

Konstrukcje metalowe

Wykład XXII

Hale stalowe

Spis treści

Rodzaje hal → #t / 3

Konstrukcje szkieletowe → #t / 12

Części składowe → #t / 19

Rodzaje analizy → #t / 33

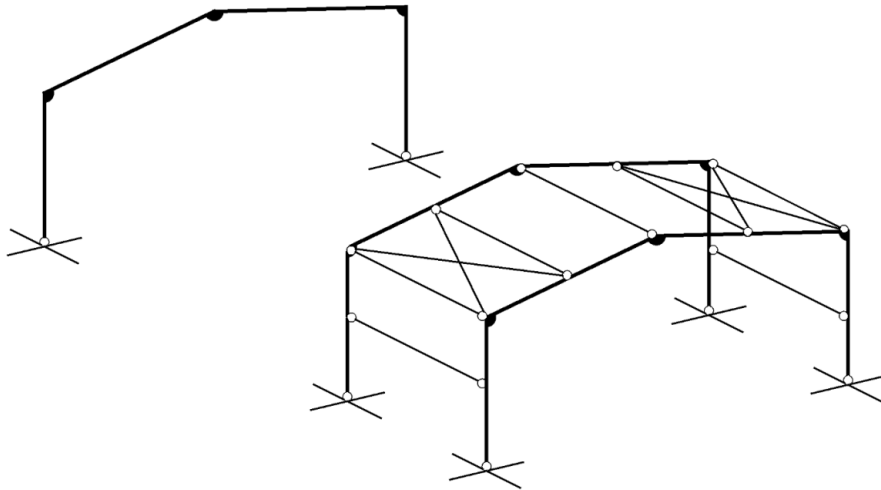
Szczegóły konstrukcyjne → #t / 68

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 96

Rodzaje hal

Hala: konstrukcja złożona z powtarzalnego układu ram płaskich, połączonych między sobą stężeniami, płatwiami i rygielkami obudowy.

Rys: traskostal.pl



Rys: Autor



Rys: weldon.pl

Hale: przemysłowe, magazynowe, handlowe, chłodnie, garaże, hangary, rolnicze, sportowe, wystawowe, biurowce...

Rys: steel.com.au



Rys: ekbud.lublin.pl

Rys: easyhalls.com



Rys: toiowo.eu

Rys: pebsteel.com



Rys: aviationbuildingsystem.com



Rys: internationalsteelspan.com



Rys: sztuka-architektury.pl

Z uwagi na działające obciążenia, hale można podzielić na::

- „ciężkie”, z suwnicami obciążającymi konstrukcję hali;
- „lekkie”, bez suwnic;

Rys: eci.com.pl

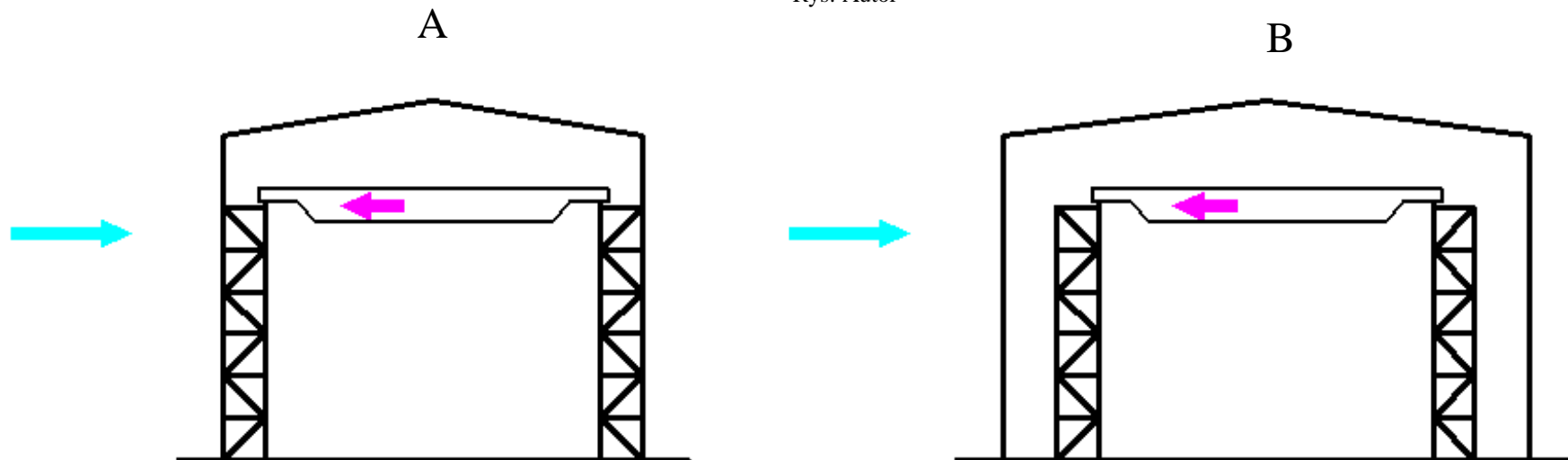


Rys: spawstal.pl



Rys: weldon.pl

Rys: Autor



Przypadek	Konstrukcja wsporcza suwnicy	Konstrukcja hali
A	Ciężar własny Obciążenia klimatyczne Obciążenia od suwnicy	
B	Ciężar własny Obciążenia od suwnicy	Ciężar własny Obciążenia klimatyczne

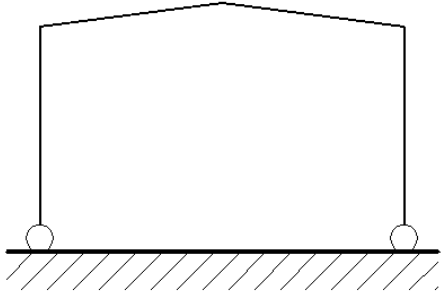
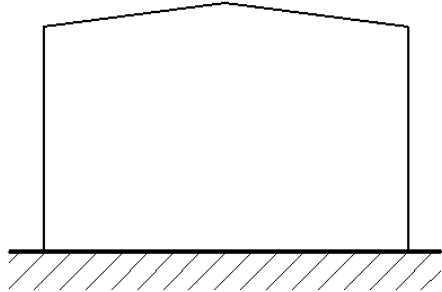
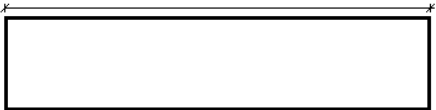
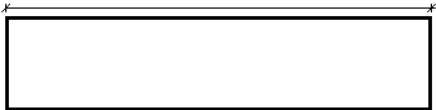
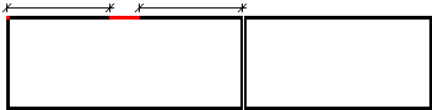
Zależność między sytuacjami A i B oraz „lekkimi” / „ciężkimi” halami jest następująca:

Sytuacja	Typ hali
A	„Ciężka”
B	„Lekka”
Hala bez suwnic	„Lekka”

Obciążenia od suwnic przedstawione zostaną na II stopniu studiów.

Zasady ogólne

Rys: Autor

	Hala „lekka”	Hala „ciężka”
Schemat statyczny		
Max długość hali / odległość między dylatacjami	150 m 	120 m 
Max odległość ściany frontowej / dylatacji od stężeń pionowych ścian	60 m 	

Przykłady hal „ciężkich” i „lekkich”



Rys: stabud.eu



Rys: pebsteel.com

Hale „ciężkie” to przede wszystkim hale przemysłowe.

Hale „lekkie” mogą mieć różne przeznaczenie i różne rozwiązania architektoniczne.



Rys: ekbud.lublin.pl



Rys: toiowo.eu



Rys: internationalsteelspan.com



Rys: steel.com.au

Idea płaskich ram połączonych poprzecznie między sobą daje duże możliwości rozwiązań estetycznych.



Rys: sztuka-architektury.pl



Rys: roof-care.com

Konstrukcje szkieletowe

Drugim - mniej popularnym - schematem konstrukcyjnym jest szkielet stalowy. W przypadku ramy sztywne połączenia występują tylko w jednej płaszczyźnie. Elementy w kierunku prostopadłym są połączone z ramą za pomocą połączeń przegubowych. Sztywne połączenia występują tylko w obu kierunkach w szkielecie.

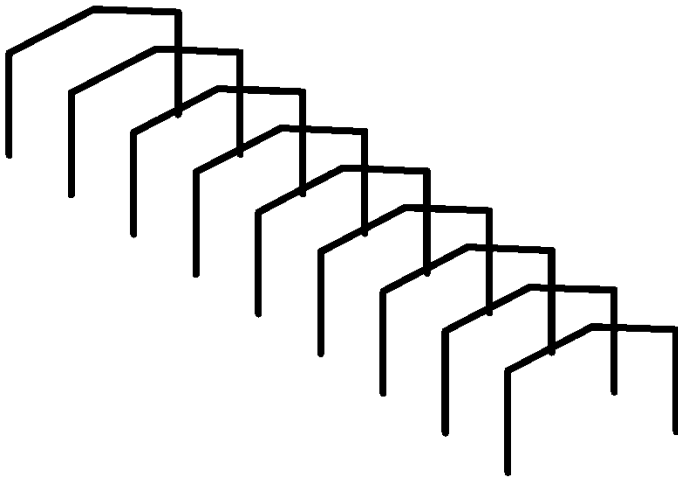
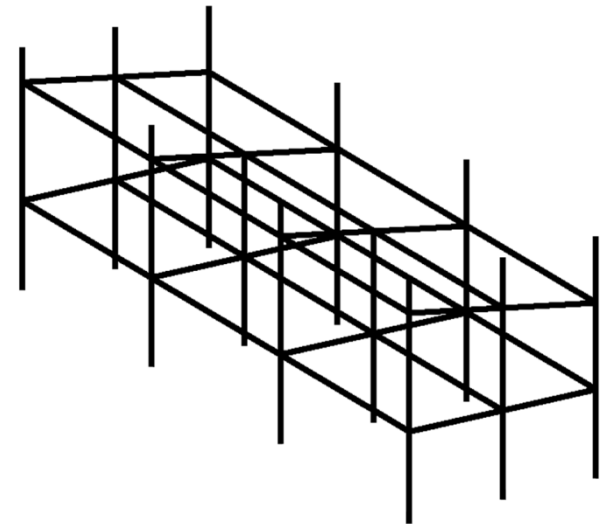


Photo: Author





Sztywne połączenie w obu kierunkach może być oparte na klasycznym rozwiązaniu połączenia rozciąganego. Względem silnej osi przekroju poprzecznego słupa, śruby łączą pas słupa i blachę czołową. Względem słabej osi, śruby łączą blachę czołową i dodatkową blachę przyspawaną do pasa słupa.

Photo: resources.scia.net

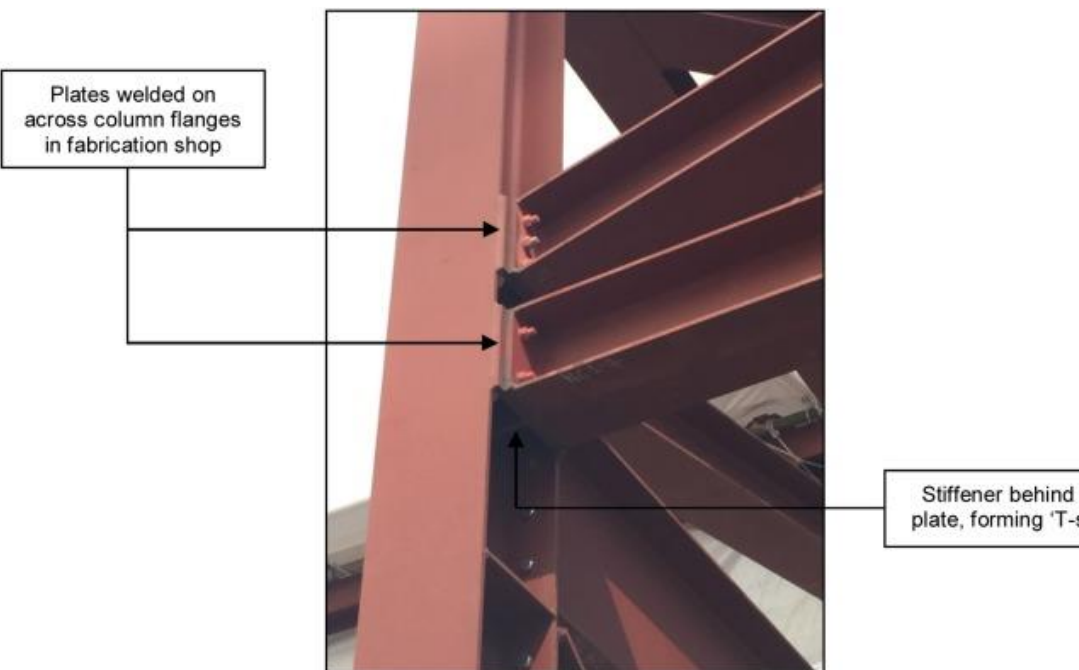
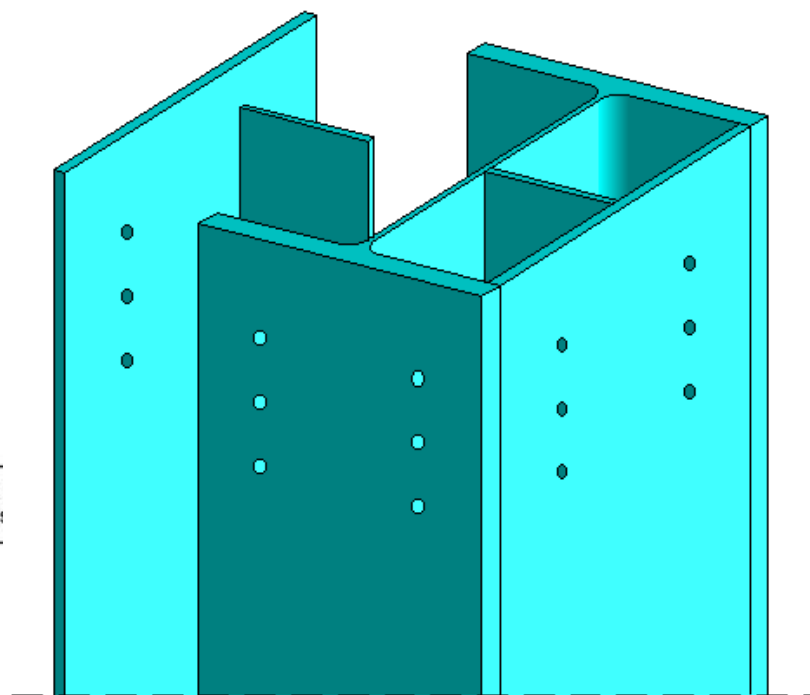


Photo: Current UK trends in the use of simple and/or semi-rigid steel connections, M. Kidd, R. Judge, S.W. Jones, Case Studies in Structural Engineering 6 / 2016

Photo: Author





Innym rozwiązaniem jest węzeł uniwersalny odsunięty, łączący belki z króćcami dwuteowymi, przyspawanymi do pasa i środka słupa.

Photo: prefabmarket.com

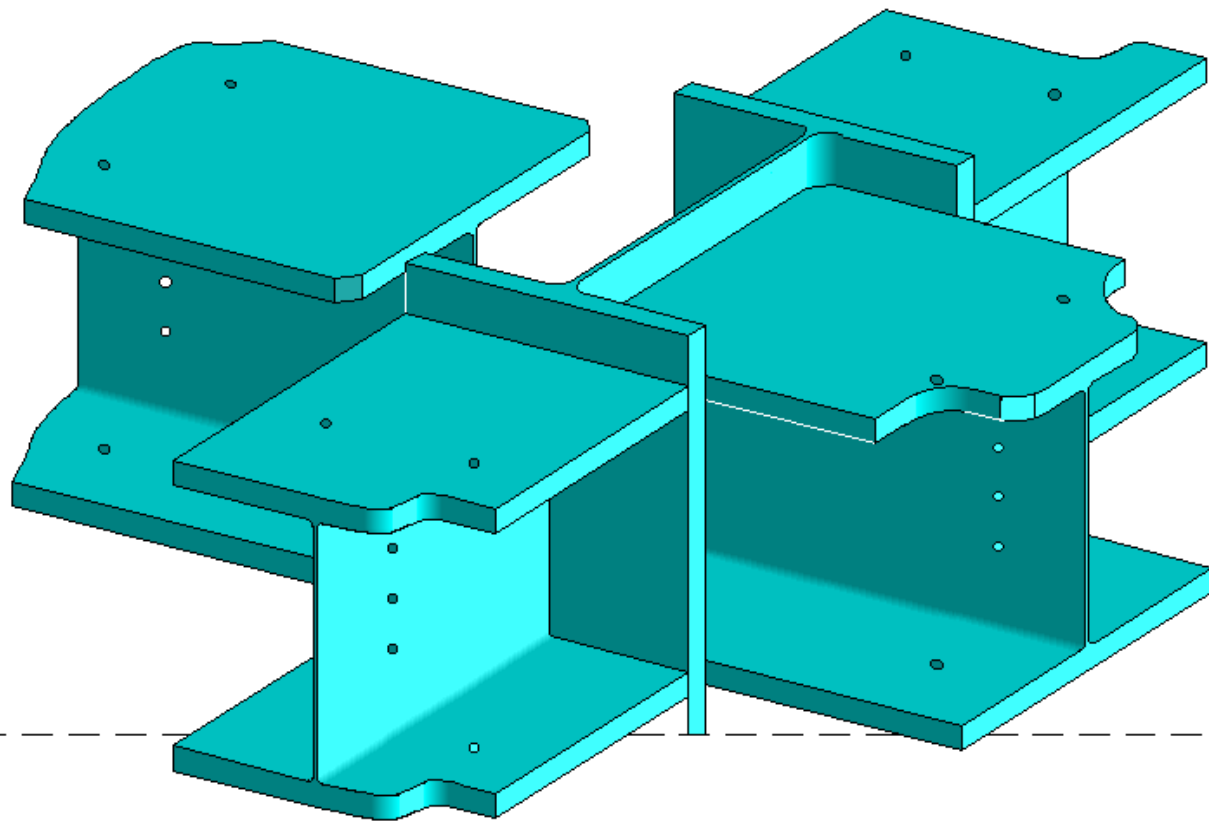


Photo: Author

Sztywność i nośność tych rozwiązań musi zostać sprawdzona.

W przypadku po lewej, wzory z Eurokodu dla obu problemów mogą być stosowane w obu kierunkach (w obu kierunkach połączenie można analizować jako belka-słup dwuteowy).

Dodatkowo należy obliczyć spoiny.

Rozwiązanie po prawej jest bardziej skomplikowane. Część belka-półka słupa może być analizowana jako spawane połączenie belka-słup. W Eurokodzie nie przedstawiono żadnych wzorów na sztywność i nośność dla węzła belka-środnik słupa. Ta część opiera się na założeniu „jeśli wytrzymałość spoin jest prawidłowa, wszystko jest ok”.

