

Konstrukcje Metalowe

Wykład XIV

Węzły i połączenia

Spis treści

Wprowadzenie → #t / 3

Węzły sztywne, podatne i przegubowe → #t / 19

Rozwiązania techniczne → #t / 26

Weryfikacja sztywności → #t / 64

Obliczenia wg Eurocodu → #t / 73

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 97

Wprowadzenie

Wykłady I – IX były wprowadzeniem do projektowania konstrukcji metalowych. Informacje z wykładów X - XIV pozwalają obliczyć nośność, stateczność i odkształcenie elementów konstrukcyjnych. Ale bez odpowiednio ukształtowanych połączeń będziemy mieli tylko skład elementów, a nie konstrukcję.



Rys: wikipedia



Rys: southweststeels.co.uk



Rys: wistal.pl

Obliczanie węzłów jest najbardziej skomplikowaną i najbardziej pracochłonną częścią każdego projektu konstrukcji stalowej. Należy wziąć pod uwagę wiele różnych zjawisk lokalnych. Może to zająć 60-70% całkowitego czasu obliczeń. Przykład: 5 wykładów (9-13) o elementach, 8 wykładów (14-21) o węzłach.



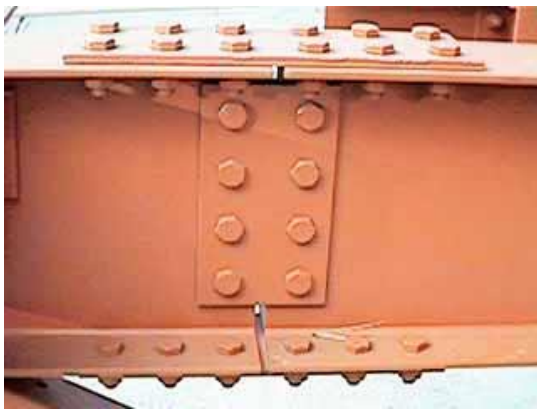
Rys: j-p.com.ua



Rys: microstran.com.au



Rys: resources.scia.net



Rys: zs4-sanok.pl

Rys: amsd.co.uk



Rys: palatinepaints.co.uk

Węzły i połączenia

1.4.2

połączenie, złącze

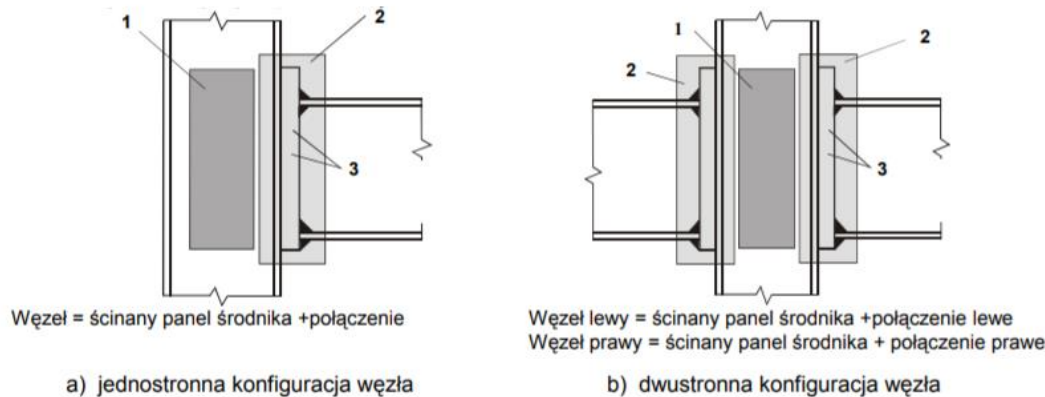
miejsce, w którym zbiegają się co najmniej dwa elementy. Na użytek projektowania przyjmuje się, że jest to zespół podstawowych części niezbędnych do przenoszenia sił wewnętrznych / momentów w tym miejscu..

EN 1993-1-8 1.4.2,
1.4.4

1.4.4

węzeł

strefa, w której połączone są wzajemnie co najmniej dwa elementy. Na użytek projektowania przyjmuje się, że jest to zespół wszystkich podstawowych części mających wpływ na sposób przenoszenia określonych sił wewnętrznych / momentów między połączonymi elementami. Węzeł belki ze słupem składa się z panelu środkowego oraz jednego połączenia (w węźle o jednostronnej konfiguracji) lub dwóch połączeń (w węźle o dwustronnej konfiguracji), patrz Rysunek 1.1.



1 ścinany panel środkowy
2 połączenie
3 części podstawowe (np. śruby, blachy czołowe)

Rys: EN 1993-1-8 Fig. 1.1

Połączenie: miejsce... ...zespół podstawowych części...

Węzeł: **strefa**... ... zespół **wszystkich** podstawowych części ...

Węzły w konstrukcji stalowej zawsze składają się ze śrub lub spoin i dodatkowych blach (żebra, blachy węzłowe). W węzłach dochodzi do lokalnej koncentracji naprężeń i sił. Z tego powodu konieczne jest sprawdzenie lokalnego zachowania elementów węzła i krótkich odcinków przyległych elementów. W grę wchodzi specyficzne zjawiska o charakterze lokalnym.

W uproszczeniu: najważniejszymi częściami węzła są spoina i trzpień śruby. Z tego powodu można je nazwać „połączeniami” - w przeciwieństwie do „pozostałej części węzła”, czyli żeber, blach węzłowych i współpracujących części prętów.

Części konstrukcji

→ #3 / 77



Rys: Autor

Każda konstrukcja może być podzielona na trzy części:

- elementy
- połączenia
- węzły

Elementy

→ #3 / 78



Rys: Autor

Pręty, belki, dźwigary, płatwie, słupy – liczone na poziomie przekroju i poziomie elementu



Rys: civildigital.com

(~ 40% obliczeń)

Połączenia

→ #3 / 79

Spoiny i trzpienie śrub – obliczenia na poziomie punktu (spoiny) i przekroju (trzpień śruby – nośność na ścinanie i nośność na rozciąganie).



Rys: Autor



Rys: ceprofs.civil.tamu.edu



Rys: researchgate.net

(~ 10% obliczeń)

Węzły

→ #3 / 80

Krótki odcinek na końcu elementu, gdzie dochodzi do interakcji elementu z sąsiednim elementem, blachami węzłowymi i trzpieniami śruby. Obliczamy nie przekroju lub elementu



Rys: ascelibrary.org

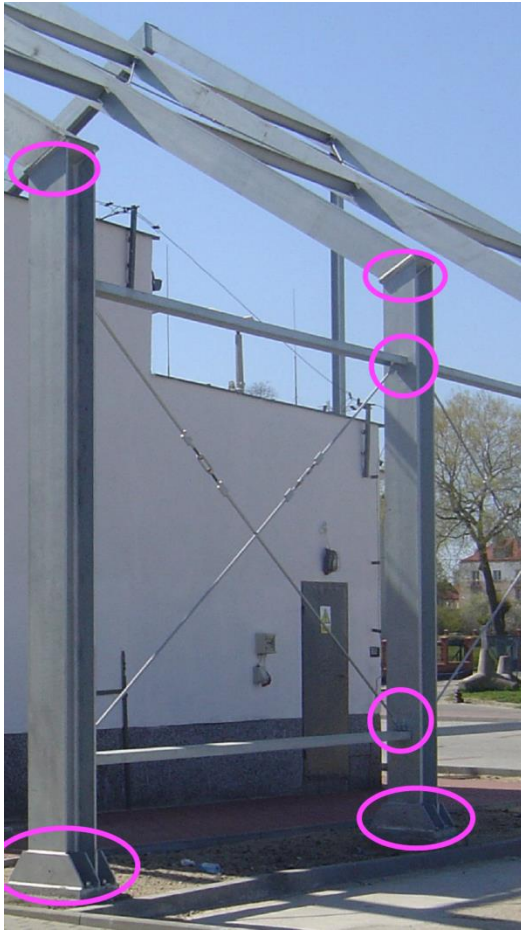


Rys: scielo.br



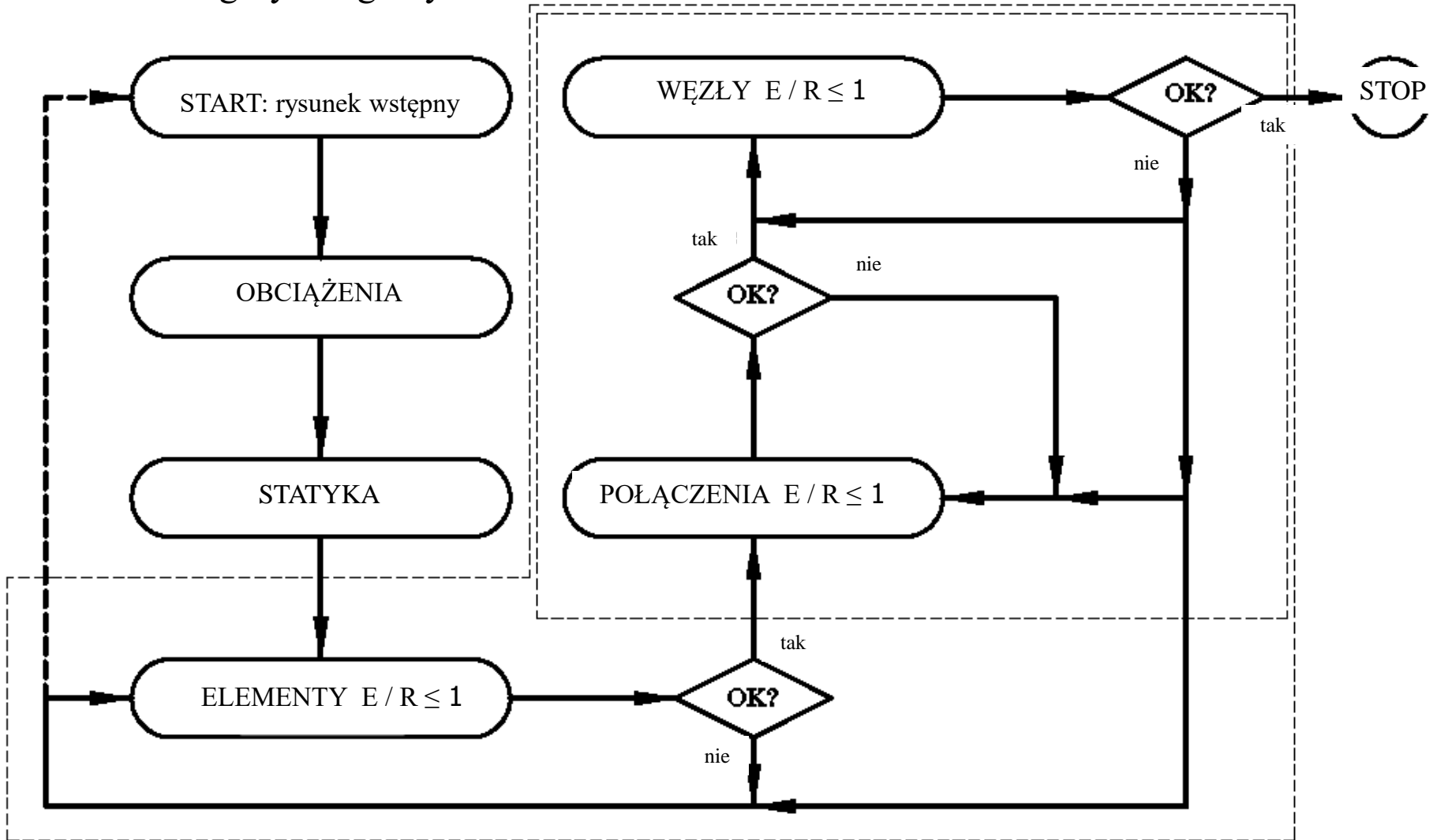
Rys: osha.gov

(~ 60% obliczeń)



Rys: Autor

Algorytm ogólny



Rys: Autor

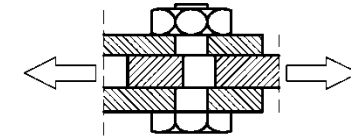
Nośnością **połączenia** możemy nazwać nośność spoiny lub trzpienia śruby:



Rys: researchgate.net

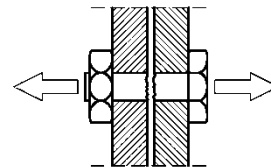


Rys: ceprofs.civil.tamu.edu



Rys: Autor

- przekroczenie naprężeń w spoinie;
- ścięcie trzpienia;
- rozerwanie trzpienia;



Rys: Autor



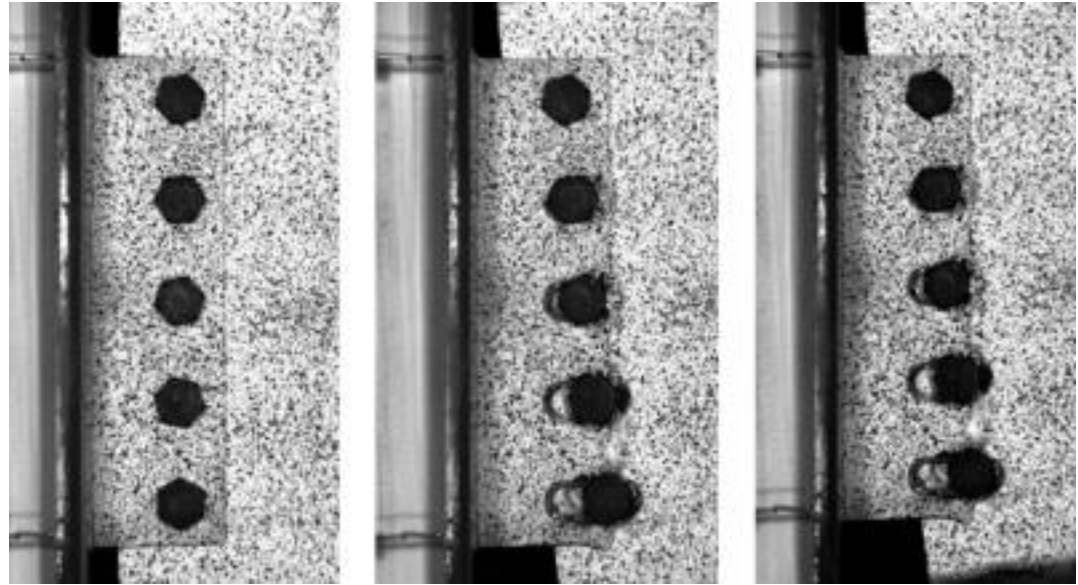
Rys: forgemag.com

Zachowanie **węzła** można podzielić na dwie grupy:

- interakcje między blachami i elementami a połączeniami;
- interakcje blach i elementów między sobą



Rys: ascelibrary.org



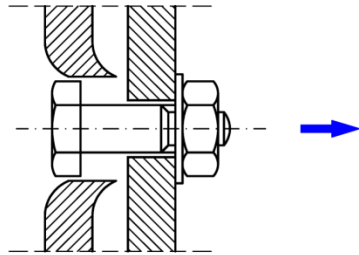
Rys: ascelibrary.org

Przykład oddziaływania między połączeniem a blachą: uplastycznienie w skutek docisku.

Lokalna deformacja blachy dociskanej do trzpienia śruby.

Inne przykłady oddziaływania między śrubą a blachą:

- przeciągnięcie łba śruby;
- lokalne zginanie blachy wokół śruby w strefie rozciąganej.



Rys: Autor



Rys: knkmpk.blogspot.com



Rys: Autor

Wybrane przykłady zniszczenia węzła bez oddziaływania z trzpieniami śrub:

- osłabienie przez otwory;
- rozerwanie blokowe;
- zniszczenie węzła kratownicy;
- zmiżdżenie betonu pod stopą słupa.



Rys: quora.com



Rys: quora.com



Rys: scielo.br



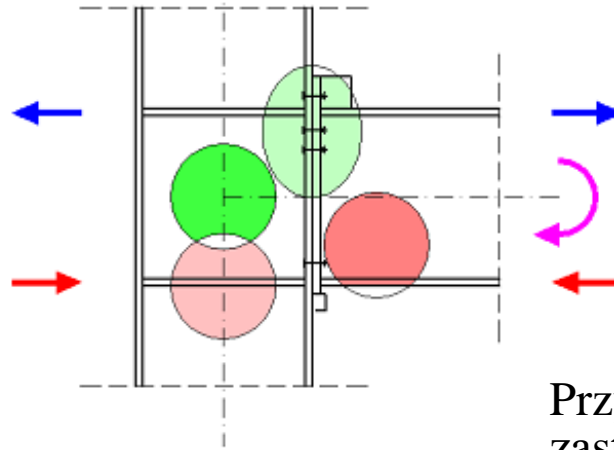
Rys: osha.gov

Sztywność złącza to drugi, oprócz wytrzymałości, ważny parametr. Zgodnie z Eurokodem musimy sprawdzić, czy nasze założenie dotyczące węzła - sztywnego lub przegubowego - jest prawdziwe dla rzeczywistej geometrii i rzeczywistych przekrojów prętów. Czasami, ze względu na dużą różnicę pomiędzy założeniami a rzeczywistym zachowaniem się złącza, musimy jeszcze raz wykonać obliczenia statyczne dla innego założenia wstępnego.

Część konstrukcji	Warunek	
	Nośność	Sztywność
Element	SGN	SGU
Węzeł	SGN	Ustalenie typu węzła

Przy sprawdzaniu nośności i sztywności węzła wykorzystujemy metodę składnikową.

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



Rys: Autor

Przy sprawdzaniu sztywności analizujemy zastępczy układ sprężynek.

O nośności całości decyduje najslabsze ogniwo.



Rys: dynamicbusiness.com.au

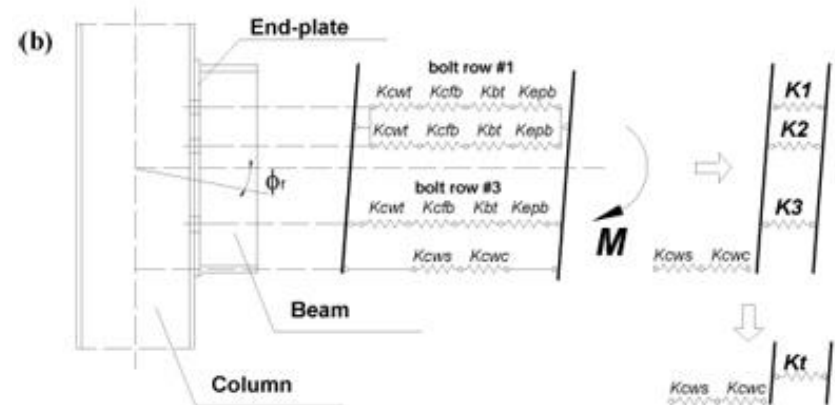


Figure 2. (a) Active components for bolted beam-to-column end-plate connections and (b) joint rotational stiffness according to EC3-1.8 (2003).

