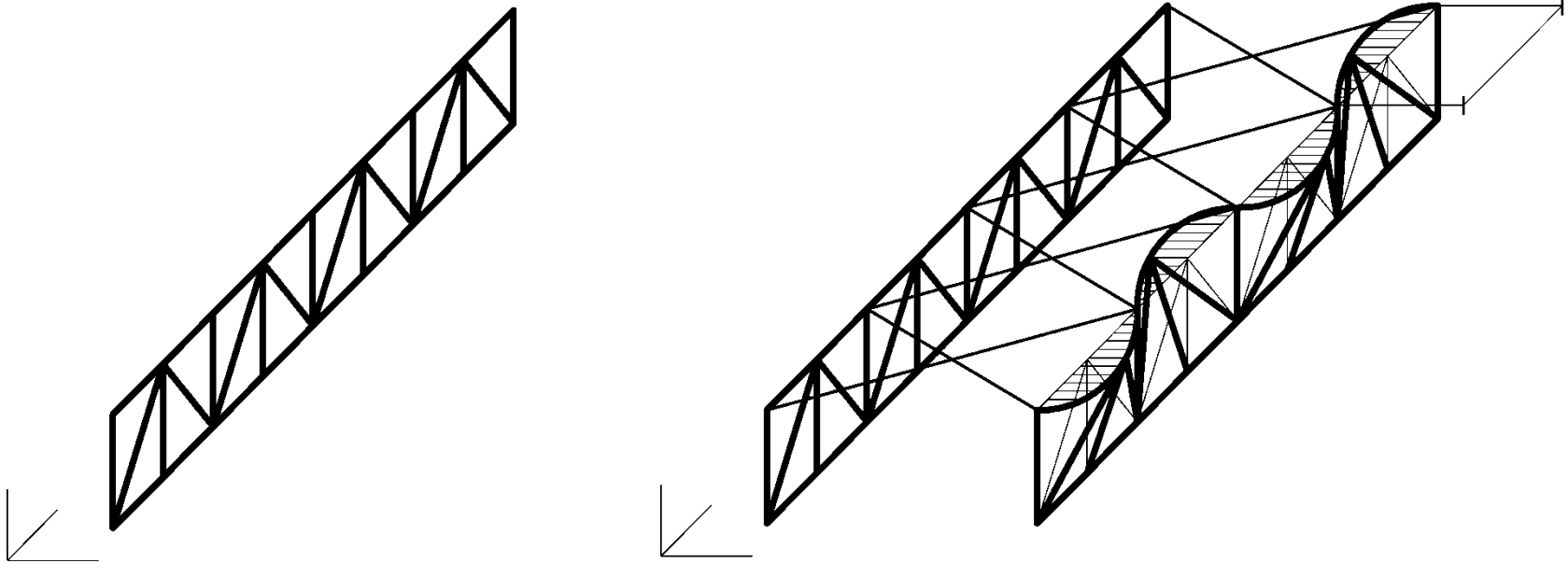
$$\mu_z L_{0z} = 3,00 \text{ m}$$

$$\mu_z L_{0z} = 2,00 \text{ m}$$

Wyężenie:

$$N_{Ed} / \chi A f_y = 1,186$$

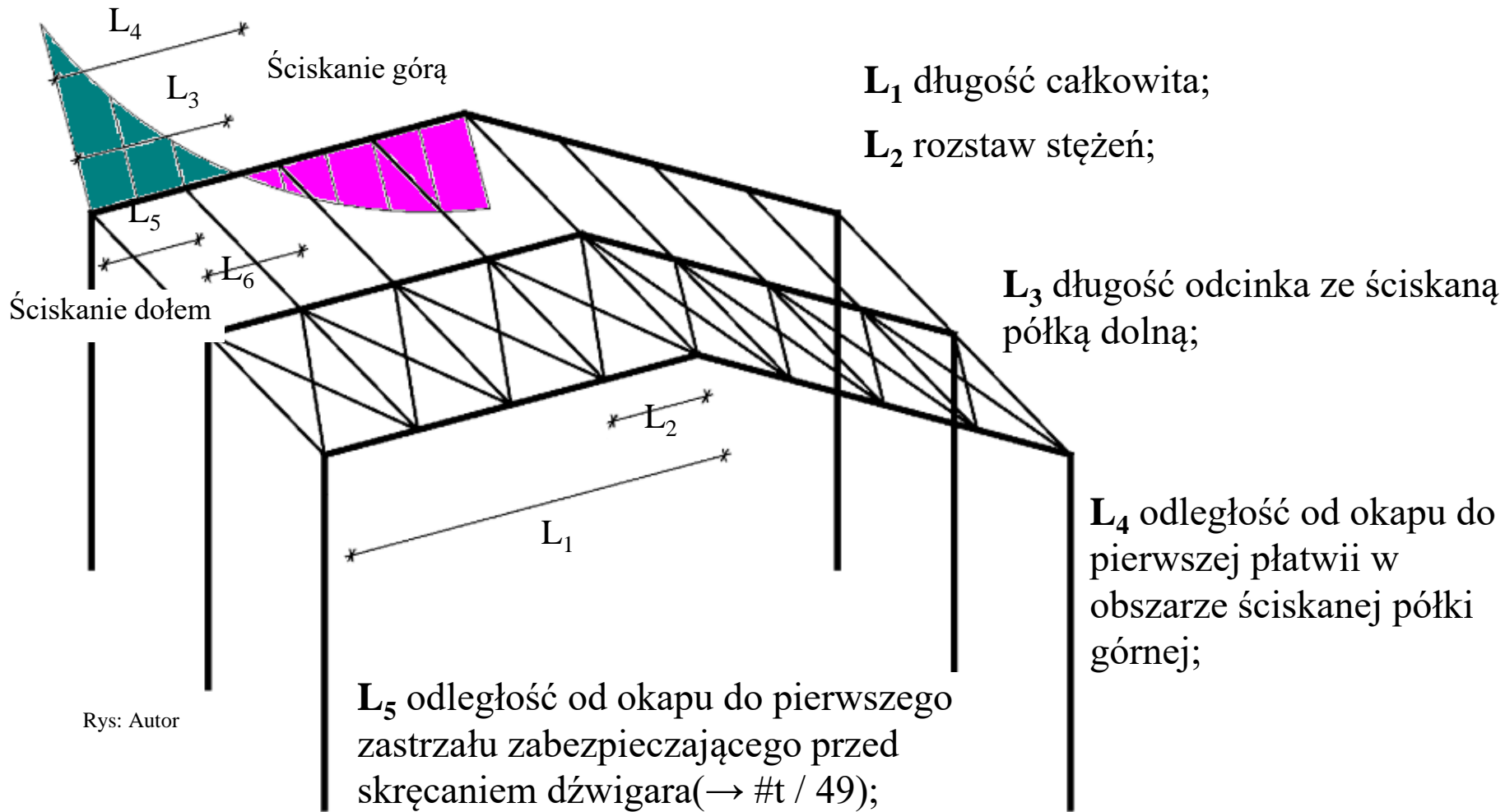
$$N_{Ed} / \chi A f_y = 0,944$$



Rys: Autor

Ściskany pas górny, wyboczenie w płaszczyźnie prostopadłej do kratownicy – długość wyboczeniowa = odległość między stężeniami połączowymi

Dźwigar dwuteowy

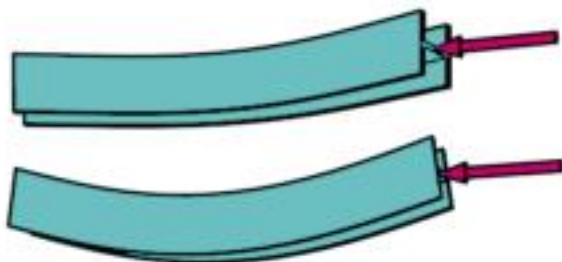


Rys: Autor

L_6 odległość między dwoma najbliższymi zastrzałami przeciw-skręceniovymi (→ #t / 49);

Rodzaj niestateczności globalnej		Długość krytyczna
Wyboczenie	w płaszczyźnie ramy	L_1
	prostopadle do płaszczyzny ramy	L_2
Zwichrzenie	jeśli zastosowano zastrzały przeciwskręciowe ($\rightarrow \#t / 49$)	$\max (L_5 ; L_6)$
	gdy brak zastrzałów ($\rightarrow \#t / 49$)	$\max (L_3 ; L_4)$

Wyboczenie

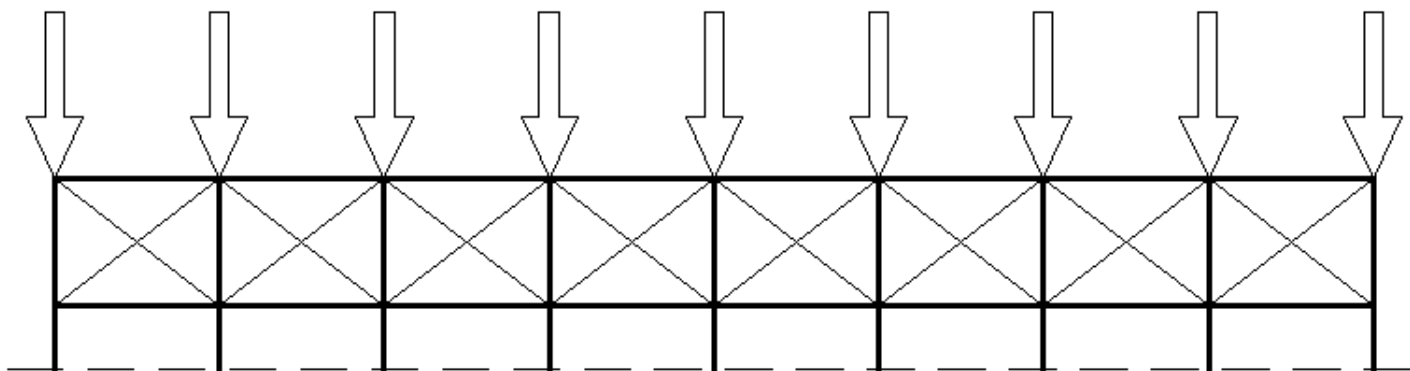


Zwichrzenie



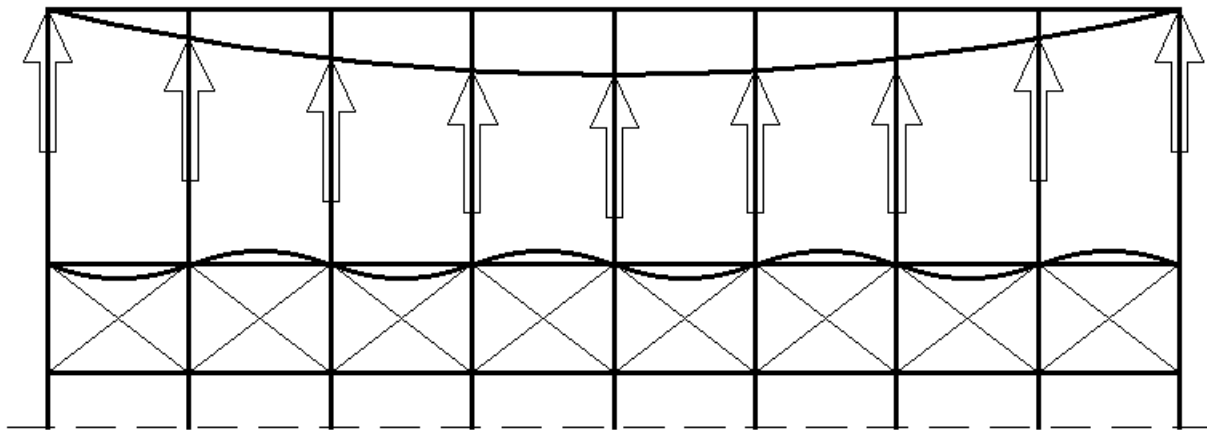
Rys: calcresource.com

Pod uwagę należy wziąć 3 rodzaje obciążeń, działających na stężenia dachowe.

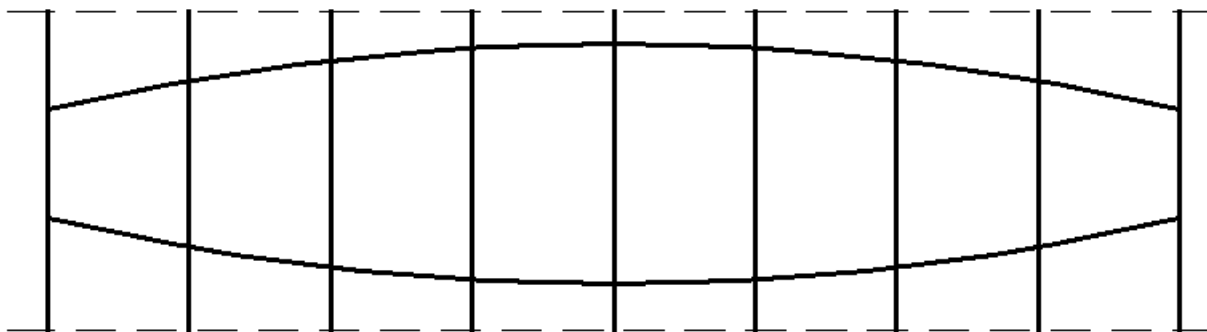


Rys: Autor

1. Obciążenie wiatrem: parcie / ssanie wiatru na ścianach szczytowych, tarcie wiatru o połac dachu. Wartość obciążenia wynika z pól powierzchni i bazowego obciążenia wiatrem.

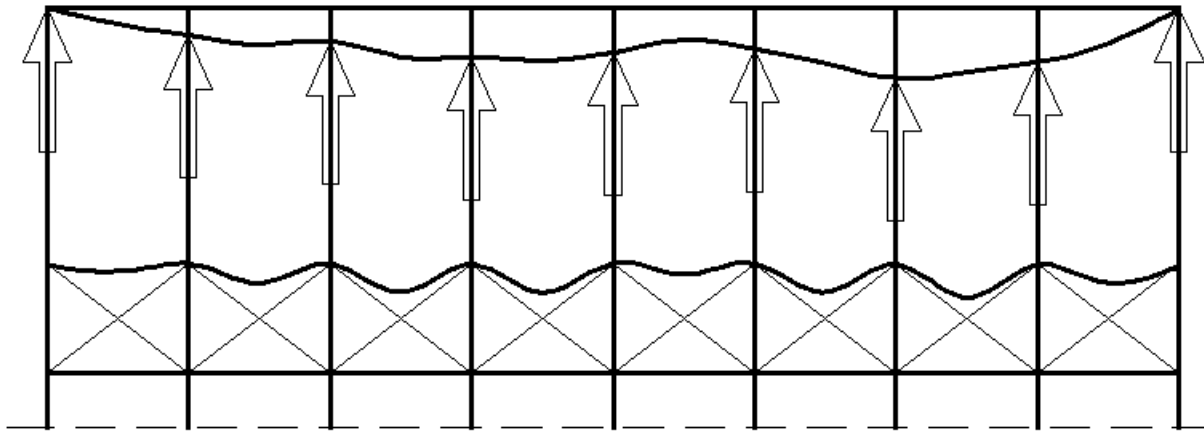


Rys: Autor

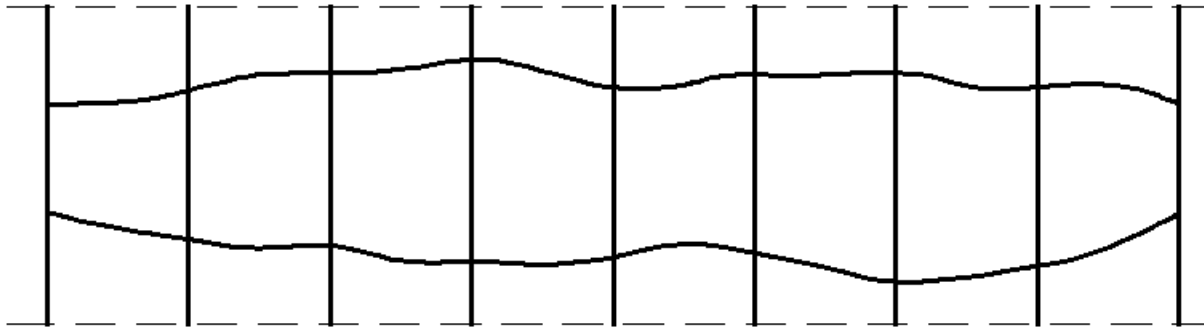


2. Niestateczność dźwigarów dachowych. Stężenia zabezpieczają dźwiga przed utratą stateczności. Bez nich utraciłby stateczność na całej długości. Stężenia można przedstawić jako układ sił „prostujących” wyboczony dźwigar. Siły te – jako reakcje – obciążają stężenia. Wartość jest siłą zastępczą, wynikającą z siły ściskającej w dźwigarze.

Dźwigary tracą stateczność niezależnie od siebie, w lewo lub w prawo. Efekt dla całego dachu nie będzie przemnożeniem (efekt dla pojedynczego dźwigara) przez (liczba dźwigarów) ale przez (współczynnik redukcyjny α_m).



Rys: Autor

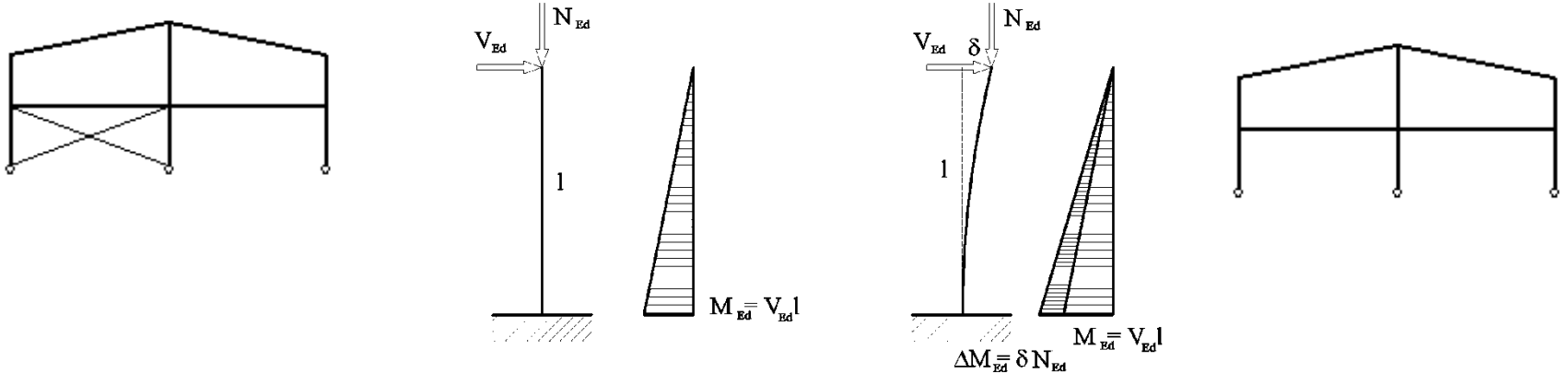


3. Imperfekcje dźwigara dachowego. W świecie realnym nie ma idealnie prostych dźwigarów. Stężenia można przedstawić jako układ sił prostujących krzywy dźwigar. Siły te – jako reakcje – obciążają stężenia. Wartość jest siłą zastępczą, wynikającą z siły ściskającej w dźwigarze i wstępnej imperfekcji wygięciowej.

Dźwigary są powyginane niezależnie od siebie. Efekt dla całego dachu nie będzie przemnożeniem (efekt dla pojedynczego dźwigara) przez (liczba dźwigarów) ale przez (współczynnik redukcyjny α_m).

Rzadkim powodem stosowania usztywnień jest potrzeba zwiększenia sztywności konstrukcji ramy w jej płaszczyźnie. Zwiększa to sztywność przechyłową ramy i zapobiega efektom II rzędu. Więcej informacji zostanie podanych na Wyk #13.

Rys: Autor



Czasami masywne rygielki obudowy nazywane są „stężeniami wiatrowymi”. Jest to tylko myląca nazwa; ich rolą nie jest stężenie konstrukcji a wyłącznie podparcie obudowy przeciw obciążeniu wiatrem.

Rys: Autor

Rodzaje stężeń

Stężenia powierzchniowe:

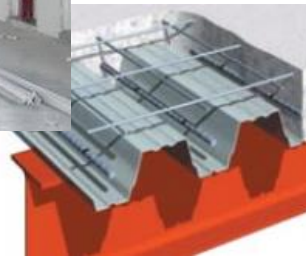
blacha fałdowa (\rightarrow #t / 20- 21)

plyta żelbetowa (\rightarrow #t / 22)

Stężenia prętowe (\rightarrow #t / 23-31)



Rys: lekkaobudowa.pl



Rys: tatasteelconstruction.com



Rys: nexus.globalquakemodel.org



Rys: nexus.globalquakemodel.org

Blachy fałdowe traktowane są jako zabezpieczenie płatwi i rygli ściennych przed wyboczeniem i zwichrzeniem.



Rys: taxonomy.openquake.org



Rys: taxonomy.openquake.org

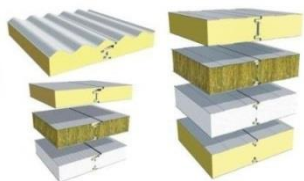
Złożona struktura: blacha fałdowa i płatwie mają dużą sztywność w swojej płaszczyźnie. Dzięki temu nie musimy używać wzmocnień wzdłuż konstrukcji (prawda tylko dla konstrukcji bez suwnic).

→ #8 / 21

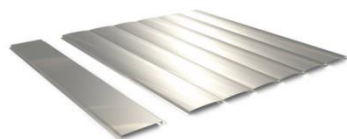
Izolacja termiczna

Fabrycznie wykonane połączenia

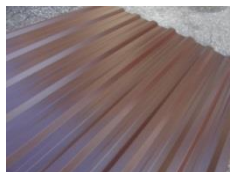
Zabezpieczenie płatwi i rygli przed niestatecznością wg EN



Rys: steelprofil.pl



Rys: pruszynski.com.pl



Rys: amarodachy.pl



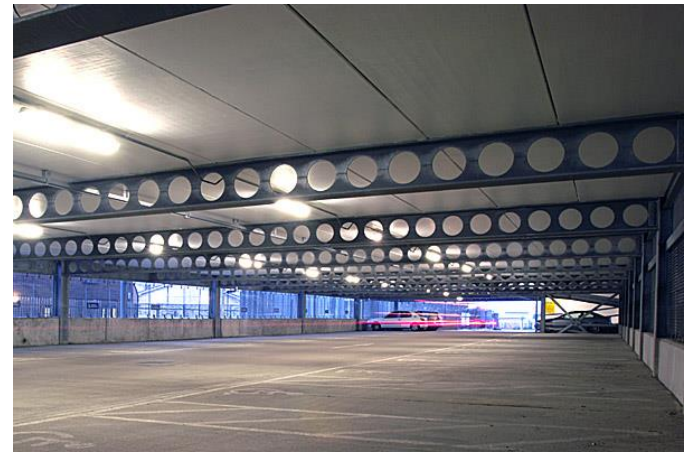
(przez 5 – 10 lat od zamontowania)



Rys building.co.uk

Oddzielne problemy (ogólnie: odpowiedzialność producenta)

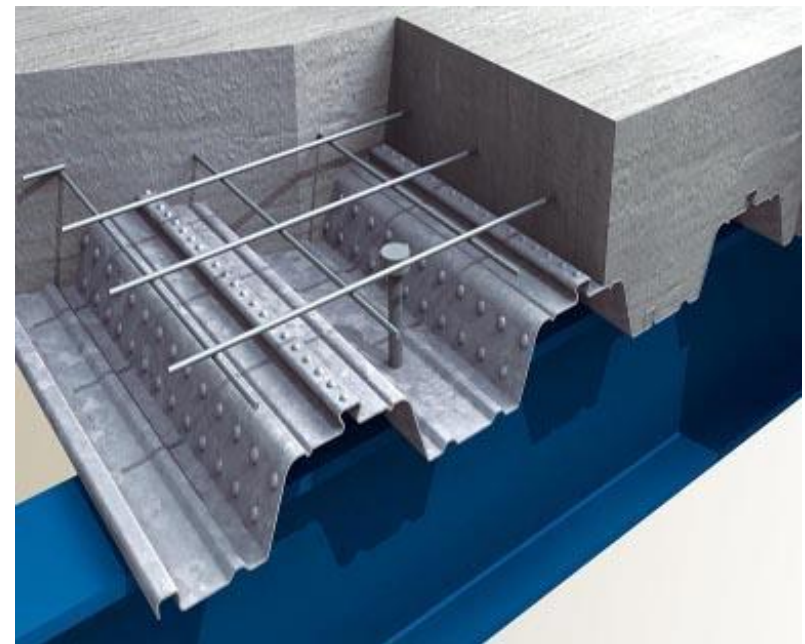
Najczęściej spotykanym przypadkiem jest plyta żelbetowa lub plyta żelbetowa na blasze falistej jako szalunek tracony. Pod uwagę brana jest tylko sztywność płyty żelbetowej; udział blachy falistej jest w tym przypadku pomijany.