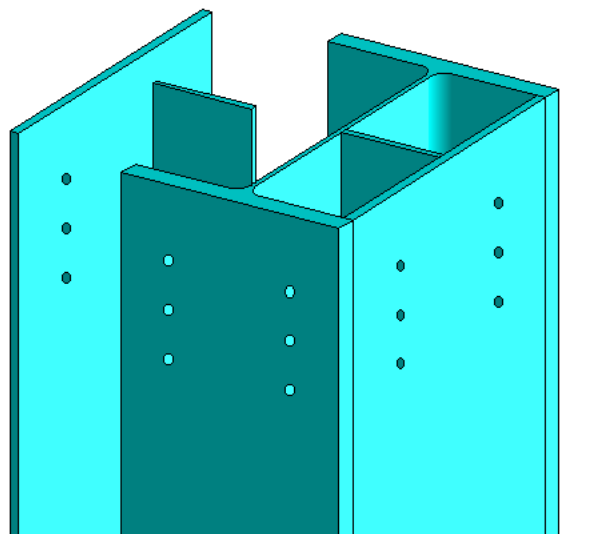
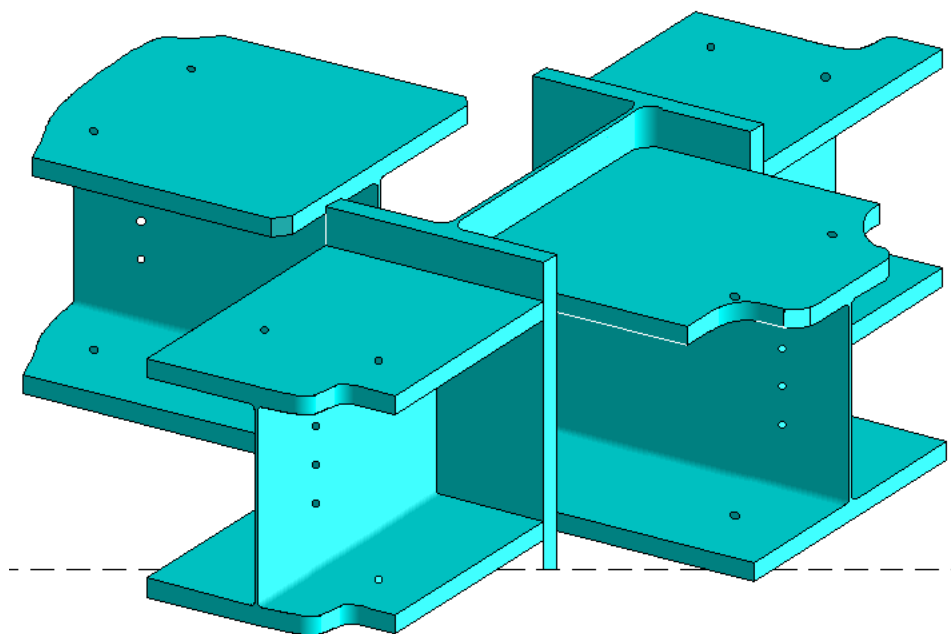


Photo: Author





Stalowe szkielety są preferowane w przypadku budynków biurowych o kilku kondygnacjach. Mała liczba stężeń jest stosowana dzięki dużej sztywności węzłów i – w kierunku poziomym – podłóg.

Photo: rccconcrete.com

Photo: ekbud.lublin.pl





Photo: wikipedia



Photo: noizz.pl

Takie rozwiązanie jest zalecane również dla wysokich budynków. Według analizy ekonomicznej, to rozwiązanie jest dobre do około 40 pięter (≈ 160 m).

Dla wyższych budynków zalecana jest współpraca między szkieletem a centralnym masywnym rdzeniem betonowym. Więcej informacji zostanie przedstawionych na II stopniu studiów.

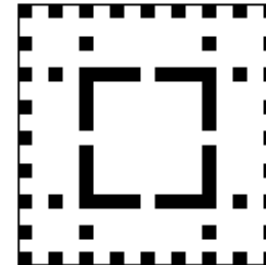
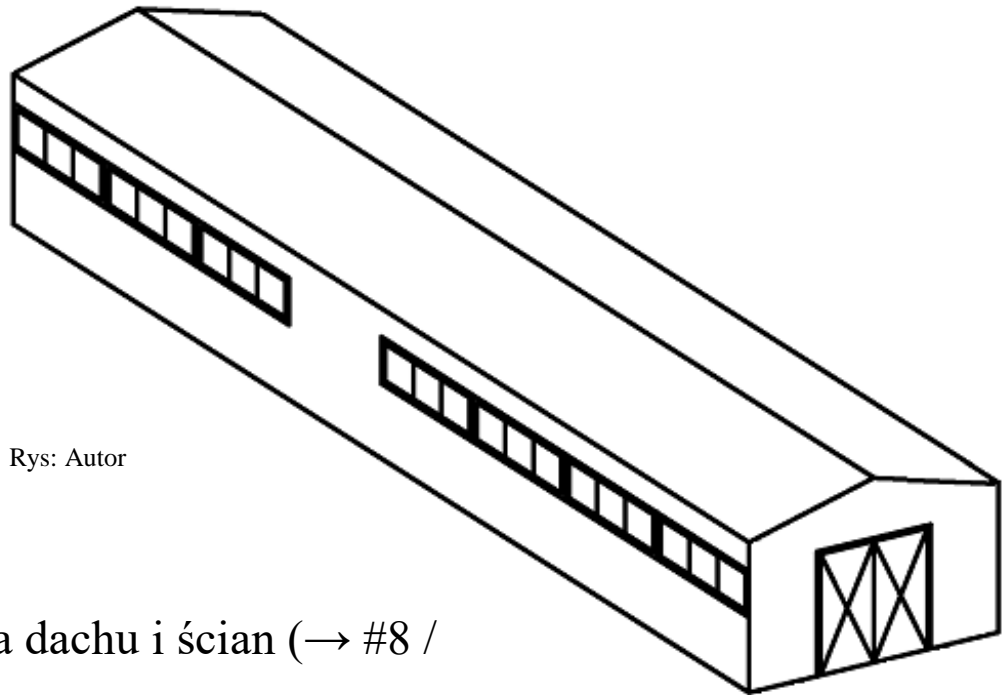


Photo: Author

Ramy	Szkielety
Węzły sztywne w płaszczyźnie ramy	Węzły sztywne w obu kierunkach
Słupy zginane jednokierunkowo	Słupy dwukierunkowo zginane
Stężenia dachowe i w ścianach bocznych	Niewielka liczba stężeń, współpraca z podłogami
Długość krytyczna słupów: w płaszczyźnie efekt współpracy słupa i dźwigarów (→ #13 / 35-71); prostopadle do płaszczyzny odległość między pionowymi stężeniami	Długość krytyczna słupów: w obu kierunkach efekt współpracy słupa i dźwigarów (→ #13 / 35-71) lub – jeśli sztywność pozioma stropu jest duża (np. płyta betonowa) – jest to odległość między stropami
Płyty warstwo, panele okładzinowe, szklane fasady jako obudowa zewnętrzna	
Najczęściej jednokondygnacyjne, zakres stosowania do 20 kondygnacji	Do 40 kondygnacji

Części składowe

Pomijając obecność konstrukcji wsporczych pod suwnice, podstawowe elementy składowe hal i szkieletów są w większości przypadków identyczne. Zdjęcia i rysunki dotyczą w większości hal, jako konstrukcji częściej spotykanych.



Rys: Autor

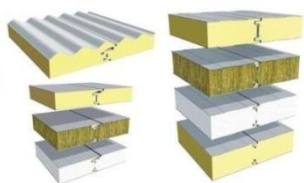
Warstwa zewnętrzna – obudowa dachu i ścian (→ #8 / 20 - 27)

→ #8 / 21

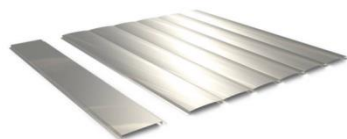
Izolacja termiczna

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)



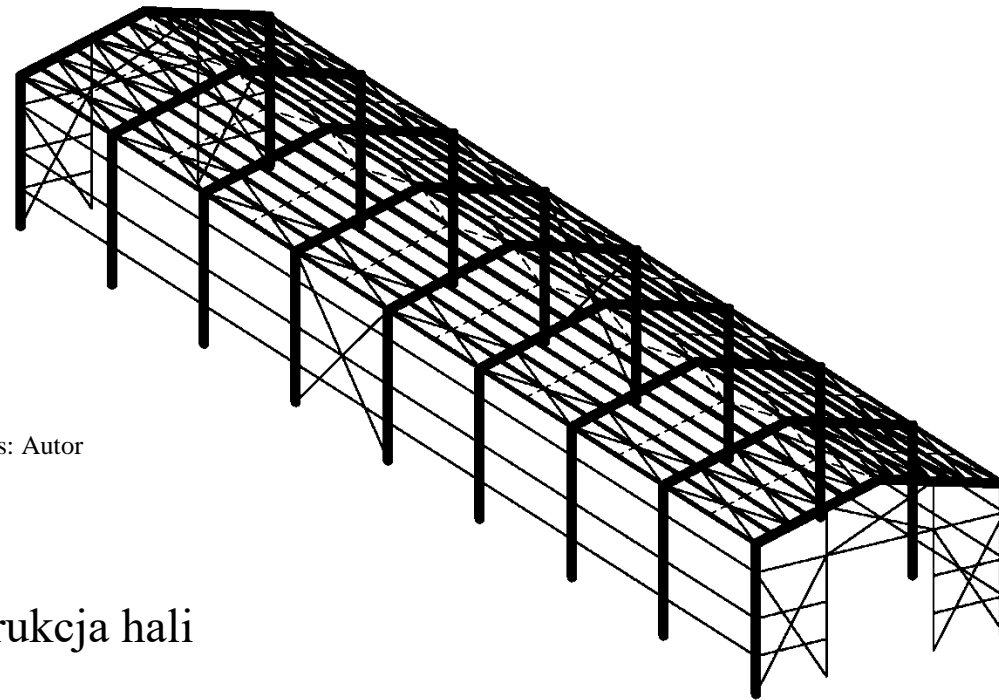
Rys building.co.uk

Oddzielne problemy (ogólnie: odpowiedzialność producenta)

Pokrycie dachu i obudowa ścian może być analizowana na jednym z trzech poziomów dokładności obliczeń:

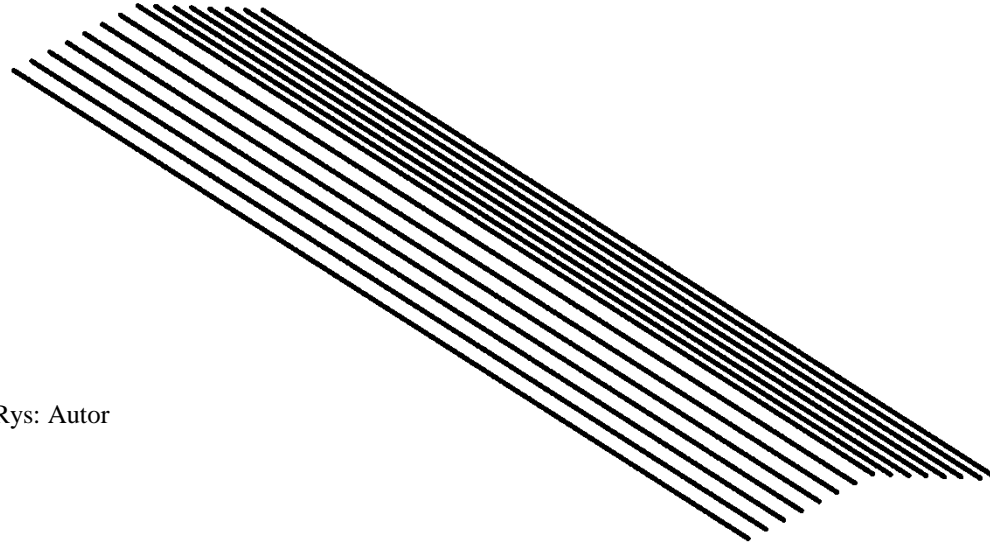
→ #8 / 22

Poziom	Comments
Tylko ciężar własny	Najprostszy, najpopularniejszy sposób obliczania (każdy typ pokrycia i obudowy)
Ciężar własny + zabezpieczenie płatwi i rygli przed niestatecznością	Zgodnie z EN 1993-1-3 (tylko blachy fałdowe) lub Obliczenia MES bazujące na wynikach eksperymentów (płyty warstwowe, panele obudowy)
Ciężar własny + zabezpieczenie płatwi i rygli przed niestatecznością + współpraca przy przenoszeniu obciążeń	Obliczenia MES bazujące na wynikach eksperymentów (każdy typ pokrycia i obudowy)



Rys: Autor

Właściwa konstrukcja hali


















Rys: Autor

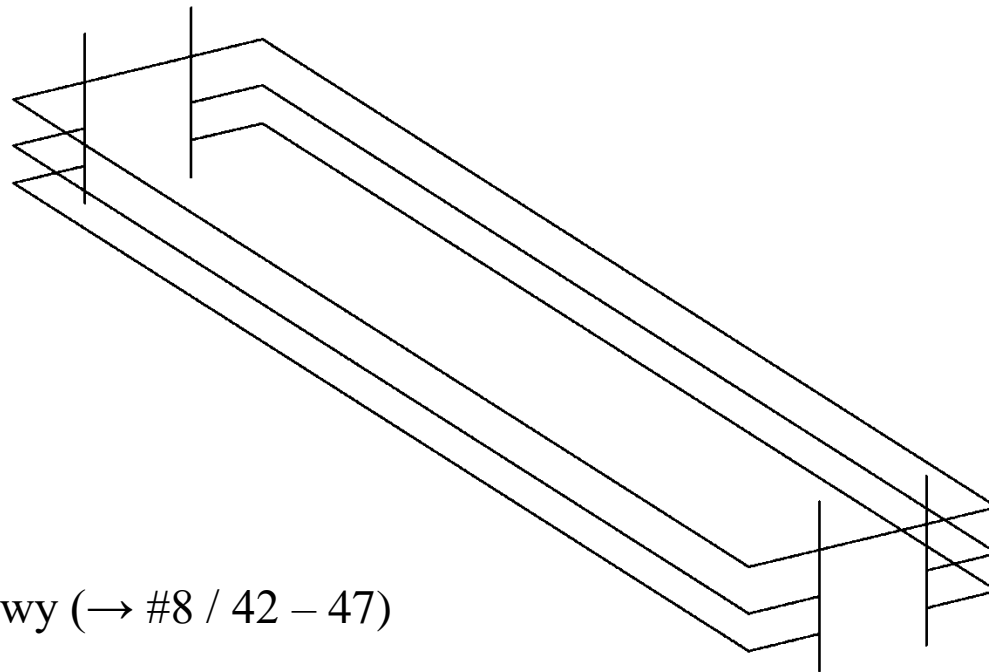
Płatwie:

- Informacje ogólne → #8 / 28 – 41;
- Płatwie kratowe #9;
- Belki gorącowalcowane #11;
- Belki ażurowe #12 / 57 – 72.

Zalecany typ płatwi w funkcji rozpiętości / odległości między podporami

Rozpiętość	Ciągłe, wieloprzęsłowe, zimnogięte	Ciągłe, wieloprzęsłowe, podwieszane, zimnogięte	Jednoprzęsłowe, gorącawalcoowane	Ażurowe	Kratowe
< 3					
3 – 4					
4 – 6					
6 – 8					
8 – 9					
9 – 12					
12 – 18					

Rys: Autor



Rygielki i słupki obudowy (→ #8 / 42 – 47)

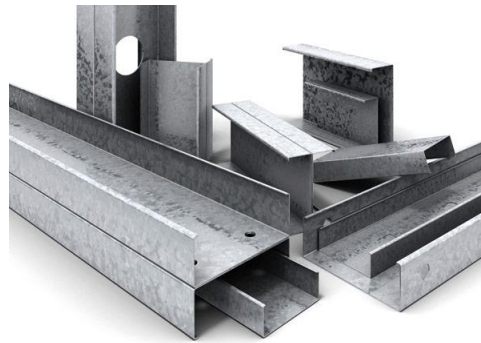
Na rygielki nie działa obciążenie śniegiem – nie muszą być tak masywne jak płatwie.

Rys: newsteelconstruction.com

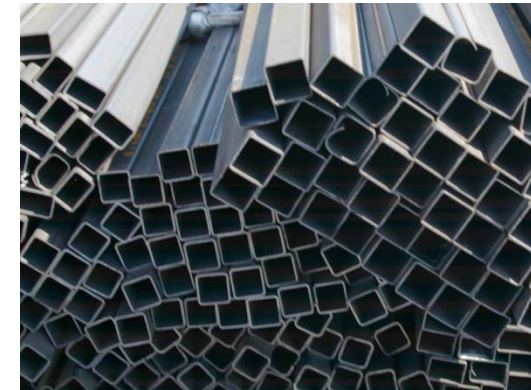
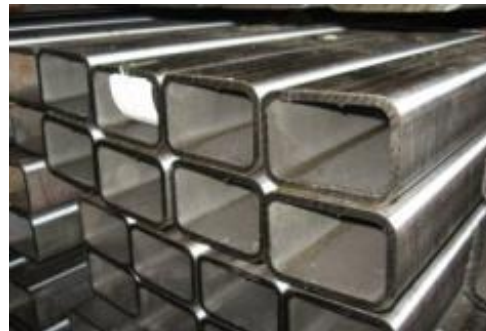
Rys: everfaithsteel.cn

Rys: calgor.com.pl

Elementy poziome



Elementy pionowe
(dodatkowe słupki
obudowy)

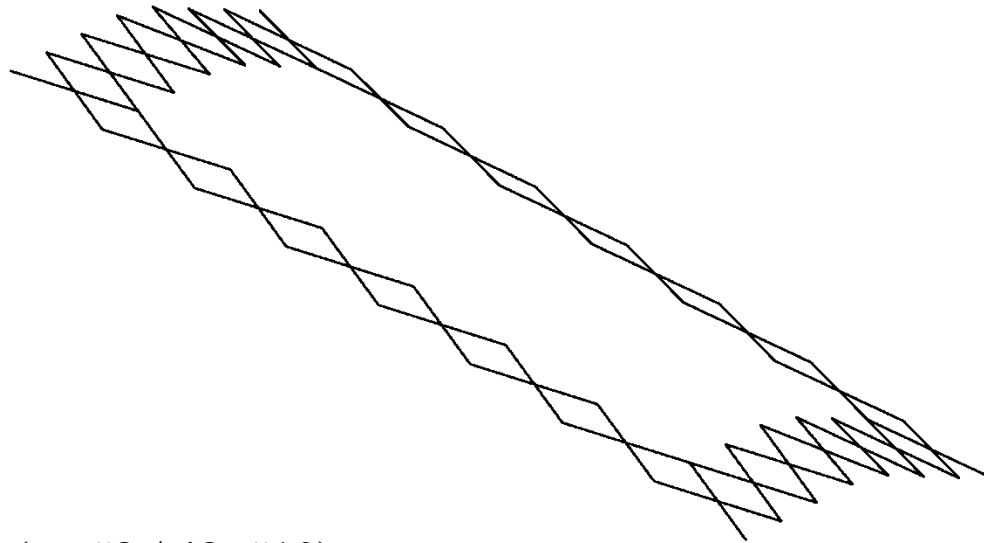


Rys: wggstal.pl

Rys: wistal.pl

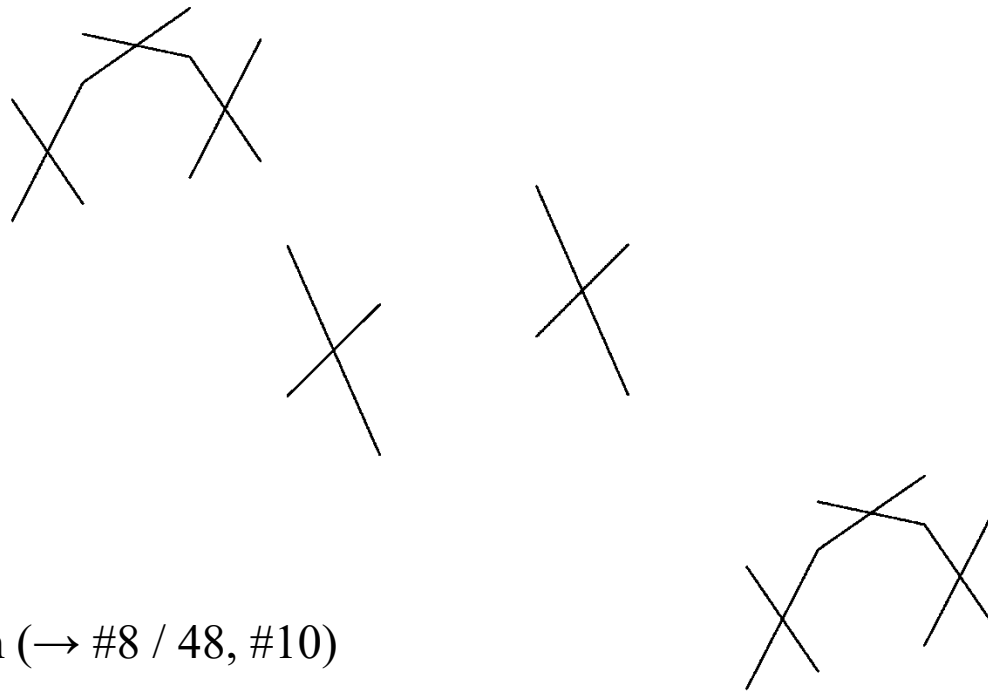
→ #8 / 43

Rys: Autor



Stężenia dachu (→ #8 / 48, #10)

Rys: Autor



Stężenia ścian (→ #8 / 48, #10)

Stężenia



Rys: calgor.com.pl

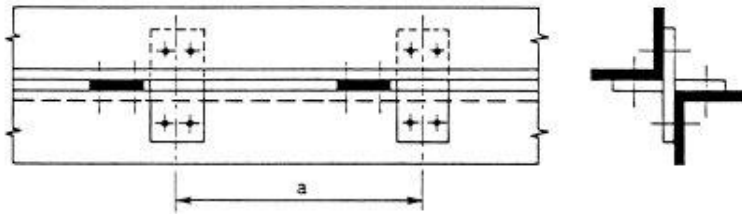


Rys: rafstal-inox.pl



Rys: rafstal-inox.pl

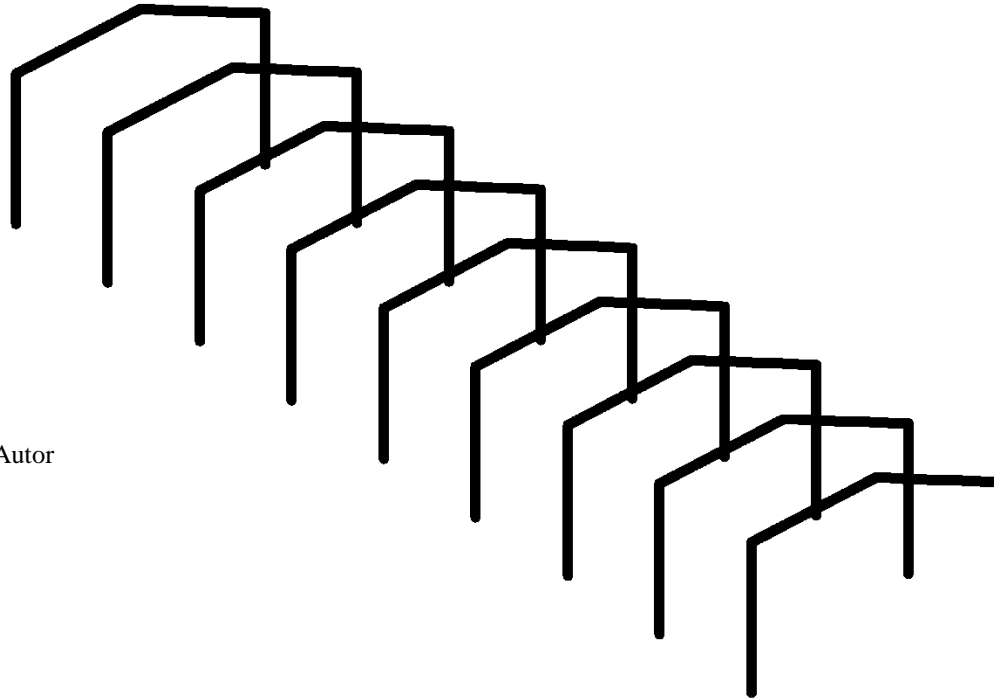
→ #8 / 48



Rys: EN 1993-1-1 fig. 6.13



Rys: stalhart.pl



Rys: Autor

Konstrukcja główna (kratownice dachowe, rygle dachowe, słupy) (→ #9, #11, #12, #13)

Ramy mogą być wykonane z kształtowników pełnościennych (gorącowalcowanych lub spawanych) oraz kratownic.