Rys: scielo.br

Rodzaj:	Nośność elementu łączącego (spoiny, trzpienie)	Węzły		
		Sztynność	Nośność	
			Interakcja elementu łączącego z innymi częściami węzła	Interakcja pozostałych części węzła między sobą
Spawane	EN 1993-1-8 rozdział 4 (spoiny) <u>Wykład #16, 17</u>	EN 1993-1-8 rozdział 5 i 6 <u>Wykład #14 i #15</u>	Brak	EN 1992-1-1 rozdział 6 EN 1993-1-5 rozdział 5 i 9 EN 1993-1-8 rozdział 4, 6 i 7 EN 1995-1-5 rozdział 9 <u>Wykład #19, 20, 21</u>
Śrubowe	EN 1993-1-8 rozdział 3 (trzpień) <u>Wykład #18</u>		EN 1993-1-8 rozdział 3 i 6 <u>Wykład #18, 19, 21</u>	EN 1993-1-8 rozdział 4 i 6 <u>Wykład #18, 19, 20, 21</u>

Węzły sztywne, podante i przegubowe

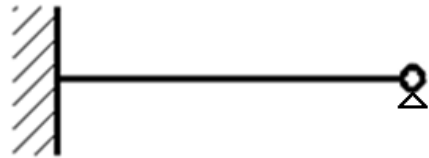
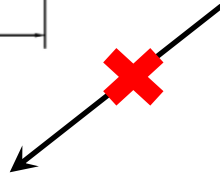
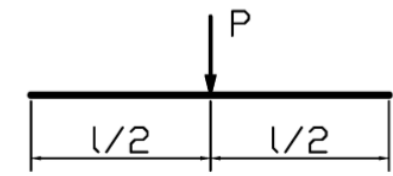


Rys: Autor

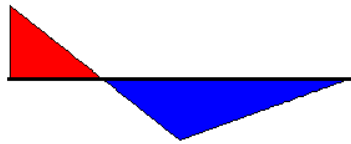
W konstrukcjach spotyka się dwa typy węzłów: przegubowe i sztywne. Oba różnią się zastosowanymi rozwiązaniami technicznymi: rozmieszczeniem śrub i blach.

- węzeł przegubowy: brak momentu zginającego, kąt obrotu zależy od odciążenia i współpracy z resztą konstrukcji;
- węzeł sztywny: brak obrotu, wartość momentu zginającego zależy od obciążenia i współpracy z resztą konstrukcji

W rzeczywistości nie ma węzłów idealnie sztywnych (**nieskończenie sztywnych**) lub idealnie przegubowych (**zerowa sztywność**). Istnieją wyłącznie węzły o mniejszej lub większej podatności.



$3 Pl / 16$

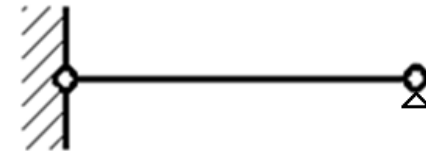
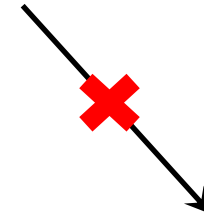
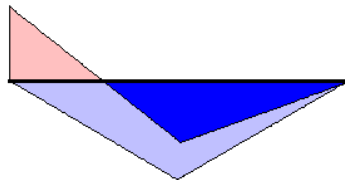
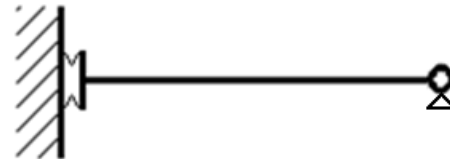


$2,5 Pl / 16$

$11 P / 16$



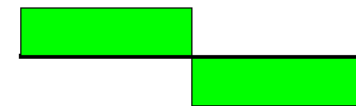
$5 P / 16$



$4 Pl / 16$



$8 P / 16$



$8 P / 16$

Rys: Autor

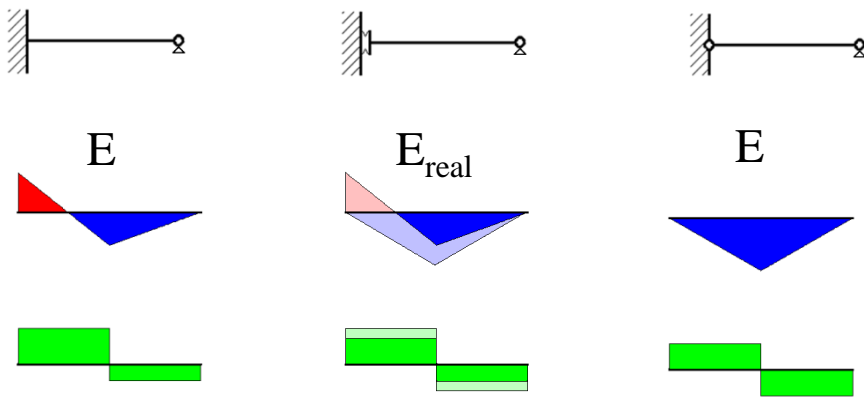
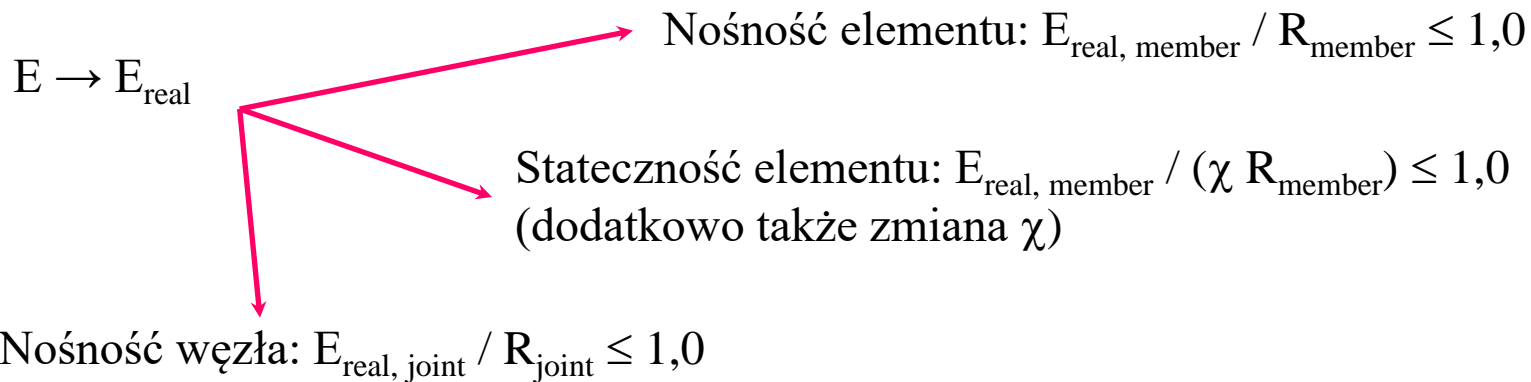


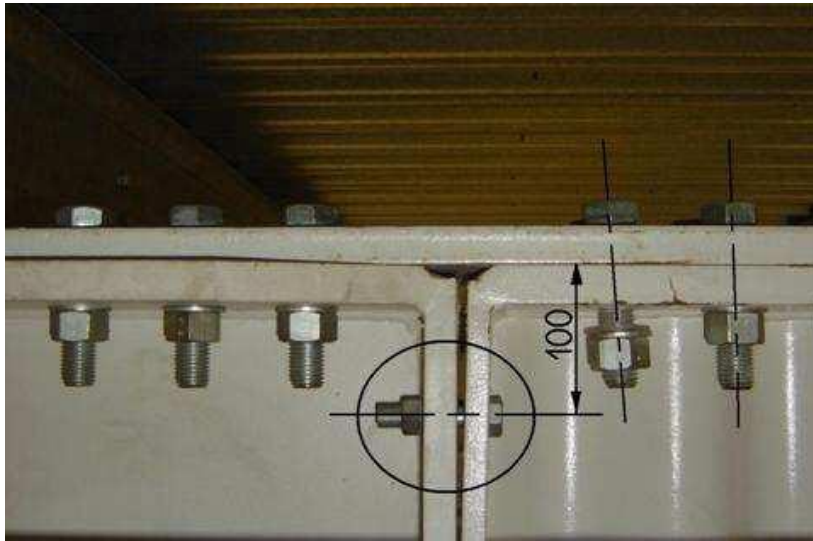
Photo: Author

Różnica między teoretycznym (E) rzeczywistym (E_{real}) może zmieniać wszystkie punkty obliczeń:

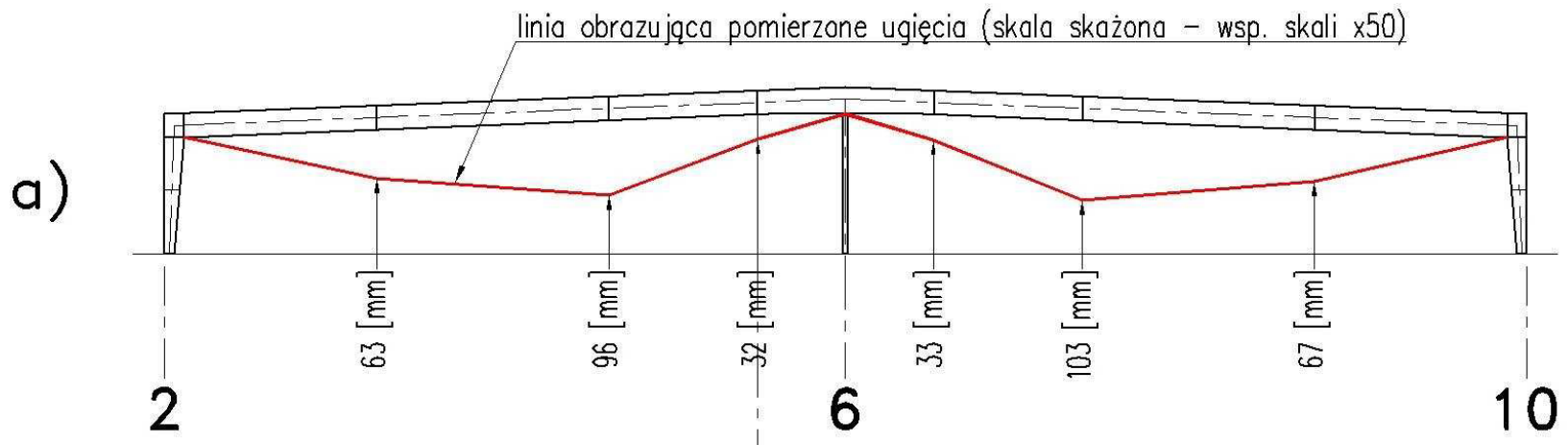


Dodatkowo, odmienna od teoretycznej sztywność węzła wpływa na deformację konstrukcji (SGU)


Nieprawidłowo zaprojektowane lub wykonane węzły śrubowe, przykład efektów:
założenia wstępne - sztywne, rzeczywiste zachowanie - podatne.



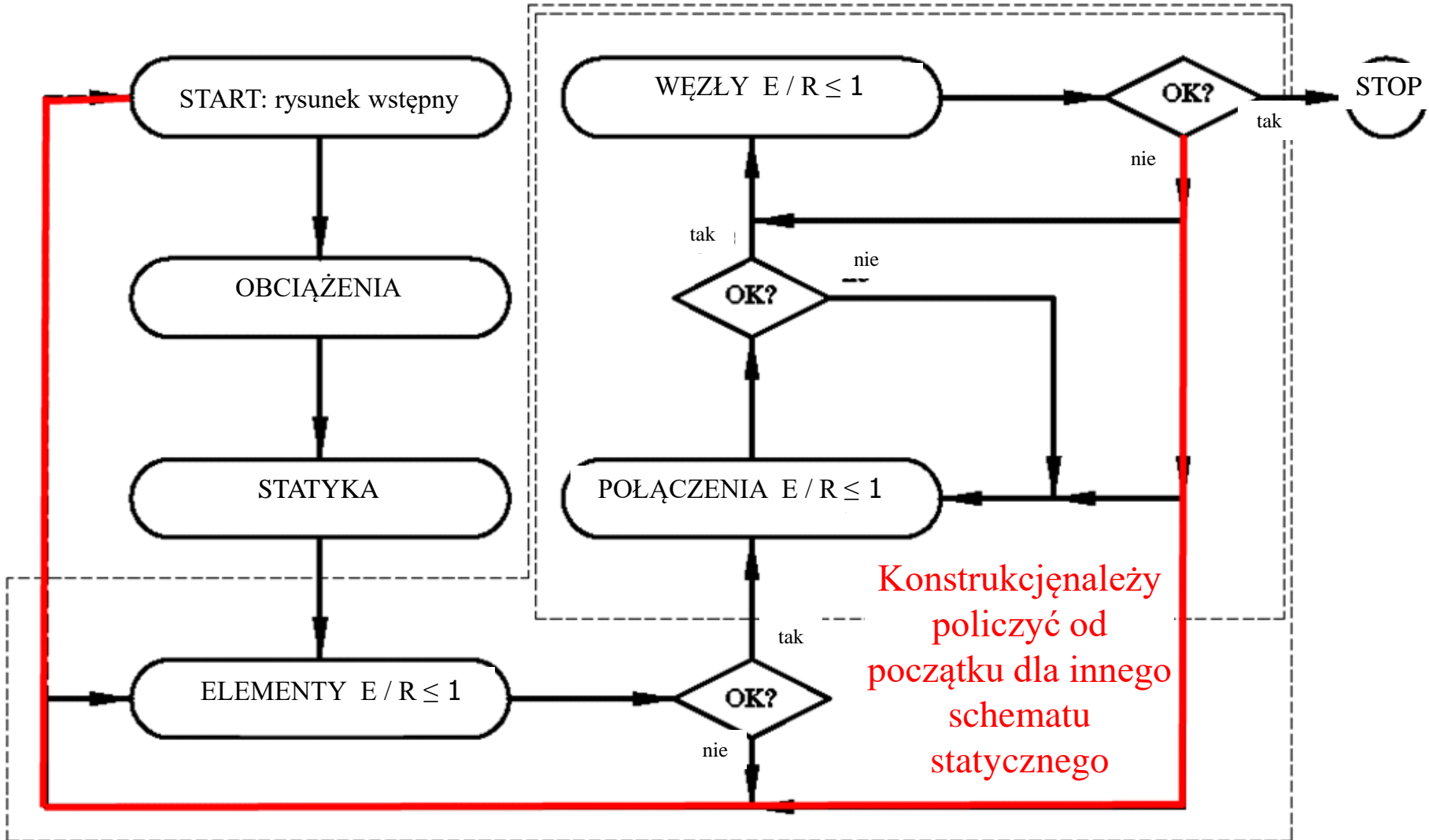
Rys: Z. Kowal, Ł. Tkaczyk, Uszkodzenia doczołowo-stycznych połączeń dźwigarów z falistym środkiem, Awarie Budowlane 2007



Rezultaty analizy:

Założenie wstępne	Rzeczywiste zachowanie	Co to znaczy dla obliczeń?
Sztywny	Sztywny	
	Podatny	
Przegubowy	Przegubowy	

Algorytm ogólny



Rys: Autor

Wstępne założenia dotyczące rozwiązań są oparte na doświadczeniach wielu pokoleń inżynierów. Rozwiązania zastosowane w modelu numerycznym muszą być takie same jak w założeniach wstępnych. Następnie należy zastosować określone rozwiązanie techniczne do obliczeń. Ostatnim krokiem jest sprawdzenie rzeczywistego zachowania węzła: typ (przegubowy / sztywny) i nośność (wystarczająca / niewystarczająca).

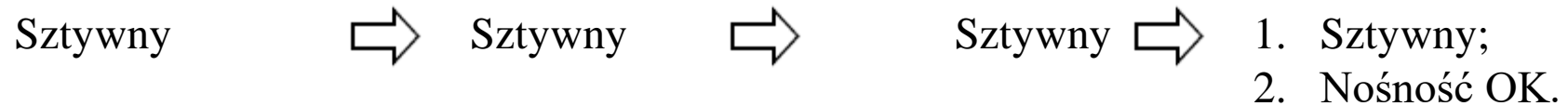
Wszystkie kroki muszą być spójne:



Na przykład:



Lub:



Rozwiązania techniczne

Założenie
wstępne



Model
numeryczny



Rozwiązanie
techniczne



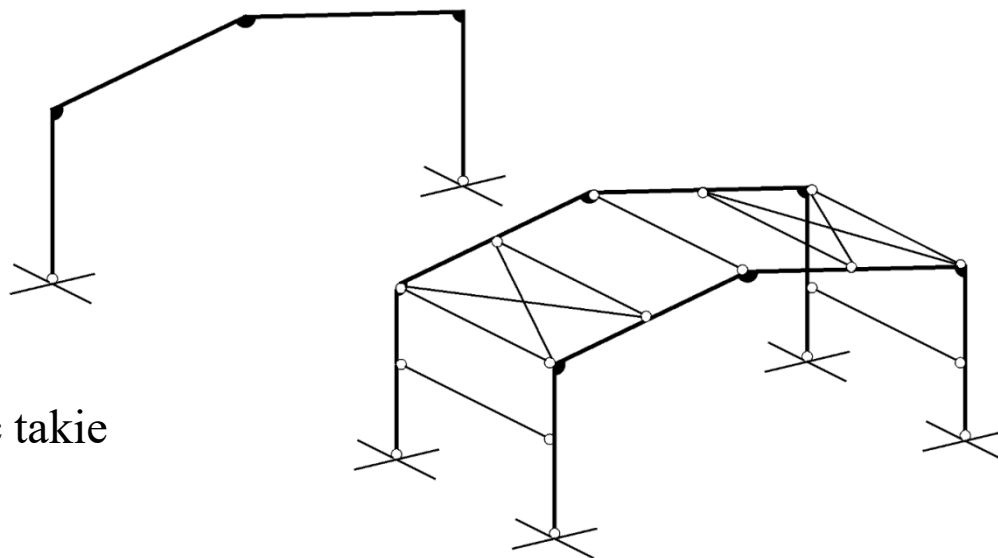
Rzeczywiste
zachowanie

Pierwszy i drugi punkt jest prosty. Założenia wstępne bazują na doświadczeniu i tradycji.