Rys: steelconstruction.info

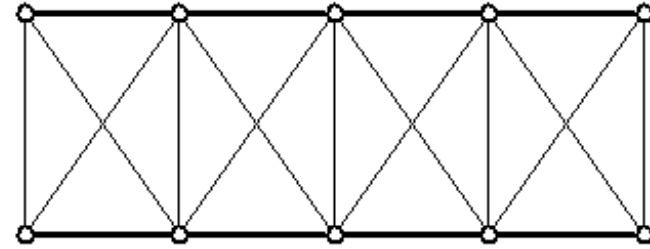
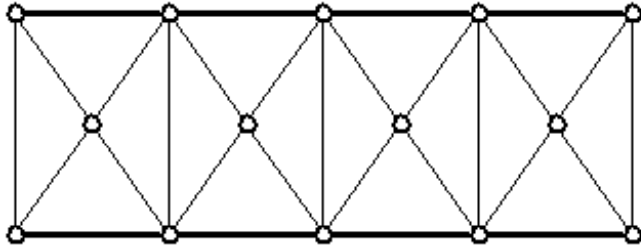


Rys: steelrite.com

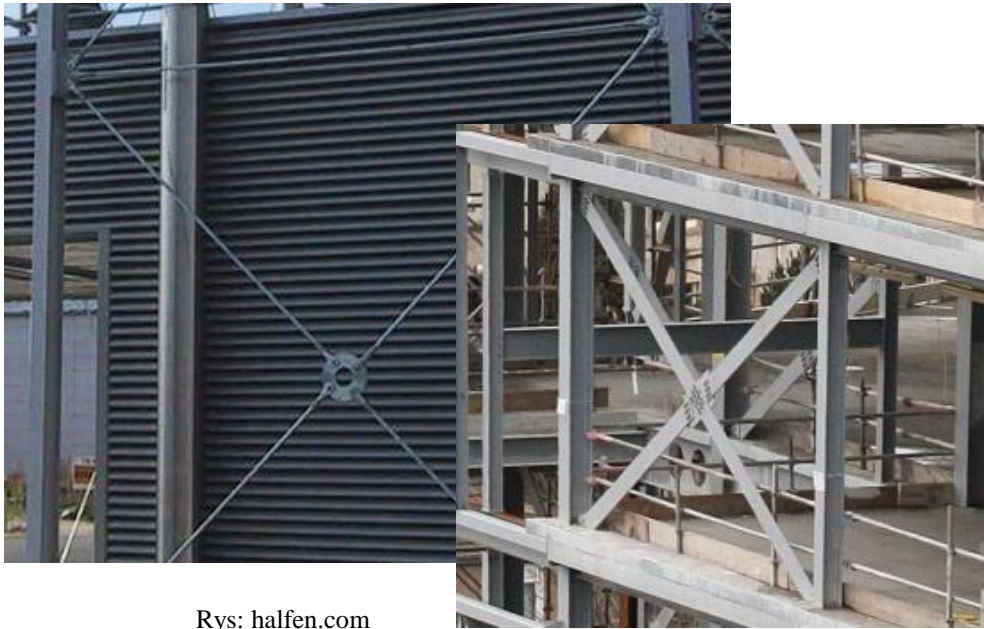


Rys: tatasteelconstruction.com

Dwa odmienne rozwiązania techniczne, wpływające na schemat statyczny stężeń: pręty mogą być połączone ze sobą w połowie długości lub mijać się w różnych płaszczyznach



Rys: Autor



Rys: halfen.com

Rys: steelconstruction.info



Rys: spantec.com.au

Stężenia (→ wyk # 10)



Rys: calgor.com.pl

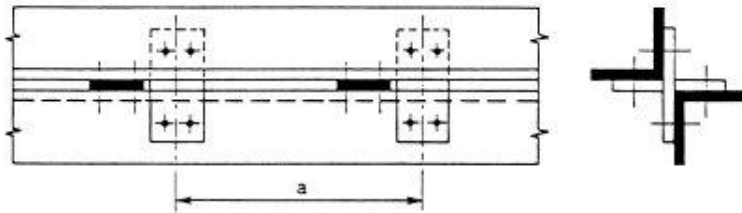


Rys: rafstal-inox.pl



Rys: rafstal-inox.pl

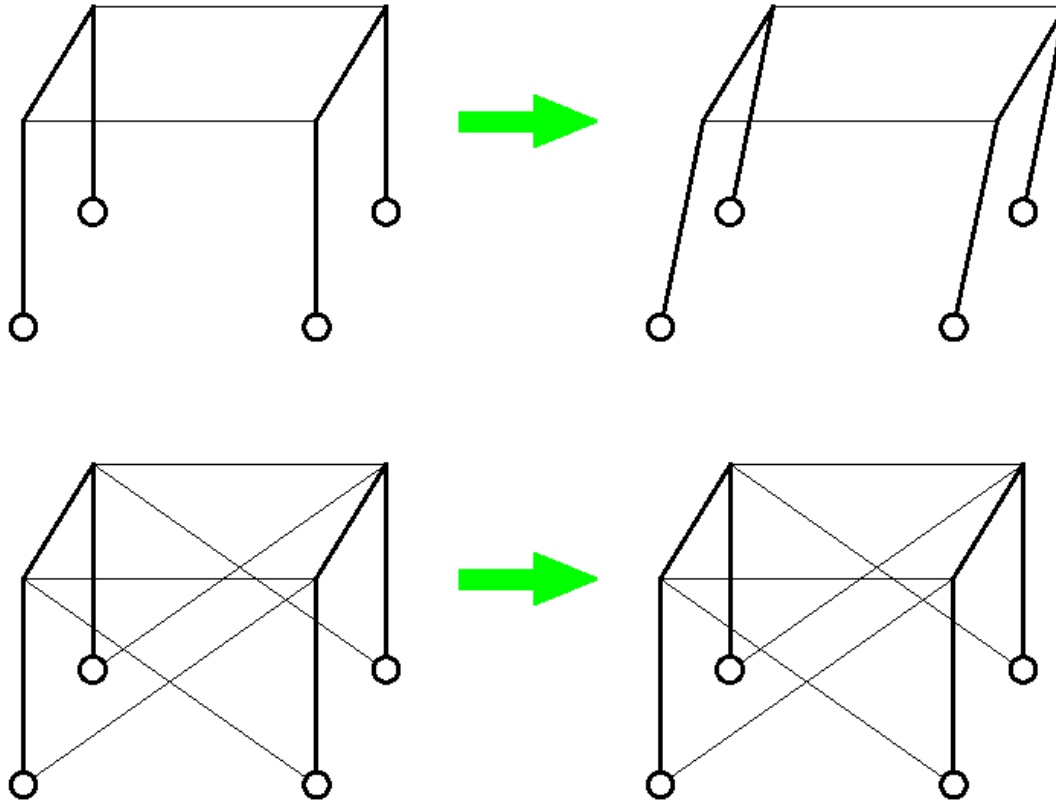
→ #8 / 48



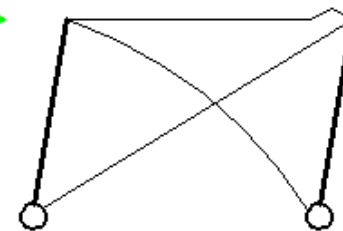
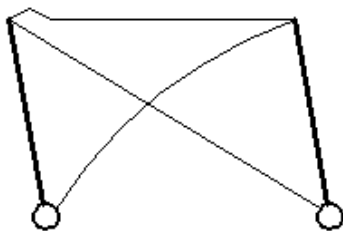
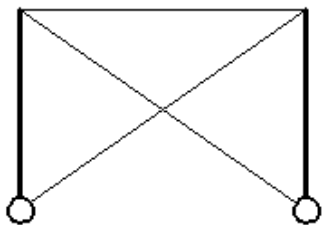
Rys: EN 1993-1-1 fig. 6.13



Rys: stalhart.pl



Ważny jest kształt stężeń prostopadłych. Prostokąt nie jest figurą geometrycznie niezmienna i taki rodzaj stężeń nie zapobiega przed niestatecznością. Figurą geometrycznie niezmienną jest trójkąt i taki właśnie kształt powinny mieć stężenia.



Rys: Autor

W trakcie swojego życia konstrukcja pracuje pod różnymi obciążeniami i oddziaływaniami. Stężenia prętowe podlegają naprzemiennemu wyboczeniu. Rezultatem jest wzrost odkształceń plastycznych wśród stężeń. Dla blach fałdowych istotna jest owalizacja otworów śrub i korozja wokół otworów śrub. Współpraca obudowa-konstrukcja zmniejsza się po kilku latach od wzniesienia konstrukcji, a ochrona przeciw-wyboczeniowa ze strony obudowy maleje.



Rys: encrypted-tbn3.gstatic.com



Rys: previews.123rf.com

Rys: Autor



Ze względu na wyboczenie, w celu zmniejszenia odkształceń w przypadku niestabilnych usztywnień prętowych, należy zamontować śruby napinające (lub inny rodzaj układu regulacyjnego).



Rys: dreamstime.com

Musimy unikać stężeń pionowych wewnątrz konstrukcji. Stężenia w płaszczyźnie ramy oraz prostopadłe do ramy powinny być umieszczane tylko po obrysie ścian zewnętrznych



Rys: lekkaobudowa.pl



Rys: i.wnp.pl

W sytuacji, gdy nie da się uniknąć zastosowania stężeń wewnątrz budynku, zalecane jest stężenie w postaci ramy portalowej. Nie ogranicza ono komunikacji wewnętrznej tak bardzo, jak stężenie X.

Zasady ogólne w przypadku stężeń prętowych:

- Należy uwzględnić dodatkowe siły w płatwiach i dźwigarach, wywołane przez współpracę stężeń i konstrukcji głównej;
- Odległość pozioma między końcami stężenia $\leq 6,00$ m \rightarrow ciężar własny stężenia można pominąć (w przeciwnym wypadku – momenty zginające od ciężaru własnego);



Rys: rafstal-inox.pl



Rys: stalhart.pl



Rys: calgor.com.pl

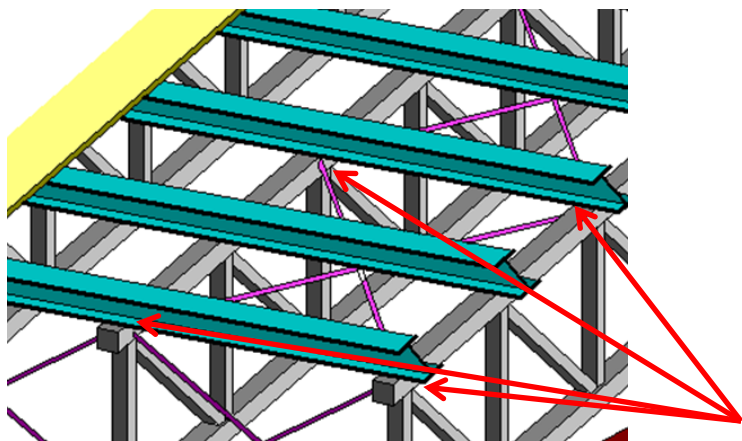
Stężenia prętowe można podzielić na dwie grupy:

- wiotkie (łatwo tracące stateczność przy ściskaniu);
- sztywne (nie tracące stateczności przy ściskaniu)



Rys: rafstal-inox.pl

Model statyczny 2D (→ #t / 46)

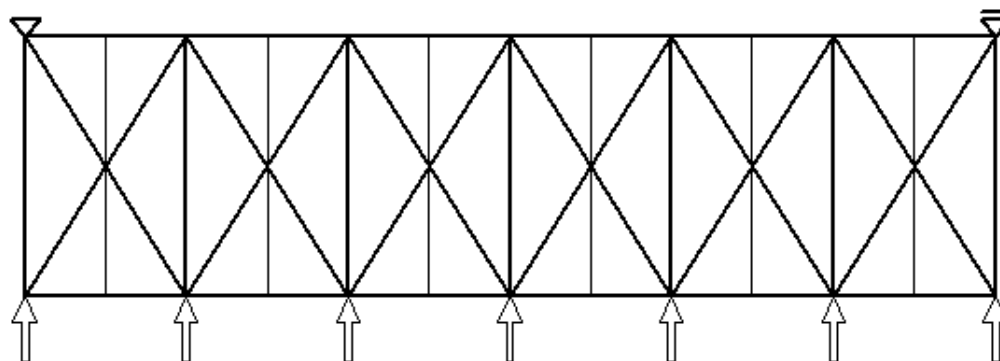


Stężenia są instalowane **między górnymi pasami** kratownicy pionowej. Płatwie są **nad górnymi pasami** kratownicy pionowej. Współpraca między stężeniami i płatwiami jest możliwa tylko dla tych płatwi, które mają wspólne punkty ze stężeniami.

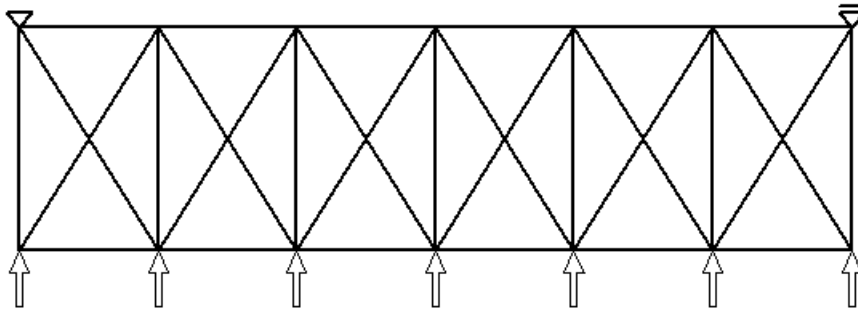


Rys: Autor

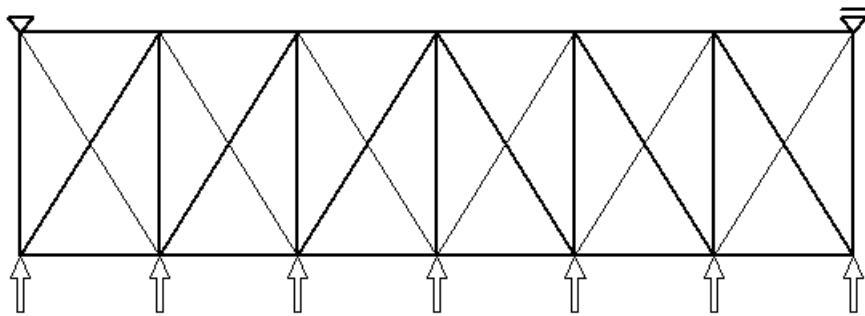
Płatwie niewspółpracujące ze stężeniami nie są brane pod uwagę w modelu statycznym.



Stężenia sztywne: w modelu statycznym brane są pod uwagę obie gałęzie (ściskana i rozciągana).

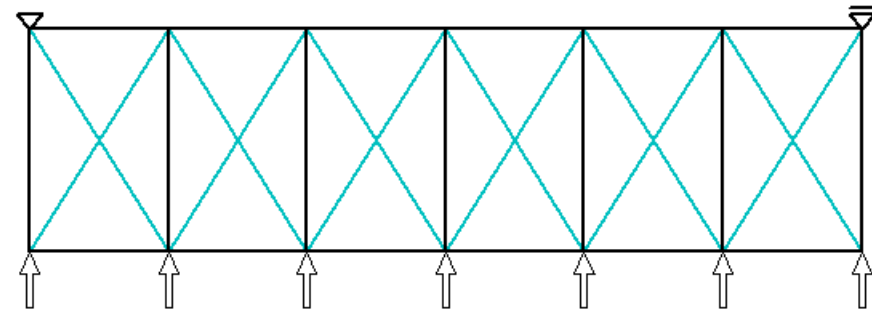


Rys: Autor

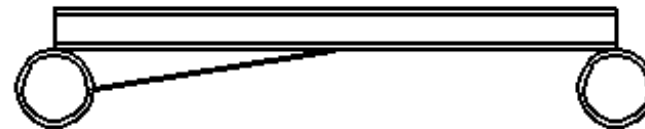
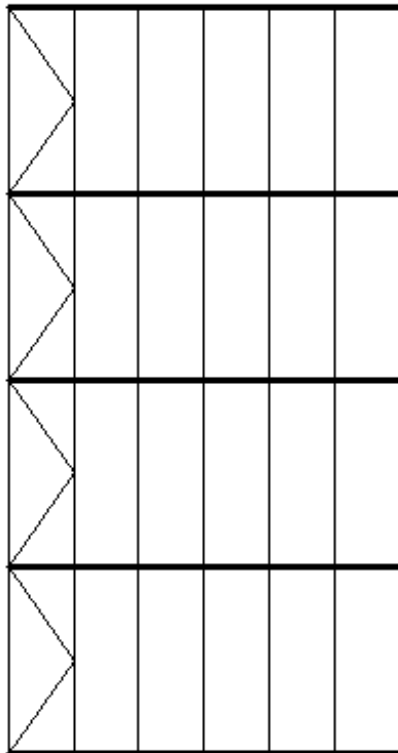


Stężenia wiotkie: w modelu uwzględniamy tylko pręty rozciągane

Stężenia wiotkie (inna możliwość): obie gałęzie (ściskana i rozciągana) są brane pod uwagę w modelu statycznym, z zastosowaniem w obliczeniach nieliniowości materiałowej; materiał nie pracuje na ściskanie.



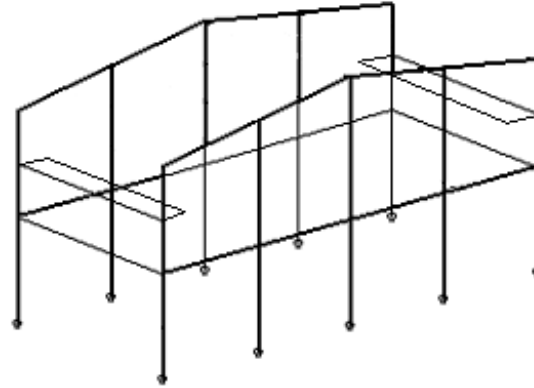
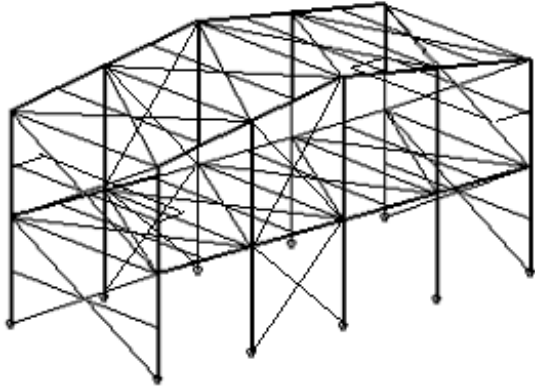
Niezalecany typ stężenia. Stężenia są połączone z płatkami w połowie ich rozpiętości. To zmienia schemat statyczny w płatwi (beka dwuprzęsłowa a nie jednoprzęsłowa), ; w dodatku na stężenia działają obciążenia z płatwi.



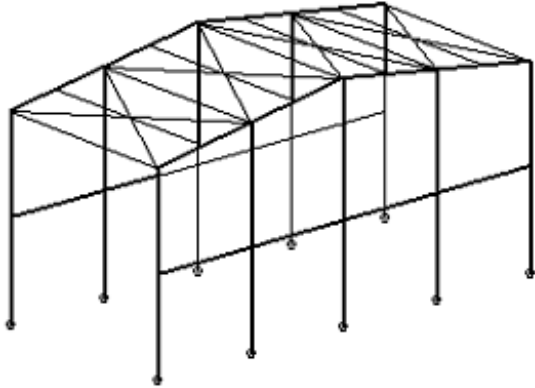
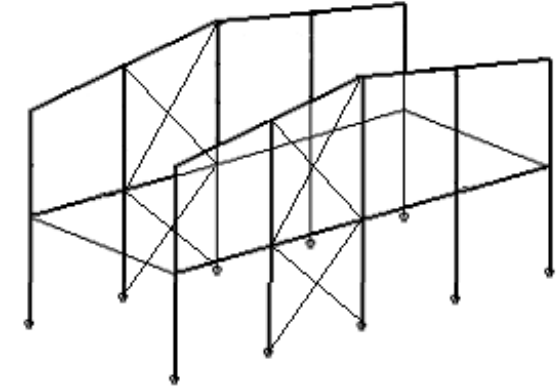
Rys: Autor

Położenie

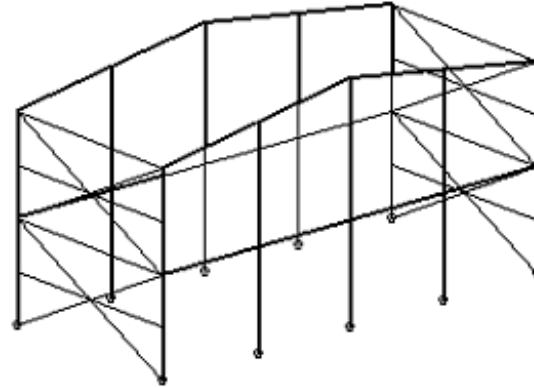
Tężniki hamowne suwnic
(II stopień studiów)



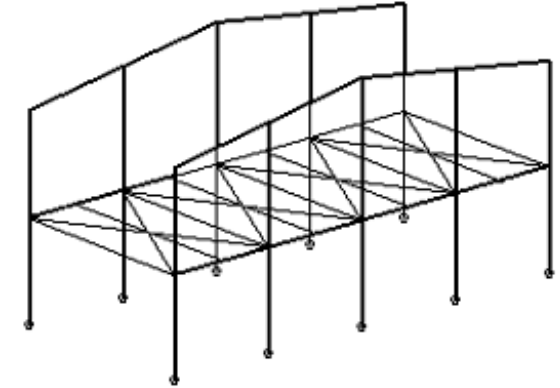
Stężenia w
płaszczyźnie ramy
(bardzo rzadko)



Stężenia
dachowe



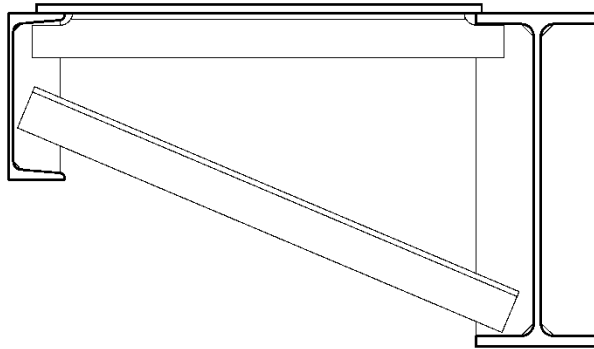
Stężenia pionowe między
ramami



Przepony podłogowe

Rys: Autor

Tężnik hamowne suwnic



Rys: Autor



Rys: konar.eu

→ Konstrukcje metalowe, II^o studiów;

Stężenia w płaszczyźnie ramy

Ten typ jest stosowany przede wszystkim w przypadku wysokich budynków. Zostaną one przedstawione na II stopniu studiów.