Rys: setrometalgroup.com



Rys: traskostal.pl

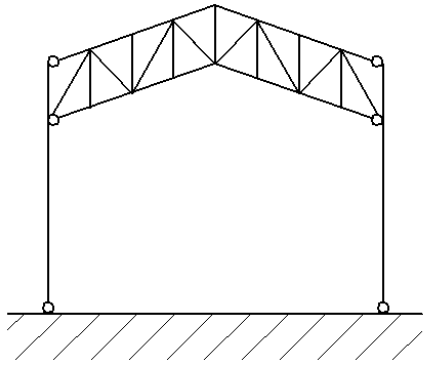


Rys: waldenstructures.com



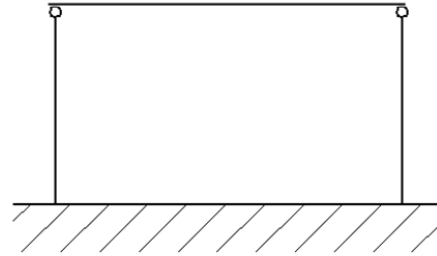
Rys: wikipedia

Kierunek podparcia

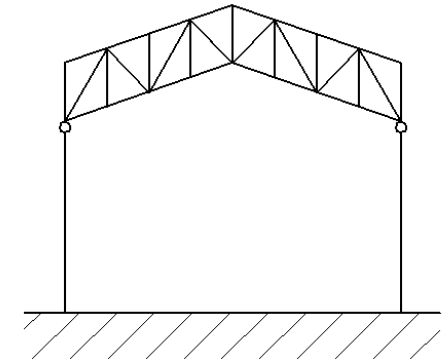


Kratownica: z boku

Rys: Autor



Belka: tylko od dołu



Kratownica: od dołu

→ #20 / 57

Podparcie od dołu → #20 / 58 - 84

Podparcie z boku → #20 / 85 - 87

Rodzaje analizy

Zgodnie z wykładem #3, najważniejszymi aspektami obliczeń są :

- Analiza I lub II rzędu;
- Model 2D lub 3D;
- Analiza sprężysta lub plastyczna.

Są one niezależne od siebie – dowolny wybór w jednej z alternatyw nie ogranicza wyboru w innych.

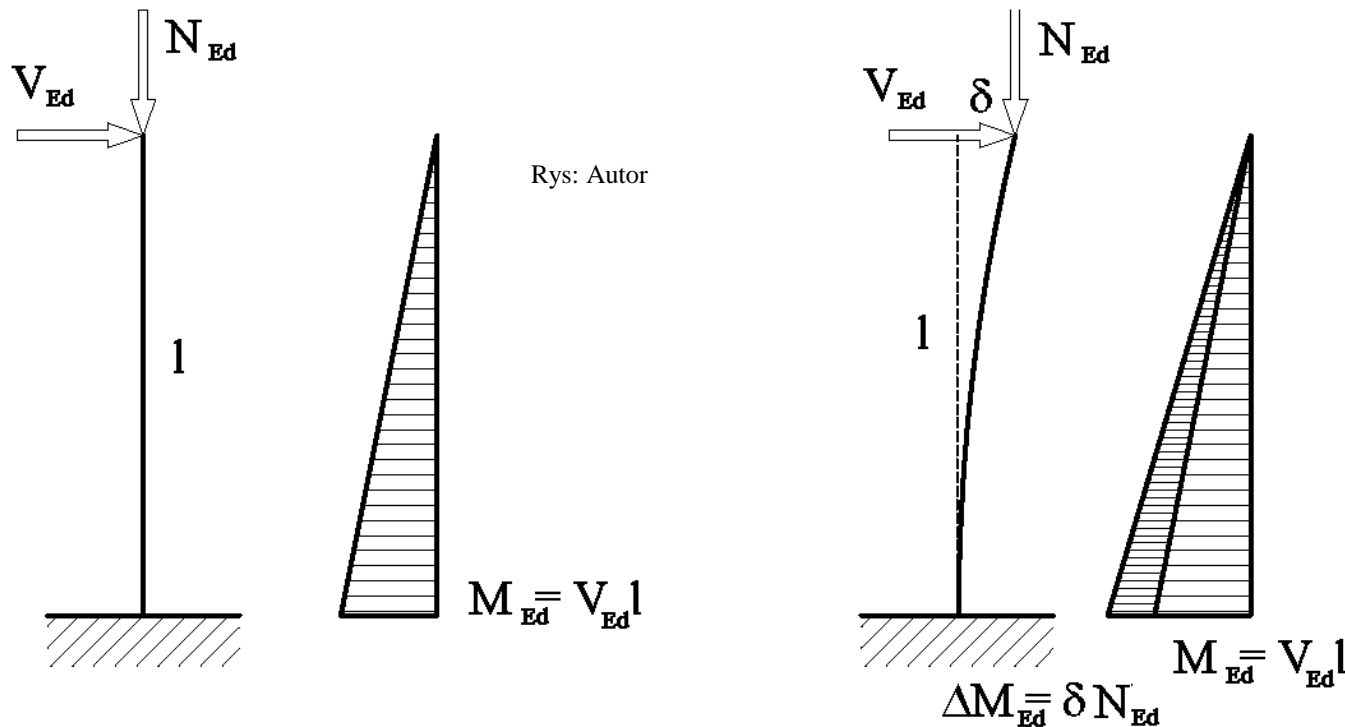
Obliczenia:	Ręczne	Komputerowe
2 D	Podstawa	Dopuszczalne
3 D	Dopuszczalne	Zalecane

Obliczenia:	Ręczne	Komputerowe
Analiza sprężysta: liniowa zależność σ - ϵ	Podstawa, II, III i IV klasa przekroju	Dopuszczalne (materiał liniowo sprężysty)
Analiza plastyczna: nieliniowa zależność σ - ϵ	Podstawa, I klasa przekroju	Zalecane (nieliniowość materiałowa)

Obliczenia:	Ręczne	Komputerowe
I rzędu	Dopuszczalne warunkowo (→ #3 / 86)	Dopuszczalne (małe odkształcenia)
II rzędu	Dopuszczalne warunkowo (→ #3 / 86)	Zalecane (duże odkształcenia)

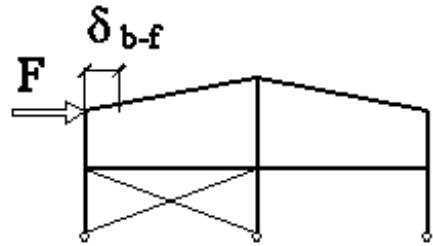
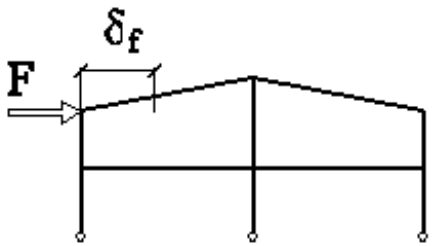
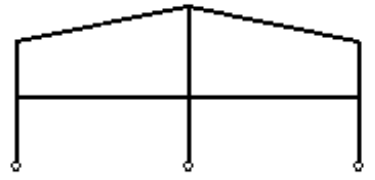
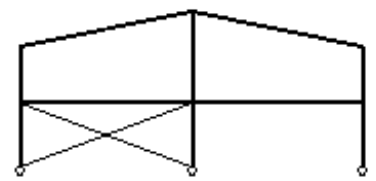
→ #3 / 90

Dla wiotkich konstrukcji pojawiają się dodatkowe momenty zginające, związane z deformacjami konstrukcji



Jako efekt zastępczy wprowadza się współczynnik zwiększający obciążenia poziome: $V_{Ed}^* = V_{Ed} \alpha^*$

Stężenie ścian
w płaszczyźnie ramy



$$\delta_f / \delta_{b-f} \leq 5$$



Rama niestężona

$$\delta_f / \delta_{b-f} > 5$$



Rama stężona - analiza II rzędu nie jest konieczna

Rys: Autor

Analiza II rzędu

→ wykład #13



Rama niestężona:

$$\alpha_{cr} \approx (H_{Ed} h) / (V_{Ed} \delta_{H,Ed})$$

$\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed}$		
$\alpha_{cr} > 10$	$10 \geq \alpha_{cr} \geq 3$	$\alpha_{cr} < 3$
Nie trzeba uwzględniać	Analiza uproszczona	Analiza zaawansowana

$$Q_{Ed}^* = Q_{Ed} \alpha^*$$

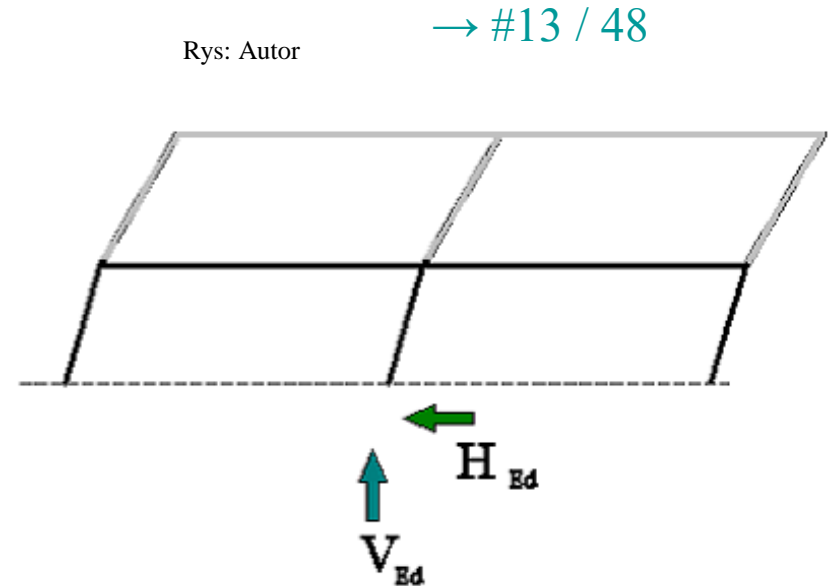
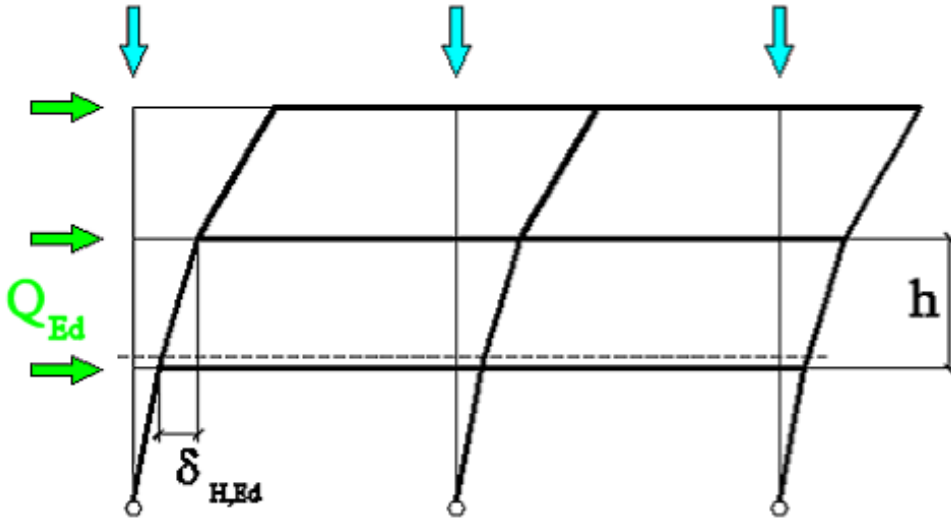
$$\alpha^* = 1 / (1 - 1 / \alpha_{cr})$$

Q_{Ed} , H_{Ed} , V_{Ed} – tylko dla konkretnego rozpatrywanego piętra

EN 1993-1-1 (5.1), (5.2), (5.4)

EN 1993-1-1 5.2.1.(3),
EN 1991-1-1 5.2.2.(5)B

Oczywiście, α_{cr} może też być policzone przez programy komputerowe



α_{cr}	α^*
20	1,053
15	1,071
10	1,111
7	1,167
5	1,250
4	1,333
3	1,500
2	2,000
1	$\rightarrow \infty$

α_{cr} wzrasta gdy:

siła krytyczna jest wielokrotnie większa od obciążenia
lub
przemieszczenia poziome i siły poziome mają małą wartość.

Uproszczone obliczenia - statyka liniowa z uwzględnieniem współczynnika zwiększającego α^* dla wszystkich obciążeń poziomych.

\rightarrow #13 / 49

Analiza zaawansowana - statyka nieliniowa (program komputerowy) bez współczynnika zwiększającego α^* .

Oczywiście, α_{cr} może być wyliczone przez program do obliczeń statycznych

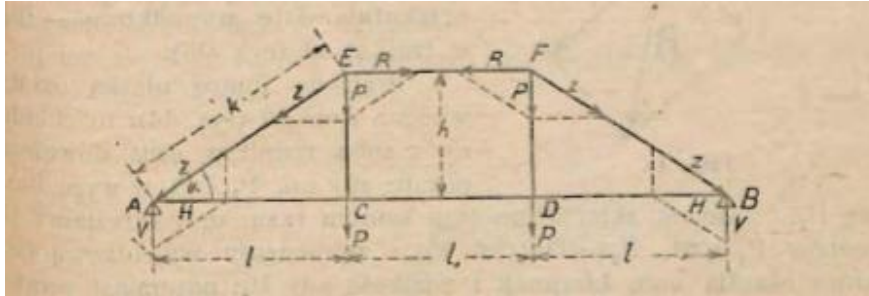
$$\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed} \rightarrow F_{cr} = \alpha_{cr} F_{Ed}$$

Bazując na wartości F_{cr} , można analizować stateczność słupów.

Analiza II rzędu jest istotna podczas obliczania słupów w ramie. Nie zawsze jest przywoływana wprost; w procedurze „C” efekty obciążeń ustalane są dla analizy I rzędu.

	Procedura "A"	Procedura "B"	Procedura "C"
Obciążenia	<ul style="list-style-type: none"> • „zwykłe” • od efektów II rzędu • od imperfekcji przechyłowych • od imperfekcji wygięciowych 	<ul style="list-style-type: none"> • „zwykłe” • (od efektów II rzędu lub od imperfekcji przechyłowych) 	<ul style="list-style-type: none"> • „zwykłe”
Obliczenia	<ul style="list-style-type: none"> • Nośność 	<ul style="list-style-type: none"> • Nośność • $\mu_y = 1,0$ • Stateczność 	<ul style="list-style-type: none"> • Nośność • Wartość μ_y • Stateczność
Uwagi	Duży nakład pracy przy ustalaniu obciążeń, brak obliczeń stateczności.	Średni nakład pracy przy zestawianiu obciążeń i sprawdzaniu niestateczności.	Mały nakład pracy przy zestawianiu obciążeń, duży przy sprawdzaniu niestateczności

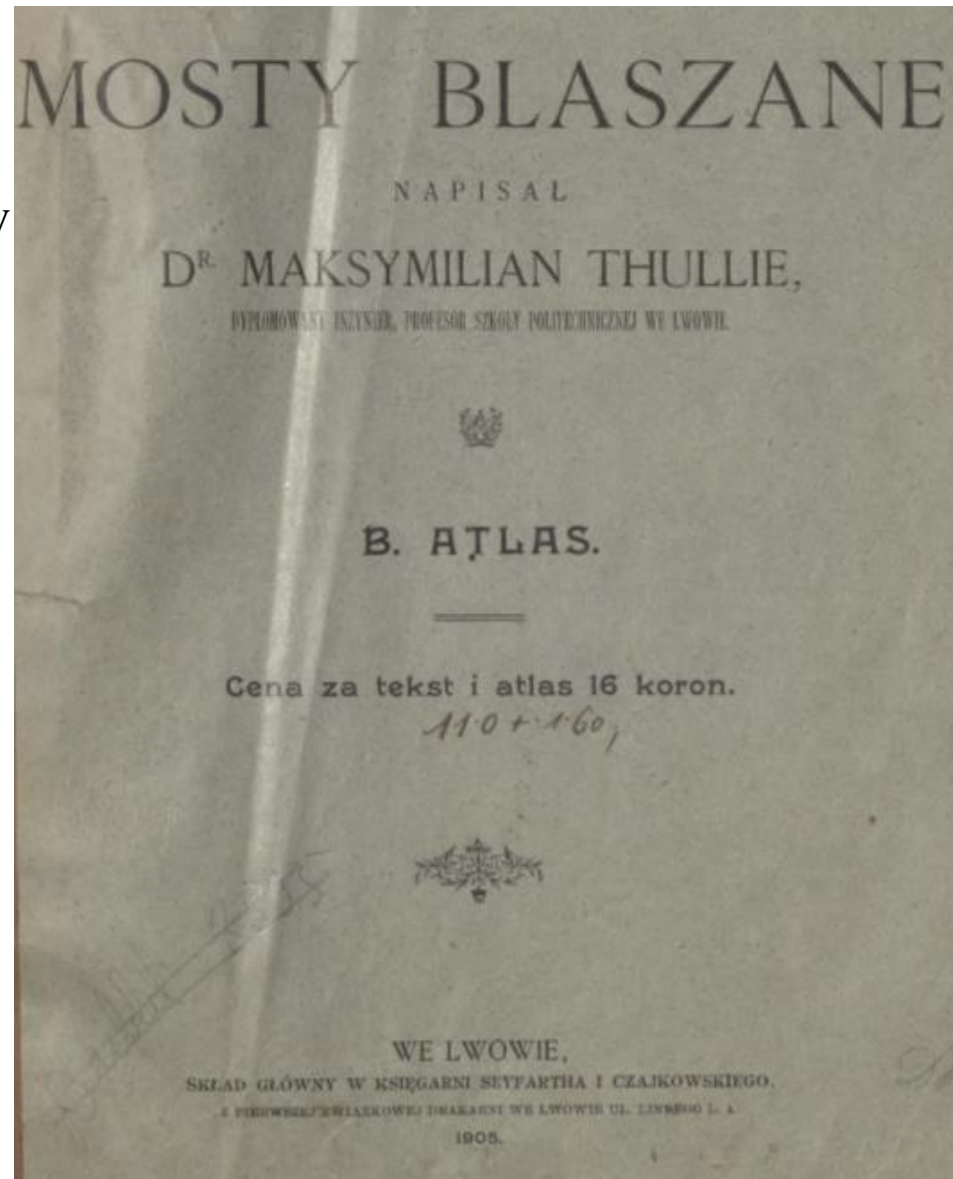
Proste modele 2D były używane przez wiele pokoleń inżynierów do projektowania konstrukcji. Modele 3D, które mają wielokrotnie więcej stopni swobody, pojawiły się na większą skalę dopiero wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów.