Najczęstszym rozwiązaniem jest:

- rama płaska;
- sztywne węzły w ramie;
- podpory przegubowe;
- węzły przegubowe prostopadłe do ramy (styk z płattwiami i stężeniami).

Rys: Autor



W modelu numerycznym należy przyjąć takie same węzły jak w założeniu wstępnym.

Bardzo skomplikowaną częścią zagadnienia są podpory konstrukcji stalowej, szczególnie w przypadku kontaktu z innym rodzajem materiału (mur, beton). Według wstępnych założeń istnieją trzy rodzaje podpór :



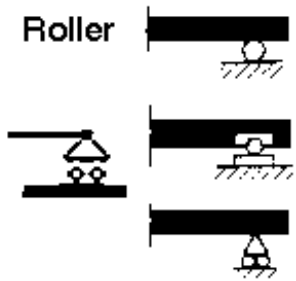
Rys: Autor

sztywna, przegubowa, przegubowo-przesuwna

Najbardziej skomplikowanym i często niedocenianym problemem jest zapewnienie konstrukcjom stalowym wystarczającej swobody obrotu i przesuwu w dwóch ostatnich typach podpór.

Podpora	Przykład
Sztywna	Słup;
Przegubowa	Słup; Kratownica lub belka oparta na konstrukcji stalowej, żelbetowej lub murowanej
Przegubowo-przesuwna	Kratownica lub belka oparta na konstrukcji stalowej, żelbetowej lub murowanej;

W przypadku masywnych konstrukcji lub konstrukcji o dużych obciążeniach (mosty) stosuje się dwa różne rozwiązania techniczne dla podpór przegubowych i rolkowych.



Rys: web.mit.edu



Rys: .fbcdn-Ryss-g-a.akamaihd.net



Rys: .texasescapes.com



Rys: web.mit.edu



Rys: wikipedia



Rys: .tatasteelconstruction.com

Dla „zwykłych” kratownic i belek ważnym czynnikiem jest proporcja między sztywnością dźwigara (kratownica lub belka dwuteowa) a sztywnością podpory (słup, ściana...):

$$S_G / S_S$$

$$S_G = E_G J_G / L_G$$

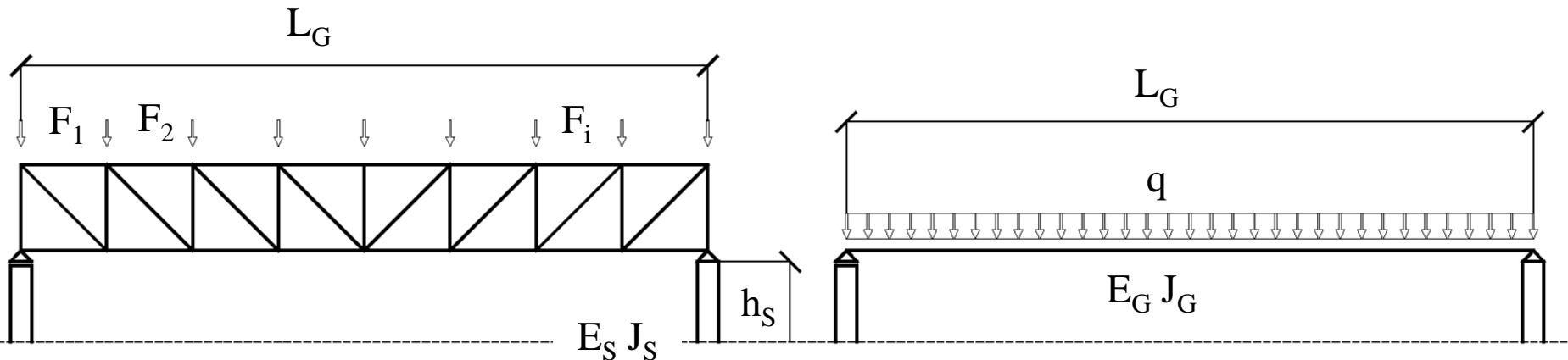
$$S_S = E_S J_S / h_S$$

Sztywność można obliczyć jako:

$$S_{\text{truss}} \approx 3,5 q L_G^2 \quad ; \quad q = (\Sigma F_i) / L_G$$

lub (\rightarrow #9 / 11):

$$J_{\text{truss}} \approx 0,35 h_{1, \text{truss}}^2 A_{\text{chord}}$$

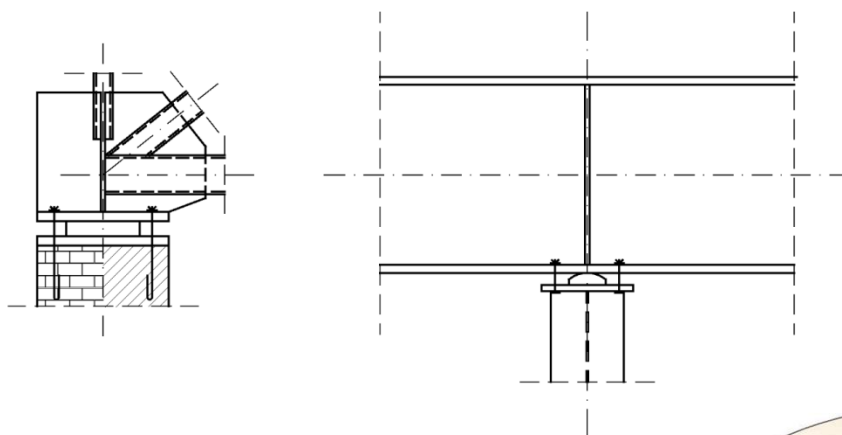


Rys: Autor

Zalecane rozwiązania techniczne (bazujące na doświadczeniu):

Duża sztywność	Sztywność pośrednia	Mała sztywność	
Bez łożyska	Łożysko płaskie	Łożysko okrągłe	Łożysko elastomerowe

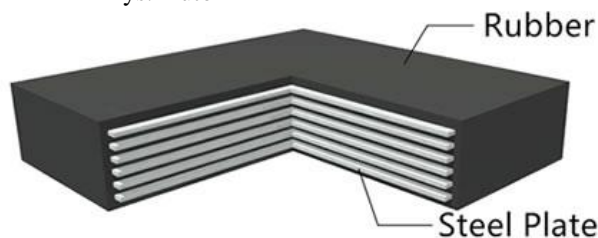
Łożysko elastomerowe jest używane przede wszystkim dla mostów. W przypadku innych konstrukcji jest rzadko spotykane.



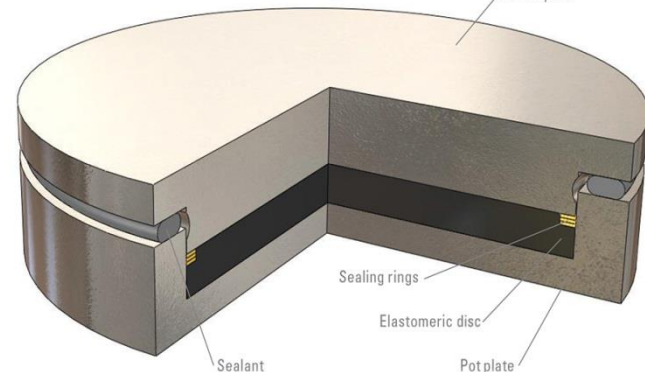
Rys: steelconstruction.info

Piston plate

Rys: Autor



Rys: bridgebearing.org



Rys: canambridges.com



Rys: anthony-johnson-engineering.co.uk

Łożysko elastomerowe składa się z naprzemiennych warstw stali i gumy. Zapewnia dobre pionowe przenoszenie obciążeń. Praca w kierunku poziomym i obrót są bardzo zbliżone do idealnego węzła przegubowo-przesuwne.

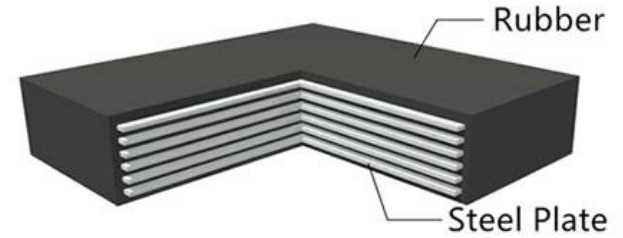


Photo: bridgebearing.org

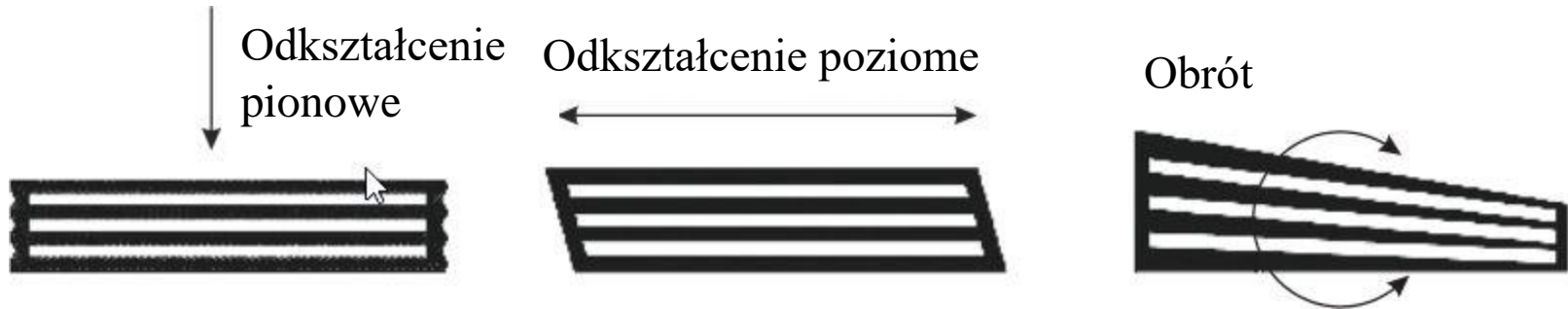


Photo: forbuild.eu

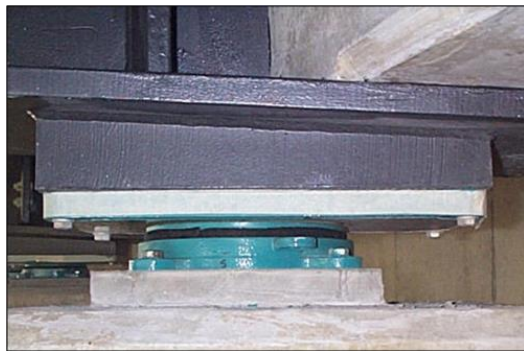


Photo: steelconstruction.info

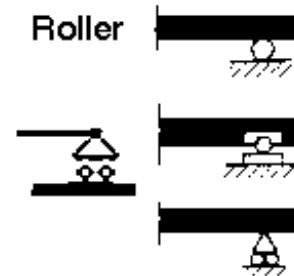


Photo: web.mit.edu

Ważną cechą konstrukcji CC3 jest duży zapas bezpieczeństwa. Rzeczywiste zachowanie podpór musi być jak najbardziej zbliżone do teoretycznego, aby uniknąć efektów wynikających z różnicy między teorią i rzeczywistością. Są to zazwyczaj imponujące konstrukcje o dużych rozpiętościach (i dużych reakcjach w podporach). Duże reakcje przy podporach nieidealnych mogą powodować znaczne efekty uboczne, niebezpieczne dla konstrukcji.



Photo: alcoxsteel.com

Photo: cnxzf.com



Photo: wikipedia

Na wykładzie zostaną przedstawione zalecenia mające zastosowanie w inżynierii lądowej dla konstrukcji CC3. W przypadku projektów CC2 i CC1 możliwe jest odejście od ścisłego przestrzegania zaleceń. Zalecenia opierają się wyłącznie na doświadczeniu inżynierskim i nie są obowiązkowe. Jednak ich przestrzeganie pozwala uniknąć potencjalnych problemów podczas eksploatacji konstrukcji.

Zalecenia dla CC3 są odmienne niż dla niższych klas konsekwencji. Konstrukcja powinna być tak tania, jak to możliwe. Szczegółowy projekt podpór może być bardzo ważny dla CC3. Dla niższych klas, z mniejszym zakładanym marginesem bezpieczeństwa, może nie być to konieczne: okaże się zbyt kosztowne w stosunku do bezpieczeństwa konstrukcji. Niewielkie różnice między idealnym a rzeczywistym zachowaniem konstrukcji mogą być akceptowalne. Przeprowadzenie/rezygnacja z dokładnej analizy powinna wynikać z doświadczenia projektanta.

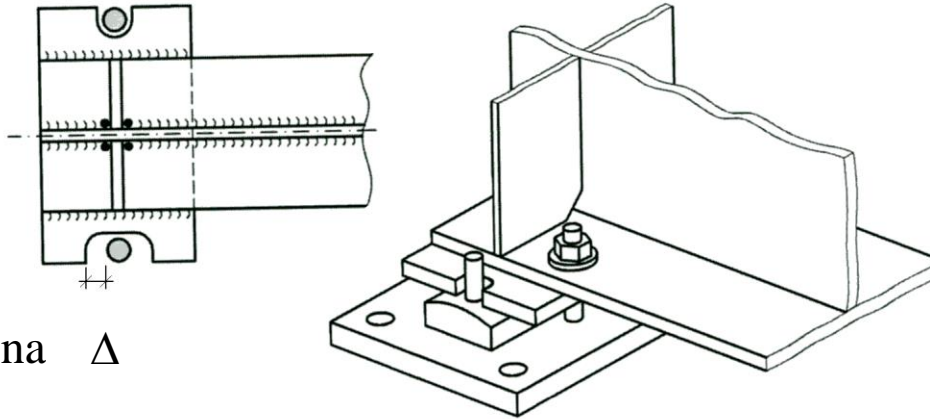
CC	$S_G / S_S > 20$	$20 \geq S_G / S_S > 10$	$10 \geq S_G / S_S > 5$	$5 \geq S_G / S_S$
3	Bez łożyska	Łożysko płaskie	Łożysko okrągłe	Łożysko elastomerowe
2	Bez łożyska	Brak łożyska / łożysko płaskie	Łożysko płaskie / okrągłe	Łożysko okrągłe
1	Brak dokładnej analizy			

Stopień swobody na przesuw dla łożyska elastomerowego uzyskuje się poprzez specjalne ukształtowanie szczegółów łożyska. Często jest to tajemnica producenta.

Stopień swobody na przesuw dla pozostałych rozwiązań jest uzyskiwany dzięki podłużnym otworom na śruby kotwiące.

Rys: K. Rykaluk, Konstrukcje metalowe cz I., DWS, Warszawa2016

Podpora przegubowa



Podpora przesuwna Δ

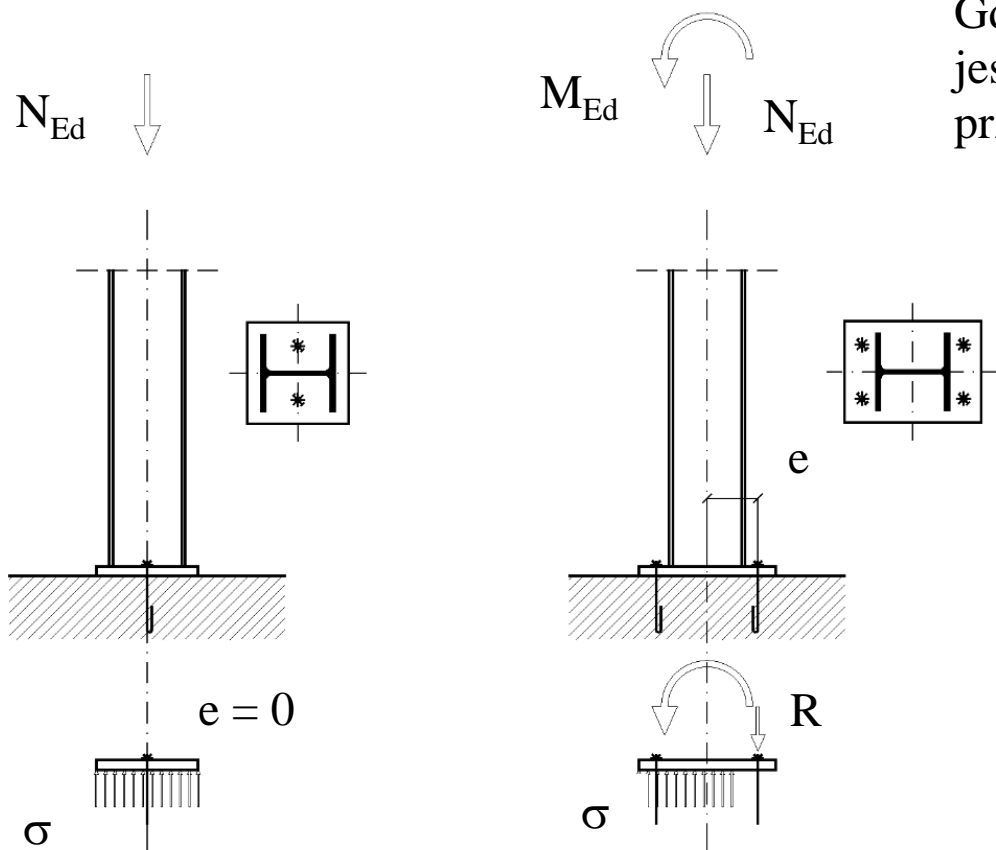
$$\Delta = q L^3 / (12 E W_{pl}) + \Delta T L \alpha_T$$

$\Delta T = |$ różnica między 8°C i temperaturą pracy konstrukcji $|$

Dla kratownicy:

$$W_{pl} \approx J_{truss} / h_{1, truss}$$

Rozwiązanie podpory słupa bazuje na innym podejściu. Rozstrzygająca jest kwestia rozmieszczenia śrub kotwiących. Moment zginający M_{Ed} jest przenoszony przez rozciąganie śrub na mimośrodkie e i przez naprężenia dociskowe w betonie.



Rys: Autor

Gdy $e = 0$, podpora jest traktowana jako przegubowa.