Rzadkim przypadkiem jest zwiększenie sztywności przechyłowej ram (\rightarrow #t / 18)



Rys:propertyeu.info



Rys:wikipedia



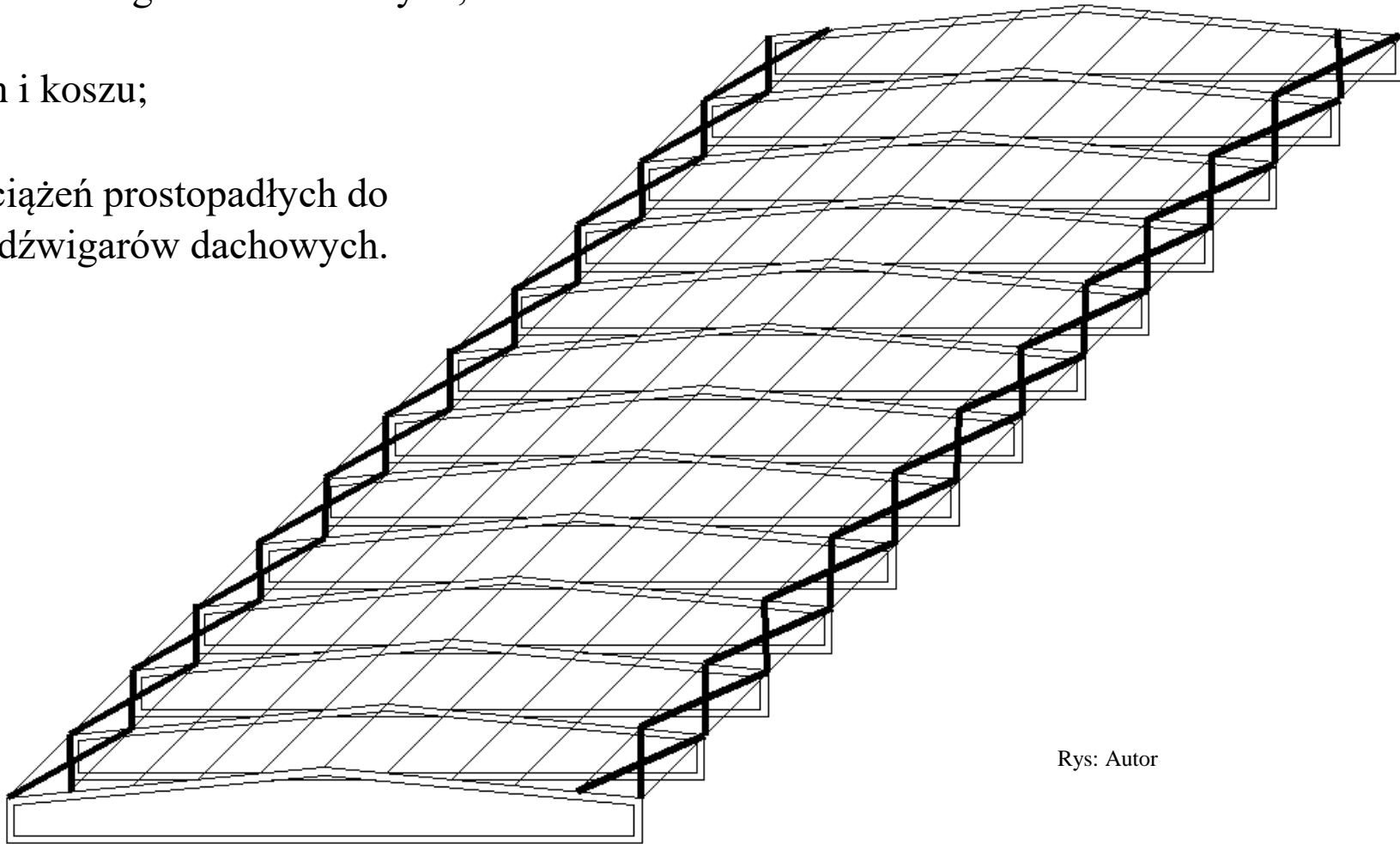
Rys: de51gn.com

Stężenia połąciowe podłużne;

Dla kratownic i dźwigarów dwuteowych;

Przy okapach i koszu;

Przejęcie obciążeń prostopadłych do
płaszczyzny dźwigarów dachowych.



Rys: Autor

Stężenia połączeniowe poprzeczne;

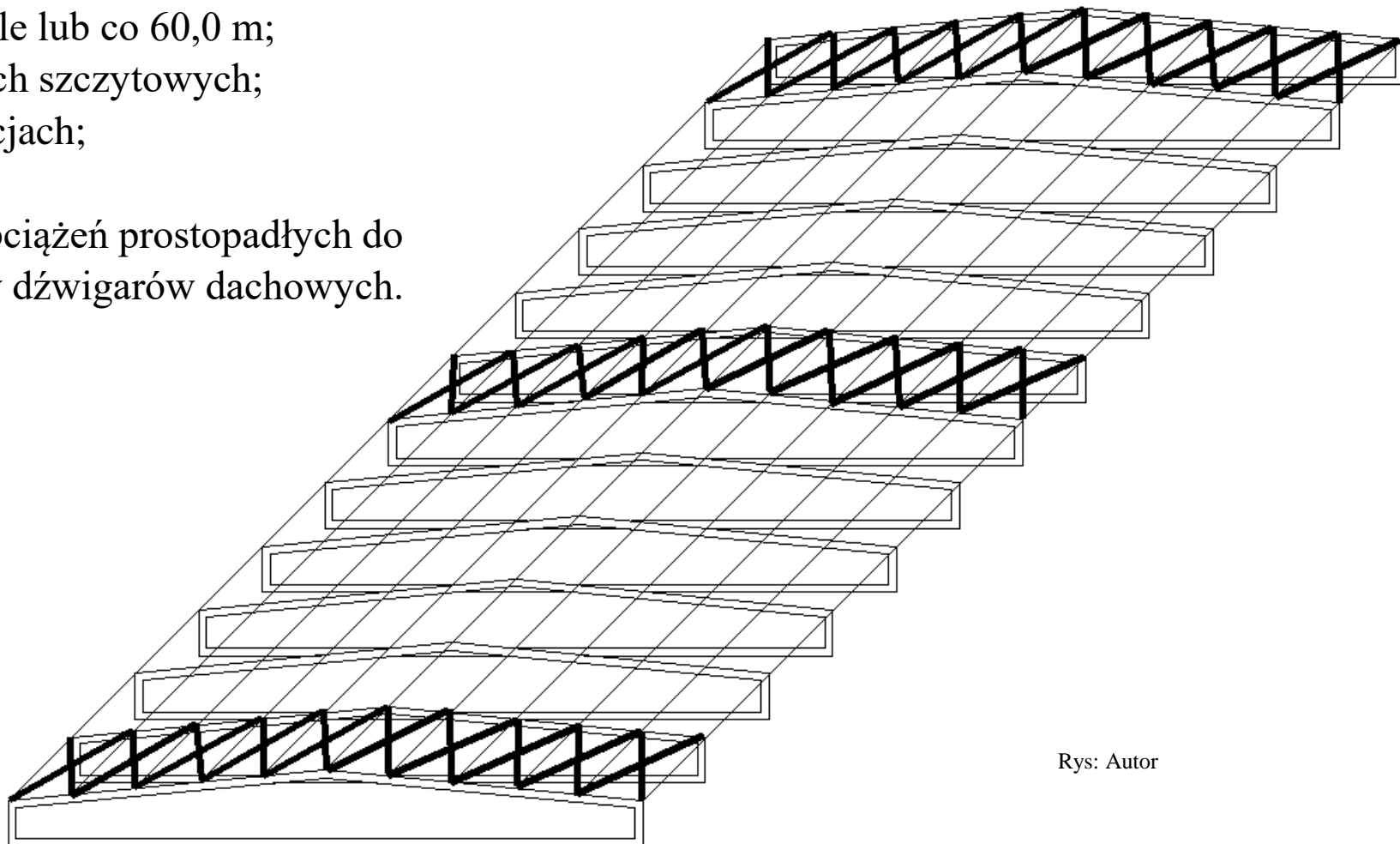
Dla kratownic i dźwigarów dwuteowych;

Co ósme pole lub co 60,0 m;

Przy ścianach szczytowych;

Przy dylatacjach;

Przejście obciążeń prostopadłych do
płaszczyzny dźwigarów dachowych.



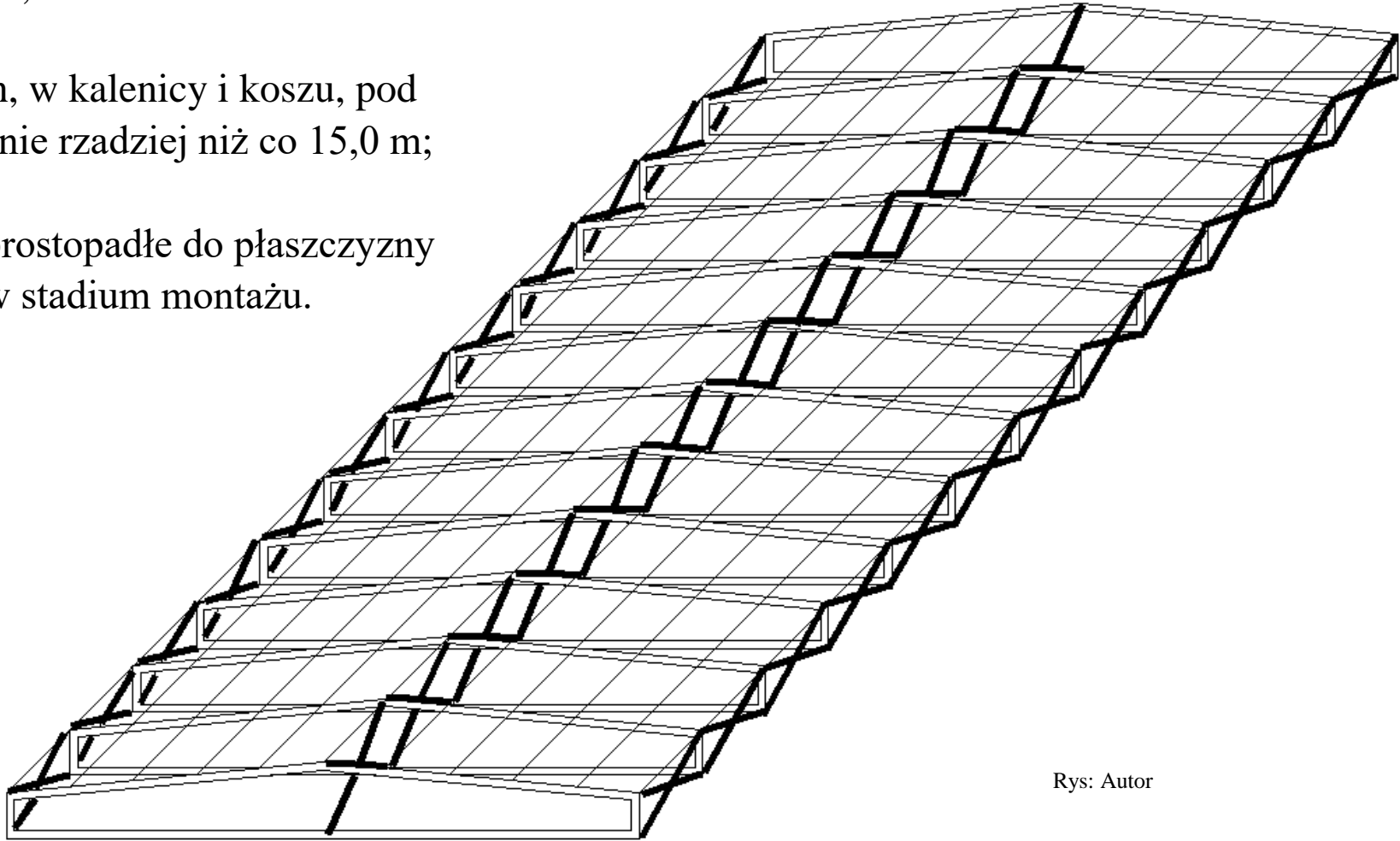
Rys: Autor

Stężenia dachowe pionowe podłużne;

Dla kratownic;

Przy okapach, w kalenicy i koszu, pod
światlikami, nie rzadziej niż co 15,0 m;

Obciążenia prostopadłe do płaszczyzny
konstrukcji w stadium montażu.



Rys: Autor

Stężenia poprzeczne pasa dolnego;

Dla kratownic;

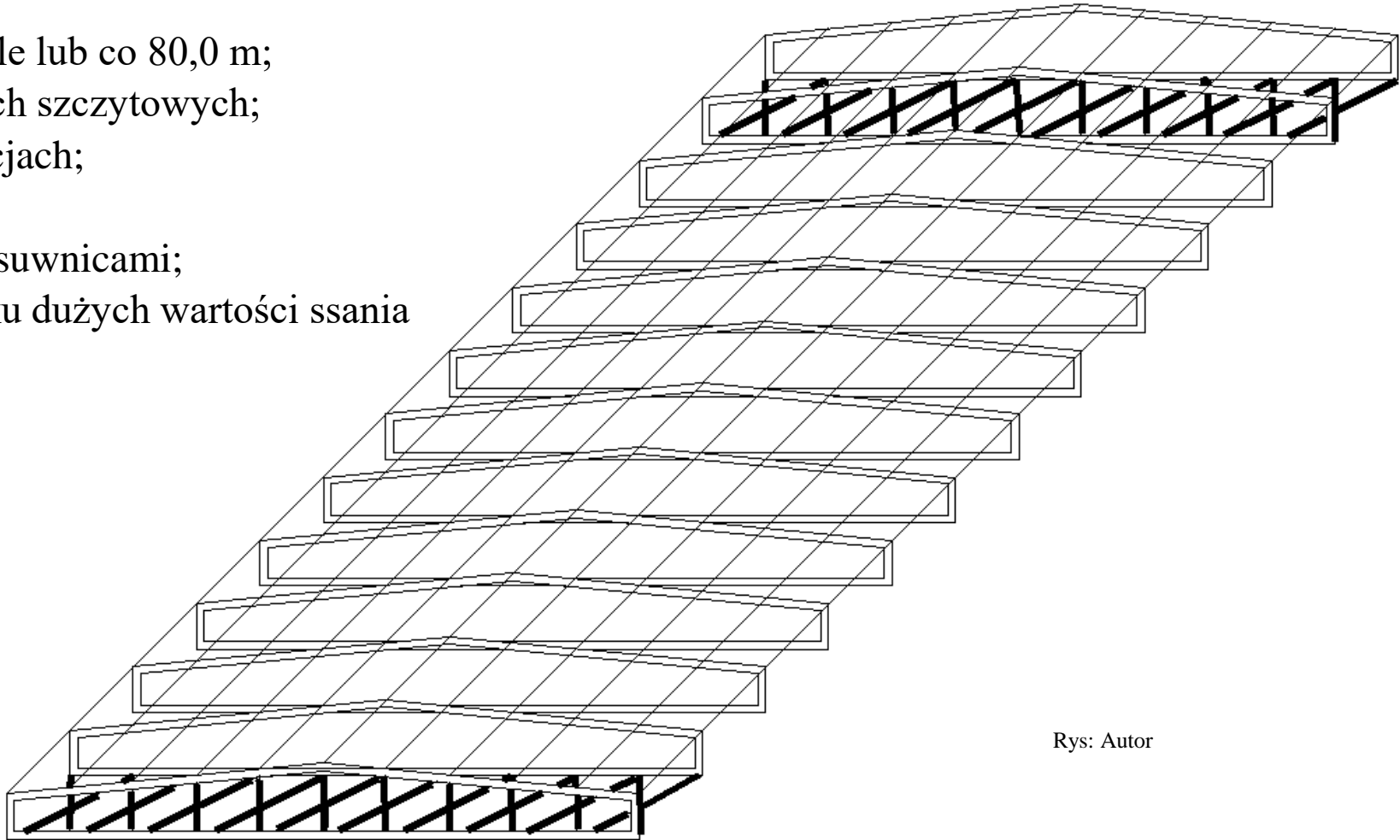
Co ósme pole lub co 80,0 m;

Przy ścianach szczytowych;

Przy dylatacjach;

W halach z suwnicami;

W przypadku dużych wartości ssania wiatru.



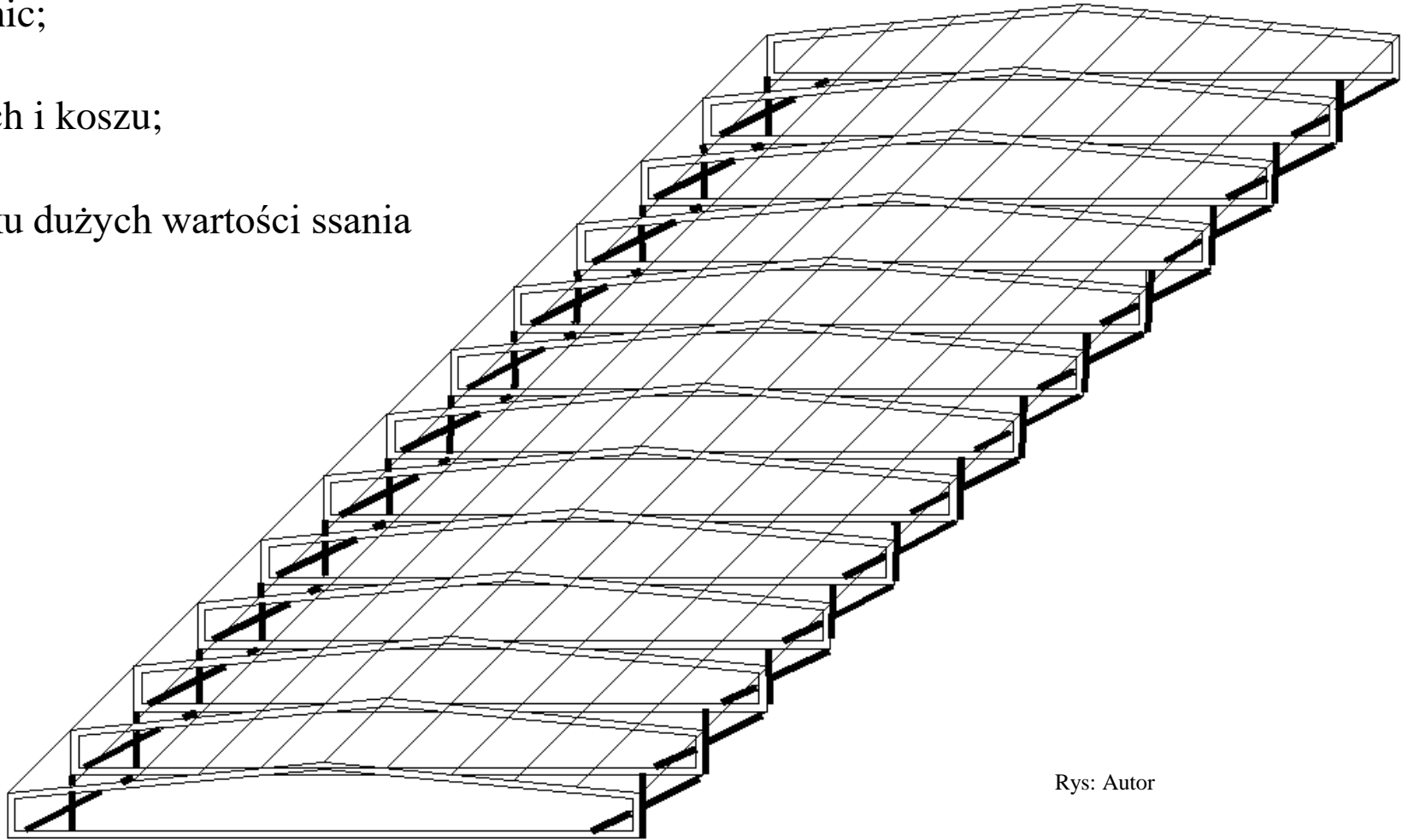
Rys: Autor

Stężenia podłużne pasa dolnego;

Dla kratownic;

Przy okapach i koszu;

W przypadku dużych wartości ssania wiatru.