Rys: bcpw.bg.pw.edu.pl

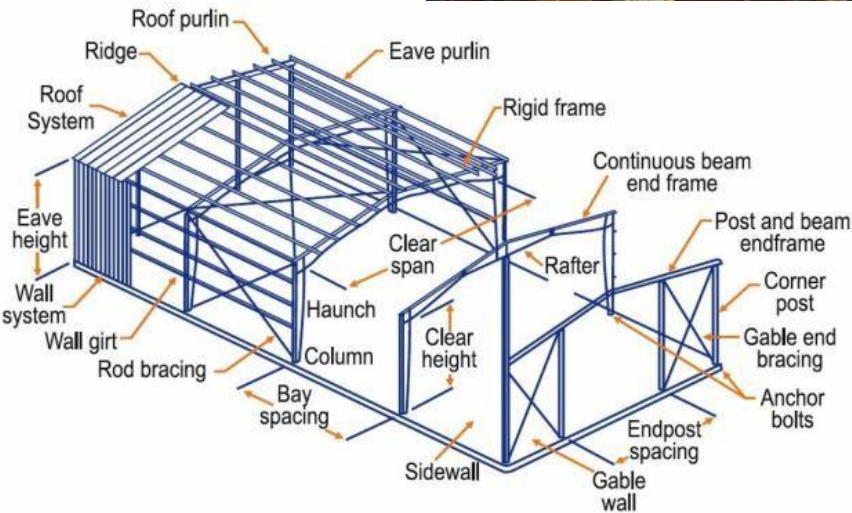
Z wcześniejszego okresu istnieje wiele zaleceń dotyczących kształtowania konstrukcji oraz uproszczonych modeli obliczeniowych dla obciążeń prostopadłych do płaszczyzny głównej.

Model 3D wymaga więcej pracy podczas modelowania. W przypadku 2D potrzeba więcej pracy „wtórnej”, na przykład przy analizie stężeń dachowych.



Rys: repozytorium.biblos.pk.edu.p

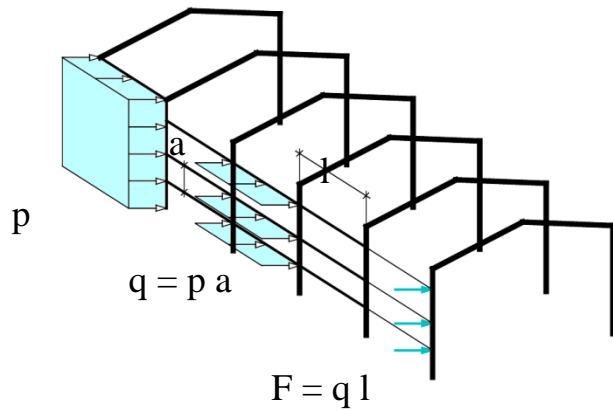
→ #8 / 44



Rys: greenterrahomes.com

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.

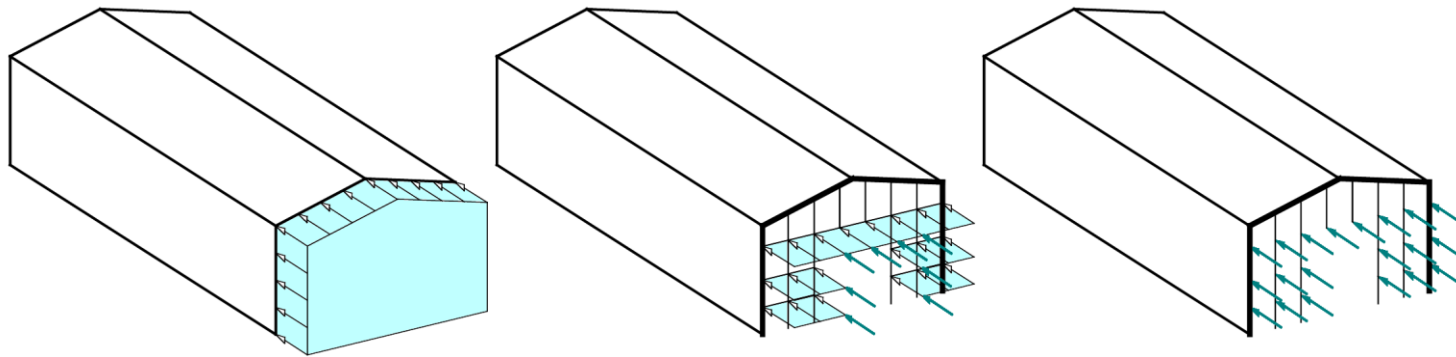
Rys: Autor



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.

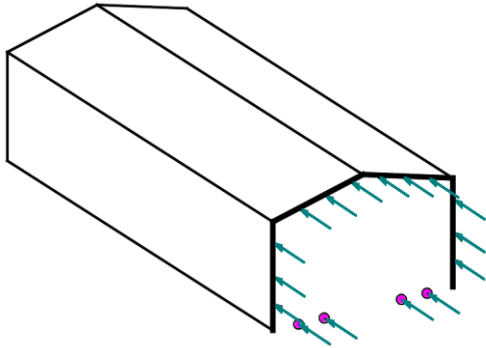
→ #8 / 45

Rys: Autor

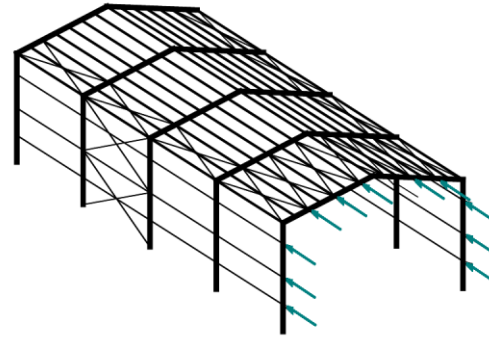


Parcie wiatru na ściany szczytowe: takie samo przeliczenie $p \rightarrow q \rightarrow F$. Siły są przyłożone do ram głównych (prostopadle do ich płaszczyzny) i do słupków w ścianach szczytowych. W przypadku drzwi (w ścianie szczytowej / bocznej) parcie wiatru na drzwi ostatecznie przekłada się na obciążenie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

Rys: Autor

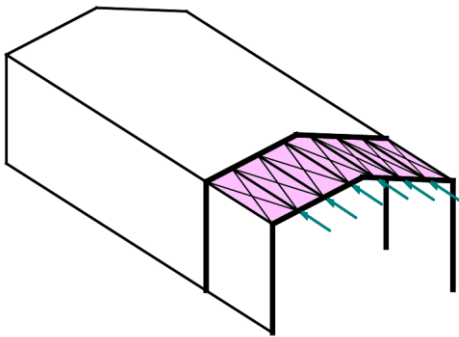


Obciążenie przyłożone do słupków ściany szczytowej przekazywane jest na fundamenty słupków i ramy główne, prostopadłe do ich płaszczyzny. Potencjalnie wywołuje do dwukierunkowe zginanie rygli dachowych i słupów ram głównych.



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

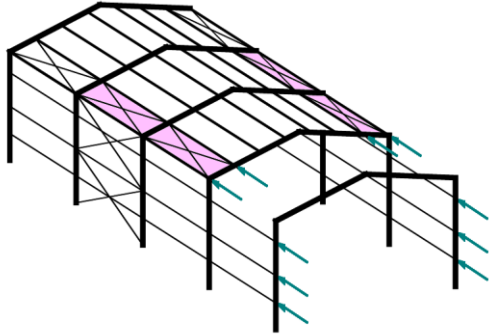
Rys: Autor



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.

→ #8 / 46

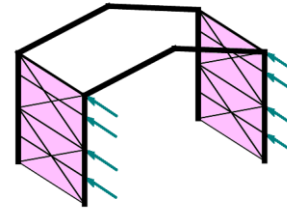
Rys: Autor



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

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

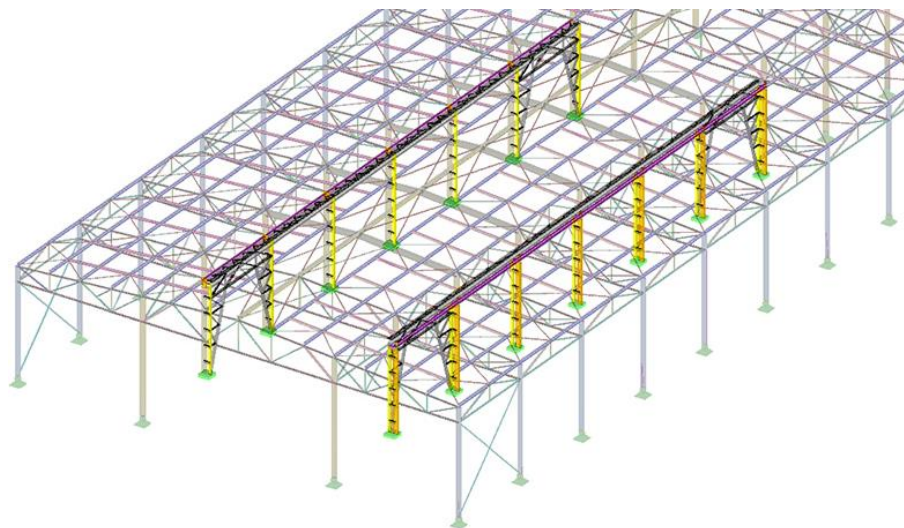
→ #8 / 47



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.

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



Rys: mesilo.pl

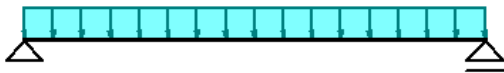
Model 3D: od razu pełna informacja o współpracy między dźwigarami, stężeniami i płatwiami. Obliczenia obejmują dwa kroki:

- 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.

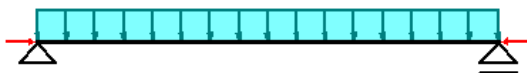
→ #10 / 48

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

Płatew: dwukierunkowe zginanie

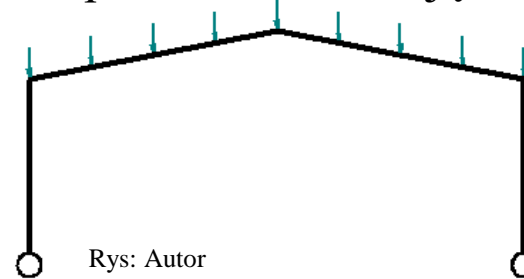


Efekt współpracy dźwigar-
stężenia-płatwie: dodatkowe
siły w dźwigarze i w
płatwiach.

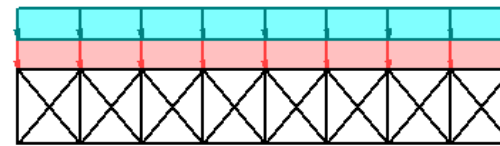


Płatew: zginanie dwukierunkowe
ze ściskaniem (konieczność
ponownego przeliczenia)

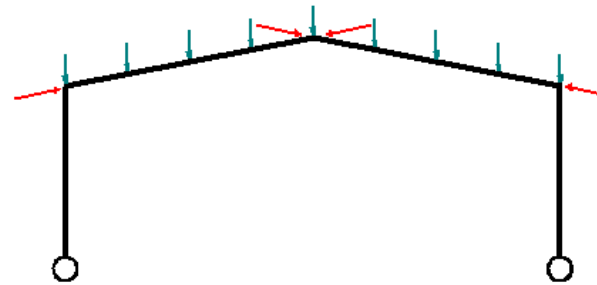
Rama płaska: siła ściskająca w dźwigarze



Obciążenie wiatrem
Siły zastępcze



Stężenie dachowe



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

Analiza sprężysta i plastyczna

W EN 1993-1-1 przedstawiona jest głównie analiza sprężysta. Na temat analizy plastycznej pojawia się tylko kilka odniesień: 5.4.1, 5.4.3, 5.6, BB.3. dodatkowo kilka informacji pojawia się w EN 1993-1-8 5.1.

- Analiza plastyczna może być zastosowana do elementów I i II klasy przekroju i płaszczyźnie symetrii pokrywającej się z płaszczyzną zginania;
- Węzły: ma ją tak wysoką nośność, że przeguby plastyczne pojawiają się w przyległych elementach, lub mają odpowiednią nośność plastyczną i wystarczającą zdolność do obrotu;
- Elementy są zabezpieczone przed zwichrzeniem;
- W przypadku, gdy siła poprzeczna, która przekracza 10% nośności przekroju poprzecznego na ścinanie, jest przyłożona do środka w miejscu przegubu plastycznego, żebra pionowe należy zastosować w odległości $h / 2$ od miejsca przegubu plastycznego, gdzie h to wysokość przekroju.

Przykłady obliczeń obiema metodami w projektach z konstrukcji metalowych na I stopniu studiów:

Projekt	Analiza sprężysta	Analiza plastyczna
Kratownica	Całość	Nic
Strop stalowy	Całość	Nic
Rama hali	Całość	Nic

W przypadku belek wieloprzęsłowych I klasy przekroju, ze względów ekonomicznych zalecana jest analiza plastyczna, choć analiza sprężysta też jest dopuszczalna.

W przypadku ram statycznie niewyznaczalnych wykonanych z elementów I klasy przekroju sytuacja jest bardziej skomplikowana:

Rodzaj obliczeń	Analiza sprężysta (prostsza)	Analiza plastyczna (bardziej ekonomiczna))
Projekt nowej konstrukcji	Preferowana	Dopuszczalna
Analiza istniejącej konstrukcji (ekspertyza, przebudowa, zmiana obciążeń...)	Dopuszczalna	Zalecana

Analiza plastyczna jest też zalecana w sytuacji gdy występują istotne obciążenia wyjątkowe.

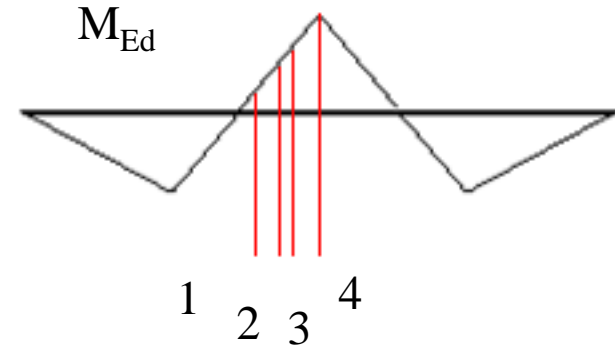
Elementy: EN 1993-1-1 5.4.3.(1) definiuje trzy możliwe rodzaje globalnej analizy plastycznej:

- analizę sztywno-plastyczną;
- analizę sprężysto-plastyczną;
- nieliniową analizę plastyczną.

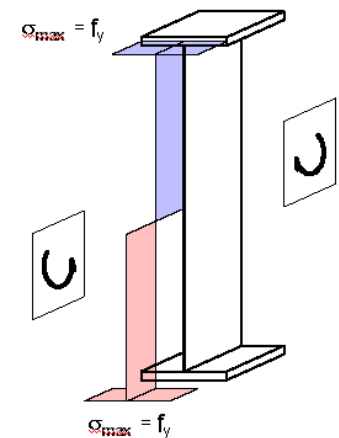
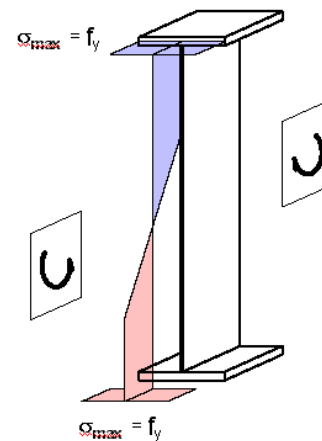
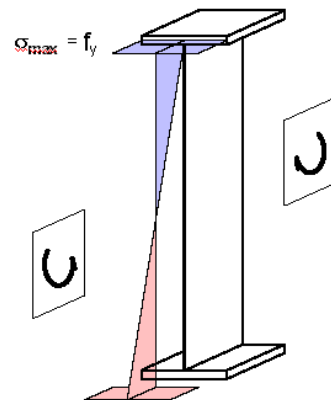
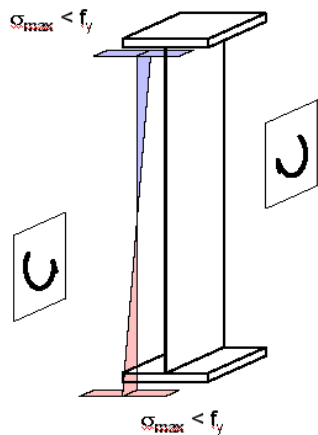
Węzły: EN 1993-1-8 5.1 definiuje tylko dwa rodzaje analizy:

- analizę sztywno-plastyczną;
- analizę sprężysto-plastyczną.

Analiza sprężysto-plastyczna uwzględnia sprężyste zachowanie się materiału w elemencie. W zależności od wartości momentu zginającego, w przekroju może pojawić rozkład naprężeń sprężysty, sprężysto-plastyczny lub pełne uplastycznienie.