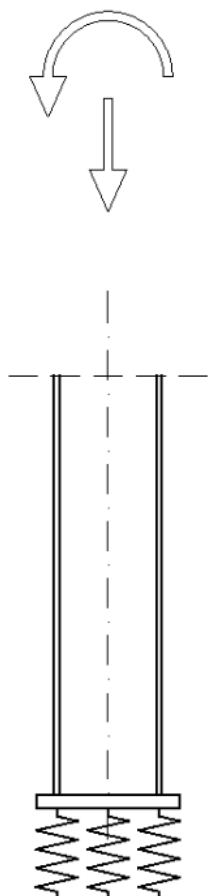
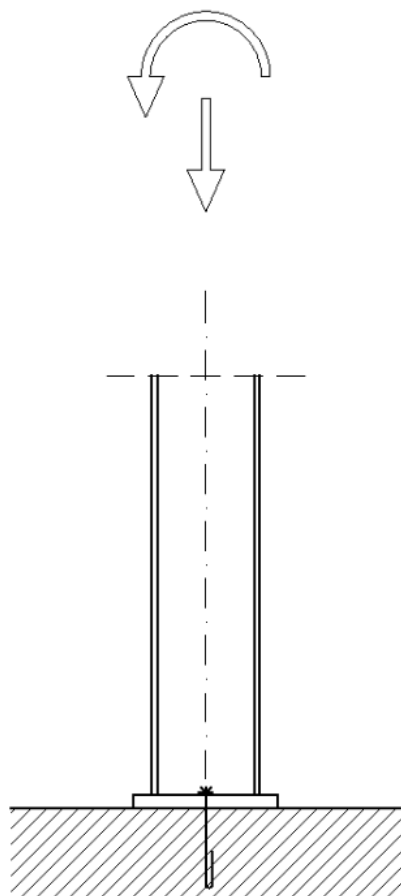


Rys: j-p.com.ua



Rys: srt251fpaler.blogspot.com

Oczywiście, przy bardzo dokładnej analizie można żelbet pod podstawą słupa przedstawić jako zespół sprężynek o pewnej nośności na zginanie.



Zgodnie z tym modelem niezerowa wartość momentu zginającego istnieje w podporze nawet w sytuacji $e = 0$. Jednak zgodnie z badaniami i eksperymentami wartość tego momentu jest na tyle mała, że podporę tę można uwzględnić jako przegubową.

Rys: Autor



W przypadku kontaktu stali z innymi materiałami niezbędna jest nie tylko analiza konstrukcji stalowej. Żelbet i mur są słabsze niż stal i zwykle ulegają zniszczeniu wcześniej niż konstrukcja stalowa. W przypadku betonu i muru analizowana jest propagacja naprężeń wewnątrz materiału. Miarą tutaj jest porównanie powierzchni bezpośredniego kontaktu ze stalą A_0 i efektywnej powierzchni A_{eff} wewnątrz materiału.

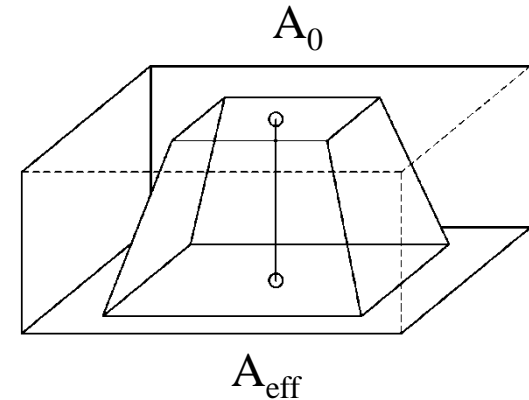
Rys: dailymail.co.uk



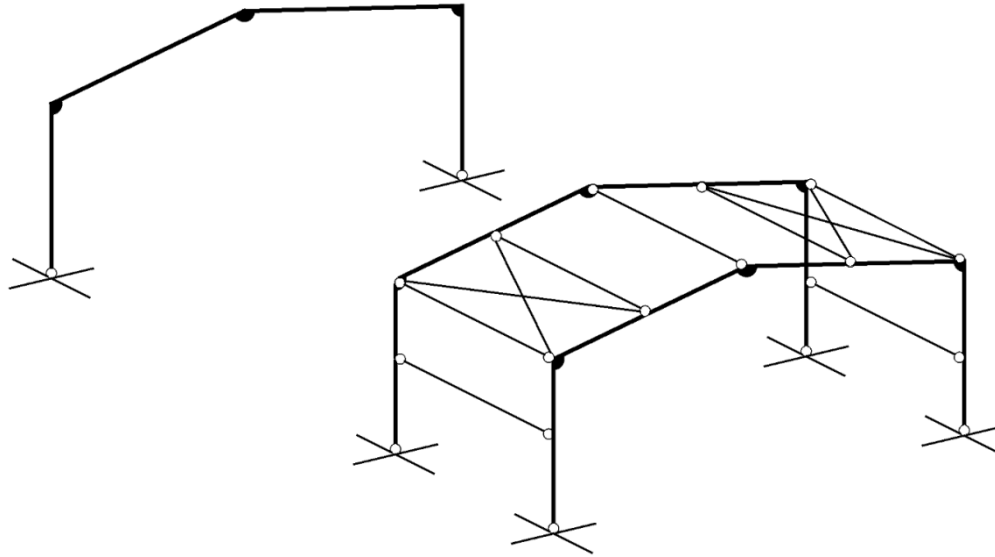
Rys: osha.gov



Rys: diy.stackexchange.com



Rys: Autor

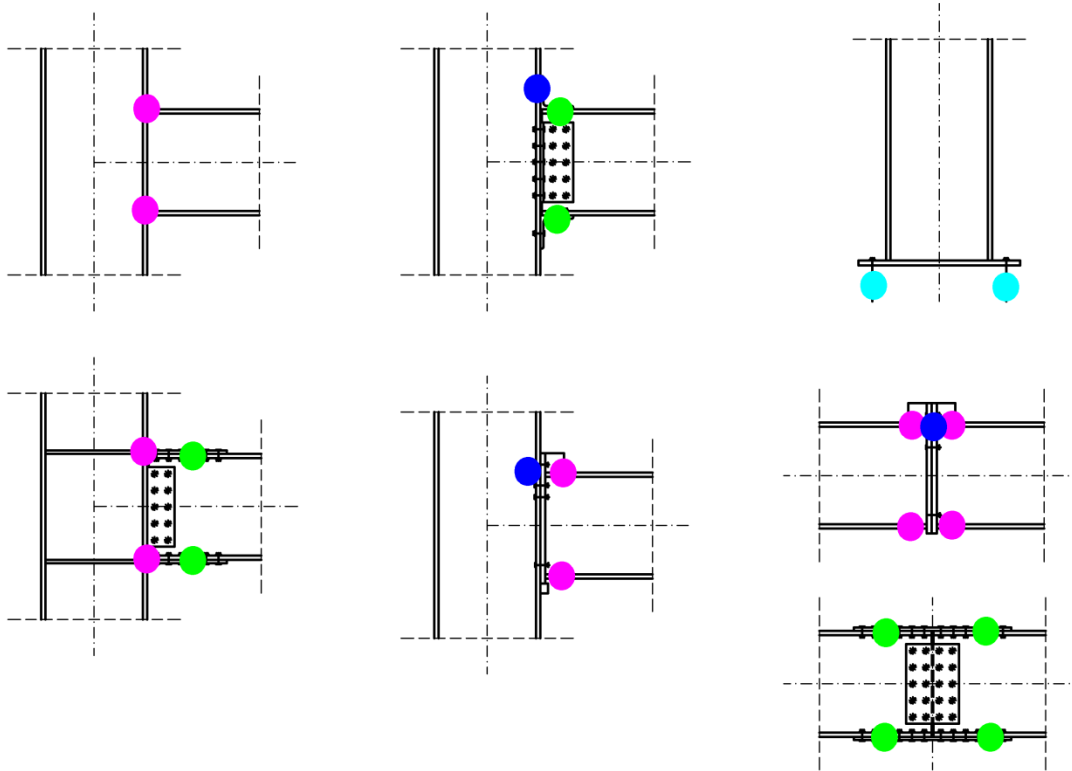


Druga grupa (oprócz podpór) węzłów w konstrukcjach to węzły pomiędzy elementami („węzły ramowe”). Można je podzielić na dwie grupy:

- sztywne;
- przegubowe;

Zasada ogólna:

unieruchomienie półki (i środka) → w założeniu węzeł sztywny.



Spoiny przy półkach

Śruby rozciągane

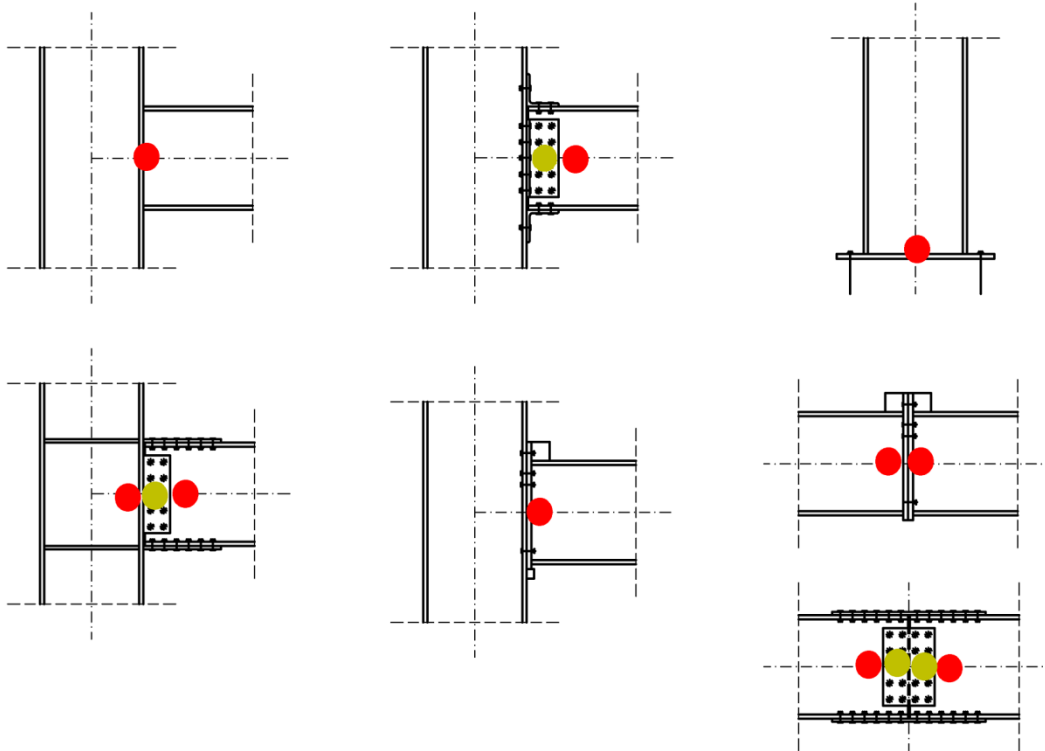
Kotwie rozciągane

Śruby ścinane

Rys: Autor

Zasada ogólna:

unieruchomienie tylko środniczka → w założeniu węzeł sztywny.

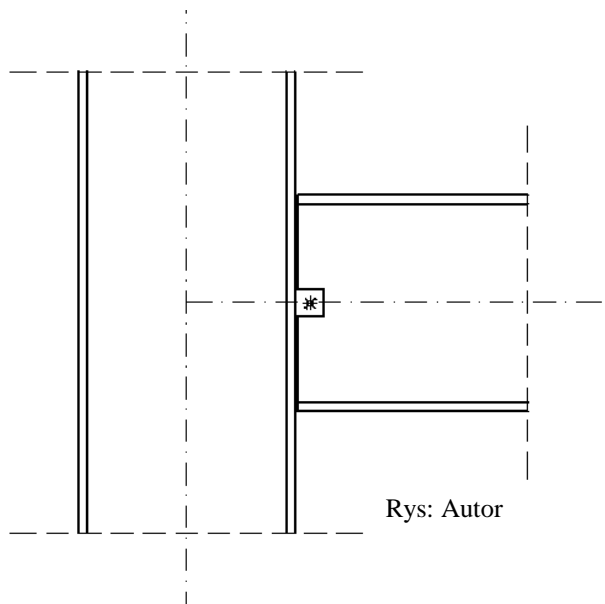


Spoiny przy środku

Śruby w środku

Rys: Autor

Węzeł z jedną śrubą można traktować jako prawie idealny przegub, ale ten typ nie jest zalecany do konstrukcji stalowych (z wyjątkiem wież elektroenergetycznych).



Rys: Autor



Rys: galeria.budownictwopolskie.pl



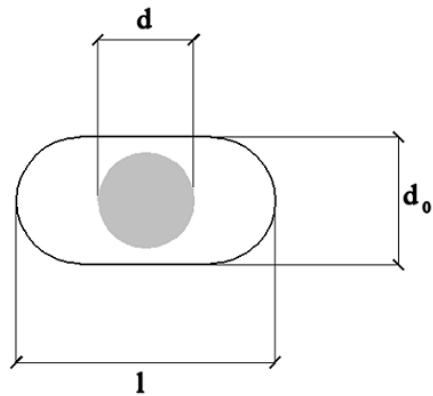
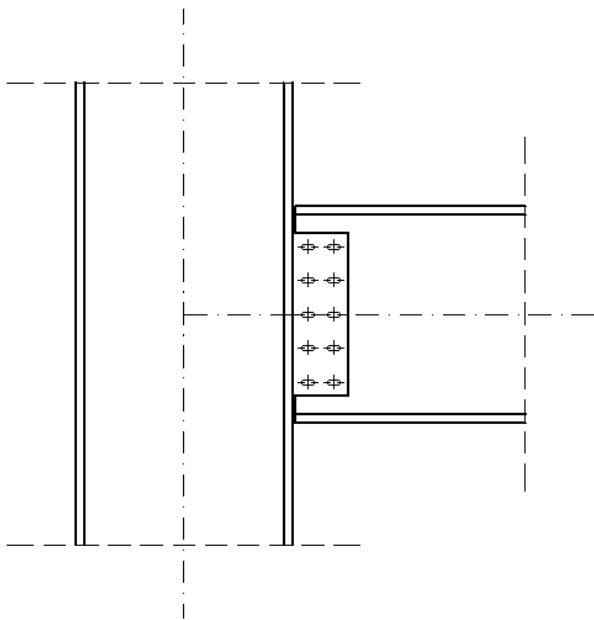
Rys: inzynierbudownictwa.pl



Rys: mlelectric.eu

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

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



Rys: Autor

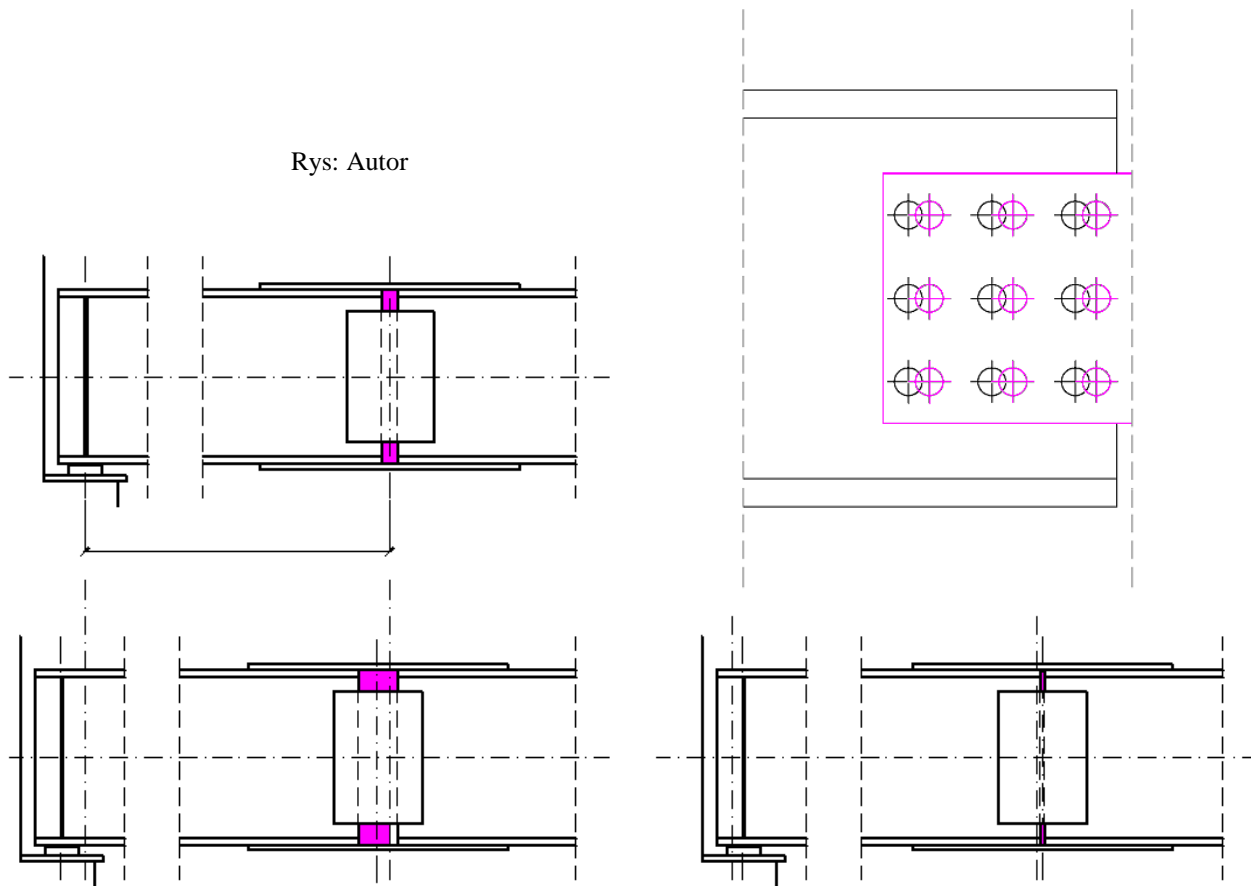


Rys: tekla-detailed-structural-fabrication.com

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

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

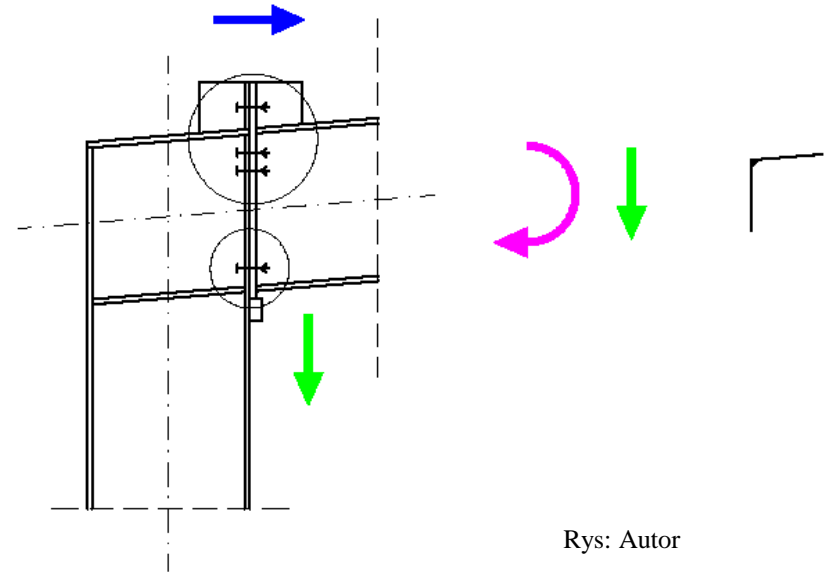
Rys: Autor



Rys: tekla-detailed-structural-fabrication.com

W płaszczyźnie ramy:

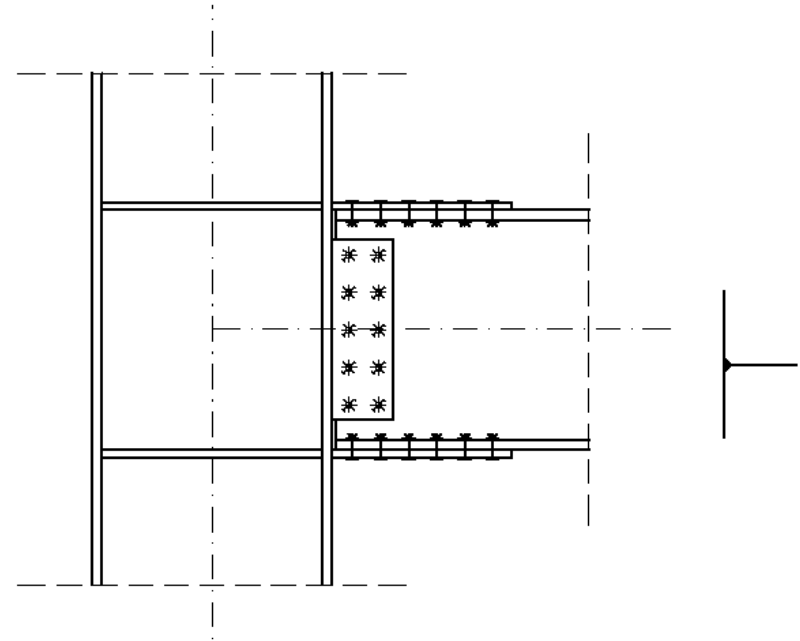
- Sztywny;
- Śruby między słupem i rygłem;
- Spoiny między dwuteownikiem i blachą czołową;
- Śruby rozciągane w części rozciąganej;
- Śruby ścinane w części ściskanej;
- Spoiny: # 17;
- Śruby: # 18, 19;
- Blachy: # 18, 19, 21;



Rys: Autor

W płaszczyźnie ramy:

- Sztywny;
- Spoiny między blachami a słupem;
- Śruby między blachami a rygłem;
- Śruby są tylko ścinane;
- Spoiny: # 17;
- Śruby: # 18, 19;
- Blachy: # 18, 19, 21;



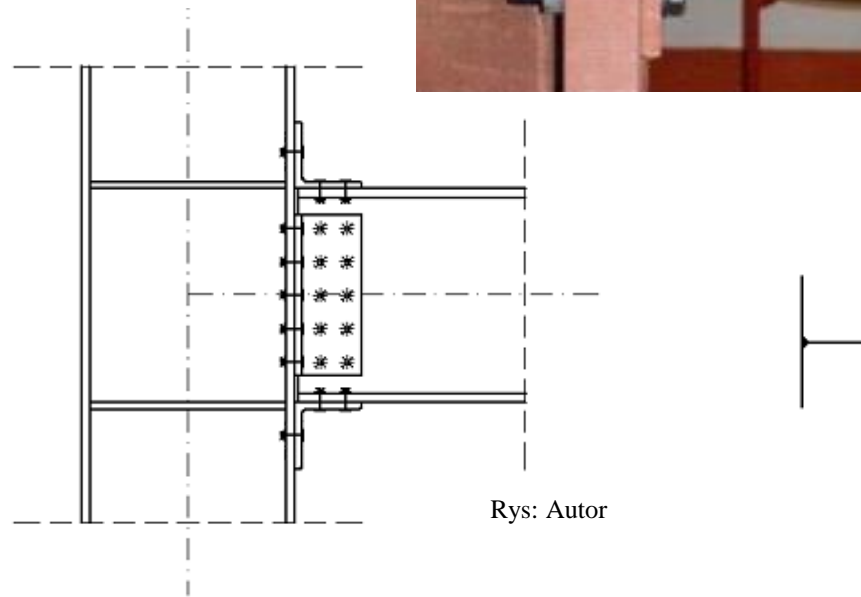
Rys: Autor

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



W płaszczyźnie ramy:

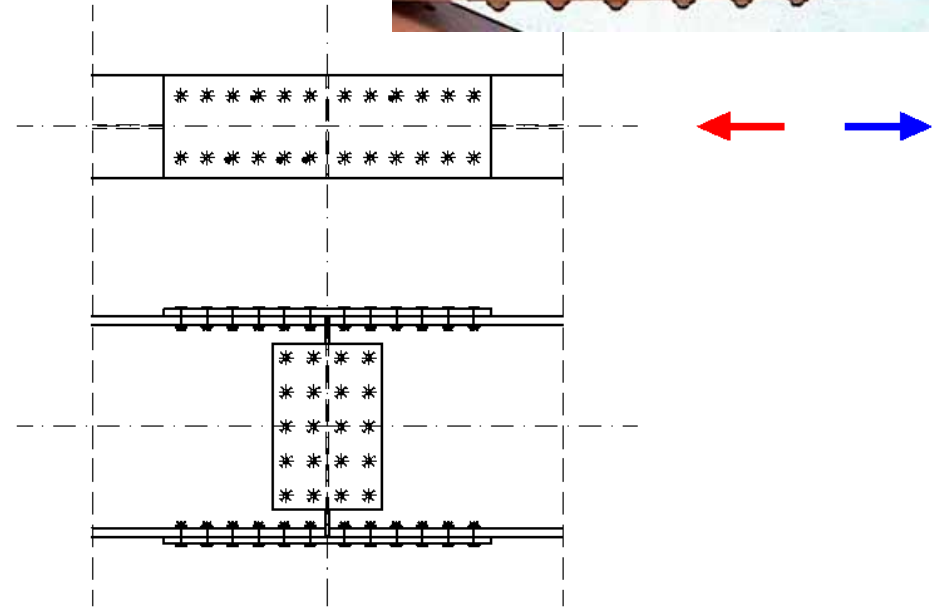
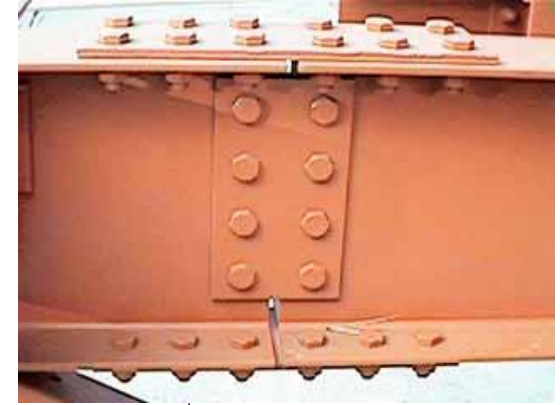
- Sztywny;
- Spoiny lub śruby między L i słupem;
- Śruby między L a belką;
- Śruby rozciągane i ścinane;
- Śruby: # 18, 19;
- L : # 18, 19



W płaszczyźnie ramy:

- Sztywny
- Śrubowy;
- Śruby tylko ścinane;
- Może być wykonany jako spawany;
- Spoiny # 17;
- Śruby: # 18,19;
- Blachy: # 18, 19;

Rys: amsd.co.uk

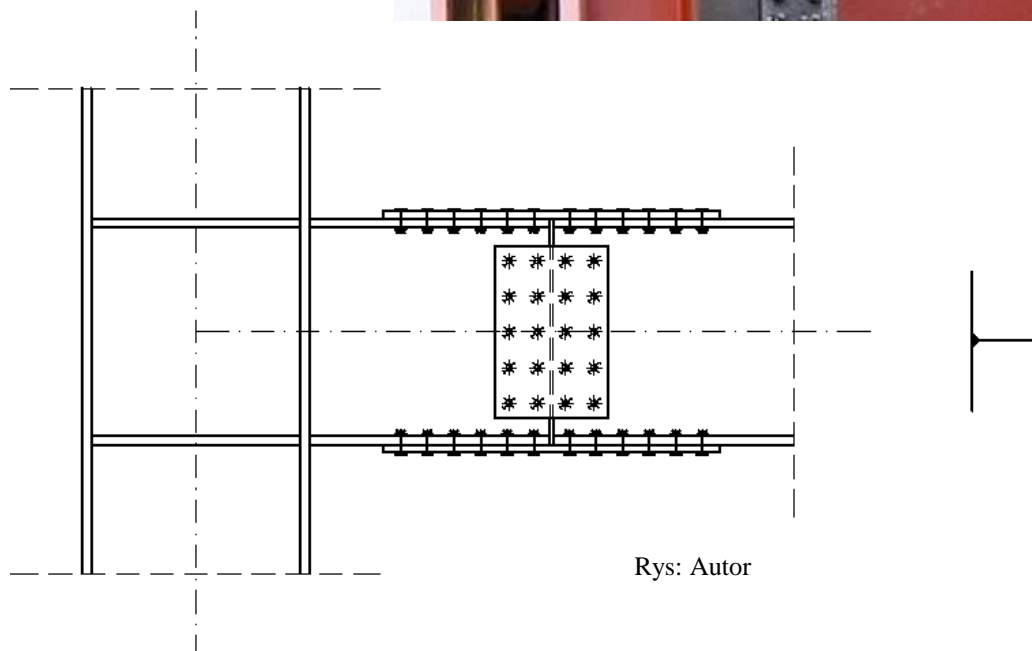


Rys: Autor

W płaszczyźnie ramy:

- Sztywny;
- Spoiny między rygłem i słupem;
- Śrubowy styk odsunięty;
- Śruby tylko ścinane;
- Spoiny: # 17;
- Śruby: # 18, 19;
- Blachy: # 18, 19;

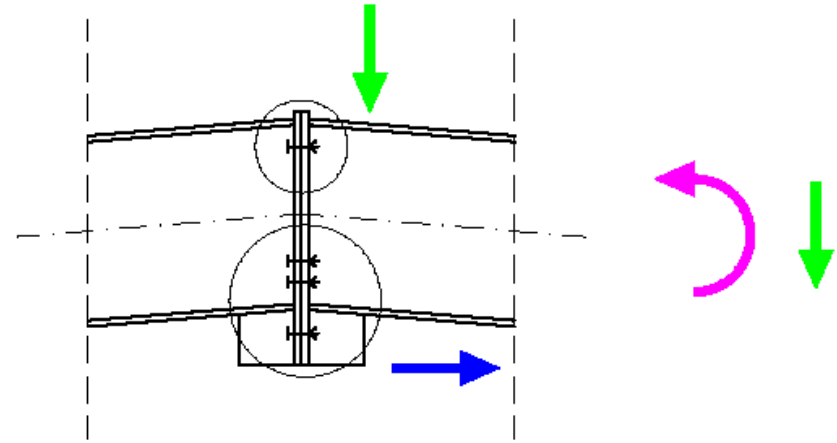
Rys: moellerengineering.com



Rys: Autor

W płaszczyźnie ramy:

- Sztywny;
- Śruby między blachami czołowymi;
- Śruby między blachami
- Spoiny #17;
- Śruby # 18, 19;
- Blachy # 19;

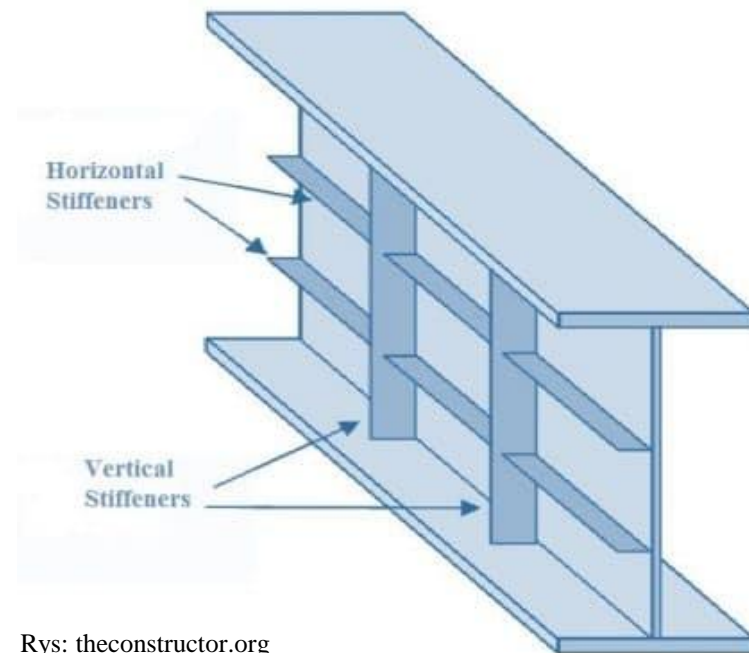


Rys: Autor

Rys: farmbuildings.info

Żebra:

- Zwiększenie sztywności środnika;
- Umożliwiają połączenie z belkami prostopadłymi;
- Spoiny # 17;
- Śruby # 18, 19;
- Blachy # 19, 21;



Rys: theconstructor.org



Rys: theconstructor.org



Rys: mscsteel.com

Żebra w narożach ramy: 3 możliwe rozwiązania (bez usztywnień, tylko poziome, poziome i ukośne). Brak żeber oznacza tańszą konstrukcję (mniejsza liczba blach i spoin, lżejsze elementy transportowe). Jednak rosnąca liczba żeber oznacza wzrost sztywności i wytrzymałości połączenia.

Wyk #21



Rys: sciencedirect.com



Rys: microstran.com.au

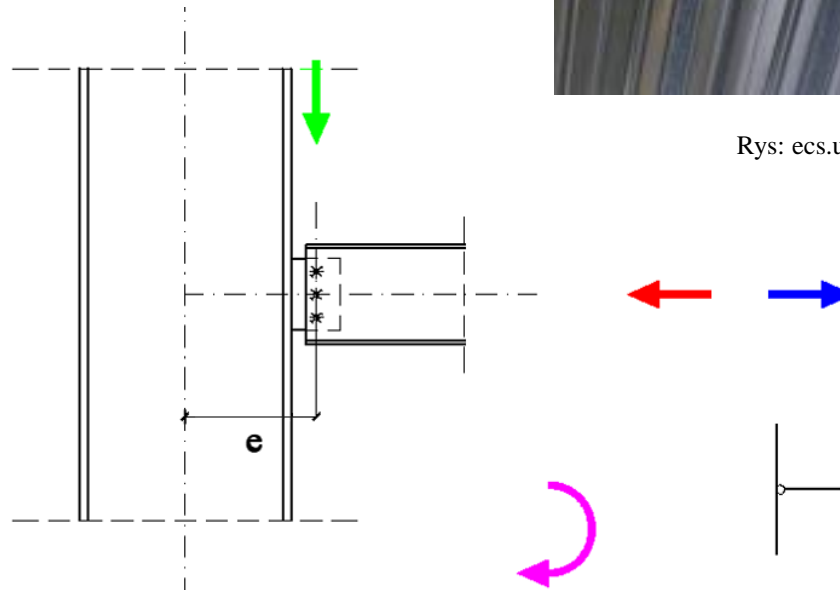
Rys: kodiaksteelhomes.com

W płaszczyźnie ramy:

- Przegub;
- Między belką i słupem;
- Drugorzędny moment zginający = siła · mimośród;
- Spoiny # 17;
- Śruby # 18, 19;
- Blachy # 18, 21;



Rys: ecs.umass.edu



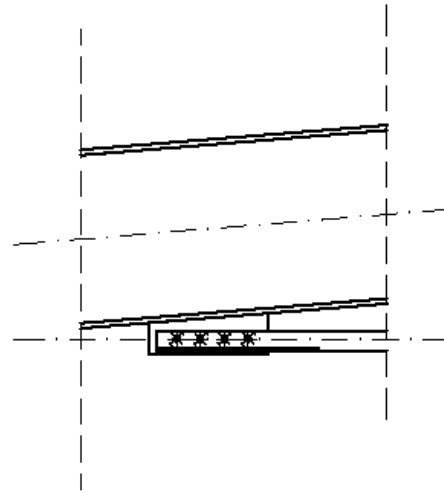
Rys: Autor

W płaszczyźnie ramy:

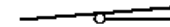
- Przegub
- Między słupem/rygłem a ściągiem;
- Spoiny # 17;
- Śruby # 18, 19;
- Blachy # 18, 21;



Rys: kobexstal.pl



Rys: Autor

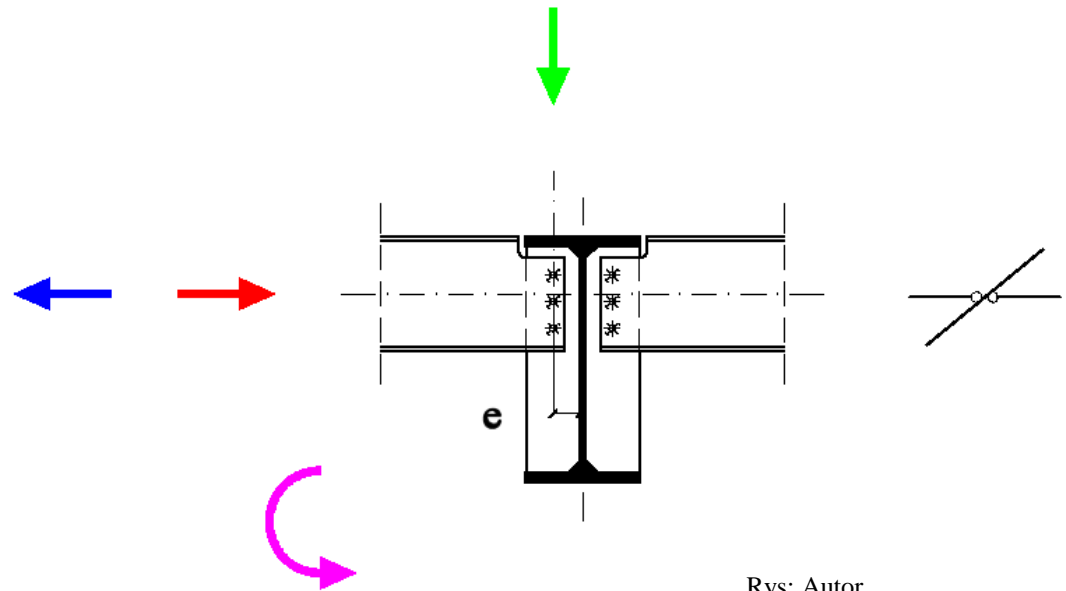


Prostopadle do płaszczyzny ramy:

- Przegub;
- Między belką podciąganiem lub między ramą a belką drugorzędną;
- Drugorzędny moment zginający = siła · mimośród;
- Spoiny # 17;
- Śruby # 18, 19;
- Blachy # 18, 21;



Rys: mscsteel.com



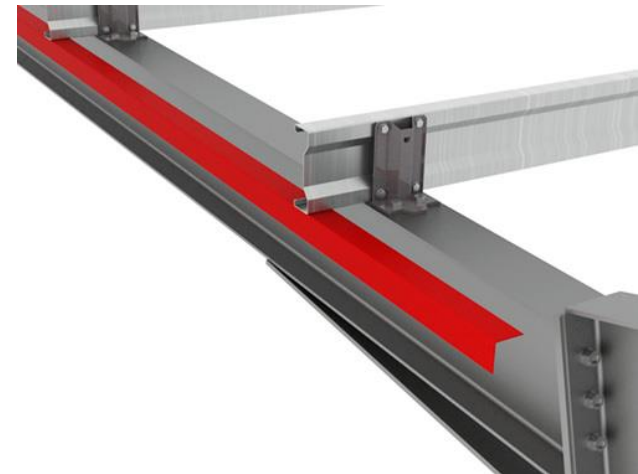
Rys: Autor

Podparcie płatwii:

- Odmienne rozwiązania dla płatwii gorącowałcowanych i zimnogiętych;
- Różne rozwiązania śrubowe lub spawane;
- Spoiny # 17;
- Śruby # 18, 19
- Blachy # 18, 21;



Rys: Autor



Rys: kingspan.com

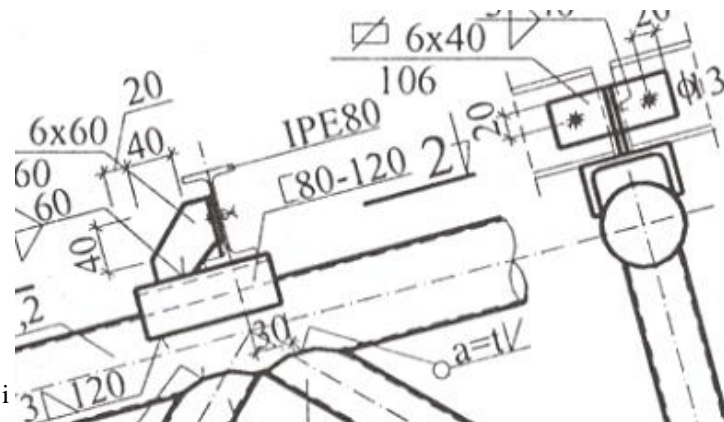


Rys: Autor



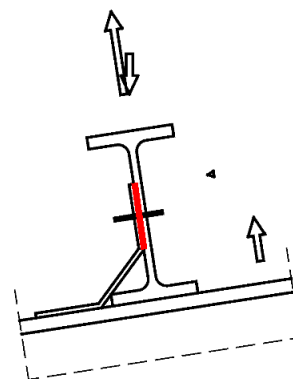
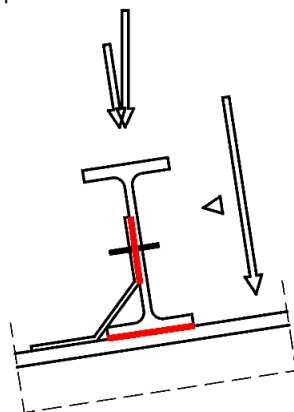
Podparcie płattwii

Goręcowałcowanych



Rys: M. Gwózdź, M. Maślak, Przykłady projektowania wybranych stalowych konstrukcji prętowych, Politechnika Krakowska 2003

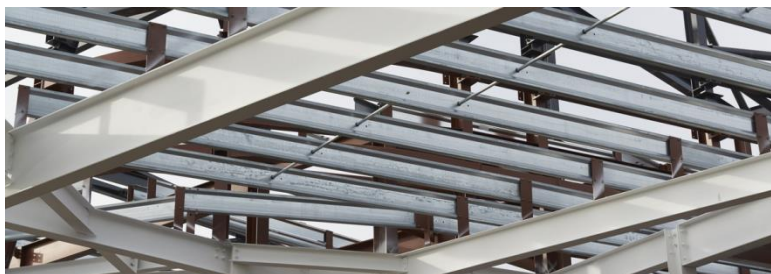
Śnieg + ciężar własny +
ciśnienie wiatru:
przez kontakt pasa
dolnego z dźwigarem;
środek i wspornik.



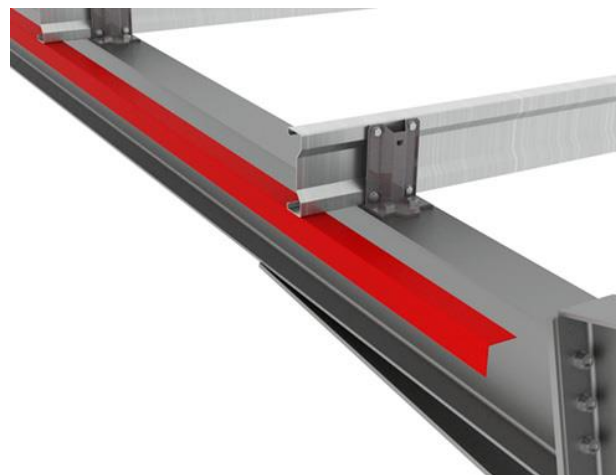
Ssanie wiatru większe
niż ciężar własny:
przez kontakt między
zębem a płytą nośną;
ściananie śruby.

→ #8 / 39

Rys: Autor



Rys: steel.ie



Podparcie płatwii

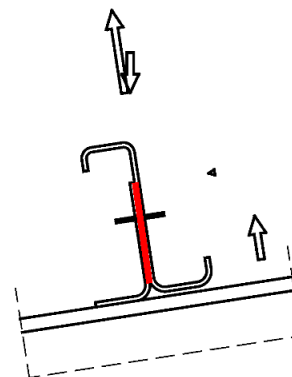
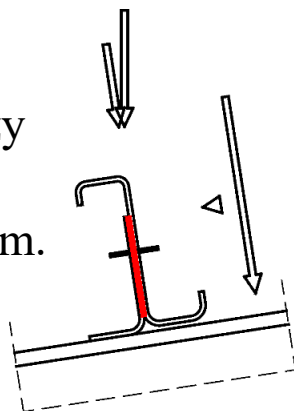
Zimnogiętej

Rys: kingspan.com

Śnieg + ciężar własny +
ciśnienie wiatru:

przez kontakt między
środkiem a śrubą;
środek i wspornik.

Brak kontaktu między
pasmem dolnym a
dźwigarem dachowym.



Ssanie wiatru większe
niż ciężar własny:
przez kontakt między
środkiem a śrubą;
środek i wspornik.

→ #8 / 41

Rys: Autor

Oparcie rygli obudowy:

- Różne rozwiązania spawane i śrubowe;
- Spoiny # 17;
- Śruby # 18, 19;
- Blachy # 18, 21;



RysAutor



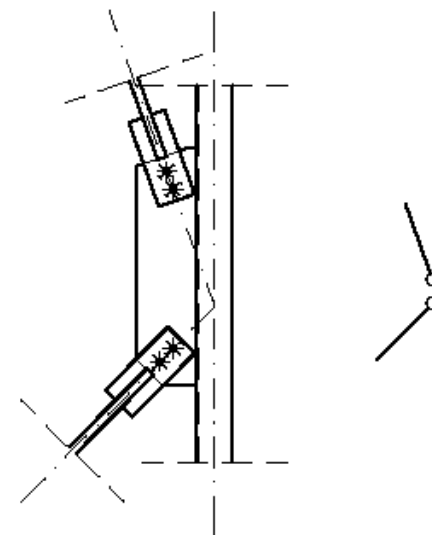
Rys: devisdepro.com



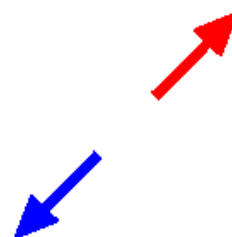
RysAutor

Stężenia:

- Przegub;
- Spoiny # 17;
- Śruby # 18, 19;
- Blachy # 18, 21;



Rys: Autor

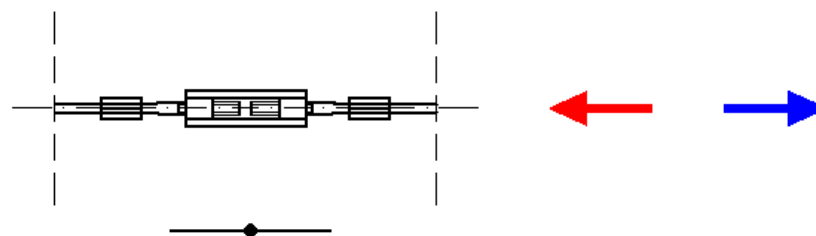


Stężenia, ściągi:

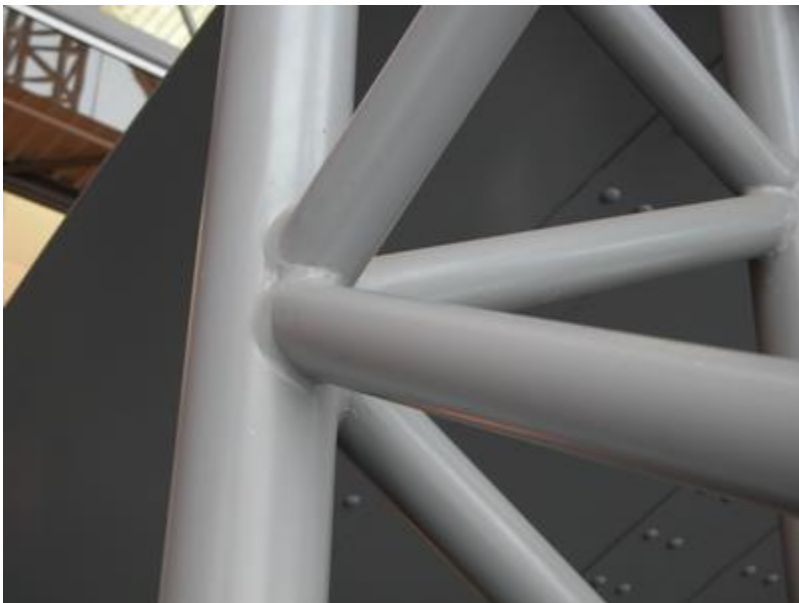
- Śruby rzymskie;
- Sztywne;
- Śruba rozciągana;
- Śruby: # 18;



Rys: Autor



Węzły w kratownicach są specyficznym problemem. Połączenia spawane między prętami kratownicy można traktować jako sztywne lub przegubowe. W tym drugim przypadku muszą zostać spełnione dodatkowe grupy warunków. Więcej informacji przedstawione będzie na wykładzie #21.



Rys: tboake.com

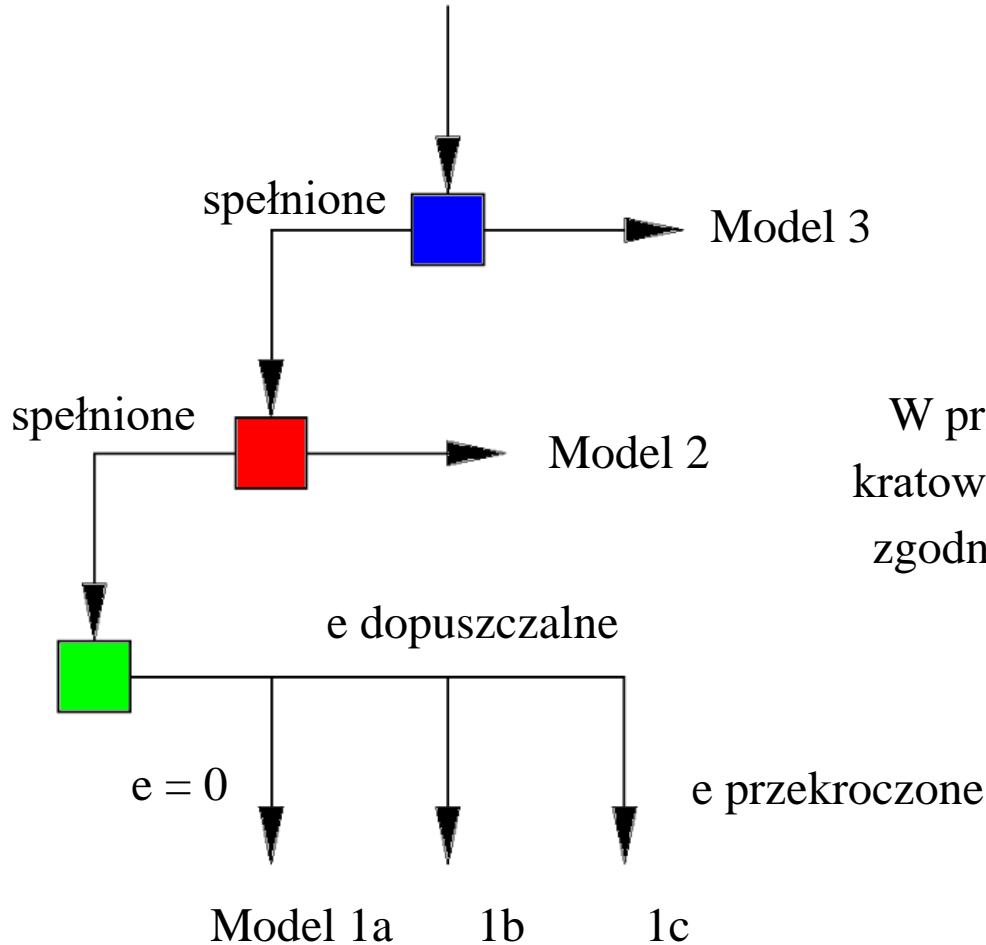


Rys: freimans.com

Kratownica

Rys: Autor

→ #9 / 54



W przypadku modelu 2 oraz 3, statyka kratownicy musi być policzona ponownie, zgodnie z nowym modelem statycznym.



Rys: zs4-sanok.pl



Rys: encrypted-tbn0.gstatic.com

Specyficznym problemem są połączenia montażowe (między elementami transportowymi) w kratownicach. W kratownicy mamy tylko siły osiowe. Profile zamknięte są stosowane przede wszystkim w nowoczesnych kratownicach.

W Eurokodzie nie ma informacji o obliczaniu sztywności i nośności połączeń między kształtownikami zamkniętymi.

W związku z tym przyjmuje się, że - jeśli wytrzymałość węzła jest wystarczająca – węzeł kratownicy nie zmieniają schematu statycznego konstrukcji. Pręt kratowy jest traktowany jako jeden ciągły element.

Weryfikacja sztywności

Założenie
wstępne



Model
numeryczny



Rozwiązanie
techniczne



Rzeczywiste
zachowanie

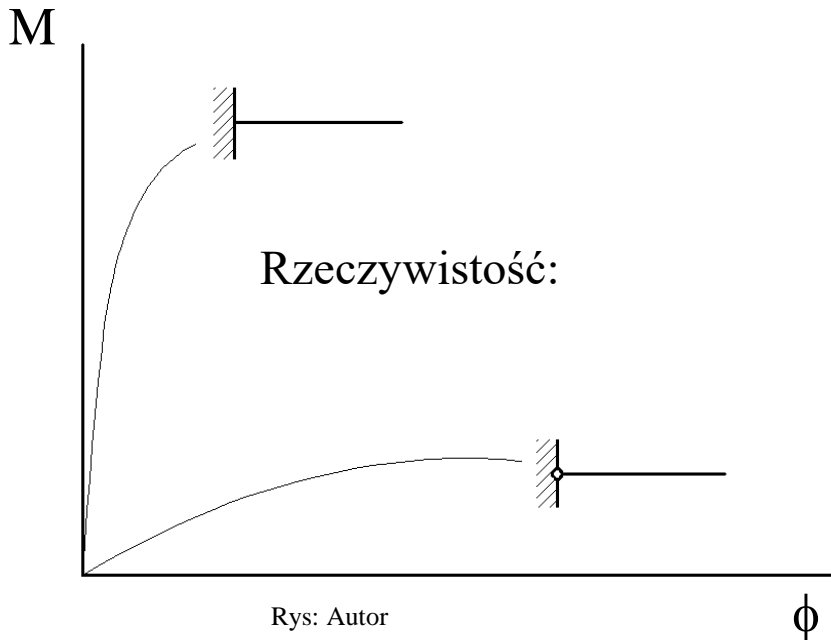
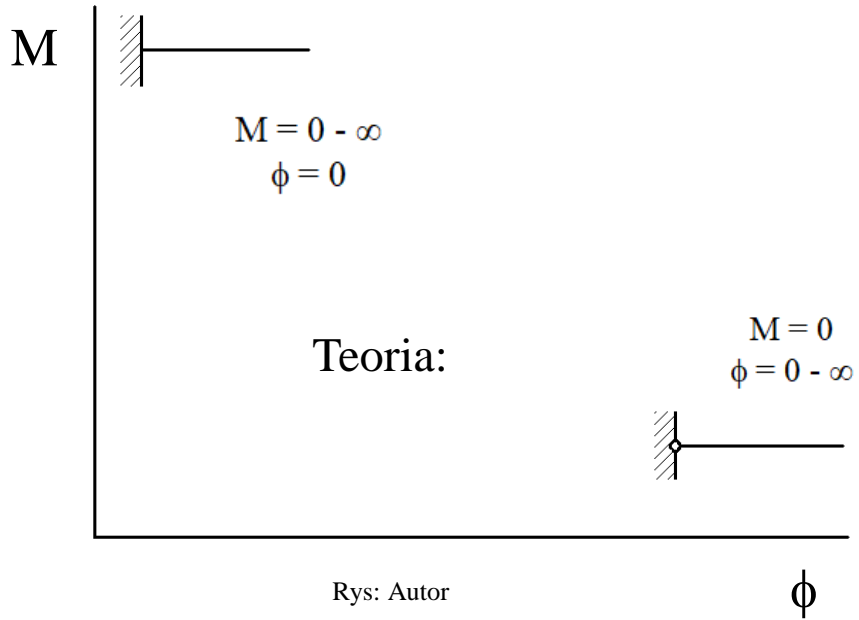
Rzeczywiste zachowanie węzła - oparte na jego geometrii (wysokość przekroju belki i słupa, grubość blach, typ śrub...) - należy zbadać i porównać z założeniami początkowymi. Oba punkty: wstępne założenia i rzeczywiste zachowanie - muszą być takie same. W przypadku różnicy, połączenie należy zaprojektować jeszcze raz.