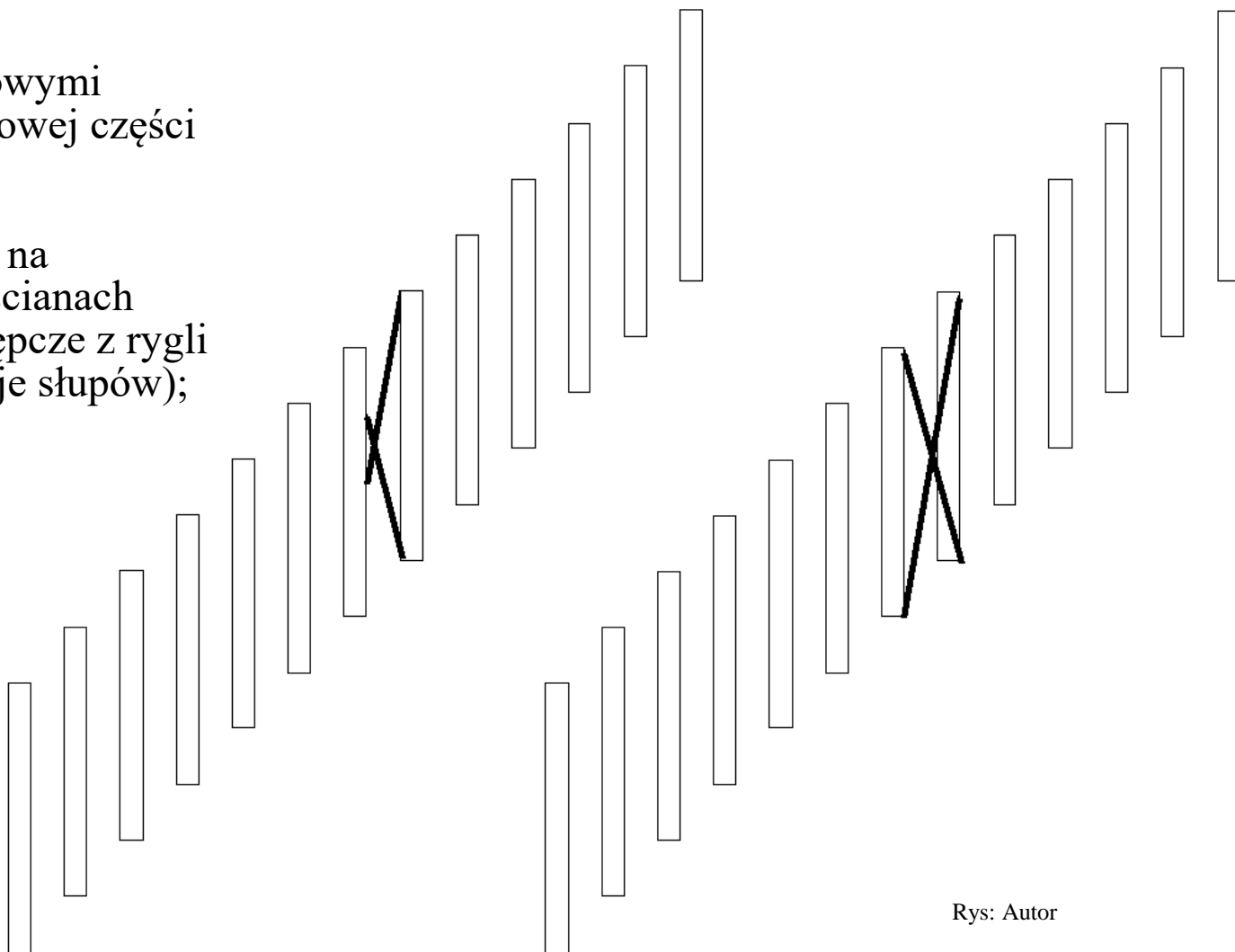
Rys: Autor

Stężenia ścienne

Pod stężeniami połączeniowymi
poprzecznymi w środkowej części
między dylatacjami;

Przeniesienie obciążeń na
fundamenty (wiatr na ścianach
szczytowych, siły zastępcze z rygli
dachowych, imperfekcje słupów);

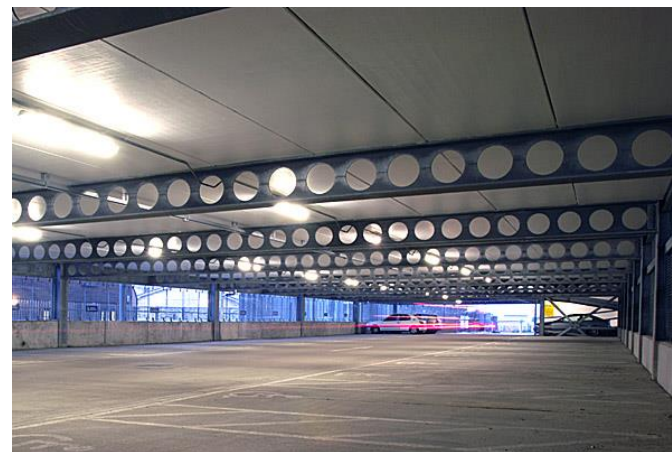
Obciążenia:
prostopadłe do
płaszczyzny ramy oraz
od imperfekcji
przechyłowych słupów



Rys: Autor

Przepony podłogowe

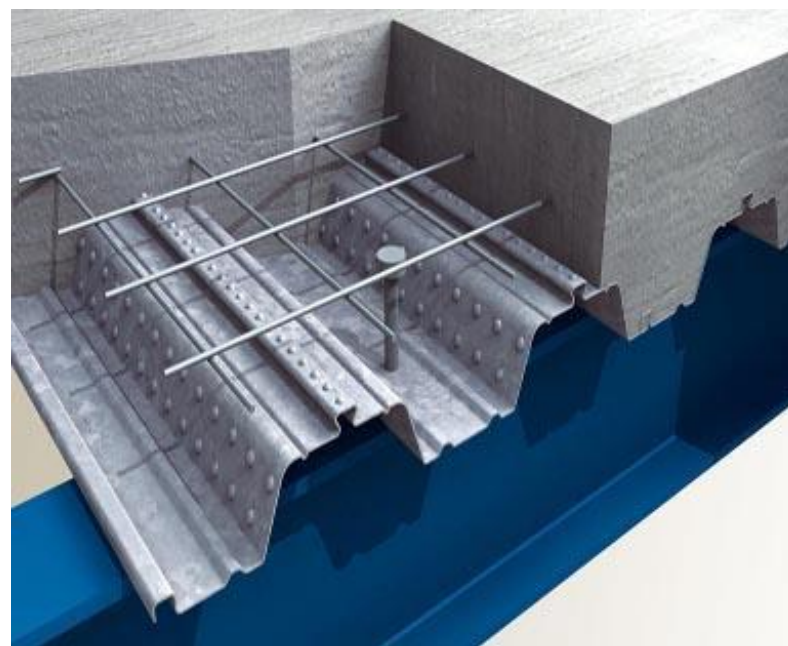
Ogólnie rzecz biorąc, przegrody podłogowe to płyty betonowe – podłogi/stropy między poziomami.



Rys: steelconstruction.info



Rys: steelrite.com



Rys: tatasteelconstruction.com

Obliczenia

Istnieje kilka algorytmów obliczania stężeń. Zależy to od:

- rodzaju stężenia (blacha falista, płyta żelbetowa, stężenie prętowe);
- rodzaju utraty stateczności (wyboczenie, zwichrzenie);
- położenia (stężenia dachowe, ścienne, tężniki suwnic, przepony podłogowe).

Trzy elementy muszą być obliczone:

- siły działające na stężenia;
- nośność stężeń;
- zachowanie się elementów stężanych: brak utraty stateczności (wystarczająca skuteczność stężeń), zabezpieczenie przed częścią postaci utraty stateczności (częściowa skuteczność stężeń), brak zabezpieczenia przed utratą stateczności (niewystarczająca skuteczność stężeń lub brak stężeń).

Czasami nie ma potrzeby obliczania wszystkich trzech elementów, niekiedy wystarczy spełnić warunki czysto geometryczne.

Płyta żelbetowa:

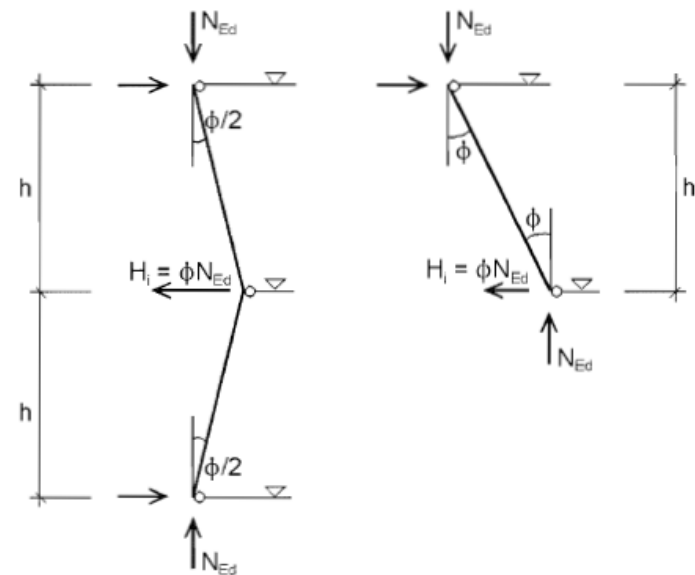
- zakłada się, że stanowi zabezpieczenie przed wszelkimi rodzajami niestateczności konstrukcji stalowej;
- nie są w tej sytuacji potrzebne dodatkowe obliczenia;
- wyznacza się jedynie siły zastępcze działające na samą płytę;
- należy sprawdzić nośność samej płyty(→ Konstrukcje żelbetowe).



Rys: nexus.globalquakemodel.org

Płyta: siły zastępcze z przechyłu słupów obciążają płytę.

Rys: EN 1993-1-1 fig 5.7





Blacha fałdowa:

Rys: i.warosu.org

- dwa odrębne algorytmy postępowania w przypadku zabezpieczania prętów (płatwie, rygielki): przez wyboczeniem i przed zwichrzeniem;
- nie wylicza się sił zastępczych;
- obliczenia skuteczności zabezpieczenia przez blachę prowadzi się wyłącznie na podstawie geometrii zabezpieczanego elementu i blachy;
- utrata stateczności przez zabezpieczany element nie wystąpi (pełna skuteczność stężenia); pewne formy utraty stateczności muszą być wzięte pod uwagę (częściowa skuteczność); wszystkie formy utraty stateczności muszą być wzięte pod uwagę (stężenie nieskuteczne).

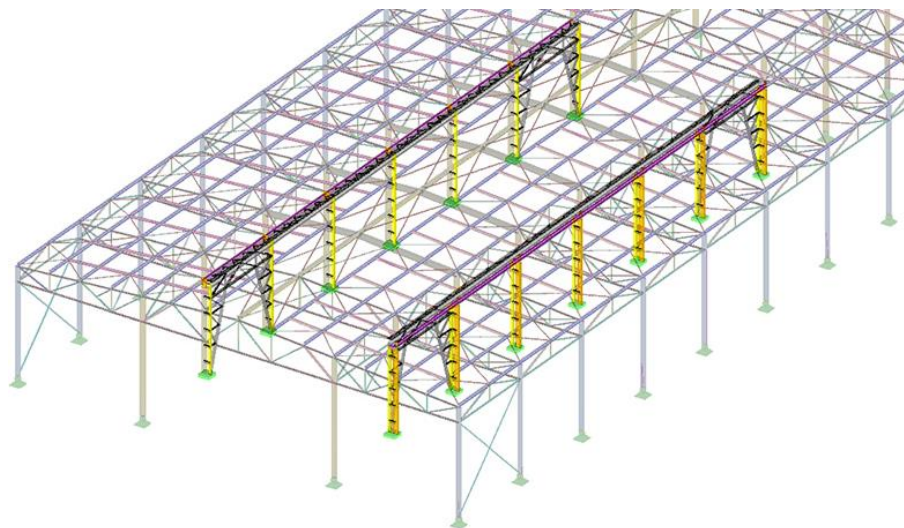
Stężenia prętowe:

- odrębne rozwiązania techniczne dla stężenia przeciw wyboczeniu i zwichrzeniu;
- odrębne algorytmy obliczeń dla stężeń w różnych miejscach konstrukcji (stężenia dachowe, stężenia ścienne);
- w większości przypadków konieczne jest policzenie sił zastępczych;
- jedynie w nielicznych przypadkach obliczanie sił zastępczych nie jest konieczne;
- współpraca stężeń z resztą konstrukcji powoduje powstanie w konstrukcji dodatkowych sił przekrojowych;



Rys: steelconstruction.info

Przyjęcie modelu numerycznego: 2D lub 3D – będzie miało znaczenie dla toku obliczeń.



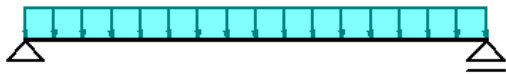
Rys: mesilo.pl

Model 3D: od razu pełna informacja o współpracy między dźwigarami, stężeniami i płatwiami. Obliczenia obejmują dwa kroki:

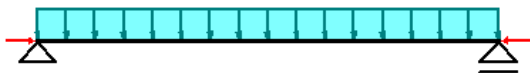
- Obliczenia wstępne: ciężar własny, obciążenia klimatyczne, obciążenie użytkowe itp.
- Dodanie sił zastępczych od imperfekcji i utraty stateczności przez dźwigar. Wyliczane są na podstawie siły ściskającej w dźwigarze z obliczeń wstępnych.

Model 2D (metoda zastępczych ram płaskich) jest bardziej skomplikowany:

Płatew: **dwukierunkowe zginanie**

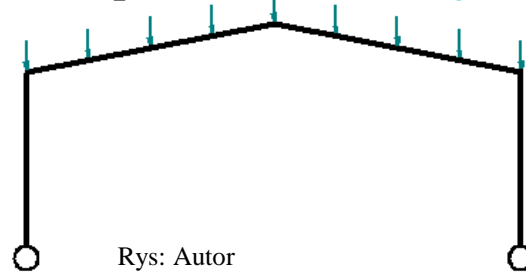


Efekt współpracy dźwigar-
stężenia-płatewie: dodatkowe
siły w dźwigarze i w
płatewiach.

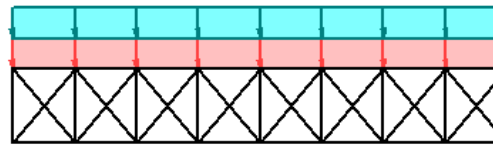


Płatew: **zginanie dwukierunkowe
ze ściskaniem** (konieczność
ponownego przeliczenia)

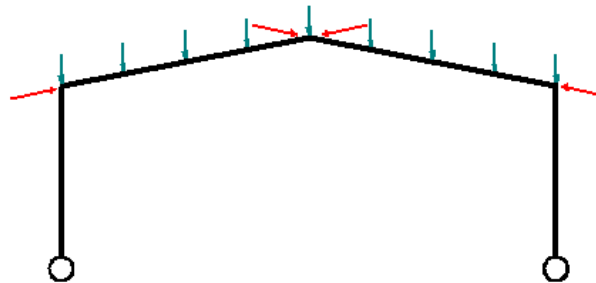
Rama płaska: **siła ściskająca w dźwigarze**



Obciążenie wiatrem
Siły zastępcze

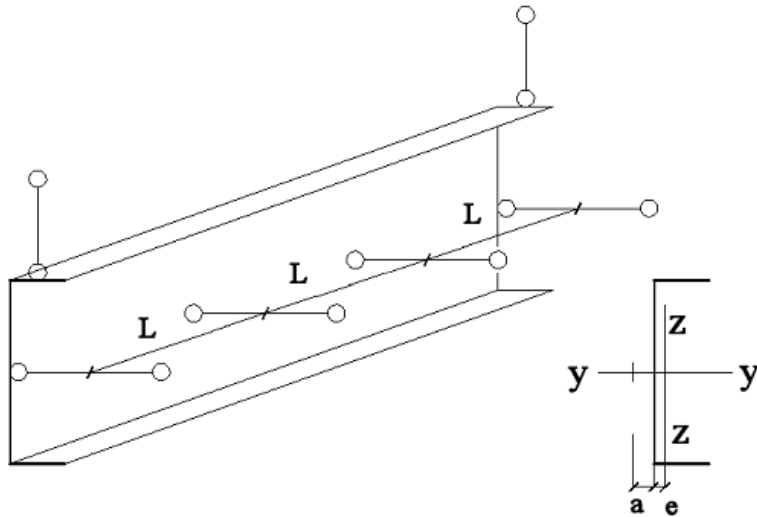


Stężenie dachowe



Rama: **dodatkowe siły ściskające /
rozciągające** w dźwigarze (konieczność
ponownego przeliczenia)

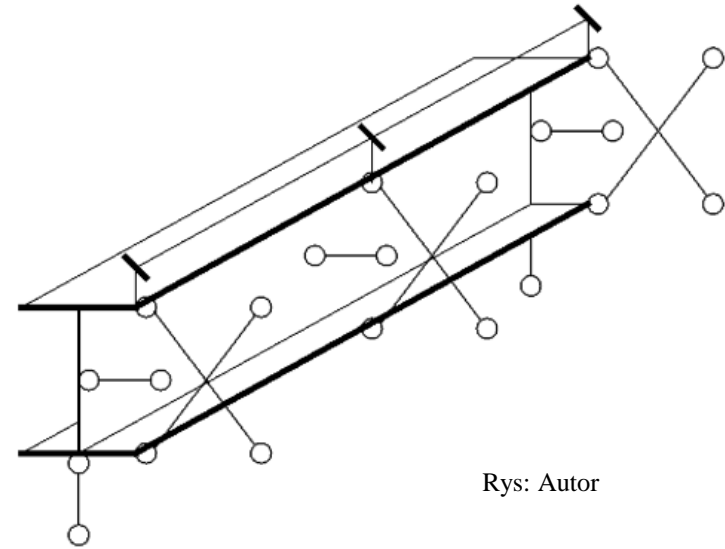
Rozwiązania techniczne



Rys: Autor

Stężenie przeciw wyboczeniu giętnemu powinno być umieszczone w osi elementu, prostopadle do słabej osi przekroju.

#t / 51



Rys: Autor

Stężenie przeciw wyboczeniu skrętnemu, skrętno-giętnemu i zwichrzeniu powinno zabezpieczyć przekrój przed rotacją.

#t / 49-51

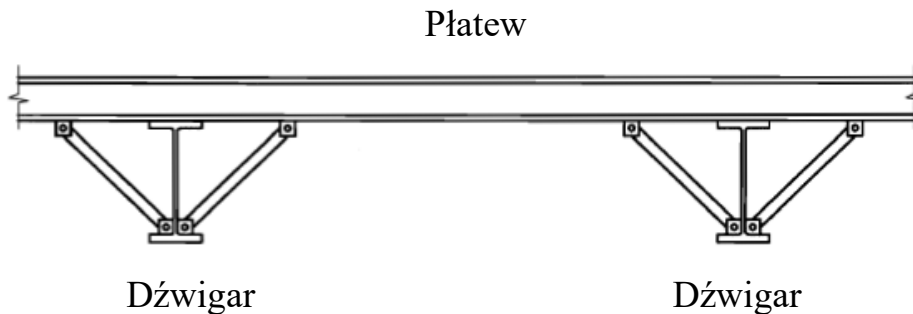
Stężenia przeciw-zwichrzeniowe



Rys: builderbill-diy-help.com

Gdy półka górna dźwigara dachowego/ podciągu jest ściskana, zabezpieczenie stanowi system stężeń, podpierających półkę górną.

Gdy ściskana jest półka dolna, wskazane jest zastosowanie zastrzałów, łączących półkę ściskaną ze stężeniami półki górnej.



Rys: EN 1993-1-1 fig 6.5

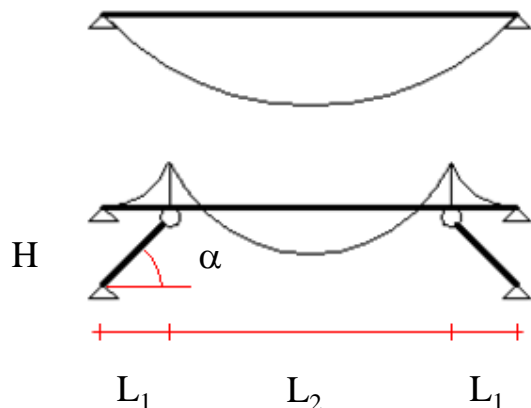


Rys: steadmans.co.uk

W tym przypadku może dojść do zmiany schematu statycznego płatwii.



Rys: builderbill-diy-help.com



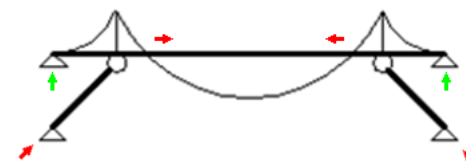
Rys: Autor

Kąt α powinien wynosić $45^\circ - 60^\circ$. H = wysokość przekroju dźwigara.

Jeśli $L_2 \geq 8 L_1$ wówczas płatwie zachowuje pierwotny schemat statyczny.

Dla bardzo wysokiego przekroju poprzecznego dźwigara dachowego jest możliwe, że odległość L_1 jest większa niż limit. W takim przypadku należy przeanalizować drugi schemat statyczny (płatwie-usztywnienie).

Rys: Autor



Duże siły ściskające mogą występować w stężeniach jako efekt reakcji. Dodatkowo, w centralnej części płatwii występuje jeszcze większe ściskanie, jako efekt współpracy płatwii-stężeń.

Siły zastępcze, przykładane do stężeń:

Uwzględniony efekt



Rys: steelbuildingstructure.com



Rys: builderbill-diy-help.com

Zabezpieczenie konstrukcji przed utratą stateczności

Dach:

$$F_{Ed, bracing} = 1,0 \alpha_m N_{Ed}^* / 100$$
 EN 1993-1-1 5.3.3.(4)

Wall:
 pomijane

$$F_{Ed, bracing} = 1,5 \alpha_m N_{Ed}^* / 100$$

EN 1993-1-1 6.3.5.2

Imperfekcje konstrukcji

Dach:

$$q_d = \Sigma [8 N_{Ed}^* (e_0 + \delta_q) / L^2]$$
 (iteracja)
 EN 1993-1-1 (5.13)

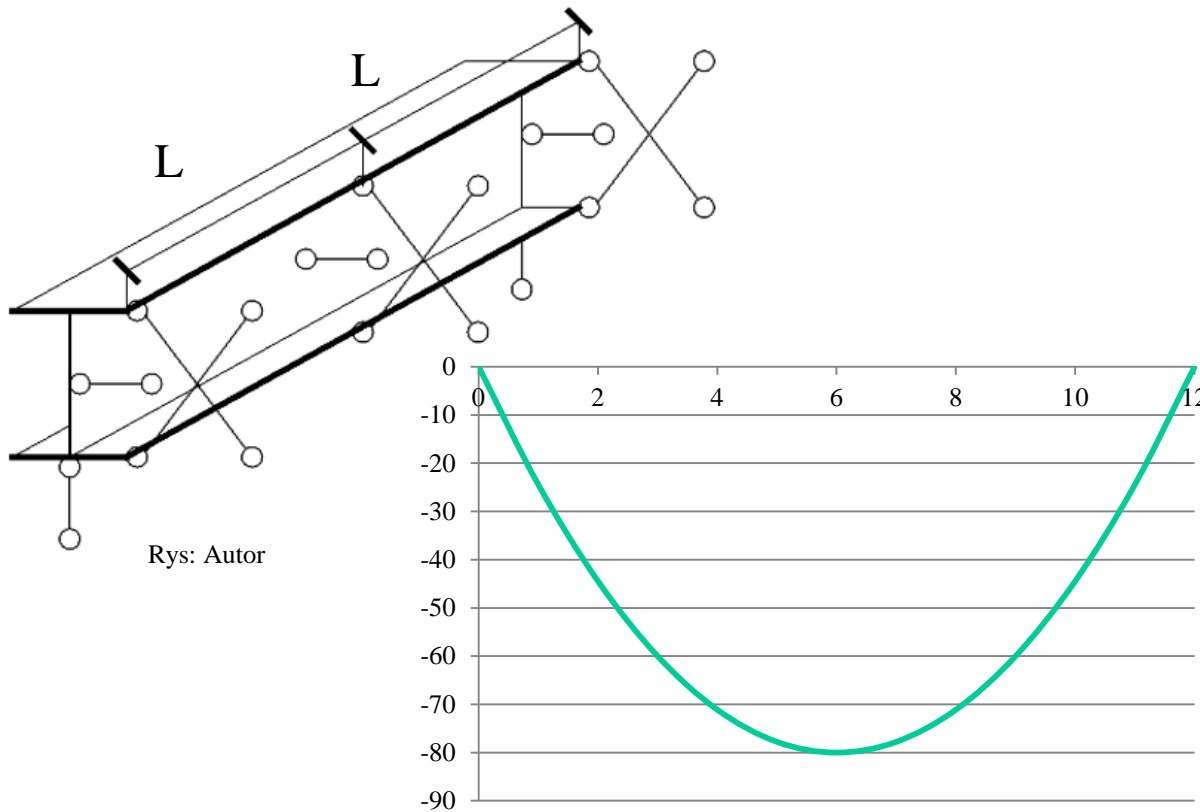
Ściana:
 #6 / 83

Pomijane

Przykład 1

Blacha fałdowa, zabezpieczenie płatwi przed wyboczeniem.