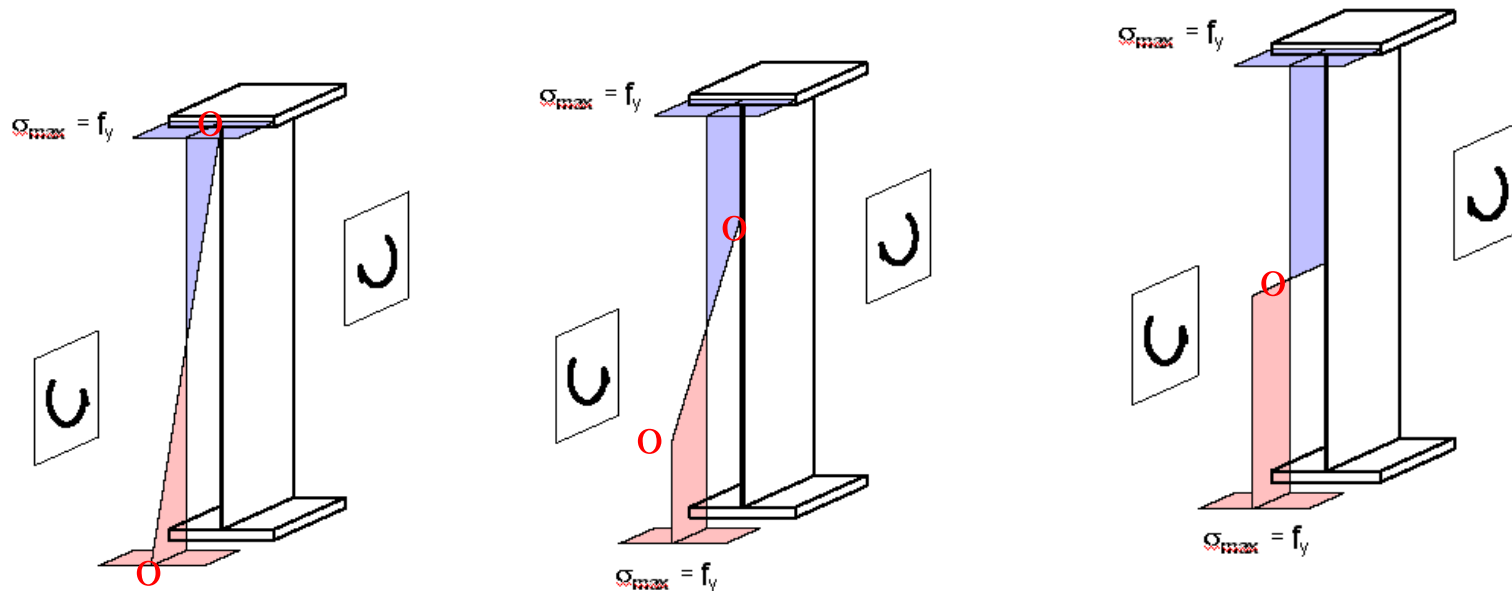


Dr inż. Antoni

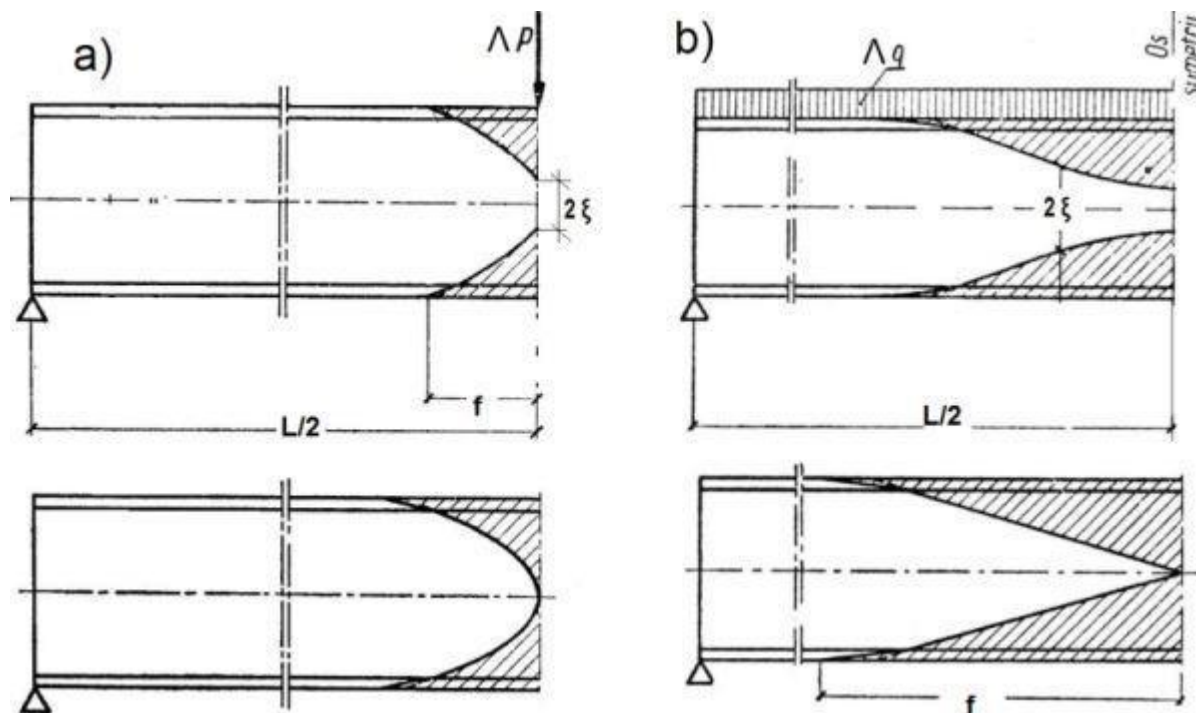


Punkty, w których kończy się stan sprężysty i zaczyna stan plastyczny \circ ($\sigma_{\max} = f_y$), tworzą po długości belki specyficzny kształt, front plastyczny.

Rys: Autor



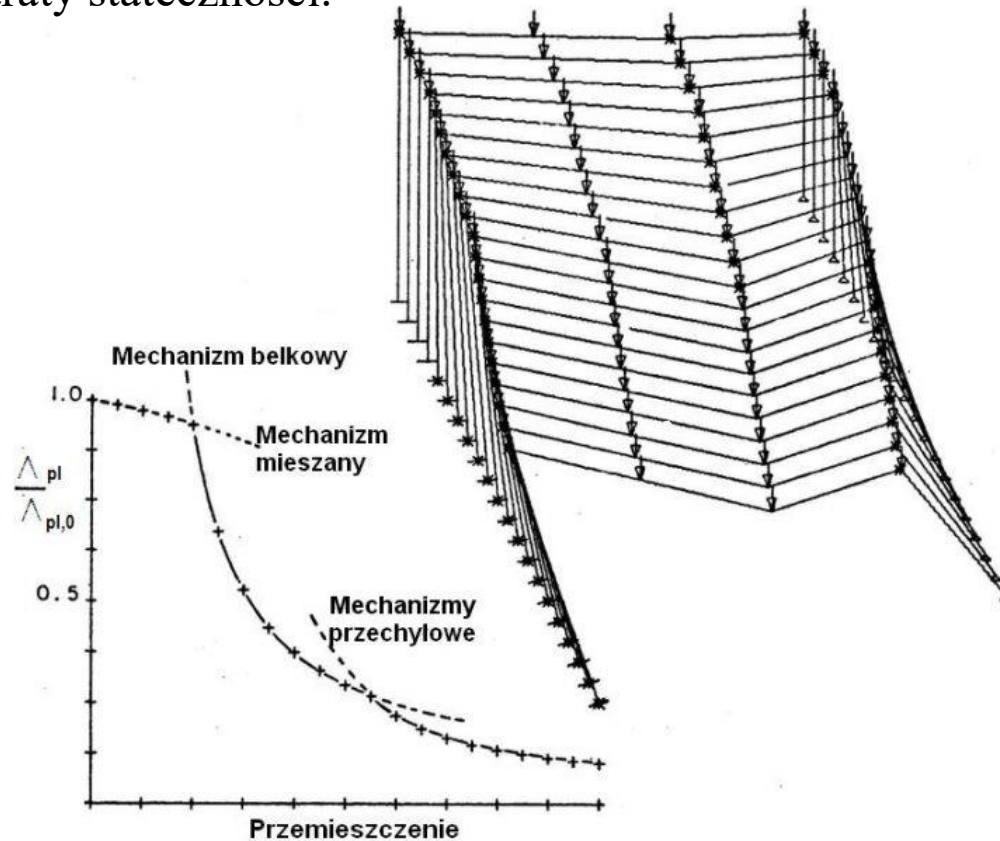
Kształt frontu jest specyficzny dla konkretnego sposobu obciążenia.



Rys: chodor-projekt.net

Uwzględnienie strefy sprężystej i sprężysto-plastycznej sprawia, że przegub plastyczny należy traktować jako obszar, a nie punkt. Ponadto uwzględnić też trzeba dodatkowe efekty sprężyste i sprężysto-plastyczne (np. wartości ugięć są inne niż w metodzie sztywno-plastycznej).

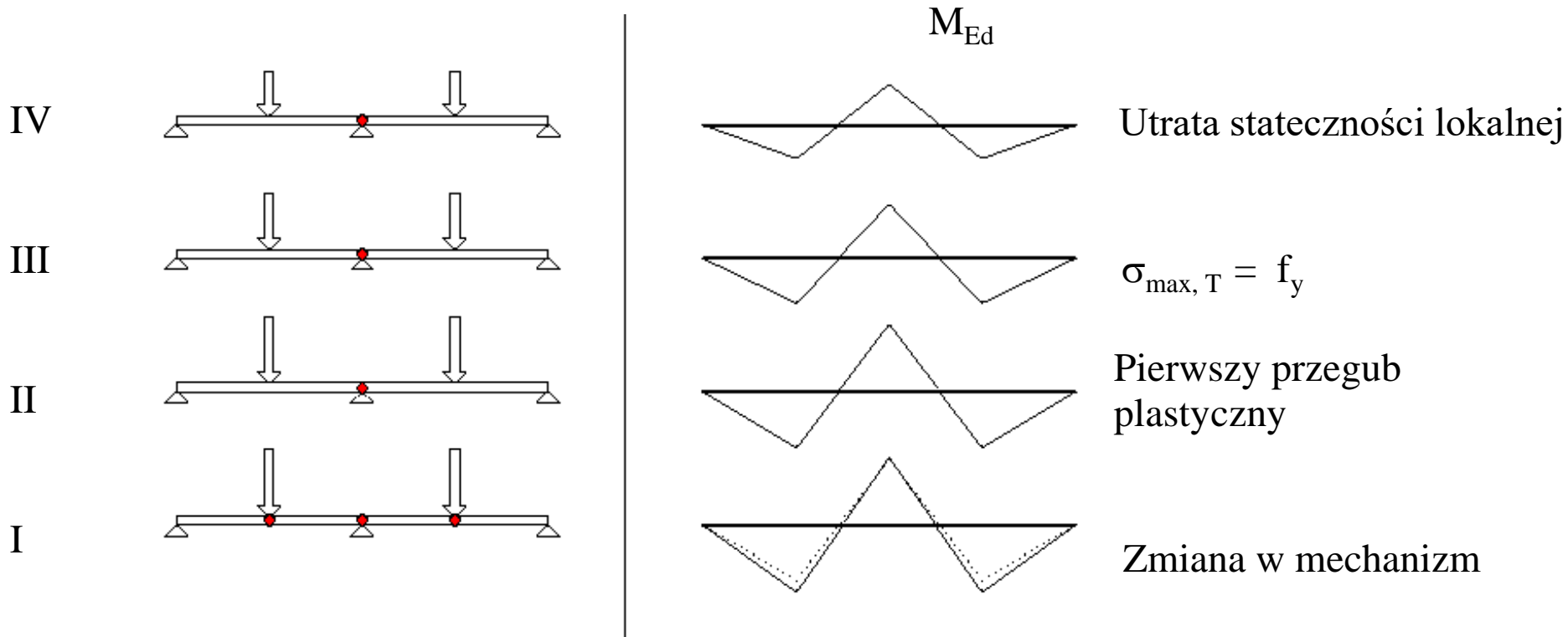
Nieliniowa analiza plastyczna jest najbardziej skomplikowanym rodzajem analizy. Uwzględnia się w niej nie tylko rozwój frontu plastycznego w funkcji przyłożonego obciążenia, ale i sprawę wpływu deformacji na rozkład sił przekrojowych (efekty II rzędu) oraz kwestię form utraty stateczności.



Rys: chodor-projekt.net

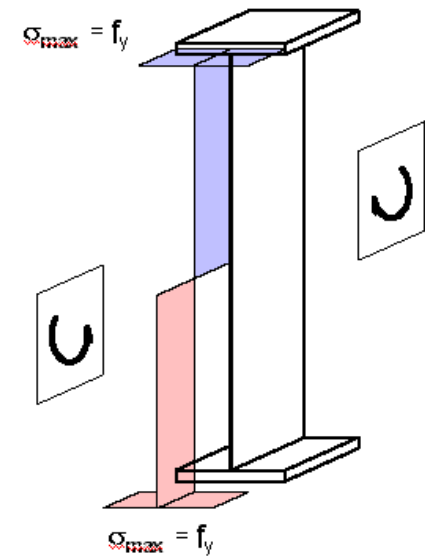
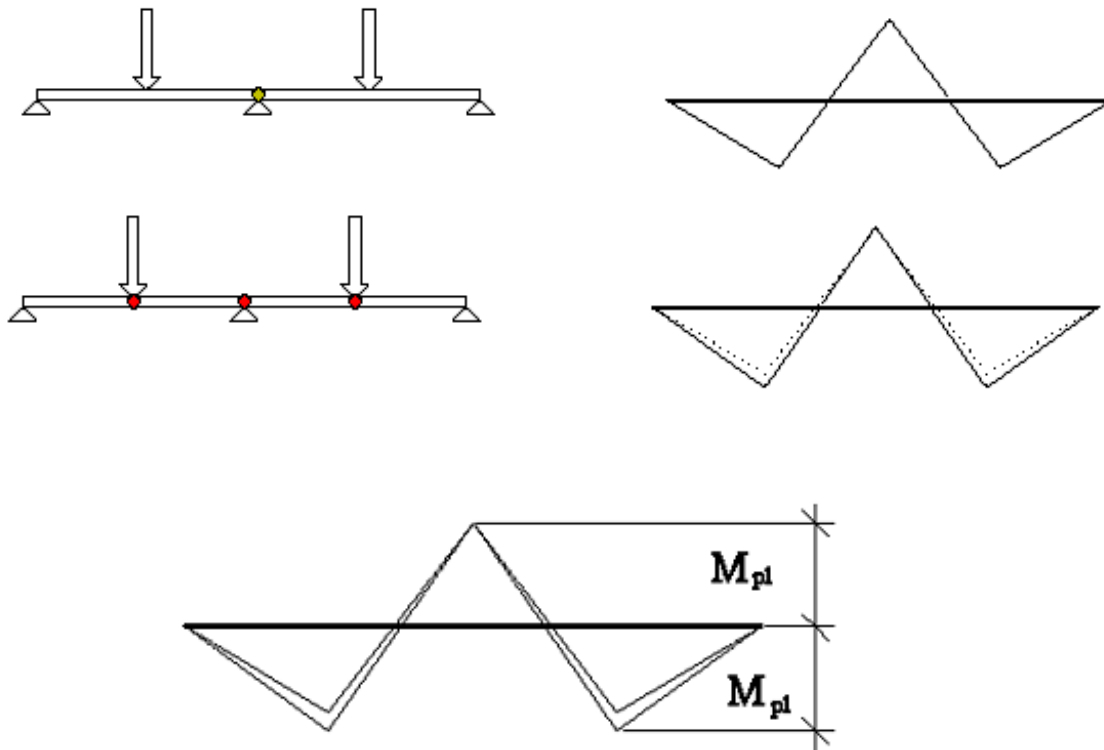
Przykładowo: złożona ścieżka równowagi, uwzględniająca fakt narastania sił ściskających w ryglu na skutek deformacji ramy i wtórnych efektów od sił ściskających.

Analiza sztywno-plastyczna (najprostsza) zakłada, że konstrukcja składa się z segmentów o nieskończonej sztywności, połączonych przegubami istniejącymi w konstrukcji od początku lub przegubami plastycznymi. Przegub upraszcza się do punktu. Metoda ta jest wykorzystywana w obliczeniach redystrybucji momentów zginających w belkach.



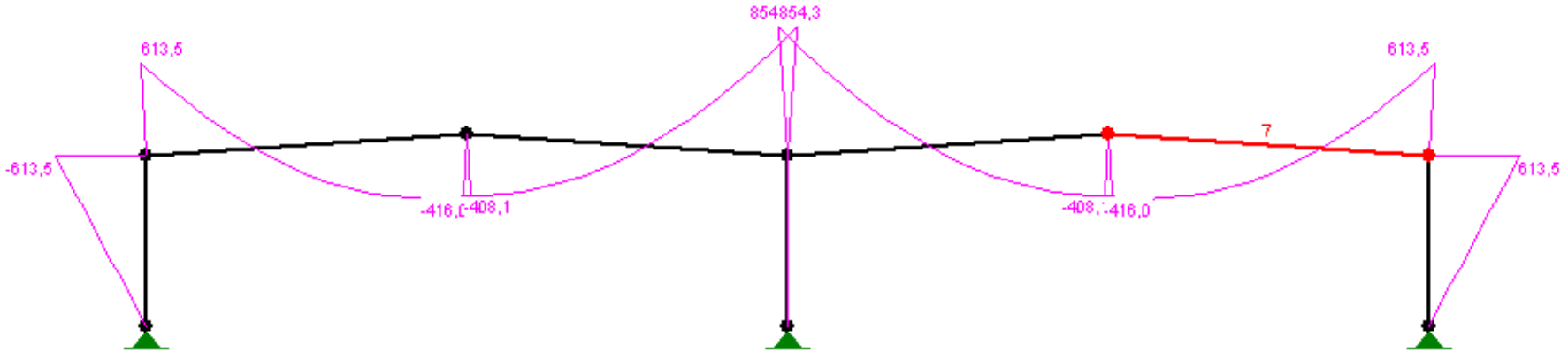
Rys: Autor

Analiza sztywno-plastyczna jest zazwyczaj wystarczająca do przeprowadzenia obliczeń. Przykładem może być analiza redystrybucji momentów zginających na belce wieloprzęsłowej i tworzenie się kolejnych przegubów plastycznych. Każde utworzenie przegubu zmienia schemat statyczny i sposób obciążenia belki (przeguby plastyczne i momenty plastyczne w przegubach). Zniszczenie następuje, gdy przegubów jest tak dużo, iż belka zmienia się w mechanizm

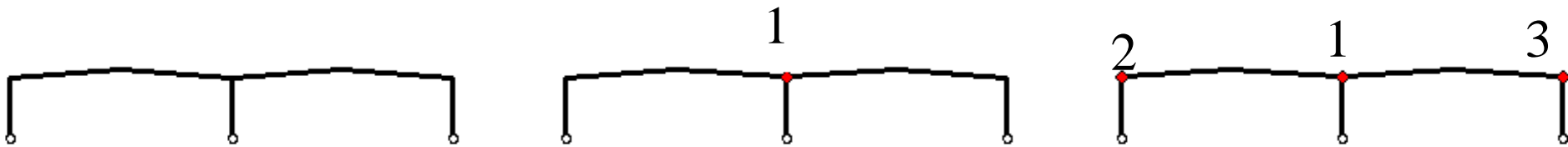


Rys: Autor

Analogicznie jest w przypadku ram – tylko że tutaj nie zawsze da się łatwo ustalić kolejność i miejsca tworzenia się przegubów plastycznych. Łatwym przypadkiem jest symetryczne obciążenie symetrycznej ramy.



Rys: Autor



Przed redystrybucją: $M_{Ed., 1} = W_{pl} f_y > M_{Ed., 2} = M_{Ed., 3}$

Po redystrybucji: $M_{Ed., 1} = M_{Ed., 2} = M_{Ed., 3} = W_{pl} f_y$

Zdolność do obrotu jest wystarczająca gdy (EN 1993-1-8 6.4):

Węzeł	$M_{j, Rd}$ zależy od	Wymagania dodatkowe	Zdolność do obrotu ϕ_{end} [rad]
Na śruby	Środnika słupa w strefie ścinanej	$d_w / t_w \leq 69 \varepsilon$	Wystarczająca dla analizy plastycznej, jeśli spełnione jest wymaganie dodatkowe
	Zginanej półki słupa / blachy czołowej / nakładki z kątownika	$t_p \leq 0,36 d \sqrt{(f_{ub} / f_y)}$	
Spawany		Brak żeber poziomych na słupie	$\geq 0,015$
	NIE zależy od środnika słupa w strefie ścinanej	Żebra poziome na słupie jedynie w strefie ściskania poprzecznego	$\geq 0,025 h_c / h_b$

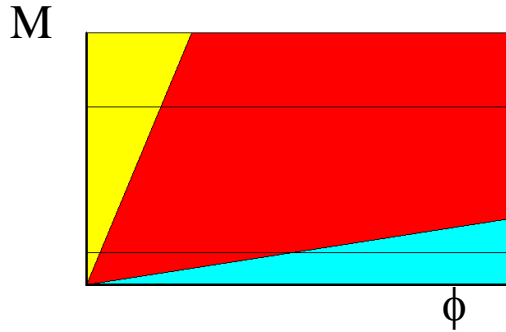
Dla węzłów spawanych należy sprawdzić warunek:

$$\text{zdolność do obrotu} \geq 1,5^\Psi M_{j, Rd} / S_{j, ini}$$

gdzie Ψ , $M_{j, Rd}$, $S_{j, ini}$ zgodnie z informacjami z poprzednich semestrów.