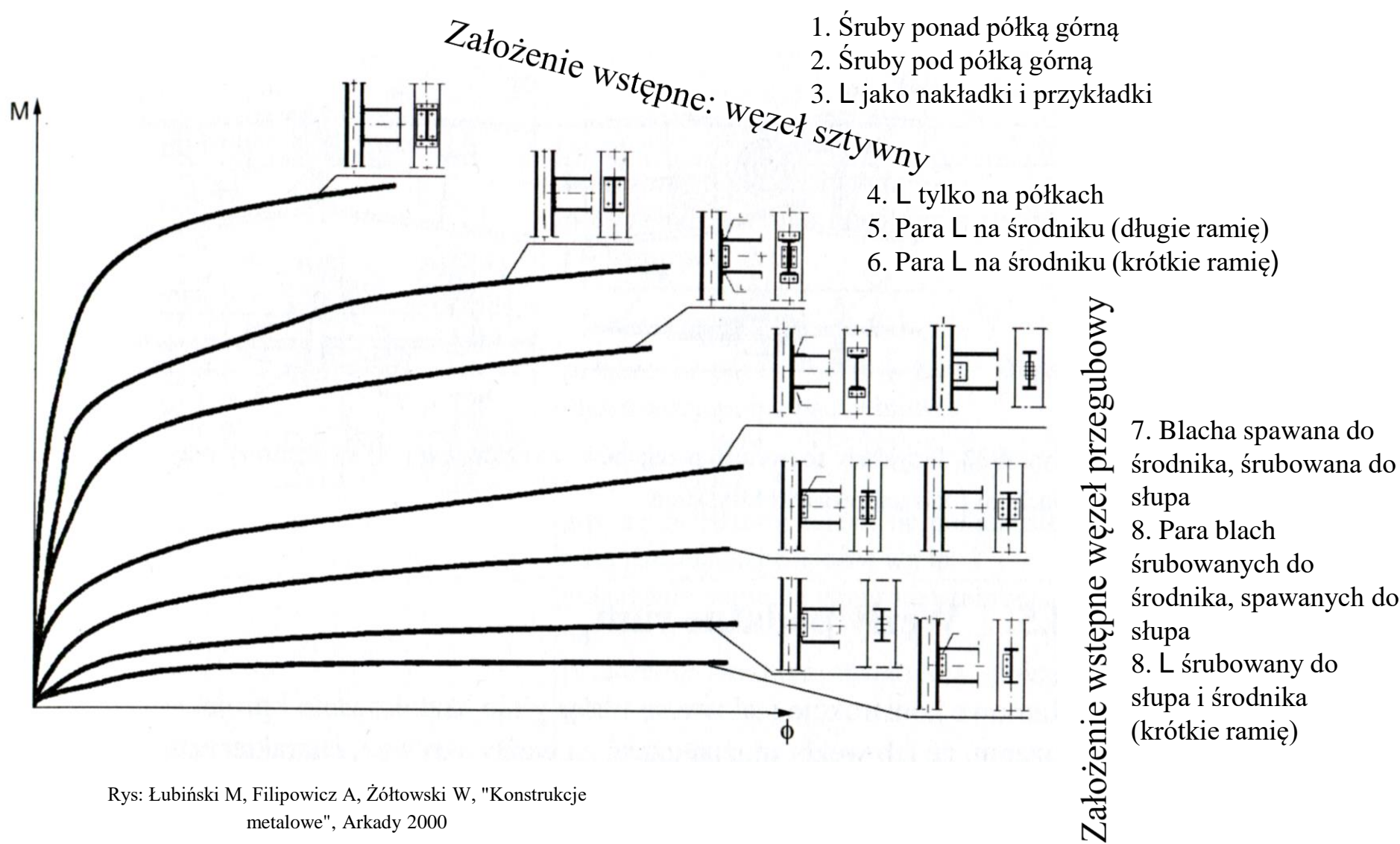
Weryfikację sztywności należy przeprowadzić przed sprawdzeniem nośności. Wzory na nośność dotyczą określonych typów węzłów (sztywny / przegub) i nie są prawdziwe dla innych typów.

Węzły

Dla węzłów ważna jest ich sztywność (zależność $M-\phi$)

→ #8 / 56





Wyniki eksperymentów

Obliczenia: (→ wyk. # 14, 15)

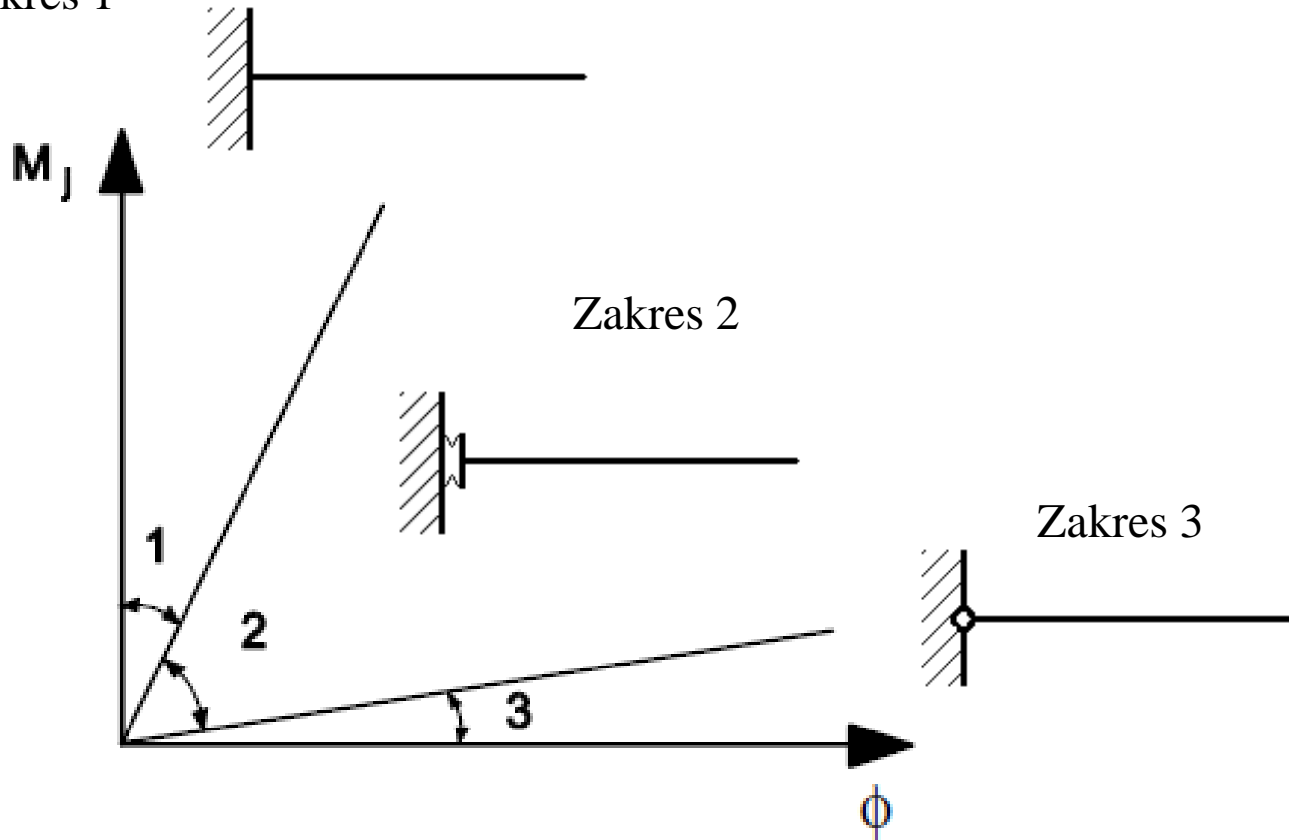
Jakie są granice między 1 i 2 oraz 2 i 3?

Jaka jest sztywność analizowanego węzła?

Co wynika z nałożenia granic na wykres sztywności?

→ #8 / 57

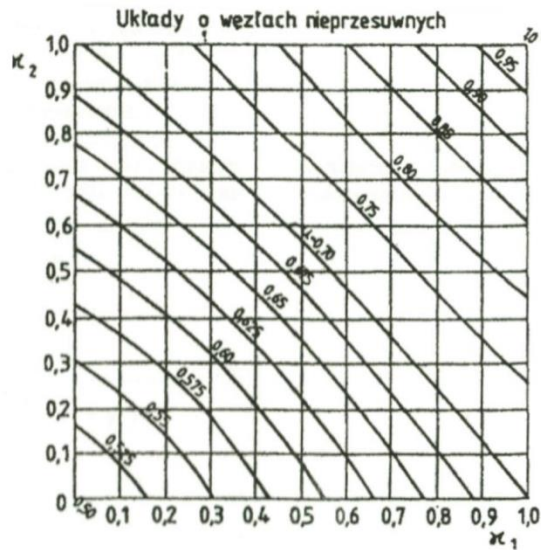
Zakres 1



Rys: Autor

Rys: EN 1993-1-8 fig 5.4

Sztywność węzła była wspomniana na wykładzie #13 (metoda europejska i amerykańska). To jednak dotyczyło sztywności globalnej”, teraz istotna jest sztywność ”lokalna”.



Rys: PN-B 3200 fig. Z1-3

Sztywność węzła

$$\kappa = \max [0,3 \ ; \ K_C / (K_C + K_0)]$$

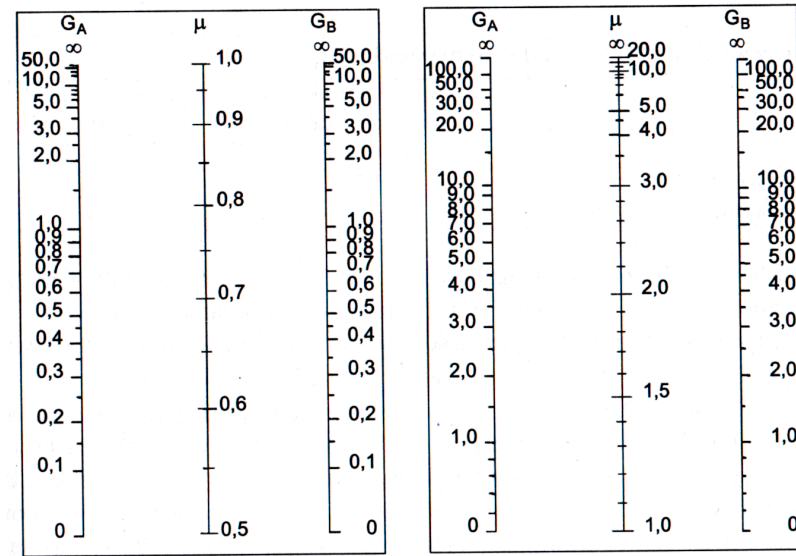
$$K_C = J_C / h$$

$$K_0 = \Sigma (\eta J_B / L)$$

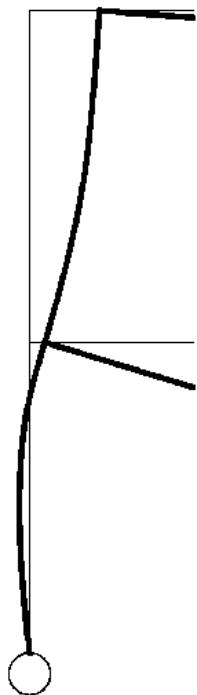
Rys: M. Łubiński, W. Żółtowski
"Konstrukcje metalowe", Arkady,
Warszawa 2000

Sztywność węzła

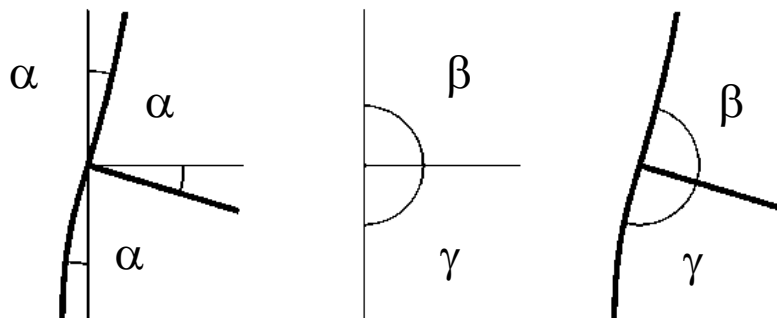
$$G = [\Sigma (J_C / h)] / [\Sigma (\eta J_B / L)]$$



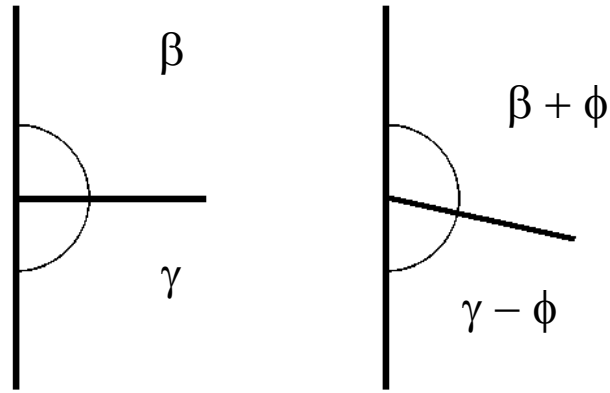
Sztywność „globalna”: wpływ sąsiednich części na zachowanie węzła. Uwzględnia się tylko globalną rotację węzłów. Nie ma zmiany początkowych kątów między elementami.



Rys: Autor



Sztywność „lokalna”: pod uwagę brana jest tylko zmiana kątów początkowych pomiędzy elementami - jako efekt lokalnych odkształceń. Rotacja globalna nie jest w tym przypadku ważna. Sztywność „lokalna” definiuje typ połączenia.

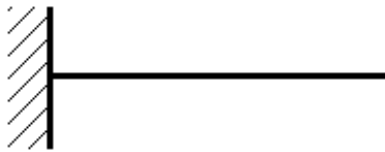


Rys: Autor

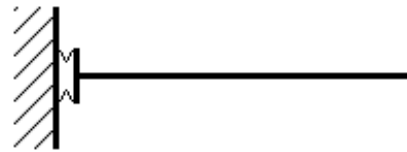
Sztywny

Podatny

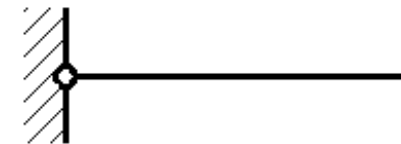
Przegub



$$\phi = 0$$



$$\phi > 0$$



Swobodny obrót

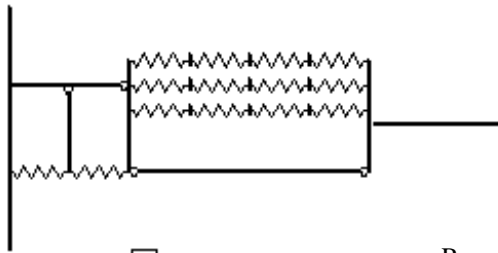
Wnioski

Globalna sztywność jest ważna tylko dla stabilności (długość krytyczna).

Lokalna sztywność może zmieniać rozkład sił przekrojowych. Jest to ważne ze względu na nośność przekrojów i stateczność prętów.

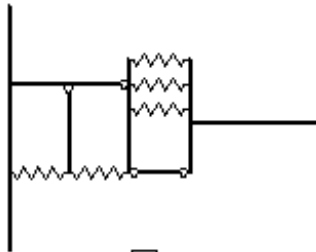
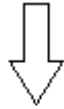
Sztywność lokalna zależy od lokalnych parametrów: liczby śrub, średnicy śrub, grubości blach...

Każda część węzła jest przedstawiana jako sprężynka.

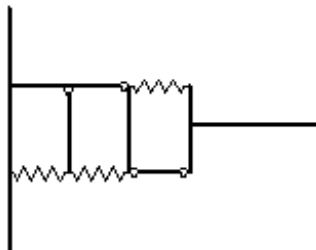
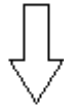


Pełny model sprężynkowy.

Rys: Autor



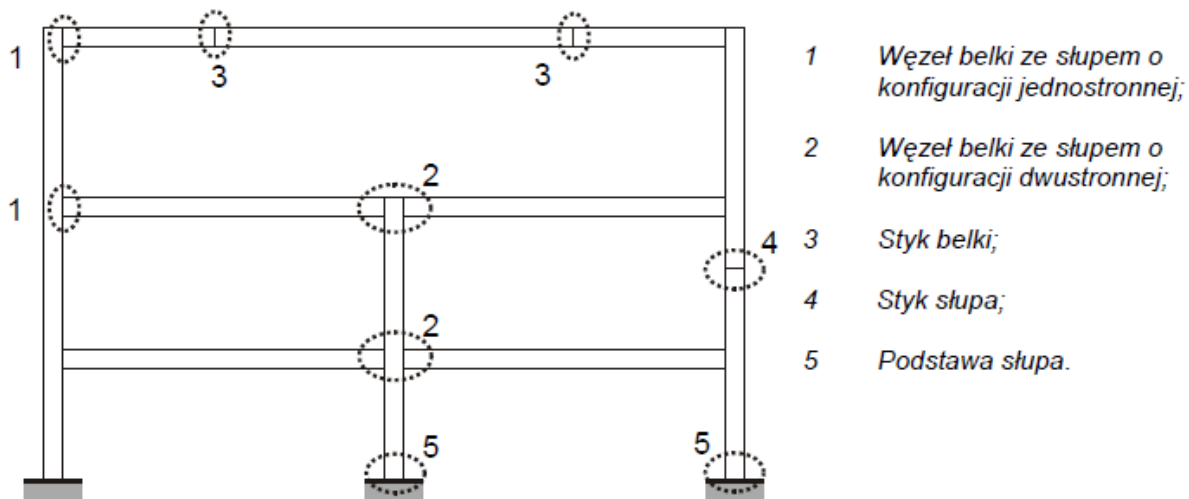
Redukcja z 3x(szereg sprężynek) do 3x(jedna sprężynka efektywna)



Redukcja z 3x(sprężynka efektywna) do jednej sprężynki zastępczej

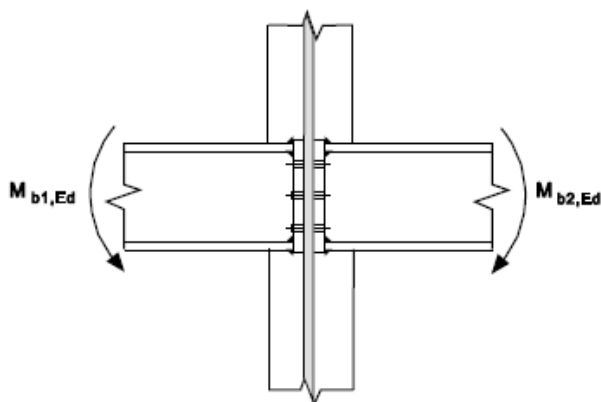
Sztywność węzła jest liczona dla tak zredukowanego modelu.