Przykład nawiązuje do wyk. #5 przykładu #2



IPE 300

S235 $\rightarrow f_y = 235$ MPa

$L = 6,00$ m

$E = 210$ GPa

$G = 81$ GPa

$J_y = 8\,356$ cm⁴

$J_z = 603,8$ cm⁴

$W_y = 557,1$ cm³

$W_{pl,y} = 628,4$ cm³

$J_w = 125\,900$ cm⁶

$J_T = 20,12$ cm⁴

$i_y = 12,46$ cm

$i_z = 3,35$ cm

$y_s = 0,0$ cm

$M_{Ed} = 80$ kNm

Przykład 1a

Blacha fałdowa T 18

Blacha fałdowa, zabezpieczenie przed wyboczeniem
płatwi

$t = 0,88 \text{ mm}$

$h = 10 \text{ mm}$

Płatew: IPE 300

$h = 300 \text{ mm}$

$b = 150 \text{ mm}$

$t_f = 10,7 \text{ mm}$

$t_w = 7,1 \text{ mm}$

$J_{z, el} = 604 \text{ cm}^4$

$J_w = 125\,900 \text{ cm}^6$

$J_t = 20,7 \text{ cm}^4$

S 235

Jedno przęsło, $l = 6,0 \text{ m}$

Rozstaw płatwi $s = 2,0 \text{ m} = 2\,000 \text{ mm}$

Szerokość dachu $b_{\text{roof}} = 14,0 \text{ m} = 14\,000 \text{ mm}$

		Podstawowe wymiary blach	Grubość mm	Masa kg/m ²
Typ	T 18		0,55	5,7
			0,75	7,9
			0,88	9,2
Typ	T 55		0,75	9,1
			0,88	10,7
			1,00	12,1
			1,25	15,1

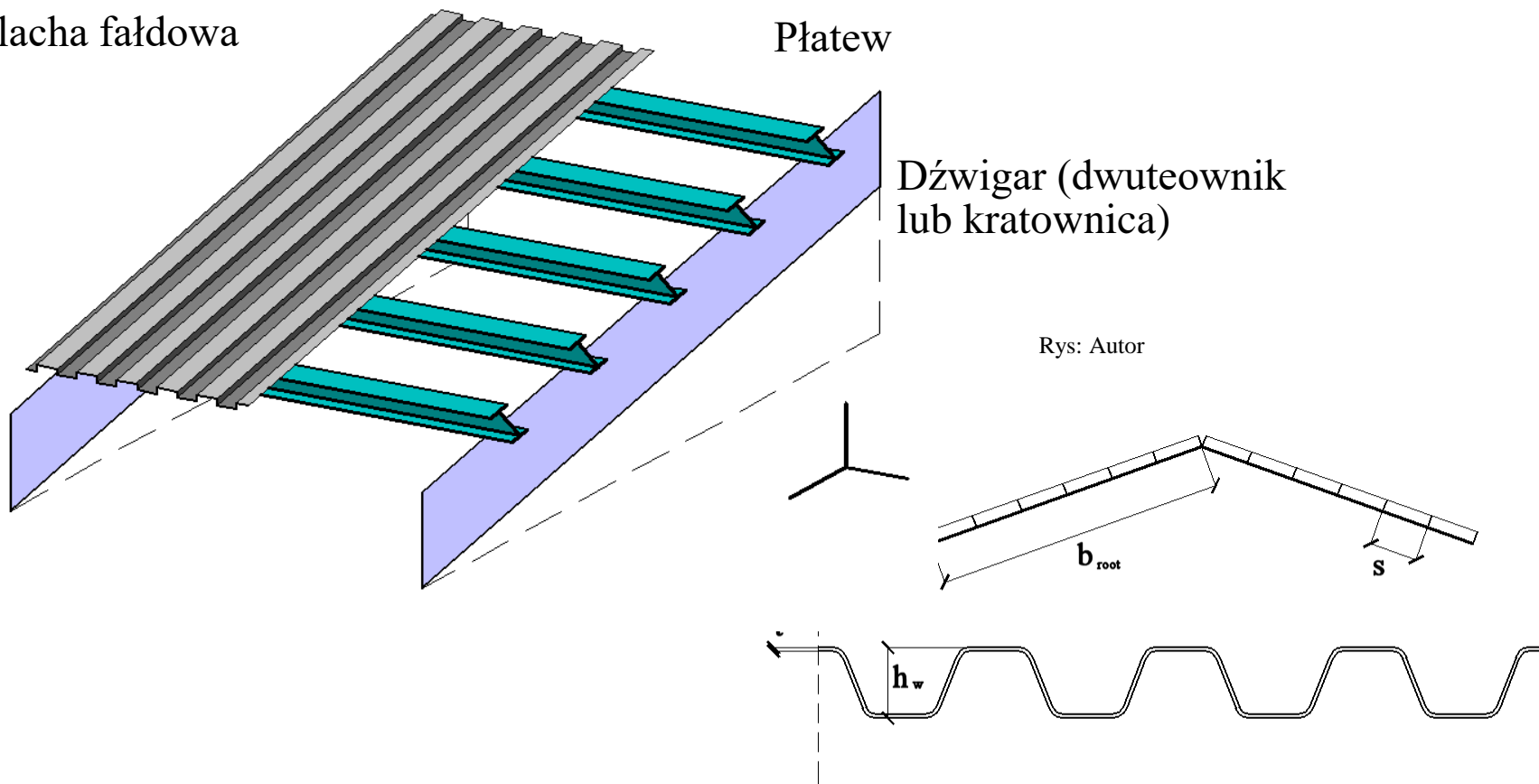
Rys: W. Bogucki, M. Żybertowicz, „Tablice do projektowania konstrukcji metalowych”, Arkady 1996

Blacha fałdowa

Płatew

Dźwigar (dwuteownik
lub kratownica)

Rys: Autor



$$S_{cs} \geq 70 (E J_w \pi^2 / l^2 + G J_t + 0,25 E J_z h \pi^2 / l^2) / h^2$$

$$[N] S_{cs} = 1000 \sqrt{(t^3) [50 + 10 \sqrt[3]{(b_{root})}] s / h_w} \text{ [mm]}$$

EN 1993-1-3 (10.1a, 10.1b)

$$S_{cs} \geq 70 (E J_w \pi^2 / l^2 + G J_t + 0,25 E J_z h \pi^2 / l^2) / h^2$$

$$[N] S_{cs} = 1000 \sqrt{(t^3) [50 + 10 \sqrt[3]{(b_{root})}] s / h_w [mm]}$$

$$70 (E J_w \pi^2 / l^2 + G J_t + 0,25 E J_z h_I \pi^2 / l^2) / h_I^2 = 3 451 \text{ kN}$$

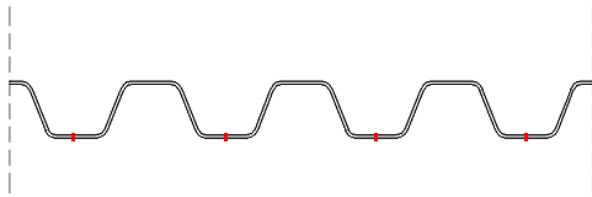
$$\begin{aligned} [N] S_{cs} &= 1000 \sqrt{(t^3) [50 + 10 \sqrt[3]{(b_{root})}] s / h_w [mm]} = \\ &= 1000 \sqrt{(0,88^3) [50 + 10 \sqrt[3]{(14 000)}] 2 000 / 10} = \\ &= 1000 \cdot 0,826 (50 + 10 \cdot 24,101) 200 = \\ &= 48 074 852 [N] = 48 074,852 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$48 074,852 \text{ kN} > 3 451 \text{ kN}$$

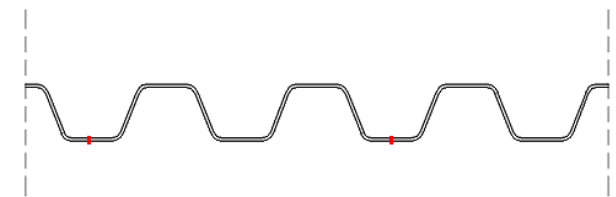
OK., płatew jest zabezpieczona przed wyboczeniem

Przykład 1b

Blacha fałdowa, zabezpieczenie przed wyboczeniem płaty



Rys: Autor



Te obliczenia są poprawne pod warunkiem połączenia płaty z blachą w każdej fałdzie.

Jeśli łączymy co druga fałdę, do obliczeń bierzemy tylko $0,20 S_{cs}$

$$70 (E J_w \pi^2 / l^2 + G J_t + 0,25 E J_z h_I \pi^2 / l^2) / h_I^2 = 3\,451 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} [\text{N}] \, 0,20 S_{cs} &= 0,20 \cdot 1000 \sqrt{(t^3) [50 + 10 \sqrt[3]{(b_{\text{root}})}]} \text{ s} / h_w [\text{mm}] = \\ &= 0,20 \cdot 48\,074,852 \text{ kN} = 9\,614,970 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$9\,614,970 \text{ kN} > 3\,451 \text{ kN}$$

OK., płatew jest nadal zabezpieczona, nawet w przypadku połączenia z pokryciem tylko w co drugiej fałdzie.

Przykład 1c

Blacha fałdowa, zabezpieczenie przed
zwichrzeniem płatwi

Blacha fałdowa T 18

$t = 0,88 \text{ mm}$

$h = 100 \text{ mm}$

Płatew: IPE 300

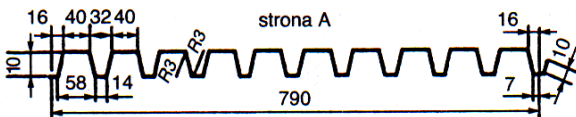
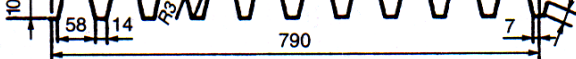
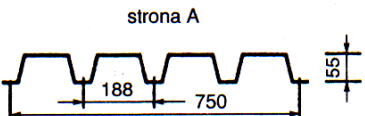
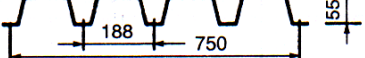
$W_{y, pl} = 628,4 \text{ cm}^3$

$J_{z, el} = 604 \text{ cm}^4$

S 235

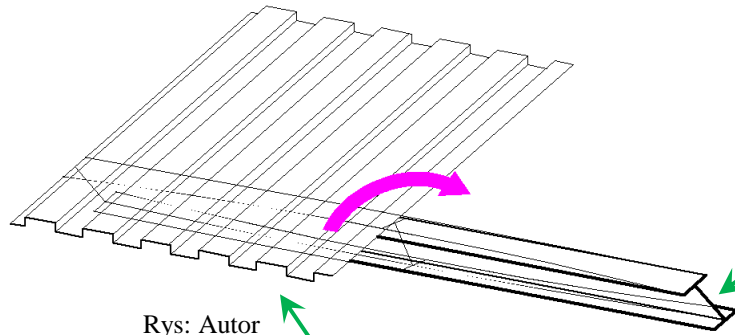
Jedno przęsło, $l = 6,0 \text{ m}$

Rozstaw płatwi $s = 2,0 \text{ m} = 20$

Podstawowe wymiary blach		Grubość mm	Masa kg/m ²	
Typ	T 18	 strona A	0,55	5,7
		 strona B	0,75	7,9
			0,88	9,2
Typ	T 55	 strona A	0,75	9,1
		 strona B	0,88	10,7
			1,00	12,1
			1,25	15,1

Rys: W. Bogucki, M. Żybartowicz, „Tablice do projektowania
konstrukcji metalowych”, Arkady 1996

Sztywność giętna, wpływ na ochronę przed zwichrzeniem



Rys: Autor

EN 1993-1-1 (BB.3):

$$S_{\text{member}} = M_{\text{pl}}^2 K_D K_U / E J_z$$

$K_U = 0,35$ (analiza sprężysta)

$K_U = 1,00$ (analiza plastyczna)

$K_D \rightarrow \#t / 59$

EN 1993-1-1 (BB.3):

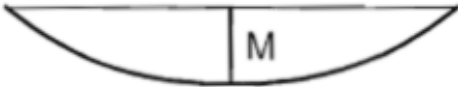

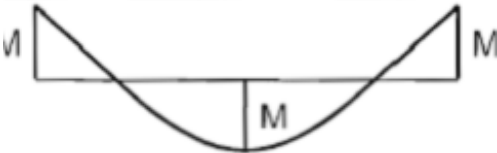


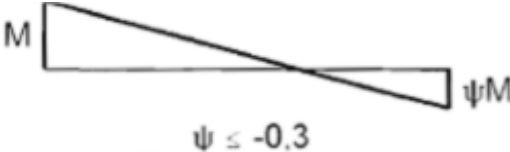
$$C_{\theta, k} \geq S_{\text{member}}$$

EN 1993-1-1 (BB.4), EN 1993-1-3 (10.11):

$$1 / C_{\theta, k} = 1 / C_{\theta R, k} + 1 / C_{\theta C, k} + 1 / C_{\theta D, k}$$

$C_{\theta R, k}$ – sztywność giętna poszycia; $C_{\theta C, k}$ – sztywność łączników (śrub); $C_{\theta D, k}$ – sztywność dystorsyjna elementu

EN 1991-1-1 tab BB.1

Przypadek	Moment zginający	K_D	
		Pas zamocowany przesuwnie	Pas zamocowany nieprzesuwnie
1		4,0	0,0
2a		3,5	0,12
2b			0,23
3		2,8	0,0
4		1,6	1,0
5		1,0	0,7

Zalecenia Eurokodu w kwestii sprawdzenia sztywności skrętnej zawierają liczne niekonsekwencje:

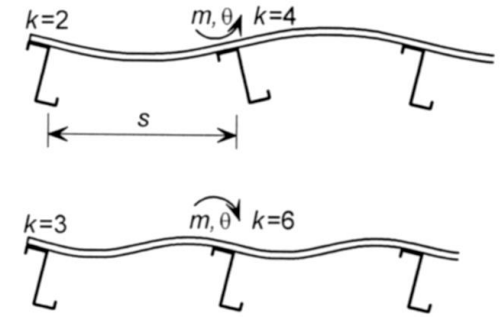
- w EN 1993-1-1 sztywność elementu liczona jest jak dla przekroju klasy I lub II (nośność plastyczna);
- EN 1993-1-3 domyślnie przyjmuje taką samą sztywność, choć Eurokod dotyczy płatwii zimnogiętych;
- EN 1993-1-1 skupia się na kwestii zabezpieczenia przekroju płatwii przez skręceniem (sztywność ma jednostkę [N / rad]);
- EN 1993-1-3 skupia się na podparciu pasów płatwii (sztywność ma jednostkę [N / m²]);
- Nie jest do końca jasne, czy w metodologii tych wzorów pełne zabezpieczenie przeciw zwichrzeniu wymaga jednoczesnego zabezpieczenia przeciw wygięciu i skręceniu, czy też wystarczy samo zabezpieczenie przed wygięciem;
- Założenie, że brak zabezpieczenia przed skręceniem nie zabezpiecza przed zwichrzeniem jest założeniem po stronie bezpiecznej.

EN 1993-1-3 (10.14):

$$1 / C_D = 1 / C_{D,A} + 1 / C_{D,C}$$

EN 1993-1-3 (10.16):

$$C_{D,C} = k E J_{\text{eff}} / s$$



Rys: EN 1993-1-3 fig. 10.7

EN 1993-1-3 10.1.5.2.(4):

$C_{D,A} = 130 p$ [Nm / m / rad]; p - liczba łączników blacha-płatew na metr długości płatwii

Symbole:

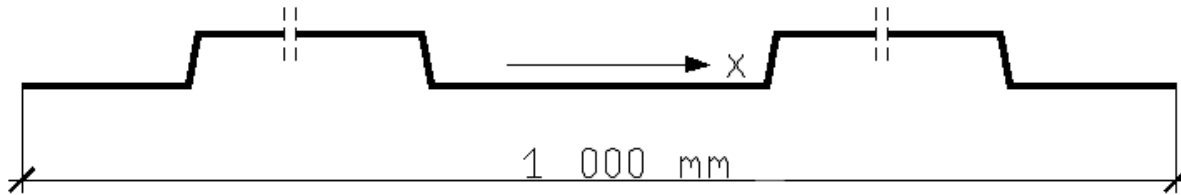
$C_{\theta, k}$ in EN 1993-1-1 (BB.3) = C_D in EN 1993-1-3 (10.14)

Rys: Autor

$$J_{x, \text{roofing}} = 3,7 \text{ cm}^4$$

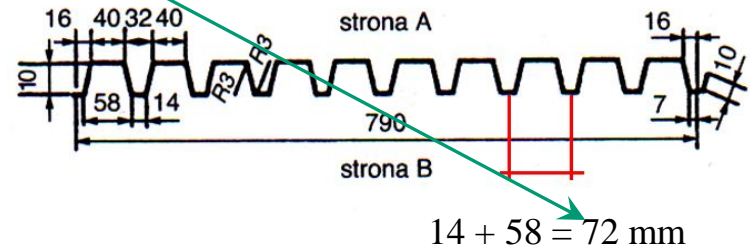
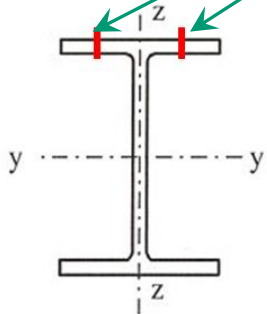
$$J_{\text{eff}} = J_{x, \text{roofing}} / 1 \text{ m} = 0,037 \text{ cm}^3$$

$$C_{D,C} = k E J_{\text{eff}} / s = 23\,310 \text{ [N]} \quad (k = \max = 6)$$



$$C_{D,A} = 130 p \text{ [Nm / m]}; \quad p: 2 \cdot 1000 / 72 = 28 \text{ śrub / 1 m płatwii}$$

$$C_{D,A} = 3\,640 \text{ [N]}$$



$$1 / C_D = 1 / C_{D,A} + 1 / C_{D,C}$$

$$C_D = 3\,148 \text{ [N]}$$

Rys: Autor

Rys: W. Bogucki, M. Żybartowicz, „Tablice do projektowania konstrukcji metalowych”, Arkady 1996

Płatew:

$$M_{pl} = f_y W_{y, pl} = 147,674 \text{ kNm}$$

$$K_U = 0,35 \text{ (analiza sprężysta)}$$

$$K_D = 3,5 \text{ (płatew jednoprzęsłowa)}$$

$$M_{pl}^2 K_D K_U / E J_z = 21\,072 \text{ [N]}$$

$$C_D = 3\,148 < M_{pl}^2 K_D K_U / E J_z = 21\,072$$

Płatew niestężona.

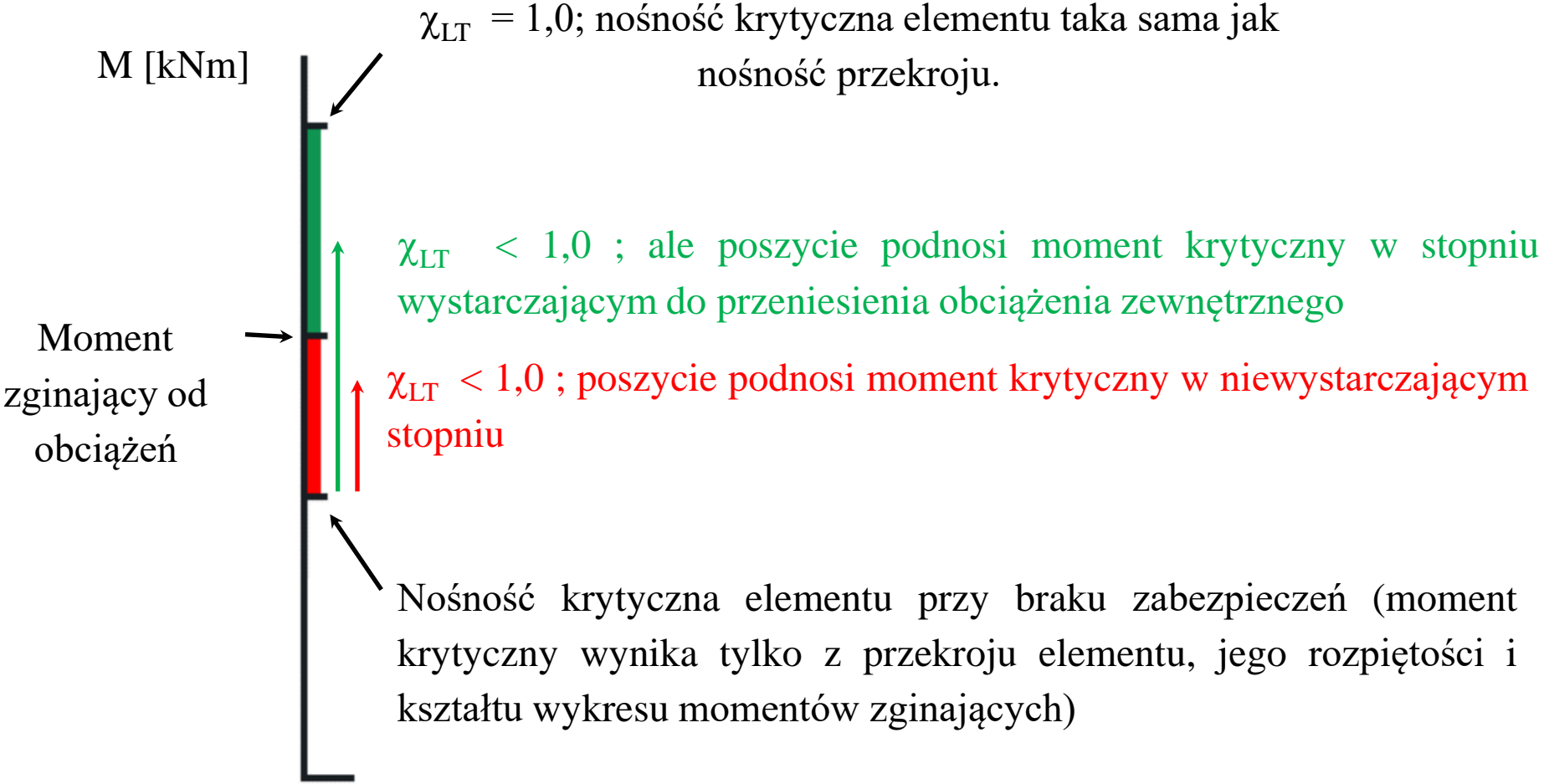
Zgodnie z przyjętą oceną, zabezpieczenie przed wygięciem i brak zabezpieczenia przed skręcaniem nie zabezpieczają przed zwichrzeniem.

Przykład 1d

W oparciu o literaturę przedstawić można cztery przypadki:

Blacha fałdowa zabezpiecza przed:		Konkluzja
Wygięciem	Skreśnieniem	
Tak ($\chi_y = 1,0$)	Tak ($\chi_{LT} = 1,0$)	Belka całkowicie zabezpieczona
Nie ($\chi_y < 1,0$)	Tak ($\chi_{LT} = 1,0$)	Mało prawdopodobne; zapewne błąd w obliczeniach
Tak ($\chi_y = 1,0$)	Nie ($\chi_{LT} < 1,0$)	Zabezpieczenie częściowe; należy policzyć zwichrzenie dla wymuszonej osi obrotu
Nie ($\chi_y < 1,0$)	Nie ($\chi_{LT} < 1,0$)	Belka niezabezpieczona, interakcja wyboczenia i zwichrzenia (\rightarrow Wyk. #13)

Moment krytyczny definiuje wartość współczynnika zwiczenia $\chi_{LT} \leq 1,0$. Spełnienie warunków na sztywność tarczową i płytową daje z definicji $\chi_{LT} = 1,0$.