Węzły w metodzie plastycznej klasyfikowane są w oparciu o ich nośność $M_{j, Rd}$ (w analizie sprężystej w oparciu o sztywność początkową $S_{j, ini}$):

Rys: Autor

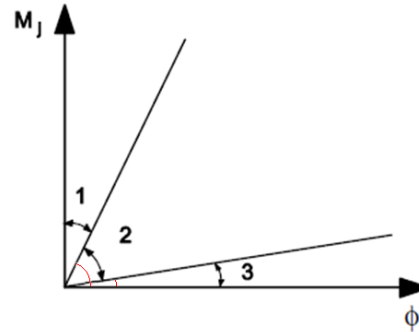


Sprężysta ($S_{j, ini}$):

Przegub

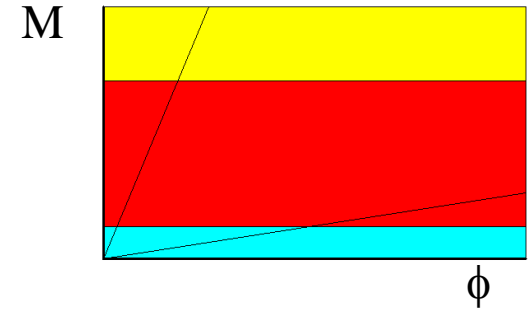
Podatny

Sztywny



Rys: EN 1993-1-8 fig 5.4

Rys: Autor



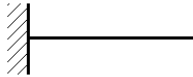
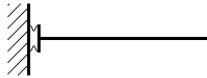
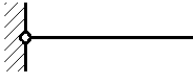
Sztywno-plastyczna ($M_{j, Rd}$):

Nominalnie przegubowy

Niepełnoosny

Pełnoosny

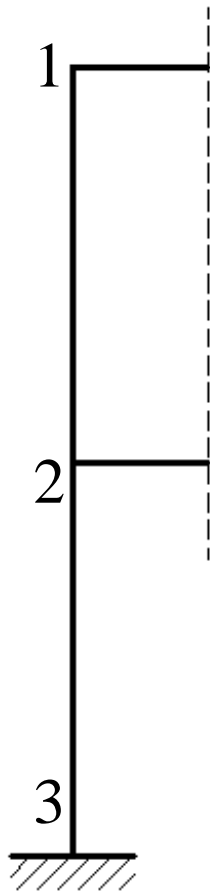
Analiza sprężysta i plastyczna węzłów:

Analiza	Sprężysta	Model węzła	Plastyczna
Klasyfikacja według	$S_{j, ini}$		$M_{j, Rd} - \phi_j$
Rodzaj węzła	Sztywny		Pełnonośny
	Podatny		Niepełnonośny
	Przegubowy		Nominalnie przegubowy

Rys: Autor

→ #14 / 81

Granice pomiędzy odmiennymi typami węzłów w analizie sztywno-plastycznej:



Dla każdego węzła liczymy nośność $M_{j, Rd}$

M_{ref}	1	$\min (M_{c, pl, Rd} ; M_{b, pl, Rd})$
	2	$\min (2 M_{c, pl, Rd} ; M_{b, pl, Rd})$
	3	$M_{c, pl, Rd}$

Węzeł	$M_{j, Rd}$
Pełnośny	$\geq M_{ref}$
Niepełnośny	$0,25 M_{ref} - M_{ref}$
Przegubowy	$\leq 0,25 M_{ref}$

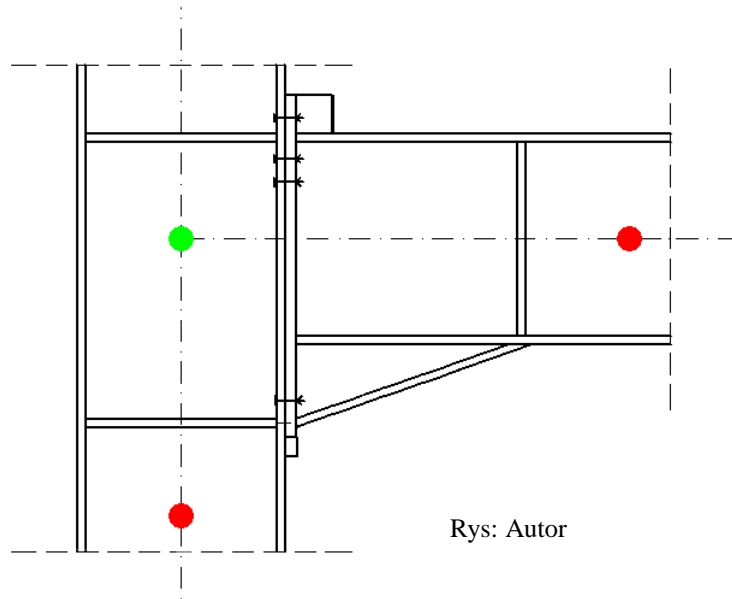
Rys: Autor

EN 1993-1-8 5.2.3.2, 5.2.3.3

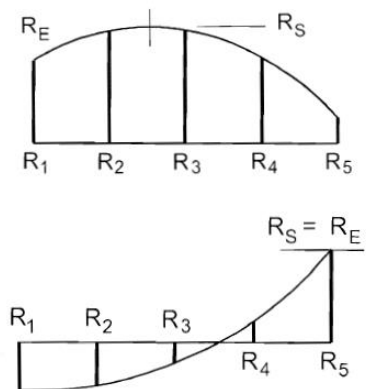
Jeżeli

$$M_{j, Rd} \geq 1,2 M_{ref}$$

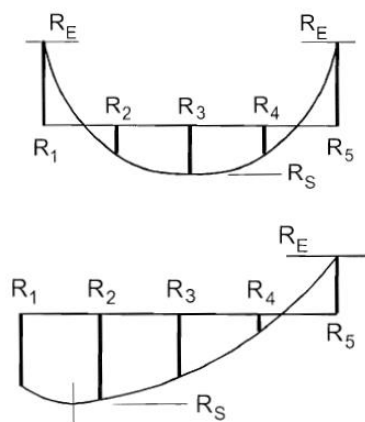
to nośność węzła jest dużo większa od nośności słupa lub belki. Przegub plastyczny pojawi się w słabszym miejscu: słupie lub belce, a nie w węźle. W takim przypadku nie jest konieczne sprawdzenie zdolności węzła do obrotu.



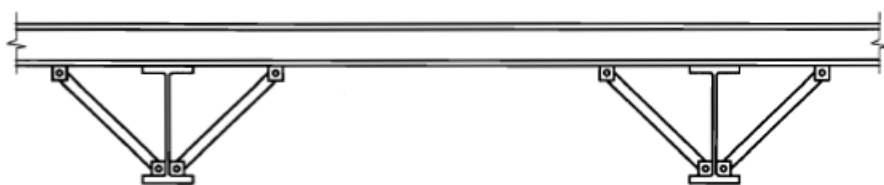
Rys: Autor



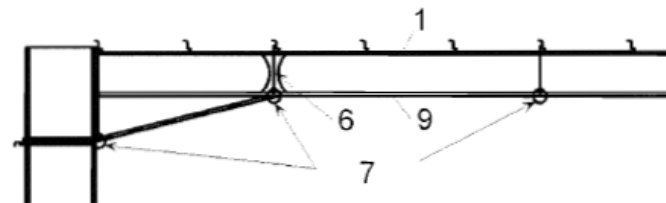
EN 1993-1-1 fig BB.5



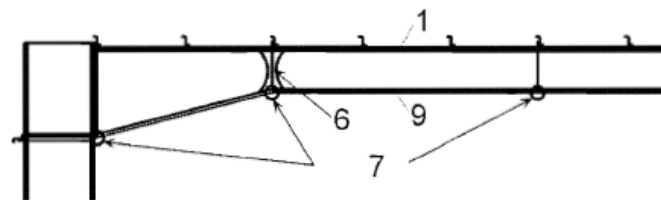
Testy i eksperymenty na modelach pełnowymiarowych oraz analiza numeryczna pokazują, że zachowanie konstrukcji w zakresie plastycznym wygląda inaczej w przypadku utraty stateczności, a inaczej bez utraty stabilności. Zasady przedstawione w Eurokodzie dotyczą sytuacji bez utraty stabilności. Wiele dodatkowych wymagań dotyczących maksymalnej odległości między przegubem z tworzywa sztucznego a stężeniem przedstawiono w EN 1993-1-1 ap. BB3. Spełnienie tych wymagań zapobiega utracie stabilności konstrukcji w zakresie plastycznym.



Rys: EN 1993-1-1 fig 6.5



EN 1993-1-1 fig BB.2

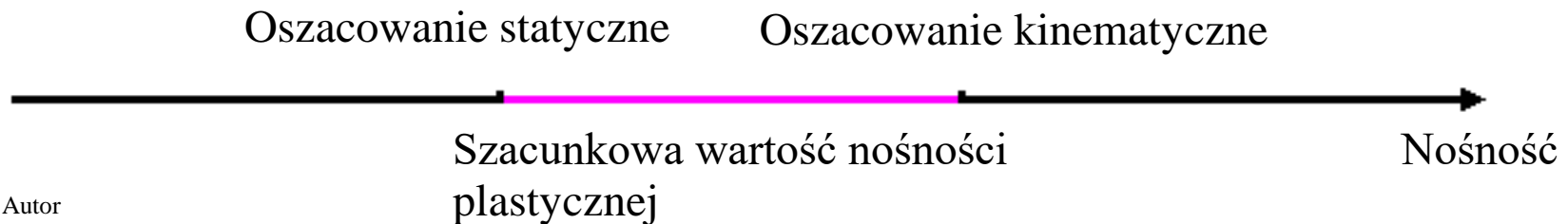


Przy analizie plastycznej ram przydają stosuje się dwa twierdzenia:

1. Twierdzenie kinematyczne: *Konstrukcja zamienia się w mechanizm (ulega zniszczeniu), jeżeli dla kinematycznie dopuszczalnego pola przemieszczeń przyrost pracy sił zewnętrznych równy jest przyrostowi pracy sił wewnętrznych*

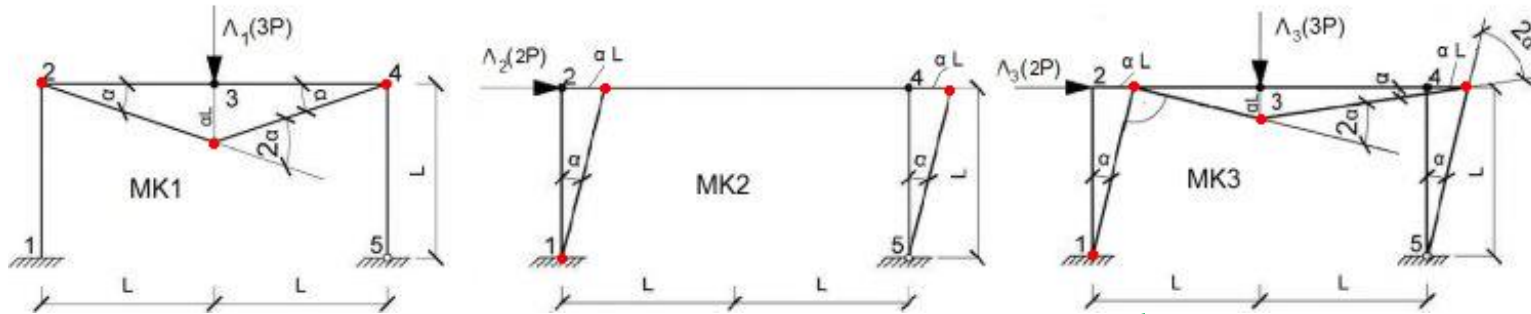
2. Twierdzenie statyczne: *Dowolny, statycznie dopuszczalny stan naprężenia (nigdzie warunek plastyczności nie jest naruszony), który jest w równowadze z obciążeniem zewnętrznym zapewnia dolną granicę oszacowania nośności plastycznej.*

Twierdzenia te pozwalają na oszacowanie od góry i od dołu nośności plastycznej. Nie zawsze jesteśmy w stanie podać dokładną wartość nośności plastycznej.

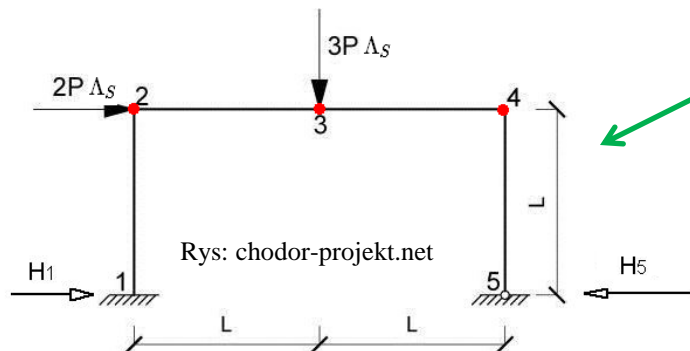


Rys: Autor

Sposób obliczania: w oparciu o zasadę prac wirtualnych określamy schemat niszczenia, (przy którym praca wirtualna jest najmniejsza) i odpowiadające jej obciążenie niszczące (oszacowanie kinematyczne – od góry).



Rys: chodor-projekt.net



Rys: chodor-projekt.net

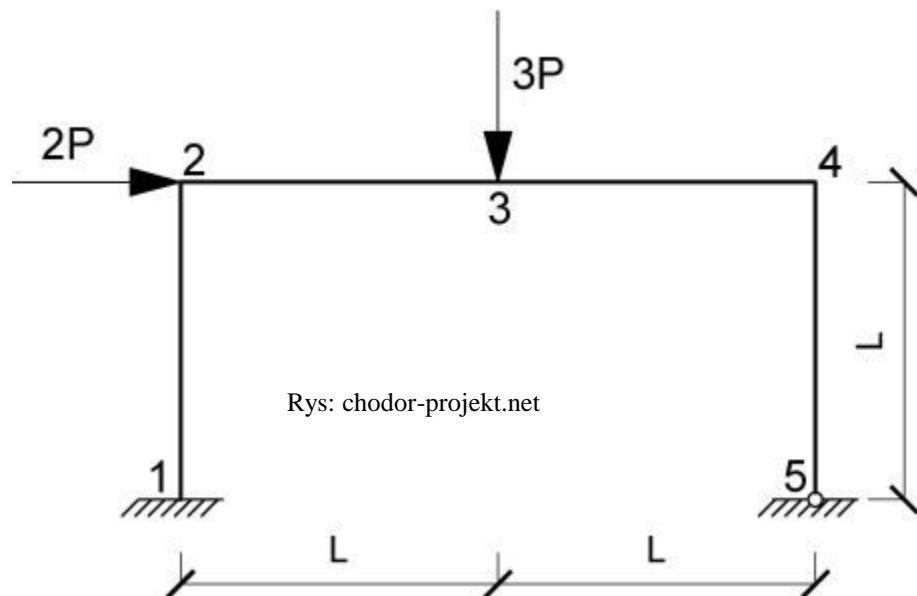
Następnie dla ustalonego wcześniej schematu niszczenia analizujemy równowagę obciążeń i reakcji (oszacowanie statyczne – od dołu). Po uwzględnieniu przegubów plastycznych schemat jest statycznie wyznaczalny.

Przykład:

$L = 5 \text{ m}$, $P = 90 \text{ kN}$

Siła pozioma = 180 kN ($2 \times 90 \text{ kN}$)

Siła pionowa = 270 kN ($3 \times 90 \text{ kN}$)



Analiza	Przekrój słupa i rygla	Masa jednej ramy	Wnioski
Sprężysta („klasyczne” obliczenia)	IPEO 450	1848 kg	
Plastyczna (oszacowanie górne i dolne)	IPEA 500	1588 kg	Rama jest o 14% lżejsza

Szczegóły konstrukcyjne

W halach stalowych czasem spotyka się rozwiązania specyficzne, odmienne od tych najczęściej stosowanych, przedstawianych wcześniej. Dotyczą kształtu hali, schematu statycznego oraz typów węzłów.



Rys: bryla.pl



Rys: rosahale.pl



Rys: konar.eu

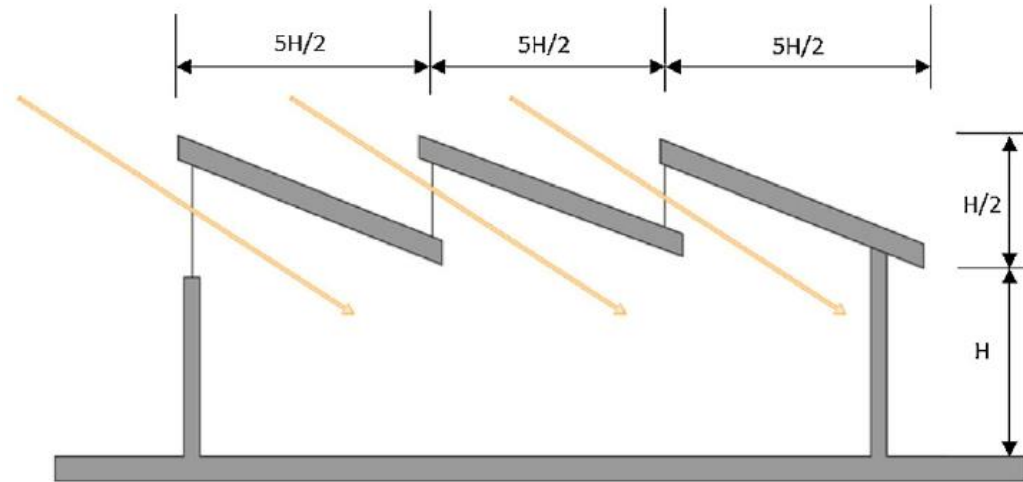
Oświetlenie wnętrza



Rys: globalprayers.info



Rys: researchgate.net

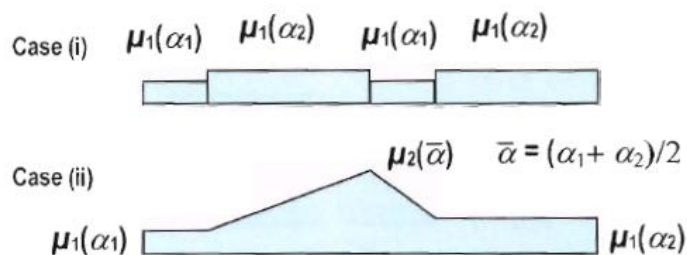


Jednym z problemów przy korzystaniu z hal o dużych rozpiętościach jest brak światła. Aby uniknąć kosztów związanych z oświetleniem elektrycznym, hale doświetlane są światłem słonecznym za pomocą świetlików lub okien w dachach piłokształtnych.

W takiej sytuacji trzeba pamiętać o specyficznym obciążeniu śniegiem i wiatrem.

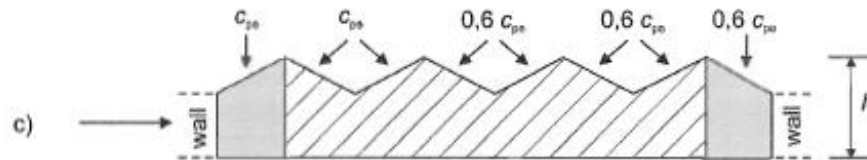


Rys: bryla.pl



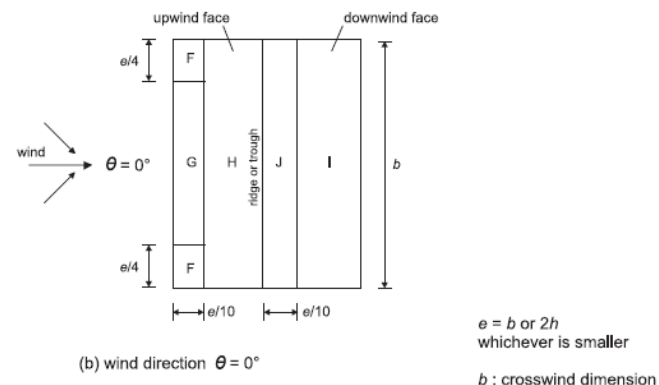
Śnieg

Rys: EN 1991-1-3 fig. 5.4



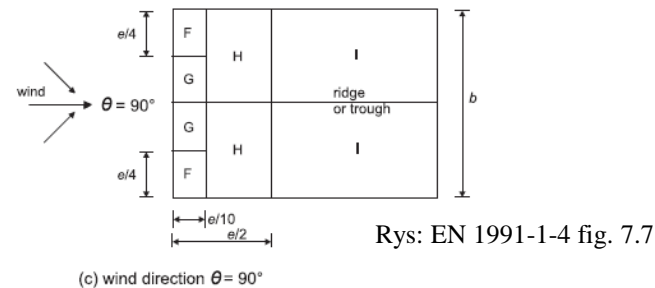
Wiatr

EN 1991-1-7 fig. 7.10



„Wiatr „prostopadły”-
obciążenie pełne dla
pierwszej, drugiej i
trzeciej połaci,
zredukowane dla
kolejnych do 60%.

Wiatr „równoległy” –
brak dodatkowych
efektów.



Rys: EN 1991-1-4 fig. 7.7



Rys: pl.all.biz



Rys: euroexport.pl



Rys: euroexport.pl

Nowoczesne świetliki są rozwiązaniem systemowym.

W przypadku świetlików kalenicowych stosuje się dodatkowe stężenia pionowe pod ściankami świetlika.



Rys: imagecomtech.com



Rys: wascoskylights.com

Świetliki pozwalają uzyskać ciekawe rozwiązania architektoniczne.