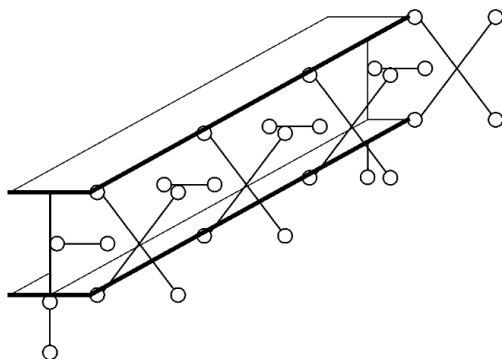


Rys: Autor

Rozróżnienie między „**czervenym brakiem zabezpieczenia**” oraz „**zielonym brakiem zabezpieczenia**” zostanie przedstawione na przykładzie obliczeniowym z Wyk #5, przykład #2. Ogólny wniosek był taki, że podpory na obu końcach belki i jedno stężenie w połowie długości nie zabezpieczają przed wyboczeniem; potrzebne były dwa stężenia co trzecią część belki.

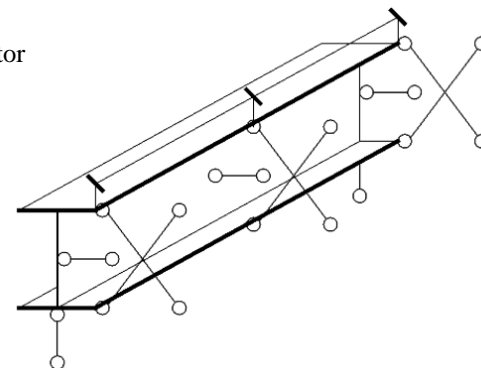
$$M_{Ed} / \chi_{LT, mod} W_{pl, y} f_y = 1,217 \quad \text{źle}$$

$$M_{Ed} / \chi_{LT, mod} W_{pl, y} f_y = 0,845 \quad \text{OK.}$$



Rys: Autor

Rys: Autor



A co z wpływem blachy?

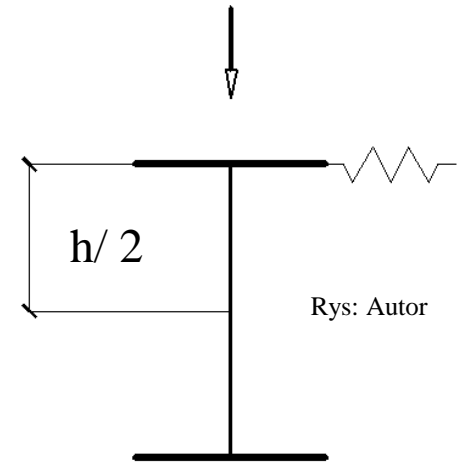
Jednakże istnienie blachy fałdowej zmienia zachowanie belki. Zwichrzenie należy analizować w oparciu o zupełnie inne wzory: zwichrzenie z wymuszoną osią obrotu:

$$M_{cr} = (i_s^2 N_{cr,T} + c_y^2 N_{cr,z}) / [C_1 (c_y - b_y) + C_2 (c_y - a_s)]$$

$$N_{cr,z} = 675,654 \text{ kN}$$

$$i_s = 12,90 \text{ cm}$$

$$N_{cr,T} = 1\,813,849 \text{ kN}$$



Geometria

y_s – położenie środka ścinania względem środka ciężkości, dla dwuteownika = 0

a_0 – odległość środka ścinania od miejsca przyłożenia obciążenia,

w analizowanym przypadku = $h/2 = 150 \text{ mm}$

r_x ramię asymetrii, dla przekroju bisymetrycznego = 0

Parametr zginania: $b_y = y_s - r_x / 2 = 0 - 0 / 2 = 0$

c_y – odległość środka ciężkości od stężenia,

w analizowanym przypadku = $h/2 = 150 \text{ mm}$

$$C_1 \quad C_2 \text{ (#5 / 68)}$$

Współczynniki dla belki ze stężeniami:

$$C_1 = 0,93$$

$$C_2 = 0,81$$

Rys: PN B 3200

(przybliżenie: jak dla obciążenia ciągłego)

Wyniki dla takiej sytuacji:

$$M_{cr} = 230,587 \text{ kNm}$$

$$W_{y, pl} f_y = 147,674 \text{ kNm}$$

$$\lambda_{LT} = 0,800$$

$$\Phi_{LT} = 1,429 \text{ (wzór ogólny, \#5 / 85)}$$

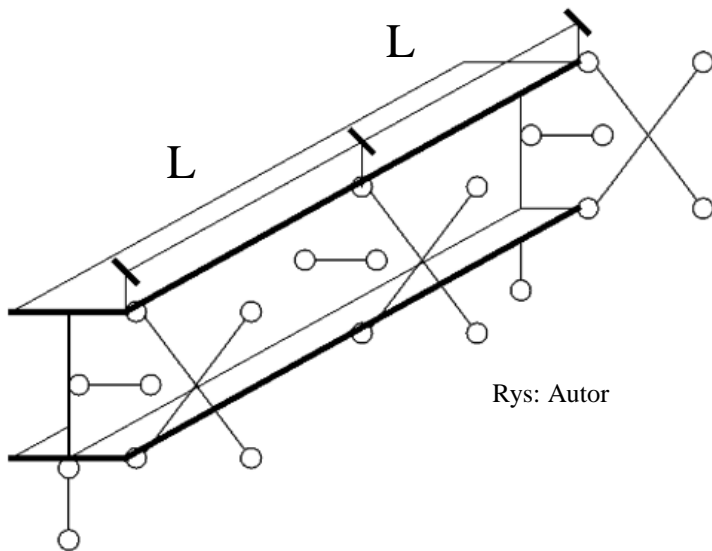
$$\chi_{LT} = 0,883$$

$$\chi_{LT, mod} = 0,852 \text{ (\#5 / 90)}$$

$$\chi_{LT, mod} W_{pl, y} f_y = 125,818 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} / \chi_{LT, mod} W_{pl, y} f_y = 0,636 \text{ OK}$$

Obciążenie belki (w płaszczyźnie symetrii przekroju YZ)	Warunki podparcia ¹⁾				Współczynniki				
	w płaszczyźnie		μ_y	μ_{ω}	A_1	A_2	B	C_1	C_2
	YZ	XZ							
Obciążenie równomiernie rozłożone	P	P	1	1	0,61	0,53	1,14	0,93	0,81
	P	P	1	0,5	1,23	0,52	1,31	-	-
	P	U	0,5	0,5	0,68	0,29	0,97	1,43	0,61
	U	U	0,5	0,5	0,27	1,61	1,88	0,15	0,91

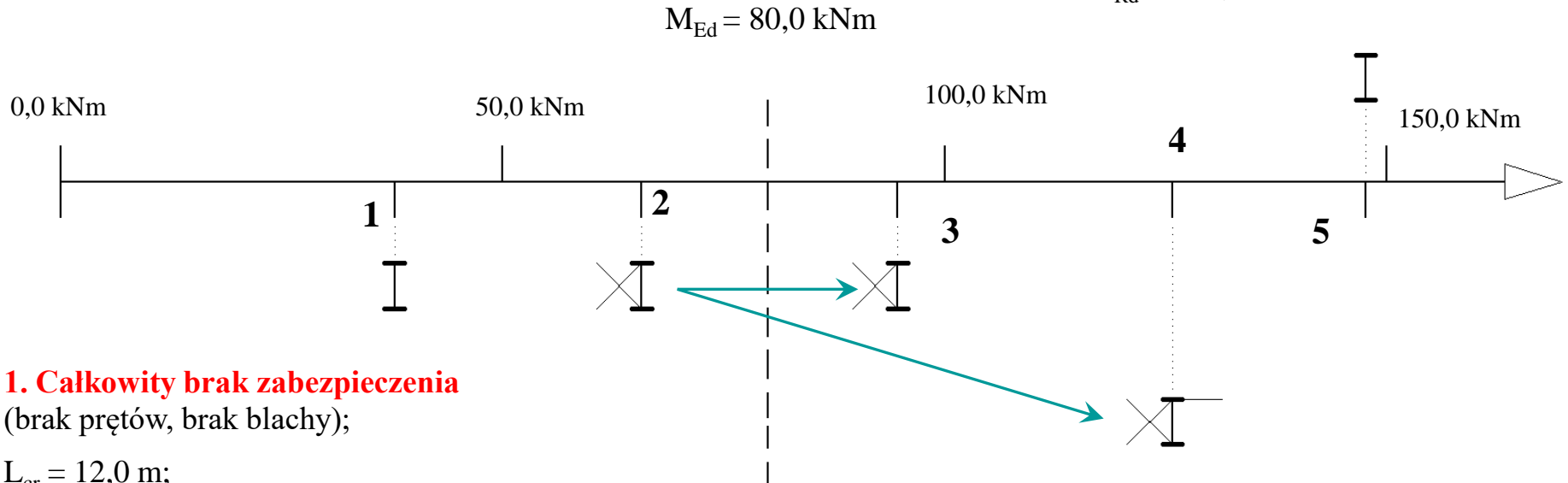


Rys: Autor

Wnioski: występuje łączny wpływ różnych typów usztywnień na nośność. Nawet częściowa ochrona z blachy fałdowej może być wystarczająca w przypadku zwichrzenia.

5. Całkowite zabezpieczenie, $\chi_{LT, mod} = 1,0$ (płyta betonowa lub bardzo mała odległość między prętami usztywniającymi lub masywna blacha fałdowa);

$$M_{Rd} = 147,674 \text{ kNm}$$



$$M_{Ed} = 80,0 \text{ kNm}$$

1. Całkowity brak zabezpieczenia
(brak prętów, brak blachy);

$$L_{cr} = 12,0 \text{ m};$$

$$\chi_{LT, mod} M_{Rd} = 37,786 \text{ kNm}$$

2. Częściowe zabezpieczenie,
#5 przyk #2, stężenie prętowe
2x6,00 m;

$$\chi_{LT, mod} M_{Rd} = 65,734 \text{ kNm}$$

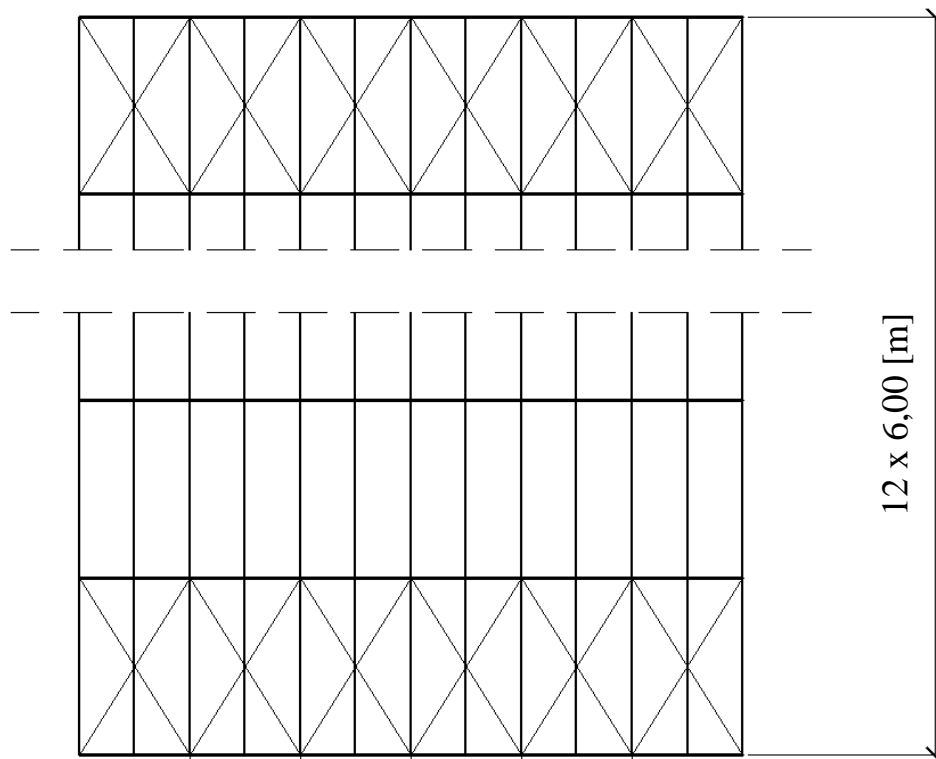
3. Częściowe zabezpieczenie,
#5 przyk #2, stężenie prętowe
3x4,00 m;

$$\chi_{LT, mod} M_{Rd} = 94,711 \text{ kNm}$$

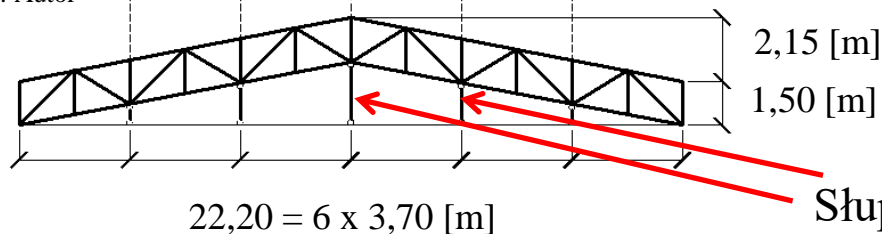
4. Częściowe zabezpieczenie, #t przyk 1d,
blacha fałdowa wymuszająca oś obrotu+
stężenia prętowe 2x6,00m;

$$\chi_{LT, mod} M_{Rd} = 125,818 \text{ kNm}$$

Przykład 2



Rys: Autor



$$22,20 = 6 \times 3,70 \text{ [m]}$$

Słupki ścian szczytowych (przy pierwszej i ostatniej kratownicy)

Przykład 2a

Pas	Max rozciąganie [kN]	Max ściskanie [kN]	Przekrój
Górny	-55,112	302,157	CHS 108x10
Dolny	-304,853	52,789	

Płatew IPE 270

S 235 $\rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}$

Wiatr:

- ściana nawietrzna 0,8 kPa
- połać dachu 0,7 kPa
- ściany boczne 0,6 kPa
- ściana zawietrzna 0,5 kPa

Przykład dla modelu 2D.

$$S 235 \rightarrow f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{(235 / f_y)} = 1,0$$

S 235 + CHS gorąco walcowana \rightarrow
krzywa wyboczeniowa a $\rightarrow \alpha = 0,21$

(EN 1993-1-1 tab. 6.1, 6.2)

Gorąco walcowane CHS 108x10 (108 mm średnica, 10 mm grubość ścianki):

$$A = 30,8 \text{ cm}^2$$

$$J_y = J_z = 373,0 \text{ cm}^4$$

$$i_y = i_z = 3,48 \text{ cm}$$

Ciśnienie wiatru i ssanie wiatru obu ścian szczytowych są przenoszone przez stężenia dachowe. Stężenia dachowe zapobiegają wyboczeniu pasów kratownic \rightarrow siły zastępcze od wyboczenia pasów działają na stężenia. Pasy kratownic nie są idealnie proste (imperfekcje) \rightarrow siły zastępcze od imperfekcji działają na stężenia dachowe.

Obciążenie wiatrem to suma:

- parcie na ścianie szczytowej (nawietrznej / zawietrznej) = ciśnienie · obciążona powierzchnia ściany szczytowej;
- tarcie na połaci dachu = ciśnienie · obciążona powierzchnia połaci · współczynnik tarcia
- tarcie na ścianie bocznej = ciśnienie · obciążona powierzchnia ściany bocznej · współczynnik tarcia

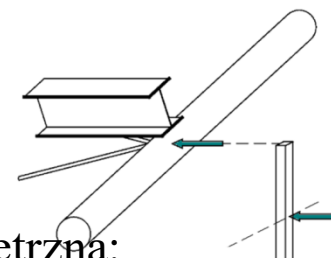
Ściany boczne:

- „część martwa”, przepływ turbulentny, brak tarcia;
- „część z tarciem”;
- część dolna, obciążenie przekazane bezpośrednio na ściany boczne;

połacie:

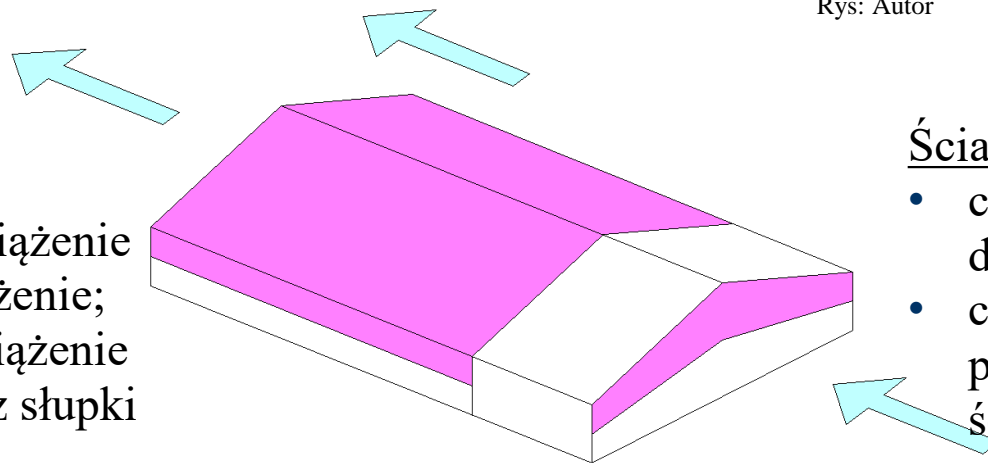
- „część martwa”, przepływ turbulentny, brak tarcia;
- „część z tarciem”;

Rys: Autor



Ściana nawietrzna:

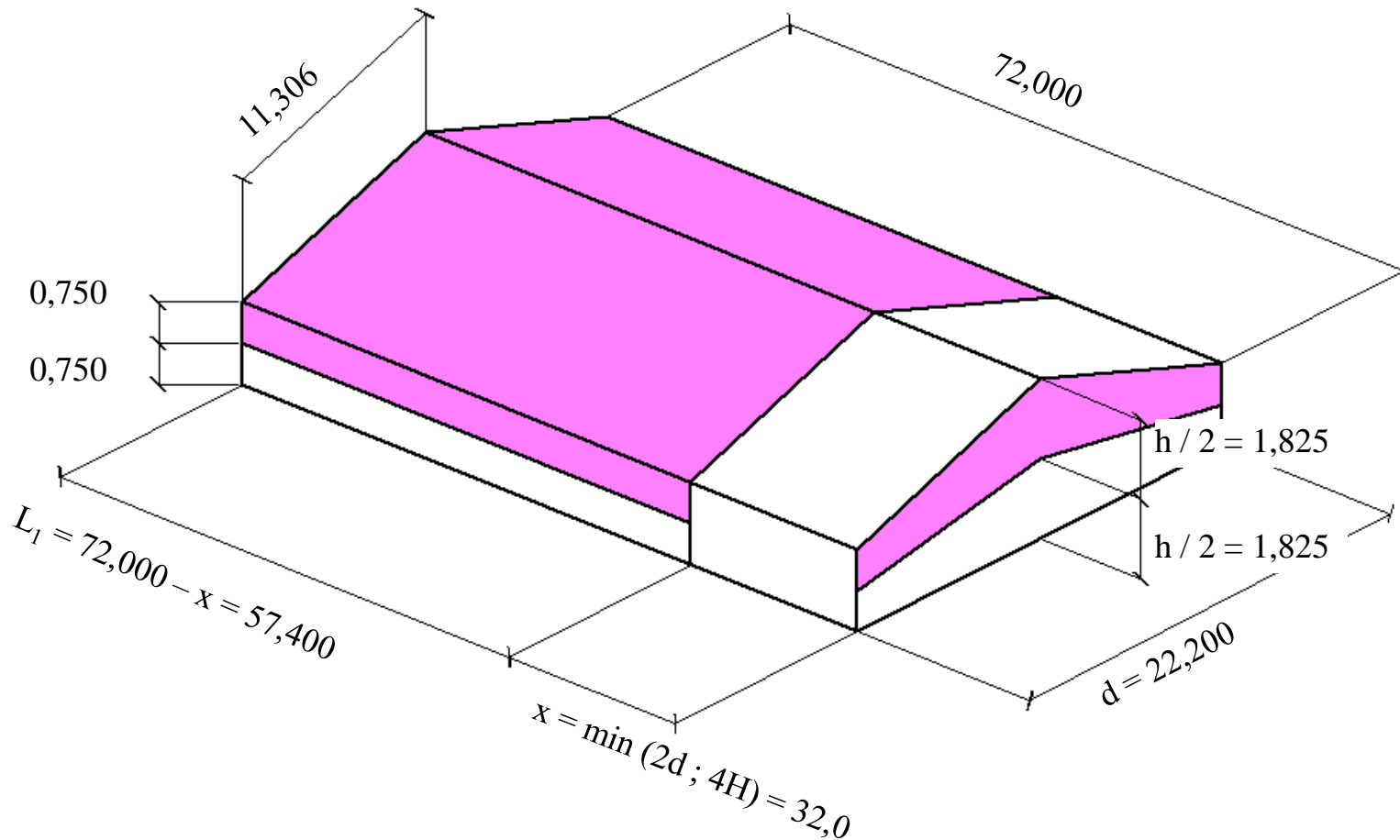
- część górna, obciążenie działające na stężenie;
- część dolna, obciążenie przekazane przez słupki na ścianę;



Rys: Autor

Ścian zawietrzna:

- część górna, obciążenie działające na stężenie;
- część dolna, obciążenie przekazane przez słupki na ścianę;



Zakres części turbulენტnej (długość x) według EN 1991-1-4 7.5

Współczynnik tarcia:
EN 1991-1-4 tab 7.10

Powierzchnia	c_{fr}
Gładka (tj. stal, beton gładki)	0,01
Chropowata (tj. beton surowy, gonty bitumiczne)	0,02
Bardzo chropowata (tj. fale, żebra, fałdy)	0,04

Ściana szczytowa nawietrzna **powierzchnia czynna**: około 0,5 całości = 28,583 m²

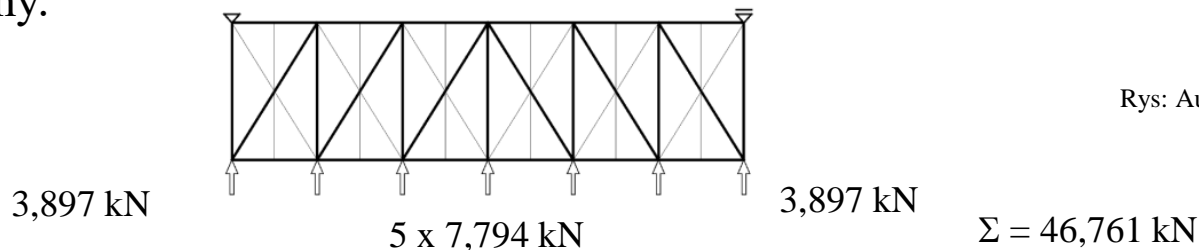
Połąć **powierzchnia czynna**: 1 297,929 m²

Ściany boczne **powierzchnia czynna**: 86,100 m²

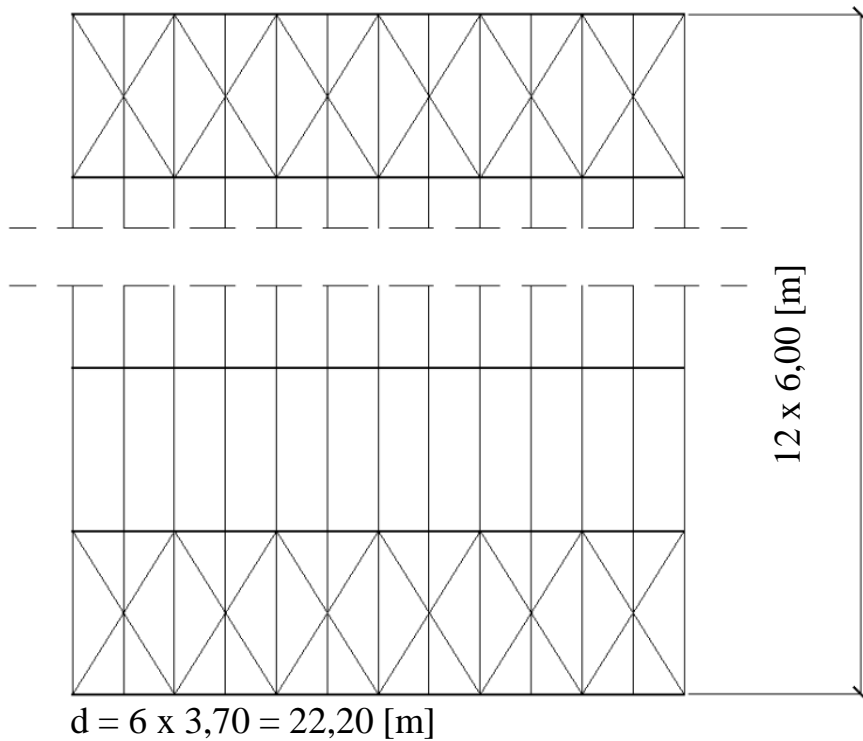
Ściana szczytowa zawietrzna **powierzchnia czynna**: około 0,5 całości = 28,583 m²

$$\begin{aligned} \text{Całość} &= A_{\text{wiward}} \cdot q_{w, \text{wiward}} + A_{\text{slope}} \cdot q_{w, \text{slope}} \cdot c_{fr} + A_{\text{side}} \cdot q_{w, \text{side}} + A_{\text{leeward}} \cdot q_{w, \text{leeward}} = \\ &= 28,583 \cdot 0,8 + 1\,297,929 \cdot 0,7 \cdot 0,01 + 86,100 \cdot 0,6 \cdot 0,01 + 28,583 \cdot 0,5 = 46,761 \text{ kN} \end{aligned}$$

Siła całkowita jest dzielona pomiędzy węzły kratownicy poziomej; uproszczenie: podział równomierny.