Rys: kingspan.com



Photo: skyspec.com

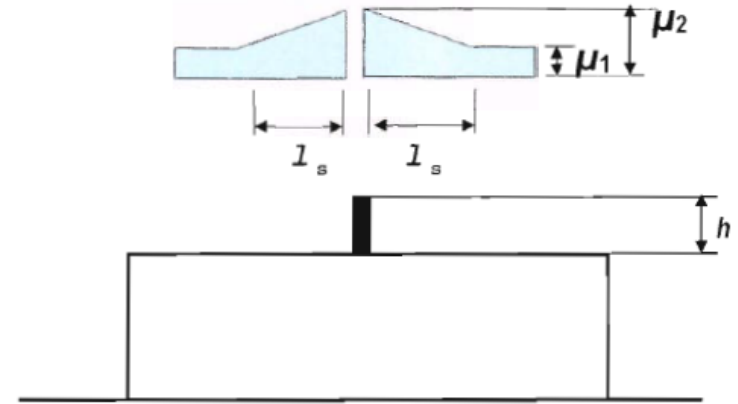


Photo: EN 1991-1-3 fig. 6.1

Oczywiście świetliki stanowią przeszkodę, która może powodować gromadzenie się śniegu na dachu.

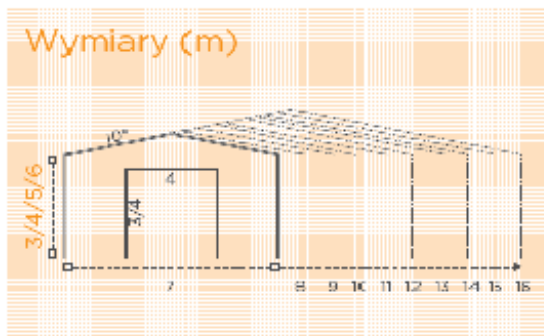


Photo: coastalengineeringcompany.com

Systemy prefabrykowane

Zgodnie z informacjami, przedstawionymi na #t / 6, w halach „lekich” mamy do czynienia wyłącznie z obciążeniami klimatycznymi i ciężarem własnym. Często brak jest istotnego obciążenia użytkowego..

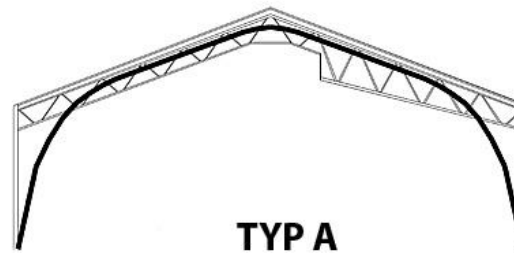
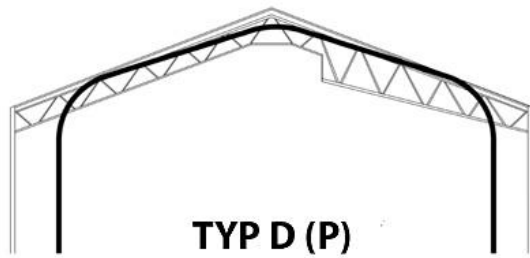
Idea hali prefabrykowanej: składa się ona z powtarzalnych modułów. Są one przystosowane do przeniesienia najbardziej niekorzystnych obciążeń klimatycznych. Różne rozmiary hal uzyskuje się przez zestawienie różnych modułów.



Rys: frisomat.pl

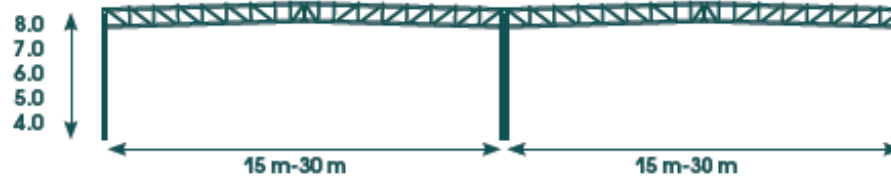
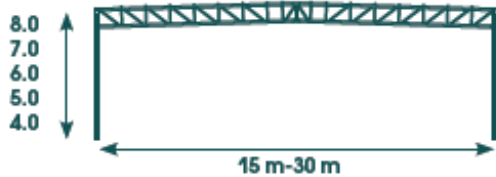
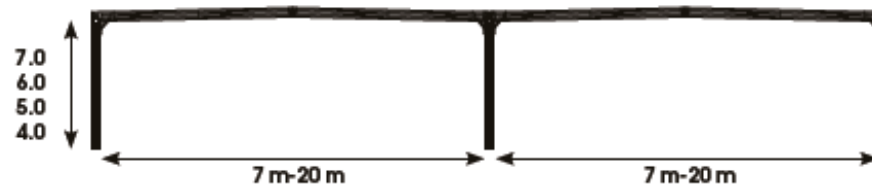


Rys: tgpolska.com



TYP D (P)

TYP A



Rys: frisomat.pl



Rys: besta-hale.pl

Prefabrykowane systemy hal pozwalają na dobre dostosowanie wielkości hali do potrzeb i wielkości działki.

Hale ze ściągami

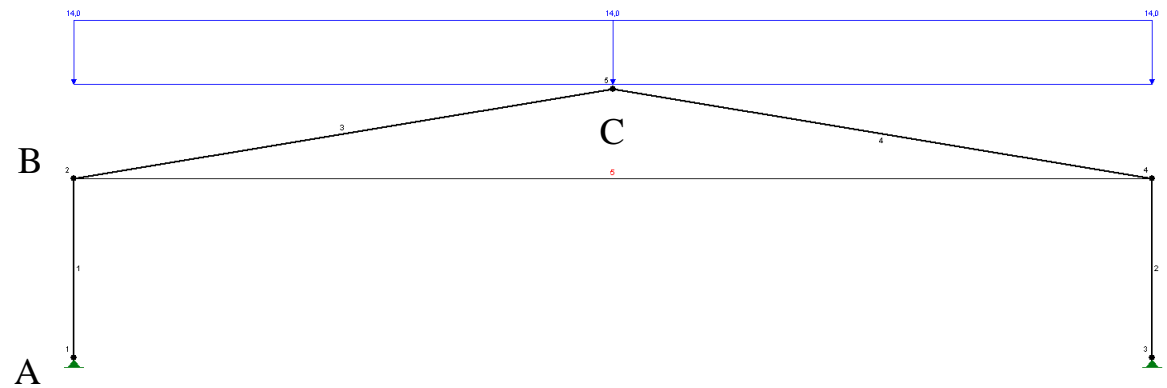
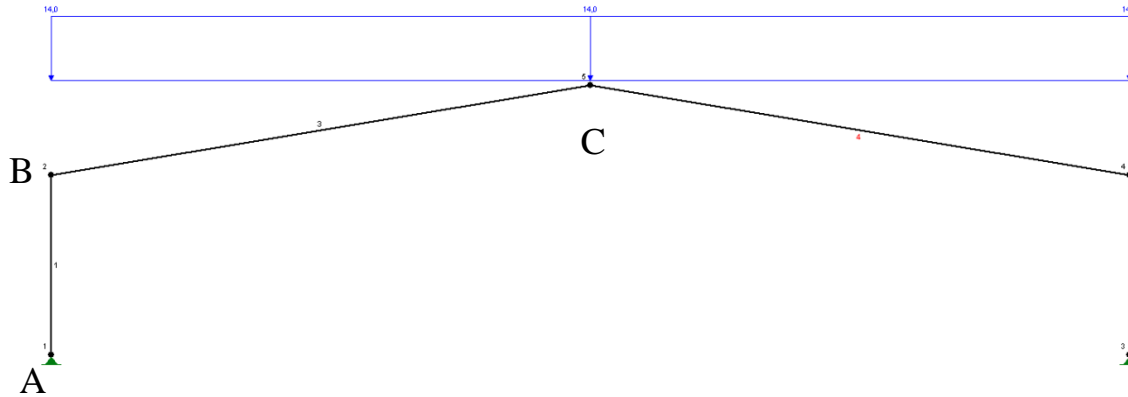
Istotna redukcja momentów zginających w dźwigarach dachowych i słupach, duża siła rozciągająca w ściągach.



Rys: lindab.com

Porównanie wyników

Dwie ramy, rozpiętość 2 x 15,00 m, wysokość 5,00 + 2,50 m, obciążenie ciągłe 14 kN / m:



Rys: Autor

Element	Punkt	Rama zwykła			Rama ze ściągiem		
		M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	N_{Ed} [kN]
Dźwigar	C	375,8	28,4	170,2	271,1 (0,721)	112,0 (3,944)	708,6 (4,163)
	$M_{opposite}$	-403,6			-163,2 (0,404)		
	B	862,6	191,2	206,8	237,7 (0,276)	107,6 (0,563)	672,0 (3,250)
Słup	B	862,6	172,5	222,6	237,7 (0,276)	47,5 (0,275)	222,6 (1,000)
	A	0,0	172,5	226,8	0,0	47,5 (0,275)	226,8 (1,000)
Ściąg							- 633,7



Rys: traskostal.pl



Rys: obud.pl

W większości przypadków główna konstrukcja hali jest schowana pod obudową. Odwrotnie w przypadku hal chłodniczych - konstrukcja główna jest bardzo często widoczna na zewnątrz.



Rys: miesiecznik.murator.pl

Wynika to z fundamentalnej zasady: izolacja termiczna zakładana jest pomiędzy konstrukcją główną a niską temperaturą. W większości przypadków konstrukcję należy chronić od zewnątrz przed niskimi temperaturami zimą. W chłodniach niska temperatura występuje wewnątrz, niezależnie od pory roku. W takiej sytuacji izolację termiczną umieszcza się od wewnątrz, konstrukcja główna - na zewnątrz.

Pokrycia bezpłatwiowe

Płatwie nie zawsze są stosowane w konstrukcji dachu. Istnieje możliwość zastosowania blach fałdowych o dużej wysokości fali. Są wystarczająco sztywne, aby wytrzymać obciążenia zewnętrzne (ciężar własny, obciążenia klimatyczne), jeśli są ustawione prostopadle do osi dźwigarów.



Rys: cobouw.pl



Rys: g-5.pl

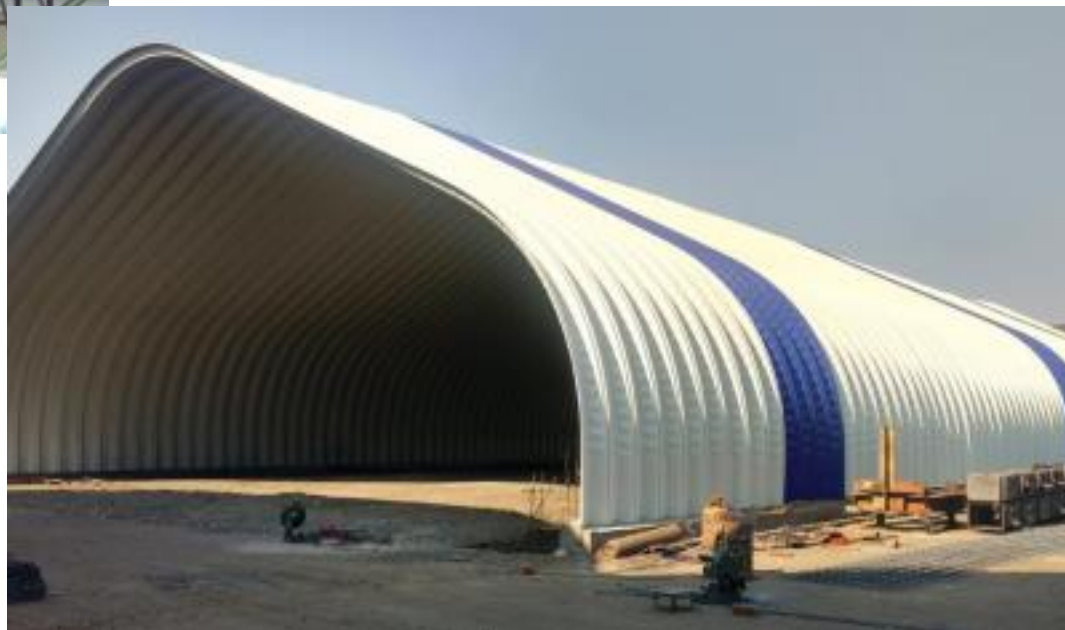


Innym przykładem takiego rozwiązania mogą być (obecnie niemal niestosowane) żelbetowe płyty oparte na dźwigarach głównych.

Są tu też zaliczane samonośne konstrukcje powłokowe z blach fałdowych.



Rys: elbet.pl



Rys: surfacesreporter.com

Konstrukcje typu mix



Rys: bca.gov.sg

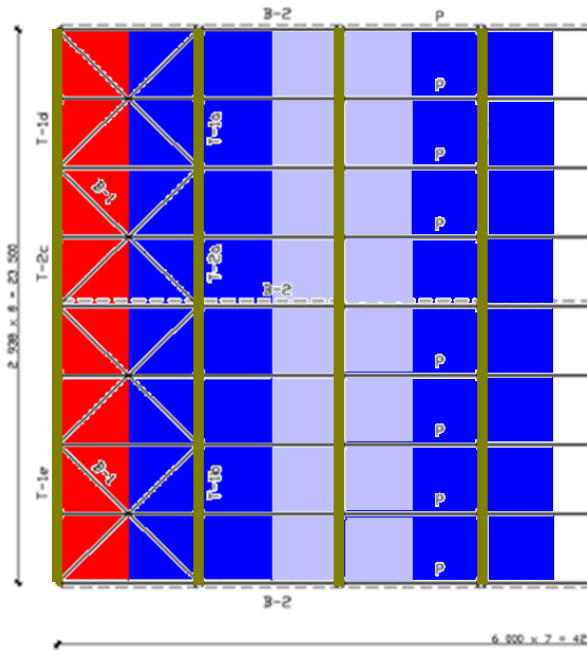


Rys: deltabi.it

Niektóre analizy ekonomiczne pokazują, że system „stalowe dźwigary – żelbetowe słupy” może być tańszy niż dźwigary i słupy stalowe.

Ściana szczytowa

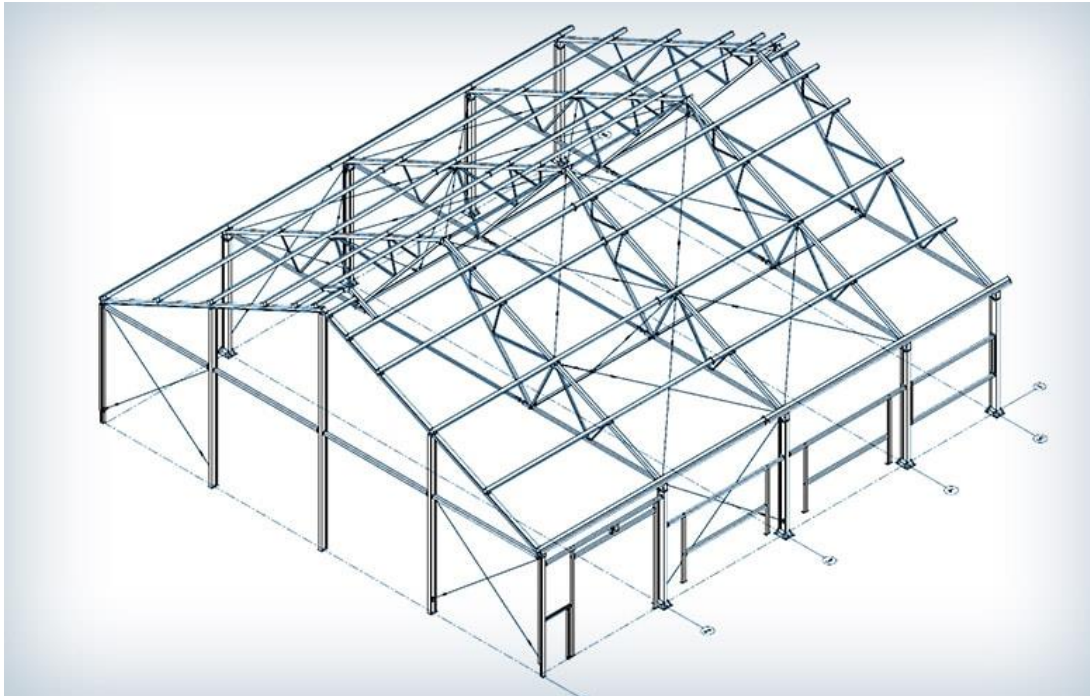
Obciążenia pionowe przyłożone do dźwigara dachowego zależą od odległości między dźwigarami. Z tego powodu obciążenie ramy skrajnej jest o połowę mniejsze w porównaniu z innymi. Istnieje możliwość zastosowania mniejszej ramy skrajnej lub jej całkowitego wyeliminowania.



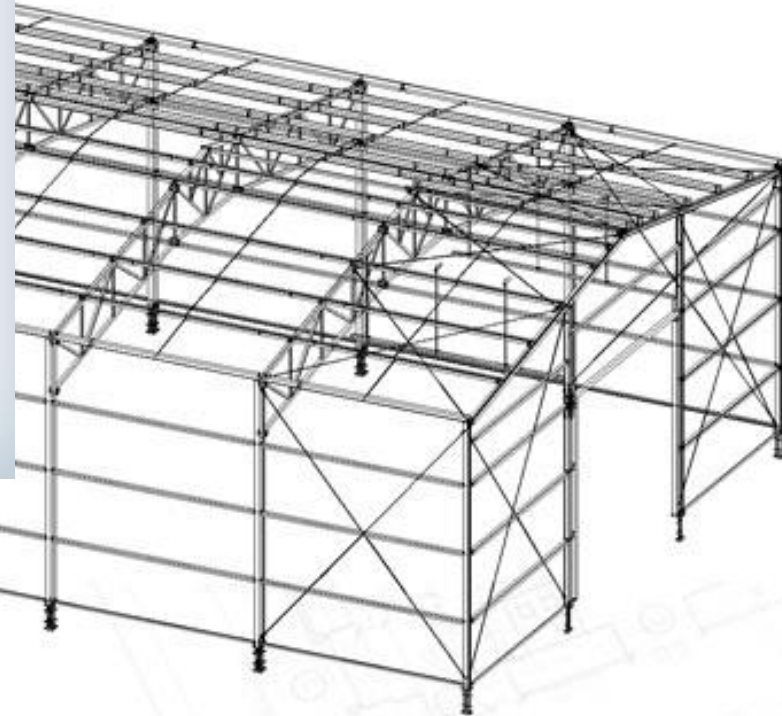
Rys: Autor



Rys: konar.eu



Rys: budvision.pl



Rys: cobouw.pl



Rys: biznes-mentor.pl

Takie rozwiązanie jest jednym z nielicznych przypadków, w których konieczne będzie zastosowanie stężenia pionowego w ścianie frontowej.

Hale superlekkie



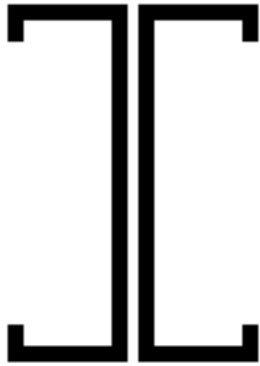
Rys: besta-hale.pl



Rys: metalfach.com.pl

Hale superlekkie wykonane są z kształtowników zimnogiętych. Rozwiązanie jest stosowane zazwyczaj w przypadku hal prefabrykowanych.

Konstrukcja wygląda jak wykonana z dwuteowników. W rzeczywistości są to pary ceowników zimnogiętych.



Rys: Autor



Rys: skeleton.pl

Uzyskanie węzłów o odpowiedniej sztywności i nośności może być problematyczne. Z tego powodu w tego typu halach stosowane są odmienne schematy statyczne.



Rys: Autor

Węzły kalenicowe

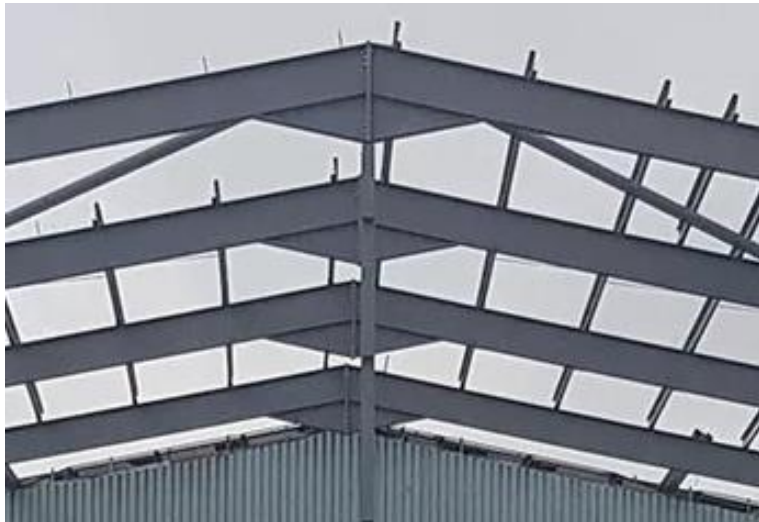


Photo: steelgram.co.uk

Dwie części dźwigara dachowego połączone w kalenicy hali.