12 pól między kratownicami, 13 kratownic. 2 pola stężone → $m = 13 / 2 = 6,5$ kratownicy na jedno pole stężone.



Rys: Autor

Współczynnik redukcyjny dla sił zastępczych (EN 1993-1-1 (5.12)):

$$\alpha_m = \sqrt{[0,5 (1 + 1 / m)]}$$

$$m = 6,5$$

$$\alpha_m = 0,760$$

Max ściskanie w pasie górnym: $N_{Ed, c} = 302,157 \text{ kN}$

Siła zastępcza od wyboczenia pasa kratownicy (EN 1993-1-1 5.3.3.(4)):

$$F_{buck} = \alpha_m N_{Ed, c} / 100 = 2,296 \text{ kN}$$

Wstępna imperfekcja wygięciowa pasa kratownicy (EN 1993-1-1 (5.12)):

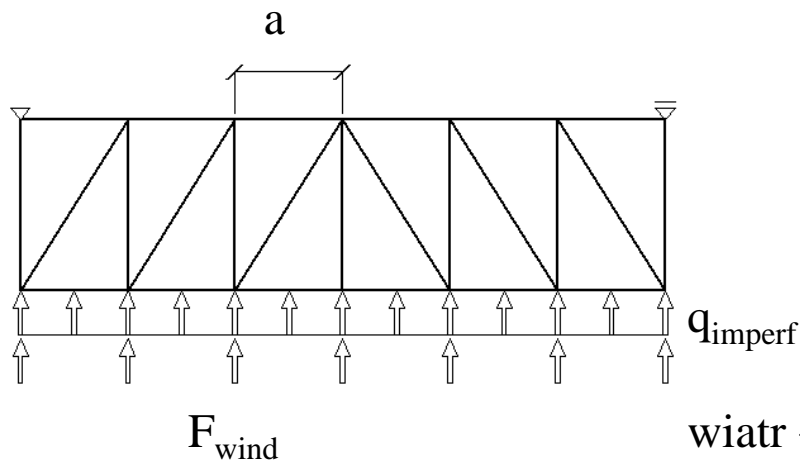
$$e_0 = \alpha_m d / 500 = 33,744 \text{ mm.}$$

Przeliczenie na siłę zastępczą przez algorytm iteracyjny.

Pod uwagę brane są dwa alternatywne schematy działania:

- wiatr i siły zastępcze wynikające z wyboczenia;
- wiatr i siły zastępcze wynikające z imperfekcji.

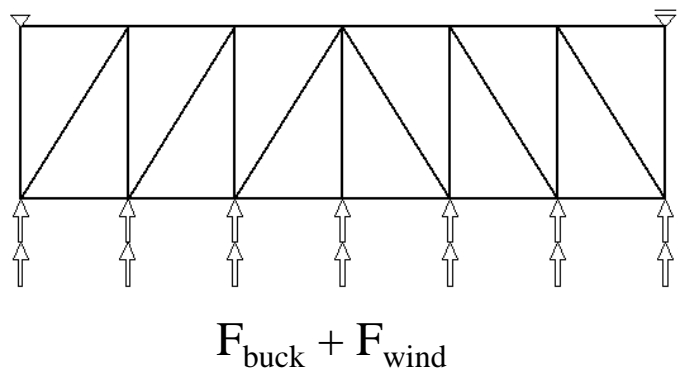
Dla ostatecznej analizy ważniejsza będzie **większa** wartość obu powyższych.



wiatr + imperfekcje

q_{imperf} jest przyłożone do stężenia jako siła skupiona:

$$F_{imperf} = a \cdot q_{imperf}$$



wiatr + wyboczenie

Rys: Autor

Obliczanie obciążeń równoważnych z imperfekcji q_{imperf} dla stężeń jest skomplikowane. Zgodnie z EN 1993-1-1 (5.13), całkowite obciążenie (wiatr + zastępcze od imperfekcji) wynosi:

$$q_{\text{imperf}} = q_d = \Sigma [8 N_{\text{Ed}, c} (e_0 + d_q) / L^2]$$

d_q – deformacja od obciążenia q_d

Obciążenie całkowite q_d zależy od d_q , ale d_q jest efektem q_d . Można to rozwiązać, stosując procedurę iteracyjną:

$$d_q^{(0)} = d(q_q) = d_q = \text{ugięcie tylko od wiatru} = d_w$$

$$q_d^{(0)} = q_d^{(0)}(e_0 + d_q)$$

$$d_q^{(1)} = d_q^{(1)}(q_d^{(0)})$$

$$q_d^{(1)} = q_d^{(1)}(e_0 + d_q^{(1)} + d_w)$$

$$d_q^{(2)} = d_q^{(2)}(q_d^{(1)})$$

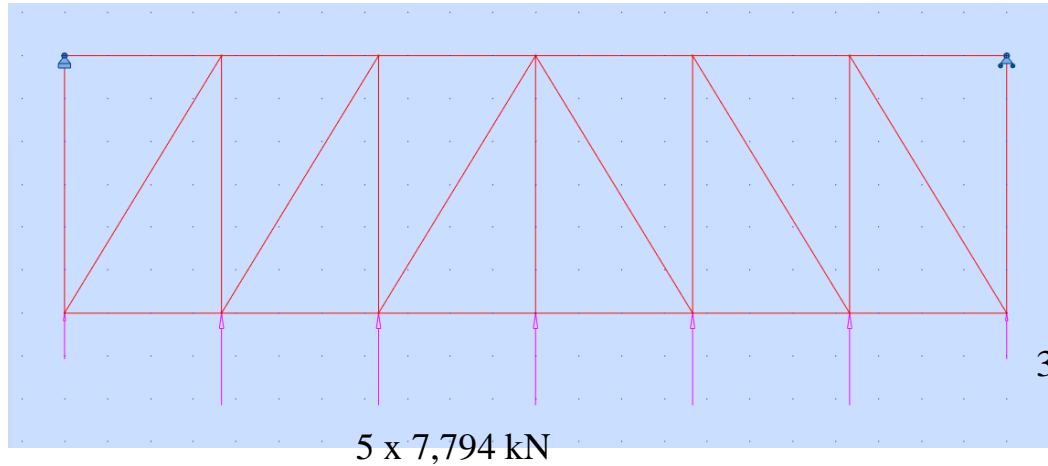
$$q_d^{(2)} = q_d^{(2)}(e_0 + d_q^{(2)} + d_w)$$

...

q_d jest przyłożone do stężenia jako siła skupiona :

$$F_d = a \cdot q_d$$

Iteracja: obliczenia statyczne stężeń muszą być wykonane kilka razy w ramach procedury iteracyjnej.



Krok 0: deformacje od wiatru

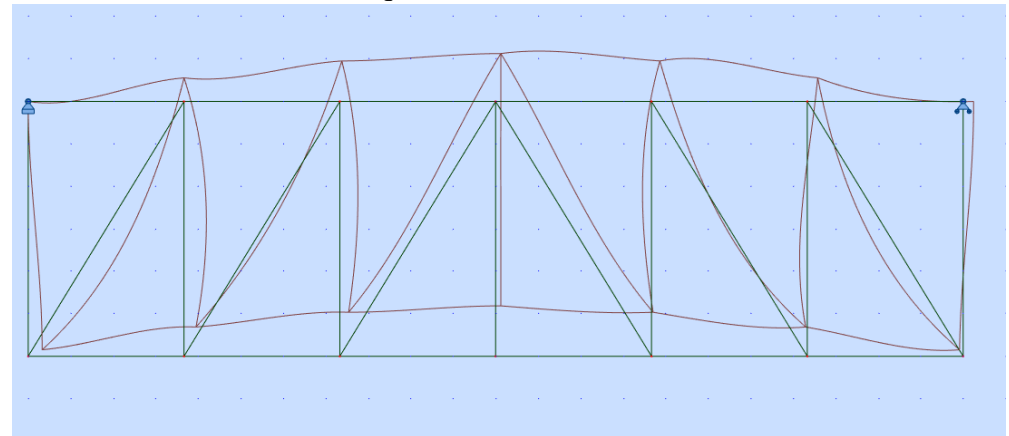
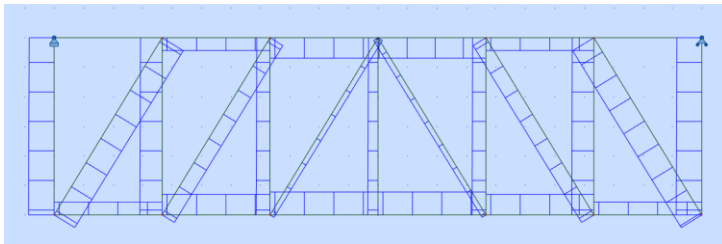
Rys: Autor

3,897 kN

3,897 kN

5 x 7,794 kN

$$d_q^0 = d(q_{\text{wind}}) = 2 \text{ mm}$$

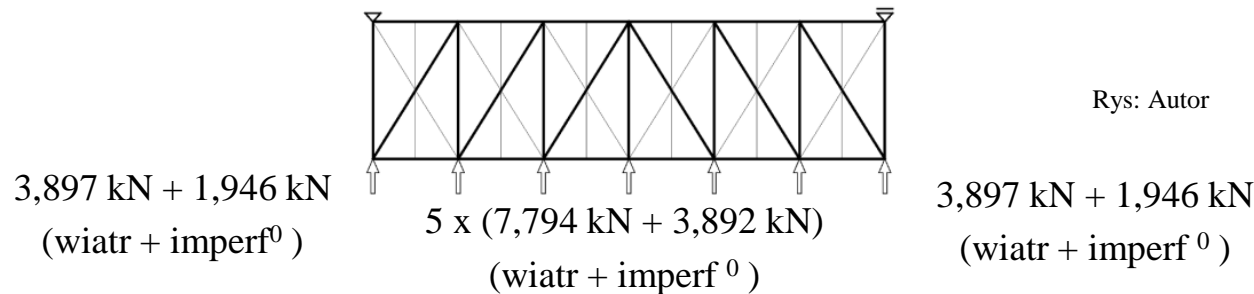


Kolejne kroki:

$$d_q^{(0)} = d(q_{\text{wind}}) = 4 \text{ mm}$$

$$q_d^{(0)} = \Sigma [8 N_{\text{Ed, c}} (e_0 + d_{\text{wind}}) / L^2] = \\ = 6 \cdot 8 \cdot 302,157 \text{ [kN]} \cdot (33,744 \text{ [mm]} + 2 \text{ [mm]}) / (22,2 \text{ [m]})^2 = 1,052 \text{ kN / m}$$

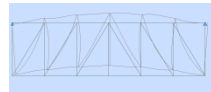
$$\rightarrow \text{siła} = 3,70 \cdot 1,052 = 3,892 \text{ kN}$$



Rys: Autor

Policzenie deformacji

$$d_q^{(1)} = d_q^{(1)}(q_d^{(0)}) = 3 \text{ mm}$$

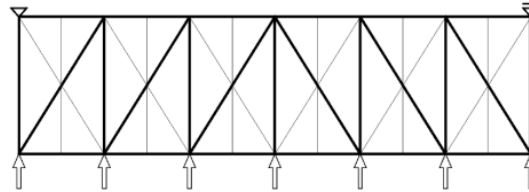


Rys: Autor

$$q_d^{(1)} = \Sigma [8 N_{\text{Ed, c}} (e_0 + d_q^{(1)} + d_{\text{wind}}) / L^2] = \\ = 6 \cdot 8 \cdot 302,157 \text{ [kN]} \cdot (33,744 \text{ [mm]} + 4 \text{ [mm]} + 3 \text{ [mm]}) / (22,2 \text{ [m]})^2 = 1,199 \text{ kN / m}$$

$$\rightarrow \text{siła} = 3,70 \cdot 1,199 = 4,436 \text{ kN}$$

Kolejne kroki:



Rys: Autor

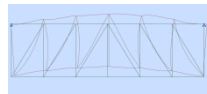
3,897 kN + 2,218 kN
(wiatr + imperf¹)

5 x (7,794 kN + 4,436 kN)
(wiatr + imperf¹)

3,897 kN + 2,218 kN
(wiatr + imperf¹)

Policzenie deformacji

$$d_q^{(2)} = d_q^{(2)}(q_d^{(1)}) = 3 \text{ mm}$$



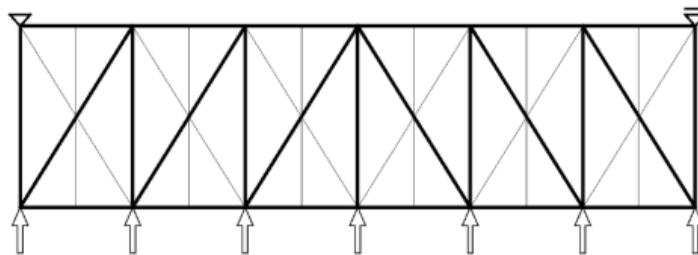
Rys: Autor

Brak różnicy w stosunku do poprzedniego kroku, koniec iteracji.

Dwie kombinacje obciążeń: wiatr + siła zastępcza od wyboczenia:

Rys: Autor

$$3,897 \text{ kN} + 1,149 \text{ kN} = \underline{5,046 \text{ kN}}$$



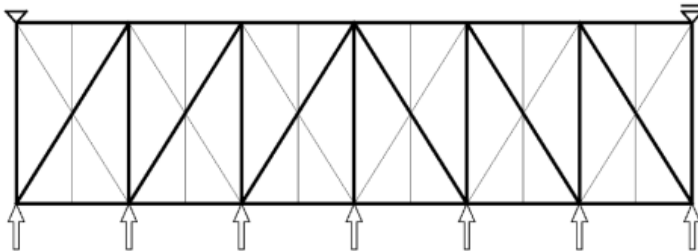
$$3,897 \text{ kN} + 1,149 \text{ kN} = \underline{5,046 \text{ kN}}$$

$$5 \times (7,794 \text{ kN} + 2,296 \text{ kN}) = 5 \times \underline{10,090 \text{ kN}}$$

Wiatr + siła zastępcza od imperfekcji:

Rys: Autor

$$3,897 \text{ kN} + 1,946 \text{ kN} = \underline{5,843 \text{ kN}}$$



$$3,897 \text{ kN} + 1,946 \text{ kN} = \underline{5,843 \text{ kN}}$$

$$5 \times (7,794 \text{ kN} + 3,892 \text{ kN}) = 5 \times \underline{11,686 \text{ kN}}$$

W drugim przypadku siły są większe → drugi przypadek będzie podstawą do wyznaczenia sił przekrojowych i nośności stężenia

Max ściskanie w pławii: $N_{Ed, c, p} = 24,17 \text{ kN}$

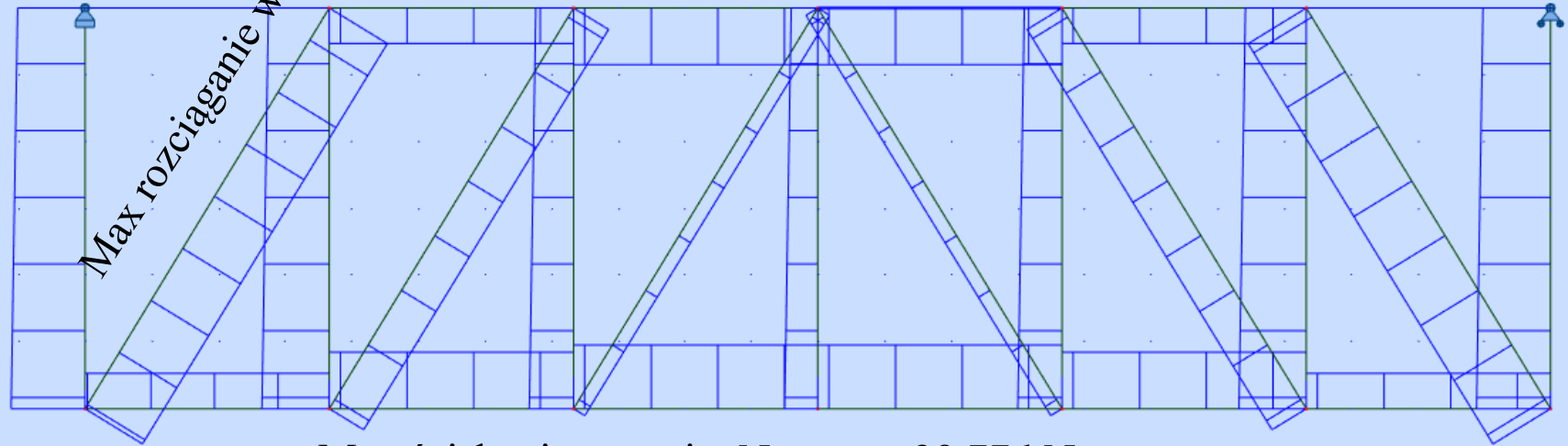
Max rozciąganie w stężeniu: $N_{Ed, t, b} = 22,02 \text{ kN}$

Wyniki:

Rys: Autor

Max rozciąganie w pasie: $N_{Ed, c, ch} = 18,46 \text{ kN}$

Max ściskanie w pasie: $N_{Ed, t, ch} = 20,77 \text{ kN}$



Sprawdzenie nośności: stężenie, pręt okrągły (tylko rozciąganie) ϕ 25

$$N_{Rd, bb} = f_y A / \gamma_{M0} = 115,355 \text{ kN}$$

$$N_{Ed, c, bb} / N_{Ed, bb} = 0,191 \quad \text{👍}$$

Sprawdzenie nośności: płatew

Płatew była wcześniej sprawdzona dla przypadku dwukierunkowego zginania. Teraz trzeba uwzględnić dwukierunkowe zginanie ze ściskaniem

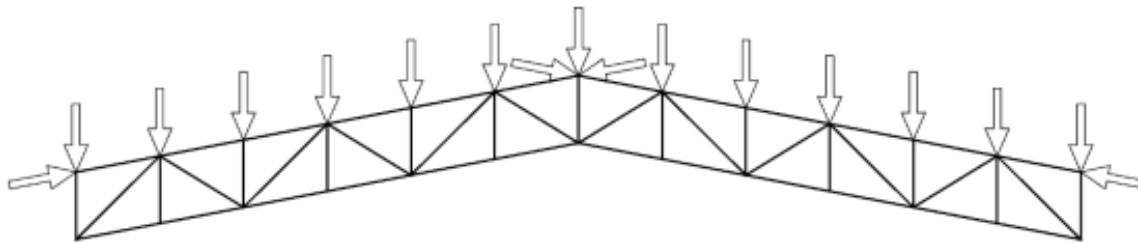
Pasy dźwigarów dachowych.

Oba pasy stężeń dachowych (kratownica pozioma) są jednocześnie górnymi pasami kratownic głównych (kratownice pionowe). Nowe wartości sił w kratownicach muszą być brane pod uwagę jako dodatkowe siły przyłożone do kratownic.

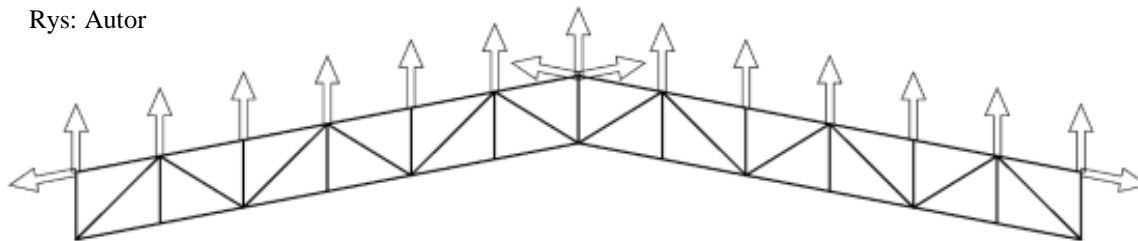
Uproszczenie dla nowych wartości sił:

Maksymalna siła ściskająca ze stężeń (20,77 kN) wraz z kombinacją obciążeń, która daje maksymalne ściskanie w górnym pasie (302,157 kN).

Maksymalna siła rozciągająca ze stężeń (18,46 kN) wraz z kombinacją obciążeń, która daje maksymalne rozciąganie (lub minimalne ściskanie) w górnym pasie (55,112 kN).



Rys: Autor



Uproszczenie: w rzeczywistości zmiany będą mniejsze, ponieważ pas dolny współpracuje z pasem górnym i przejmie część nowych sił.