Dla sztywności: parametry k_i dla lewej i prawej belki oraz blachy czołowej.



Photo: thordell.com

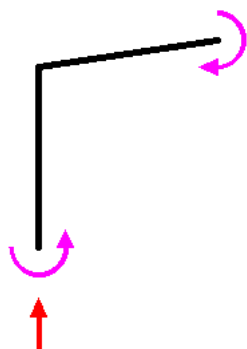
Dla nośności: lewa i prawa blacha czołowa zginana, lewy i prawy środek belki rozciągany, lewy i prawy górny pas belki ściskany.

Poziome węzły doczołowe



Rys: konar.eu

Rzadkim rozwiązaniem jest poziomy doczołowy węzeł śrubowy. W takim węźle mamy do czynienia z zupełnie innym rozkładem sił i zupełnie innymi zjawiskami w porównaniu do „klasycznego” węzła czołowego.



Rys: Autor

Słup: zginanie i istotna wartość siły ściskającej.

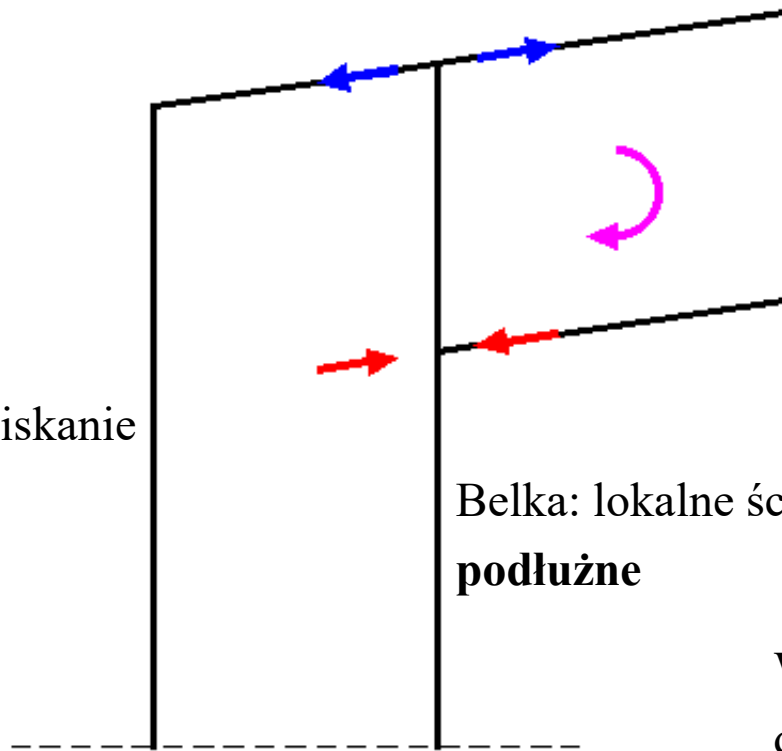
Belka: zginanie i pomijalna wartość siły osiowej.



Rys: uwoy.edu

Słup: lokalne rozciąganie
poprzeczne

Belka: lokalne rozciąganie
podłużne



Słup: lokalne ściskanie
poprzeczne

Belka: lokalne ściskanie
podłużne



Rys: uwyo.edu

Rys: Autor

W „klasycznym” (pionowym) węźle doczołowym obciążenia miejscowe w słupie są poprzeczne, w belce podłużne.



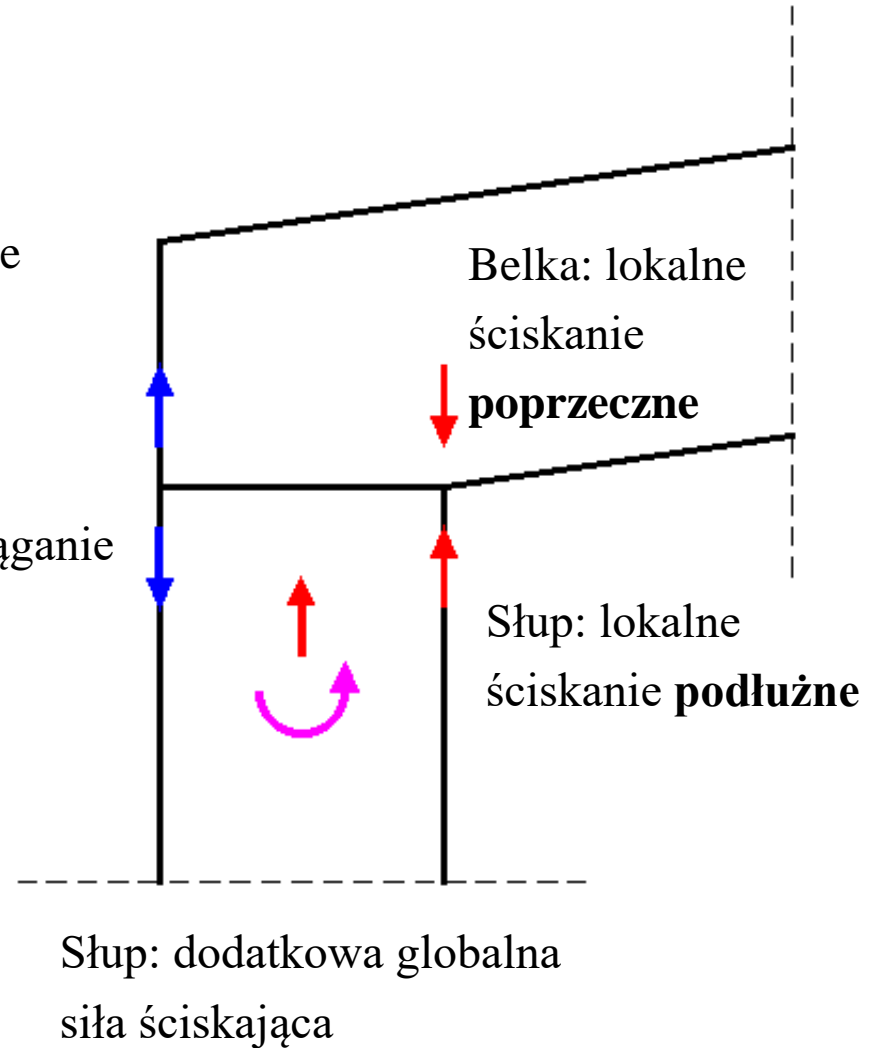
Rys: wymiar.eu

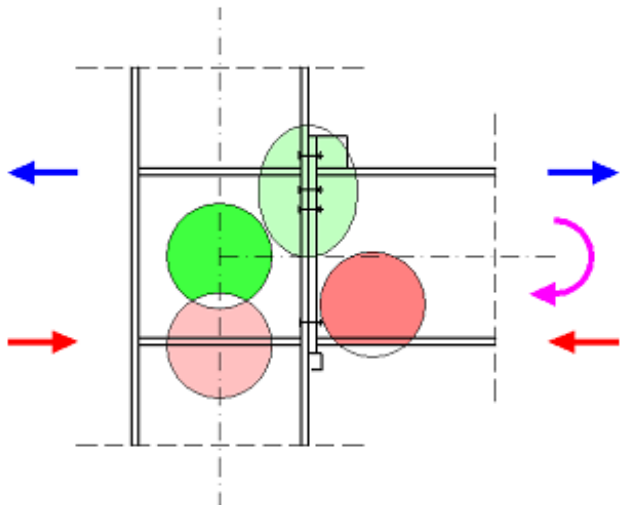
Belka: lokalne rozciąganie **poprzeczne**

Słup: lokalne rozciąganie **podłużne**

W poziomym węźle doczołowym jest odwrotnie: obciążenia miejscowe w słupie są podłużne, w belce poprzeczne.

Rys: Autor





Rys: Autor

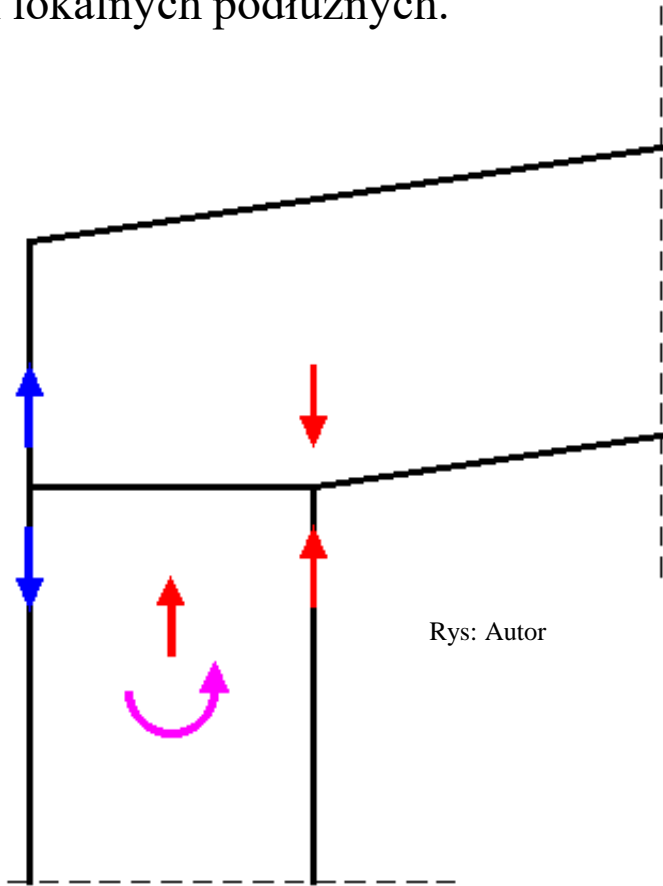
Obliczenia węzła pionowego:

- Słup dla zjawisk lokalnych poprzecznych;
- Zginanie blachy czołowej;
- Belka dla zjawisk lokalnych podłużnych.

Obliczenia węzła poziomego:

- Słup dla zjawisk lokalnych podłużnych;
- Zginanie blachy czołowej;
- Belka dla zjawisk lokalnych poprzecznych.

Dodatkowym problemem jest globalna siła osiowa w kolumnie. Wzory przedstawione w Eurokodzie można zastosować, jeśli siła ta nie jest większa niż 5% nośności.



Rys: Autor

Węzły sztywne w szkieletach

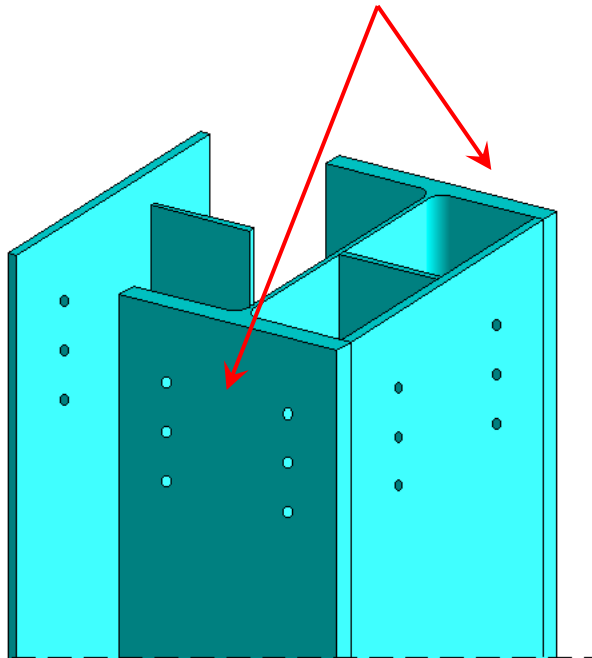
Sztywność i nośność muszą być sprawdzone dla każdego węzła sztywnego.

Węzeł śrubowy doczołowy, „klasyczne”

obliczenia:

sztywność (→ #14 / 85-91, #15 / 3-42, 46-52,
proj #3)

nośność (→ #19 / 25-82, proj #3)



Węzeł doczołowy spawany:

sztywność (→ #14 / 85-91, #15 / 3-42, 46-52)

nośność (→ #19 / 25-75)

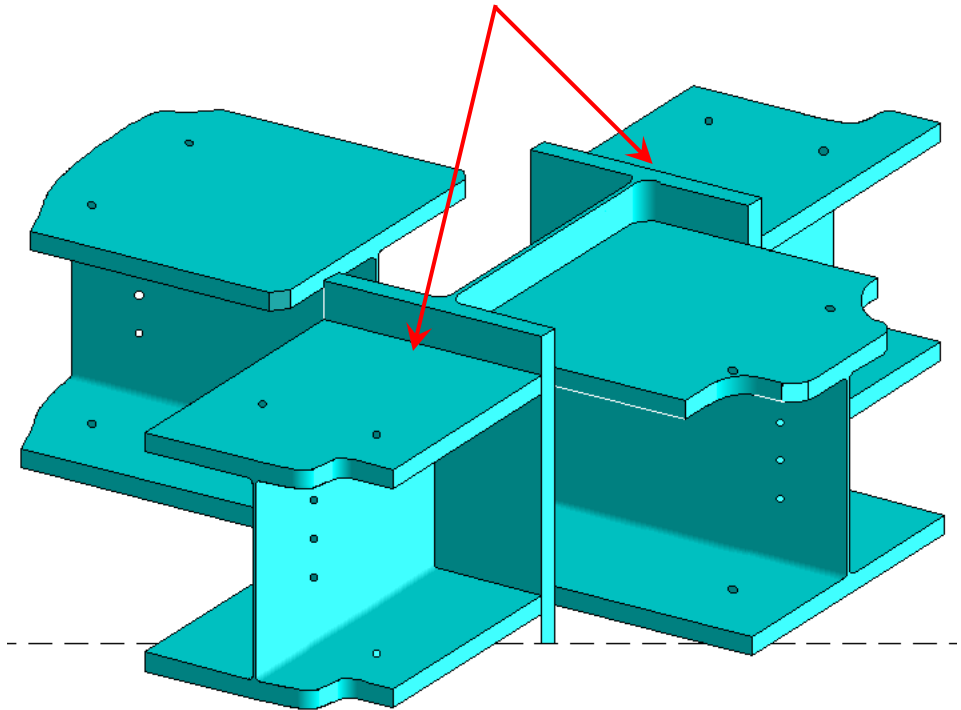
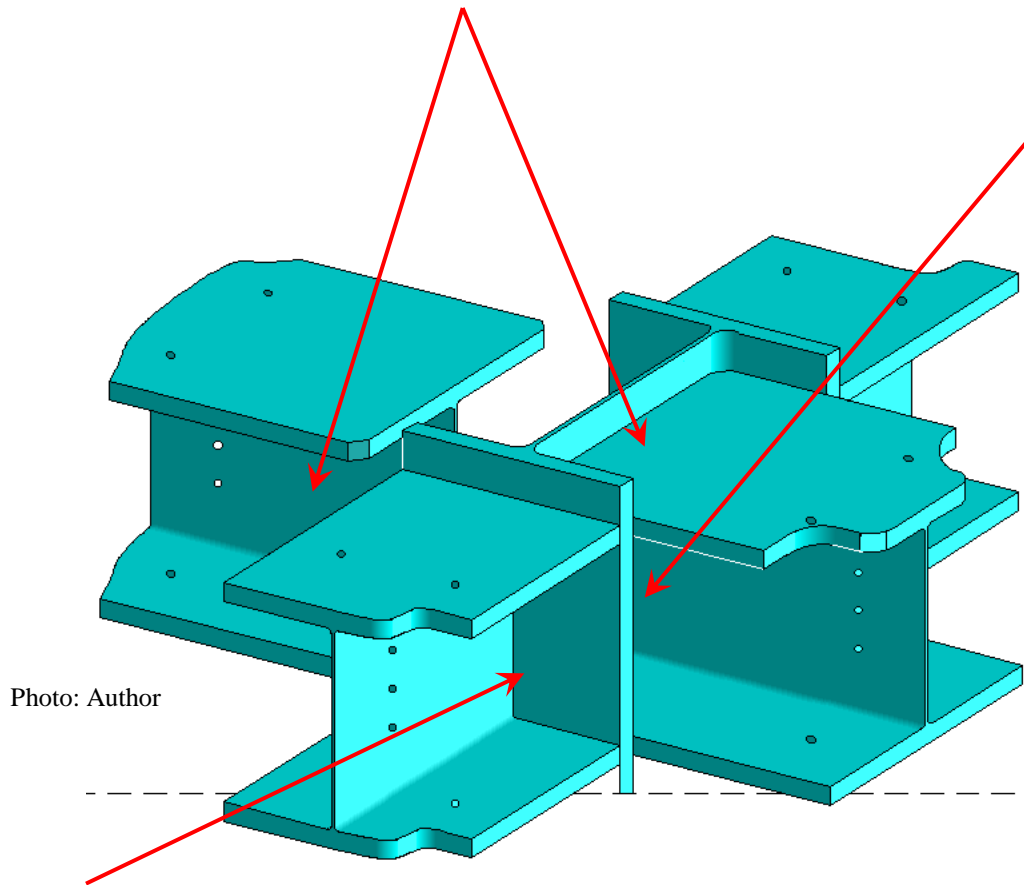


Photo: Author

Pasy są poziomymi żebrami dla średnicy słupa, średniki można traktować jako żebra ukośne na średniku słupa.



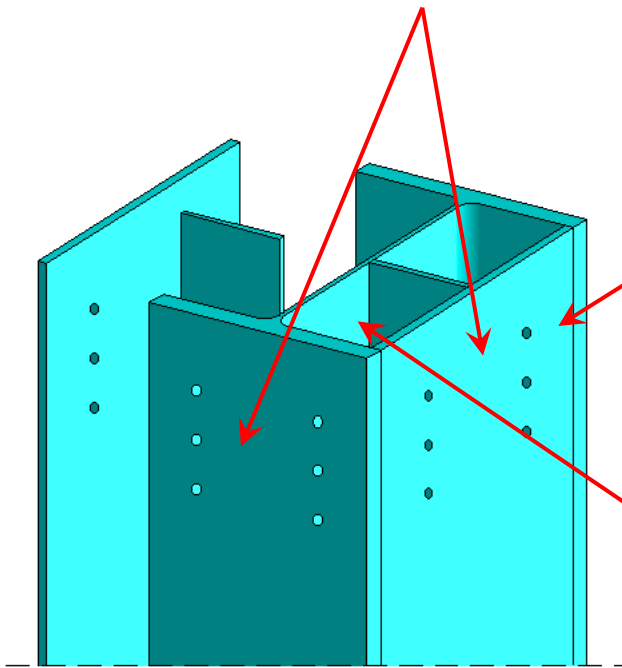
Kierunek prostopadły: brak szczegółowych informacji w Eurokodzie.

Bezpośrednie spawanie pasów słupów i belek po wewnętrznej stronie pasów słupów – idealnie sztywny węzeł – jest zakładany bez szczegółowej weryfikacji.

Połączenie spawane – brak obciążonych części słupa przy sprawdzaniu nośności (\rightarrow #19 / 54); nośność wynika tylko z wytrzymałości spoin.

Sztywność węzła uźebrowanego poziomo i ukośne na średniku słupa: idealnie sztywne bez sprawdzania (\rightarrow #15 / 66, 67); nośność jak dla węzła z żebrami na średniku słupa; sprawdzanie wytrzymałości spoin.

Te same obliczenia po obu stronach: połączenie belki ze słupem w styku śrubowym doczołowym, kontakt między blachą czołową a pasem słupa. Te same obliczenia dla sztywności i nośności.



Brak swobodnej krawędzi pasa, prawdopodobnie sztywność i nośność większe, niż wynikałoby to ze wzorów Eurokodu.

Uciążliwy proces spawania i montażu śrub - mała ilość dostępnego miejsca.

Photo: Author

Zagadnienia egzaminacyjne

Hale „lekkie” i „ciężkie”, podobieństwa i różnice

Wpływ efektów II rzędu na projektowanie hal

Modele 2D i 3D, porównanie

Analiza sprężysta i plastyczna, porównanie

Główne założenia analizy plastycznej

Charakterystyka typów analizy plastycznej

Hale i szkielety, podobieństwa i różnice

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@pk.edu.pl