Nowe siły w pasach

Na początku:

Pas	Max rozciąganie[kN]	Max ściskanie [kN]	Przekrój
Górny	-55,112	302,157	Gorąco walcowany CHS 108x10
Dolny	-304,853	52,789	

Zmiana jest efektem współpracy kratownicy ze stężeniami:

Max siła ściskająca w pasie od stężeń: $N_{Ed, c, ch} = 20,77$ kN

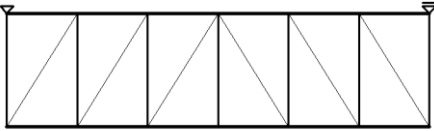
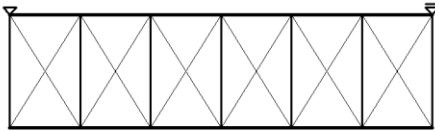
Max siła rozciągająca w pasie od stężeń: $N_{Ed, t, ch} = -18,46$ kN

Nowe siły w pasach:

Pas	Max rozciąganie[kN]	Max ściskanie [kN]	Przekrój
Górny	$-55,112 - 18,460 =$ $= -73,572$	$302,157 + 20,770 =$ $= 322,927$	Gorąco walcowany CHS 108x10
Dolny	-304,853	52,789	

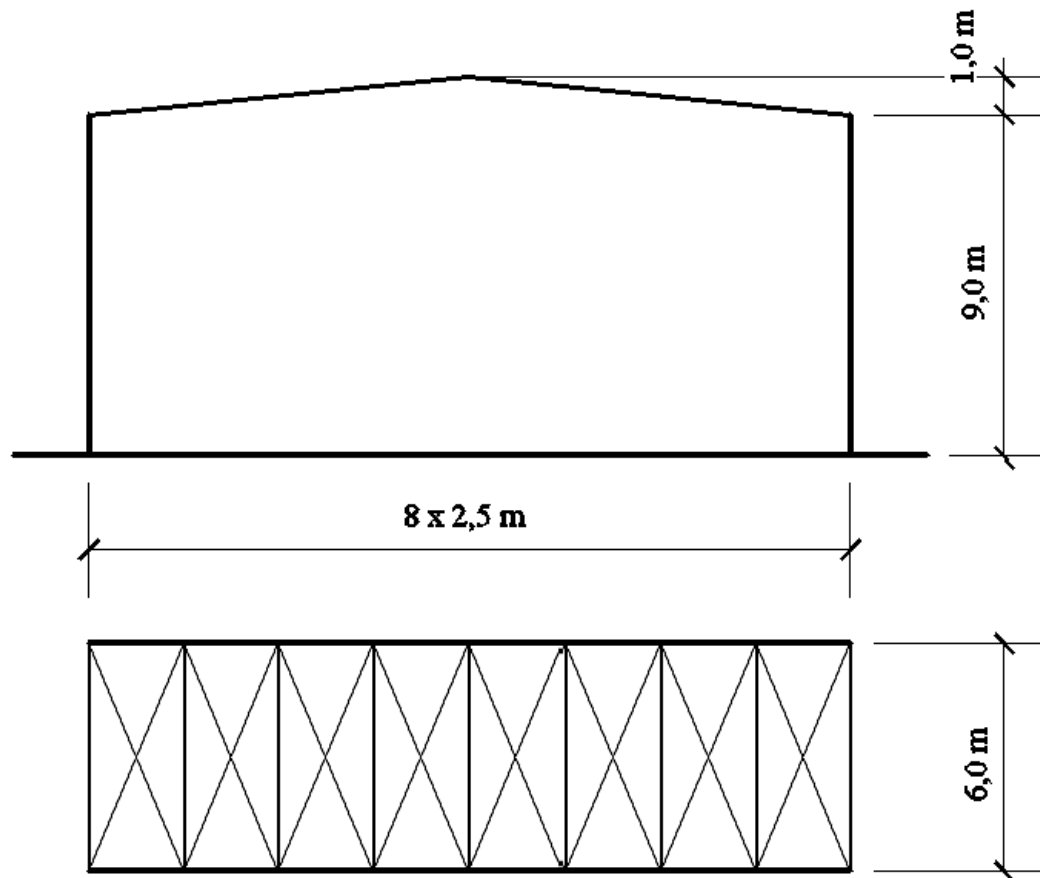
Porównanie stężeń wiotkich i sztywnych.

Na początku obliczeń zakładamy rodzaj stężeń. Każdy kolejny krok obliczeń iteracyjnych (model statyczny) musi być zgodny z tym założeniem.

Stężenie	Stężenia wiotkie, pręt ϕ 25	Stężenia sztywne CHS 60,3x5
Model statyczny		
Max siła w stężeniu	Rozciąganie: 22,02 kN Brak ściskania	Rozciąganie: 8,89 kN Ściskanie: 11,12 kN
Max ściskanie w pławii	24,17 kN	11,66 kN
Dodatkowa siła w pasie kratownicy głównej	Rozciąganie: 18,46 kN Ściskanie: 20,77 kN	Rozciąganie: 17,91 kN Ściskanie: 18,20 kN

Przykład 2c

Stężenia połączeniowe poprzeczne, dźwigar dwuteowy



Płatew jednoprzęsłowa IPE 210

$$M_{Ed, y} = 26,865 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed, z} = 2,687 \text{ kNm}$$

Dźwigar dachowy HEA 550,

$$h_{HEA 500} = 0,54 \text{ m}$$

Wiatr na ścianach szczytowych
(parcie na jednej + ssanie na
drugiej):

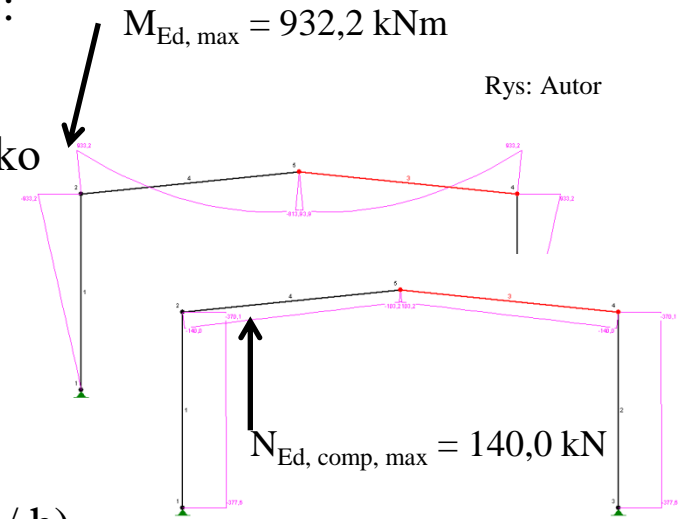
$$q_w = 0,8 \text{ kPa}$$

Rys: Autor

Różnice między przykładami 1a (krata) i 1c (dwuteownik):

- inna wartość $F_{\text{buck}} = \alpha_m N_{\text{Ed, c, equ}} / 100$;
- wysokość h według $t\# / 72$ dotyczy całej hali, a nie tylko kratownicy;
- inny jest przekrój pasów kratownicy-stężenia;
- konieczne są zastrzały przeciwwzwichrzeniowe;

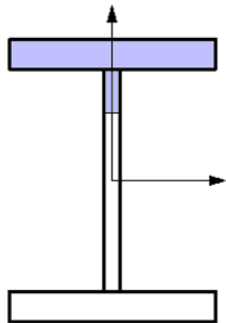
Reszta taka sama.



$$N_{\text{Ed, c, equ}} = \max (N_{\text{Ed, comp}} ; M_{\text{Ed}} / h ; N_{\text{Ed, comp}} / 2 + M_{\text{Ed}} / h) =$$

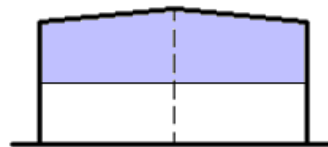
$$= \max (140,0 ; 932,2 / 0,54 ; 140,0 / 2 + 932,2 / 0,54) =$$

$$= 1796,3 \text{ kN}$$



Rys: Autor

Półka górna dwuteownika + 1/5 średnicy =
= pas kratownicy-stężenia



Rys: Autor

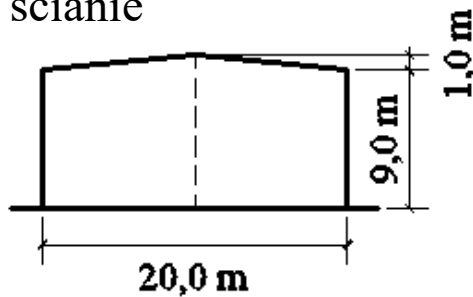


Rys: builderbill-diy-help.com

Przykład 3

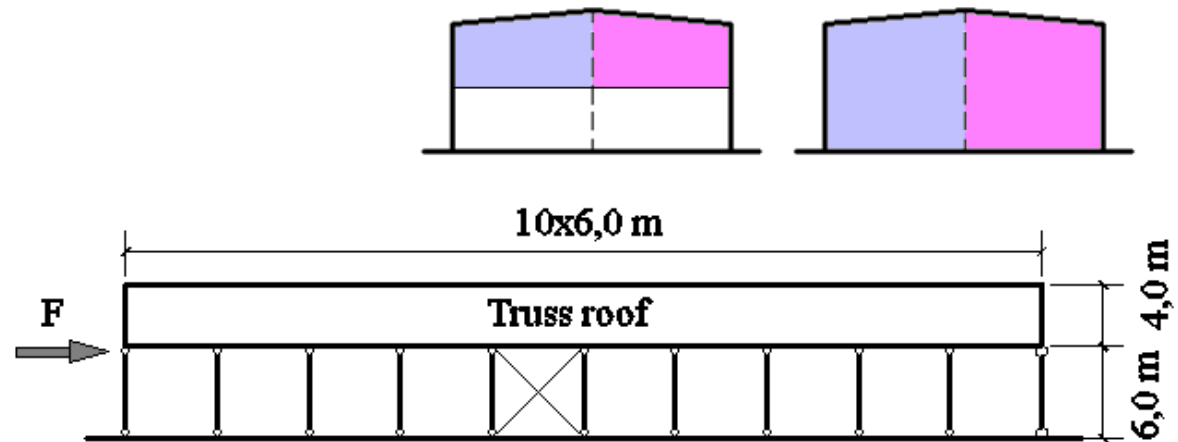
Stężenia pionowe ściennie

Wiatr z lewej
połowy ściany
szczytowej działa
na stężenia w
lewej ścianie



Wiatr z prawej
połowy ściany
szczytowej działa
na stężenia w
prawej ścianie

Oczywiście, część obciążenia wiatrem ze ścian szczytowych przenosi się bezpośrednio na fundamenty słupków obudowy (\rightarrow #t / 72, 87). Dla bezpieczeństwa można jednak przyjąć, że całe obciążenie wiatrem ze ścian szczytowych działa na stężenia w ścianach bocznych.



$$F = F_{\text{wind}} + F_{\text{column-imperf}}$$

Rys: Autor

Obciążenia:

Imperfekcje:

Siła osiowa w słupach $N_{Ed} = 160 \text{ kN}$

Ilość słupów w ścianie $m = 11$

Wysokość słupa $h = 6,0 \text{ m}$

$$F_{\text{column-imperf}} = N_{Ed} \Phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

$$\Phi_0 = 1 / 200$$

$$\alpha_h = \max\{ 2 / 3 ; \min[(2 / \sqrt{h}) ; 1,0] \} = 0,814$$

h – wysokość słupa [m]

$$\alpha_m = \sqrt{[0,5 (1 + 1 / m)]} = 0,739$$

$$F_{\text{column-imperf}} = 0,481 \text{ kN}$$

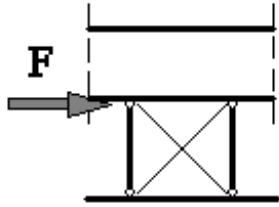
Wiatr:

$$\text{Powierzchnia } A = 2 \cdot 10 \cdot [(9 + 10) / 2] / 2 = 95 \text{ m}^2$$

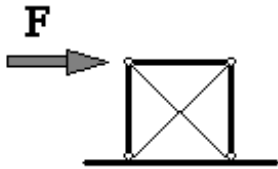
$$q_{\text{wind}} = 0,8 \text{ kPa}$$

$$F_{\text{wind}} = A q_{\text{wind}} = 76 \text{ kN}$$

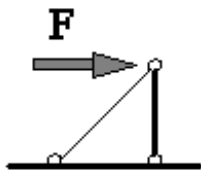
$$F = F_{\text{wind}} + F_{\text{column-imperf}} = 76,481 \text{ kN}$$



Siły poziome są przenoszone do fundamentów przez stężenia.
Można więc policzyć tylko jedno pole – to w którym występują stężenia.



Przyjmując stężenia sztywne, liczymy kratownicę typu X.
Siła ściskająca w stężeniu wynosi 65,8 kN. Odległość między końcami stężenia jest mniejsza niż 6,0 m; nie ma potrzeby analizowania zginania od ciężaru własnego.
Dodatkowa siła ściskająca w słupie wynosi 43,1 kN

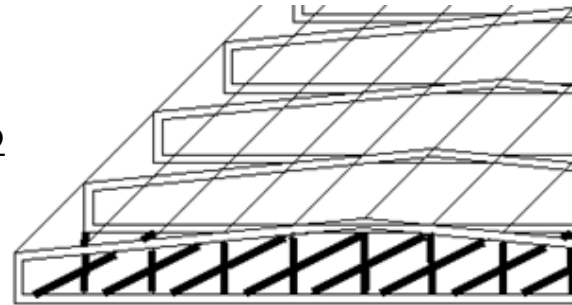


Dla stężeń wiotkich należy przyjąć odmienny schemat statyczny.
Siła rozciągająca w stężeniu wynosi 108,2 kN. Odległość między końcami stężenia jest mniejsza niż 6,0 m; nie ma potrzeby analizowania zginania od ciężaru własnego.
Dodatkowa siła ściskająca w słupie wynosi 76,5 kN

Rys: Autor

Uwagi dodatkowe

Stężenia połączeniowe poprzeczne pasa dolnego



Rys: Autor

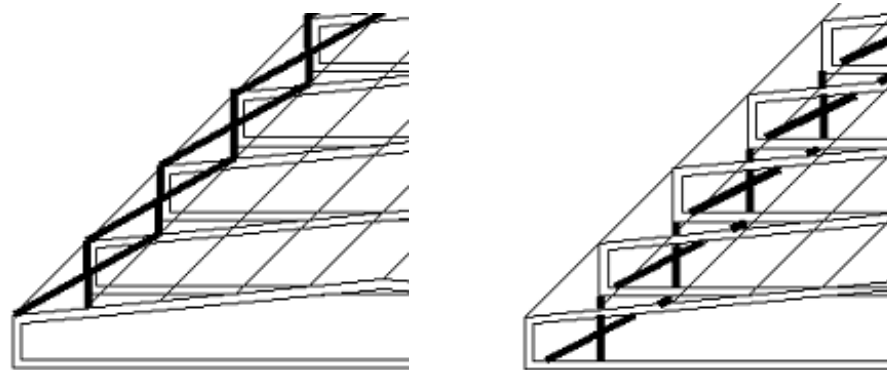
Te same zasady obliczeń, co w przypadku stężeń połączeniowych poprzecznych pasa górnego. Siły równoważne – z niestabilności pasa i z imperfekcji pasa – obliczane są dla charakterystyk dolnego dolnego. Można je zastąpić zastrzałami.



Rys: builderbill-diy-help.com

Stężenia połączeniowe podłużne

Rys: Autor

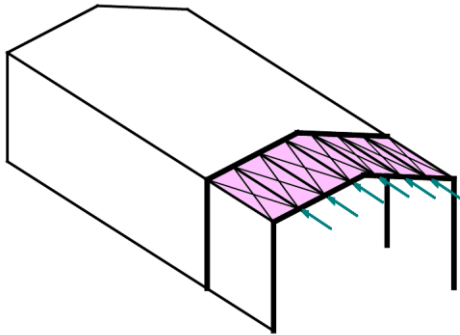


W nowoczesnych konstrukcjach z tego typu stężeń rezygnuje się w przypadku hali bez suwnic. Bez szczegółowych obliczeń przyjmuje się, że ich rolę odgrywa sztywność pokrycia dachowego.



Rys: taxonomy.openquake.org

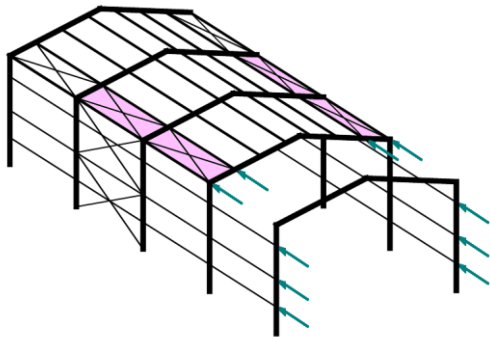
Tego rodzaju stężenia są niezbędne w halach wyposażonych w suwnice, dlatego należy je szczegółowo policzyć.



Rys: Autor

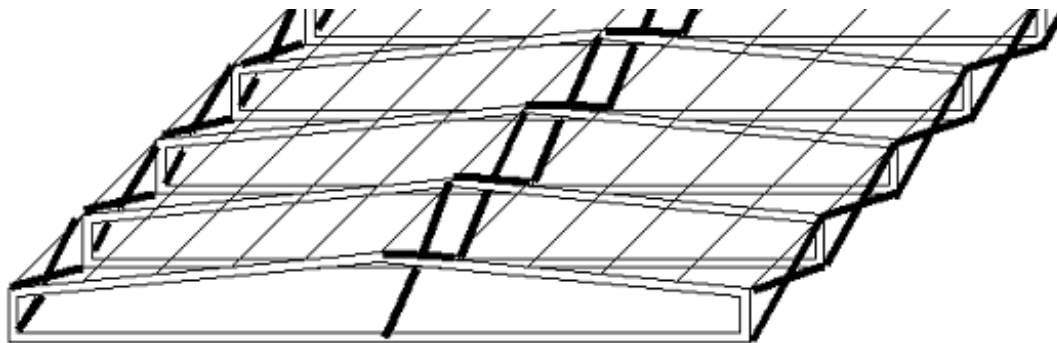


Rys: U. Pawlak, M. Szczecina, The eigenvalue problem in the dynamics of the steel industrial hall with internal handling system, Structure and Environment, 2016 / 8, 160-167

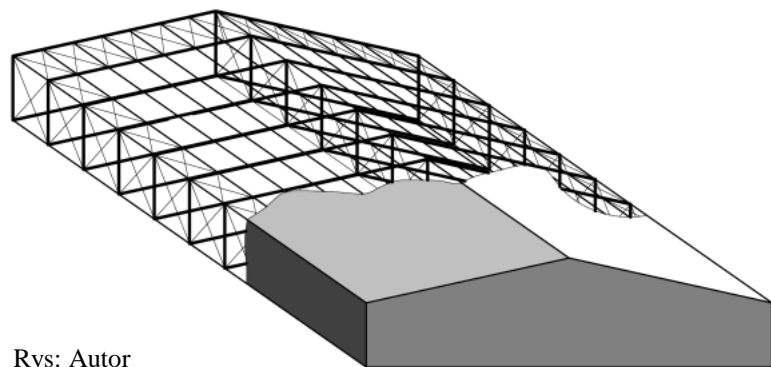


Tego typu stężenia są przede wszystkim ściskane. Dlatego też stosuje się tu wyłącznie stężenia sztywne. Siły do nich przyłożone wyliczane są w oparciu o całkowite pole powierzchni ściany frontowej podzielone między dwa stężenia (lewa i prawa ściana).

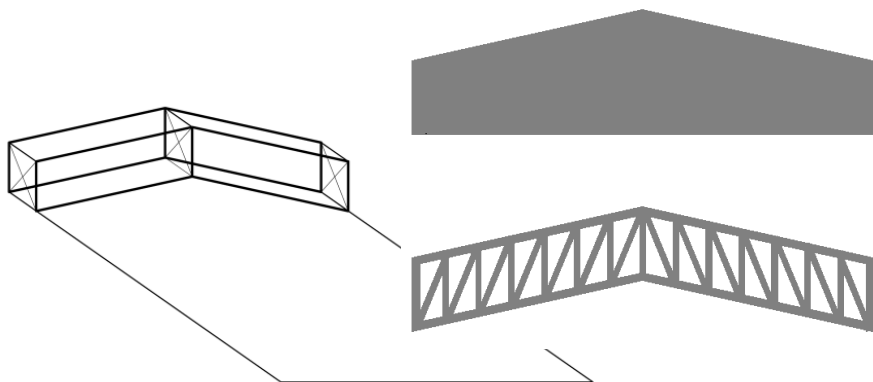
Stężenia pionowe podłużne



Rys: Autor



Rys: Autor



Tego typu stężenia są przede wszystkim ściskane. Dlatego też stosuje się tu wyłącznie stężenia sztywne. Siły do nich przyłożone są równoważne siłom od wyboczenia pasa dolnego (obliczanym według tych samych wzorów, co dla pasa górnego) oraz od oddziaływania wiatru na ścianę szczytową w fazie montażu (obszar oddziaływania wiatru jest znacznie mniejszy, niż w fazie eksploatacji).

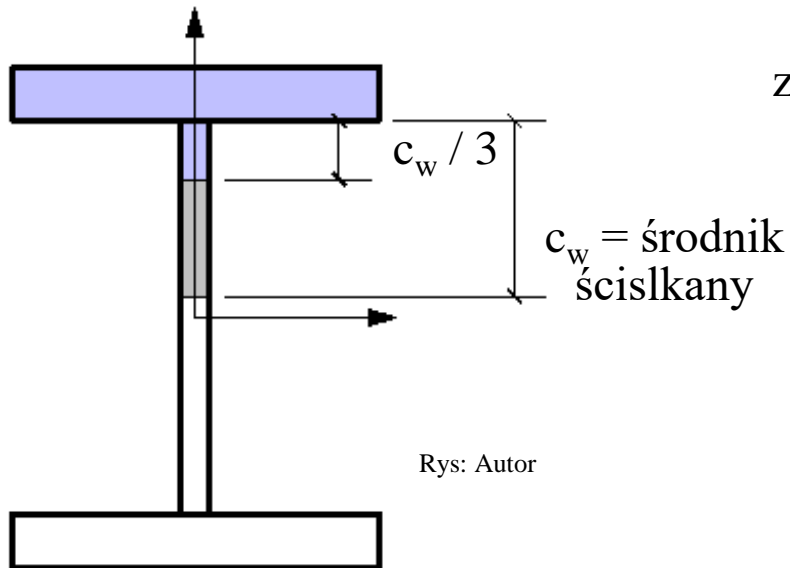
Metoda uproszczona, analiza sprężysta

EN 1993-1-1 6.3.2.4

Belka lub dźwigar z zastrzałami dochodzącymi do pasa ściskanego nie są podatne na zwichrzenie, jeżeli odległość między stężeniami L_C spełnia zależność:

$$L_C k_c / (i_{f,z} \lambda_1) \leq \lambda_{c0} M_{c,Rd} / M_{y,Ed}$$

$M_{y,Ed}$ - maksymalna wartość momentu zginającego w obrębie rozstawu zastrzałów



$$M_{c,Rd} = W_{y,c,f} f_y / \gamma_{M1}$$

k_c zgodnie z #5 / 63

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon$$

$$\lambda_{c0} = 0,5$$

$$i_{f,z} = \sqrt{ [J_{\text{eff},f,z} / (A_{\text{eff},f} + A_{\text{eff},w})] }$$

Zagadnienia egzaminacyjne

Rodzaje stężeń

Rola i rozmieszczenie stężeń dachowych

Podobieństwa i różnice stężeń przeciw wyboczeniu i przeciw zwichrzeniu

Algorytm sprawdzania skuteczności blach fałdowych

Algorytm obliczeń stężeń prętowych

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@usk.pk.edu.pl