Obliczenia według Eurokodu

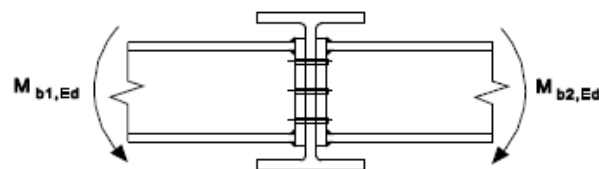


Rys: EN 1993-1-8 fig 1.2

a) Konfiguracje węzłów konstrukcji w płaszczyźnie większej sztywności



Węzeł belki ze słupem o konfiguracji dwustronnej



Węzeł belki z belką o konfiguracji dwustronnej

W Eurokodzie jest sporo niekonsekwencji:

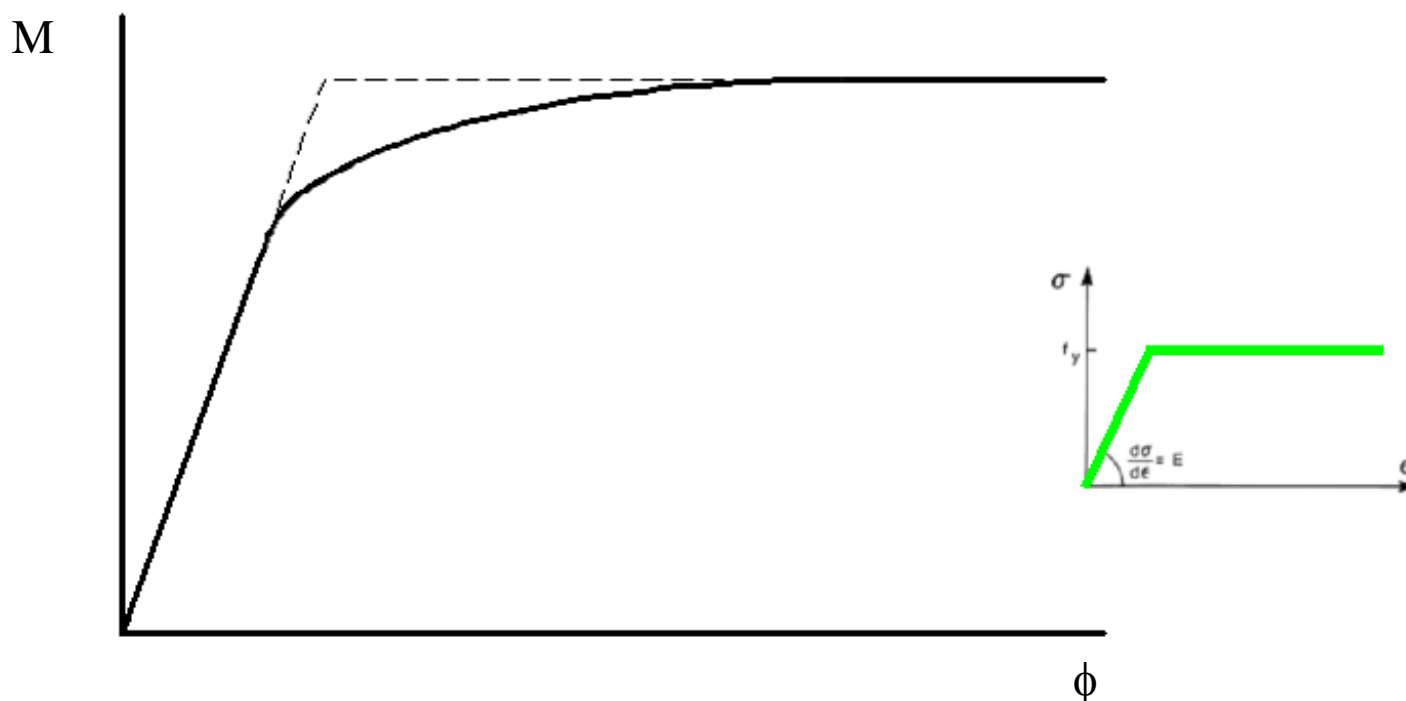
- Na rys 1.2 (#t /73) pokazany jest styk zginany względem osi słabej, ale nie ma żadnych informacji o wzorach i procedurach obliczeniowych (nośność, sztywność) dla takiego przypadku;
 - Zgodnie z 1.2 (#t /73) należy sprawdzać każdy rodzaj styku, ale przedstawione w Eurokodzie wzory i procedury dla sprawdzenia sztywności dotyczą styków doczołowych;
- Zgodnie z 1.2 (#t /73) należy sprawdzać także sztywność styków typu belka-belka i słup-słup, ale podane są tylko wzory tylko dla styków belka-słup;
 - Wzory przedstawione w Eurokodzie mogą być stosowane tylko, gdy siła osiowa w elementach nie przekracza 5% nośności; brak informacji co zrobić gdy ten warunek nie jest dotrzymany;

- Wartości k_i przedstawione w Eurokodzie dotyczą przekrojów dwuteowych; omówione są też styki przekrojów rurowych; brak informacji o połączeniach innych rodzajów przekrojów;
- W Eurokodzie przedstawione są wartości k_i dla blach ścinanych ale brak informacji o wartości Ψ i $S_{j, \text{end}}$ dla węzłów uniwersalnych ($\rightarrow \#t / 79$);
- Nie ma jasności, czy należy sprawdzać węzły przegubowe (przegub \leftrightarrow węzeł podatny);
 - W Eurokodzie nie ma żadnych wyjaśnień, w jaki sposób należy budować modele sprężynkowe;
 - W literaturze można znaleźć informacje niemal wyłącznie dla styków śrubowych doczołowych.

Zgodnie z EN 1993-1-8, zależność $M-\phi$ dla węzła sztywnego może być przedstawiona jako układ trzech funkcji:

liniowa – nieliniowa - liniowa

To czyni ją podobną do wykresu $\sigma-\epsilon$.

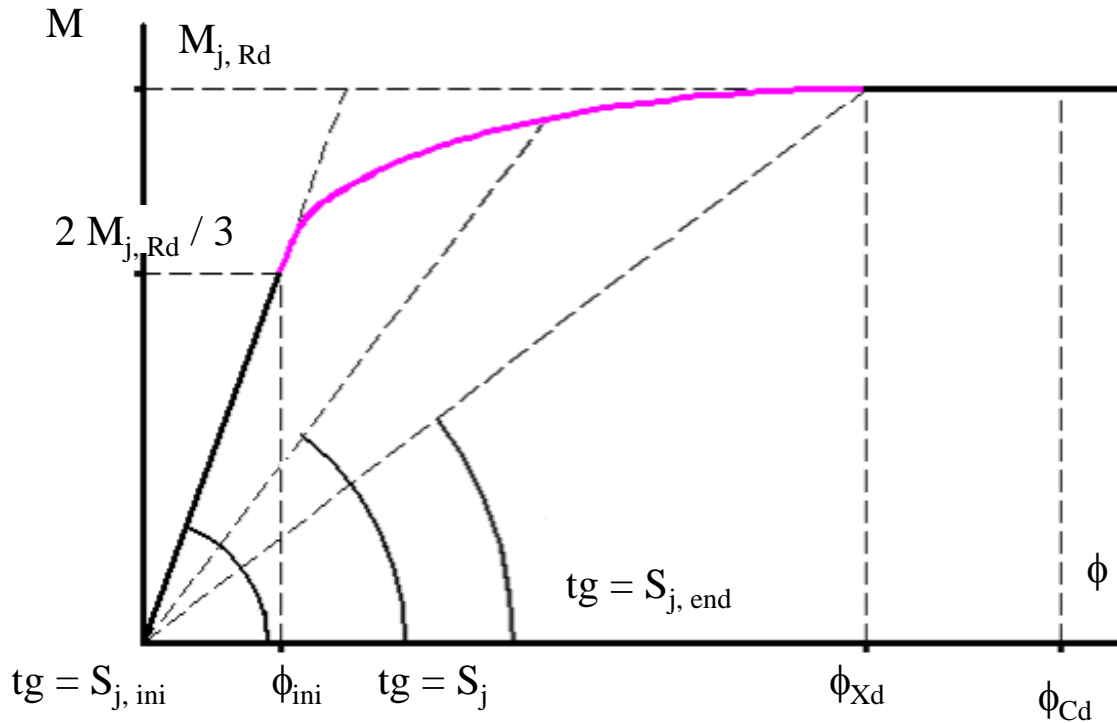


Rys: Autor

EN 1993-1-8 5.1.2.(3), (4)

EN 1993-1-8 (6.27), (6.28a), (6.28b)

EN 1993-1-8 fig 6.1



$$\phi_{ini} = 0,667 M_{j,Rd} / S_{j,ini}$$

$$\phi_{Xd} = 1,5^\Psi M_{j,Rd} / S_j$$

$$\phi_{Cd} = \phi_{max}$$

Rys: Autor

$$M_{j,Ed} = S_j \phi$$

$S_{j,ini} \rightarrow$ geometria (wyk #15)

Dla $M_{j,Ed} > 2 M_{j,Rd} / 3 :$

$$S_j = S_{j,ini} / \mu$$

$$\mu = (1,5 M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^\Psi$$

$$\mu_{end} = 1,5^\Psi$$

$M_{j,Rd} \rightarrow$ geometria (wyk #19)

$$M_{j,Ed} = S_j \phi = S_{j,ini} \phi / \mu$$

$$M_{j,Ed} \mu = S_{j,ini} \phi$$

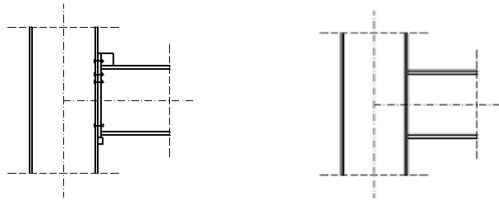
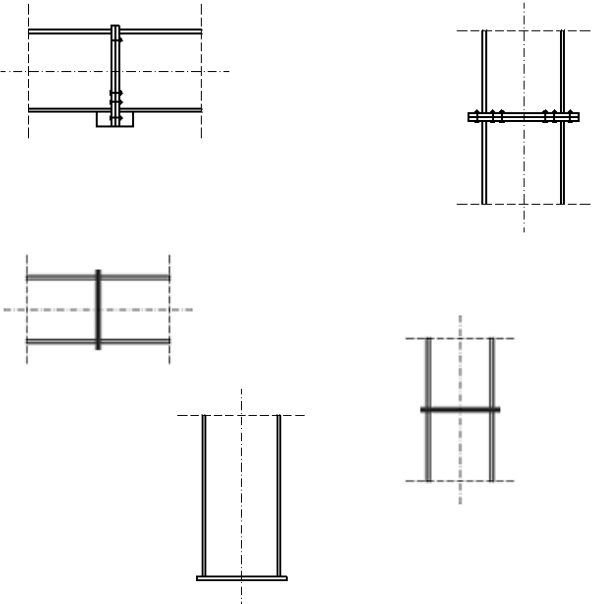
$$M_{j,Ed} (1,5 M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^\Psi = S_{j,ini} \phi$$

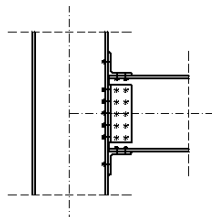
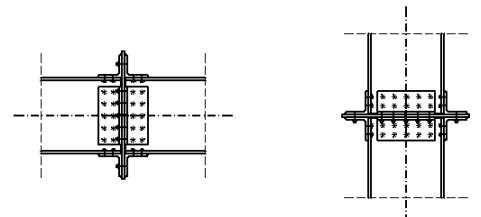
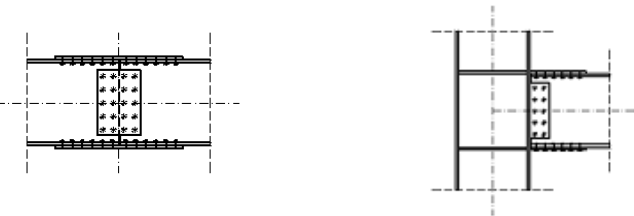
$$M_{j,Ed}^{\Psi+1} = S_{j,ini} M_{j,Rd}^\Psi \phi / 1,5^\Psi$$

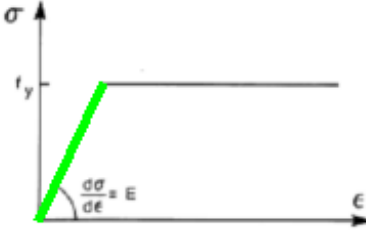
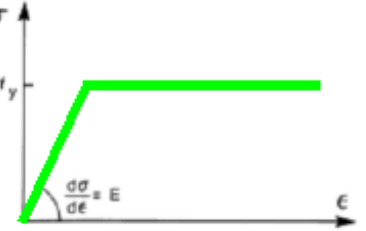
$$M_{j,Ed}^{\Psi+1} = \phi (S_{j,ini} M_{j,Rd}^\Psi / 1,5^\Psi)$$

$$M_{j,Ed} = (\Psi+1 \sqrt[\Psi]{\phi}) A$$

$A \rightarrow$ geometria

Węzeł	Ψ	$S_{j, \text{end}}$ (sztywny)	$S_{j, \text{end}}$ (podatny)
	2,7	$S_{j, \text{ini}} / 3,0$	$S_{j, \text{ini}} / 2,0$
		$S_{j, \text{ini}} / 3,0$	$S_{j, \text{ini}} / 3,0$

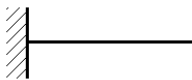
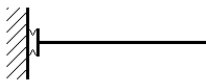
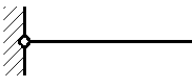
Węzeł	Ψ	$S_{j, \text{end}}$ (sztywny)	$S_{j, \text{end}}$ (podatny)
	3,1	$S_{j, \text{ini}} / 3,5$	$S_{j, \text{ini}} / 2,0$
		$S_{j, \text{ini}} / 3,5$	$S_{j, \text{ini}} / 3,5$
	?	$S_{j, \text{ini}} / ?$	$S_{j, \text{ini}} / ?$

Analiza	Klasy przekroju → #3 / 85	Zależność odkształcenie- napężenie
Sprężysta	I, II, III, IV	
Plastyczna	I	

Różne wzory na nośność dla obu rodzajów analizy.

Rys: Autor

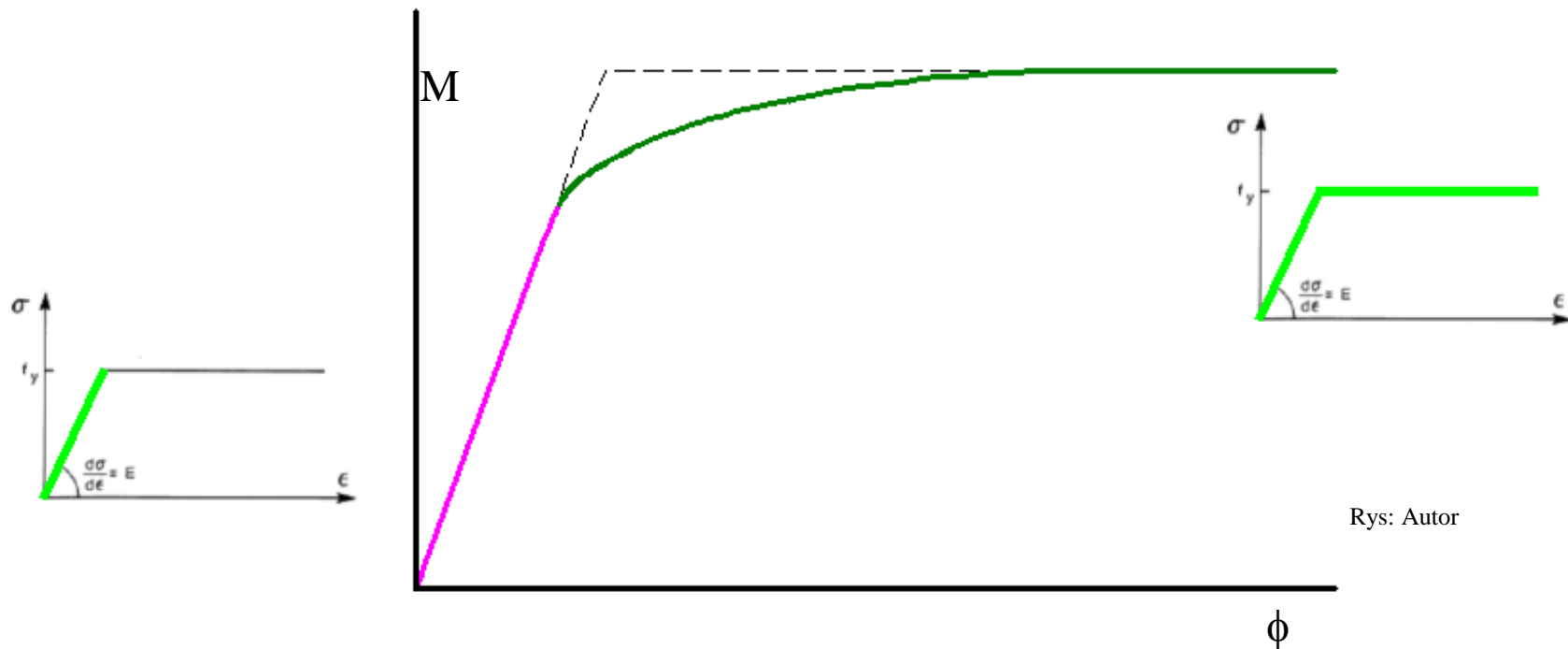
Analiza sprężysta i plastyczna węzłów:

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

Rys: Autor

Analiza sprężysta: początkowa, liniowa część zależności

Analiza plastyczna: nieliniowa i stała część zależności



Rys: Autor

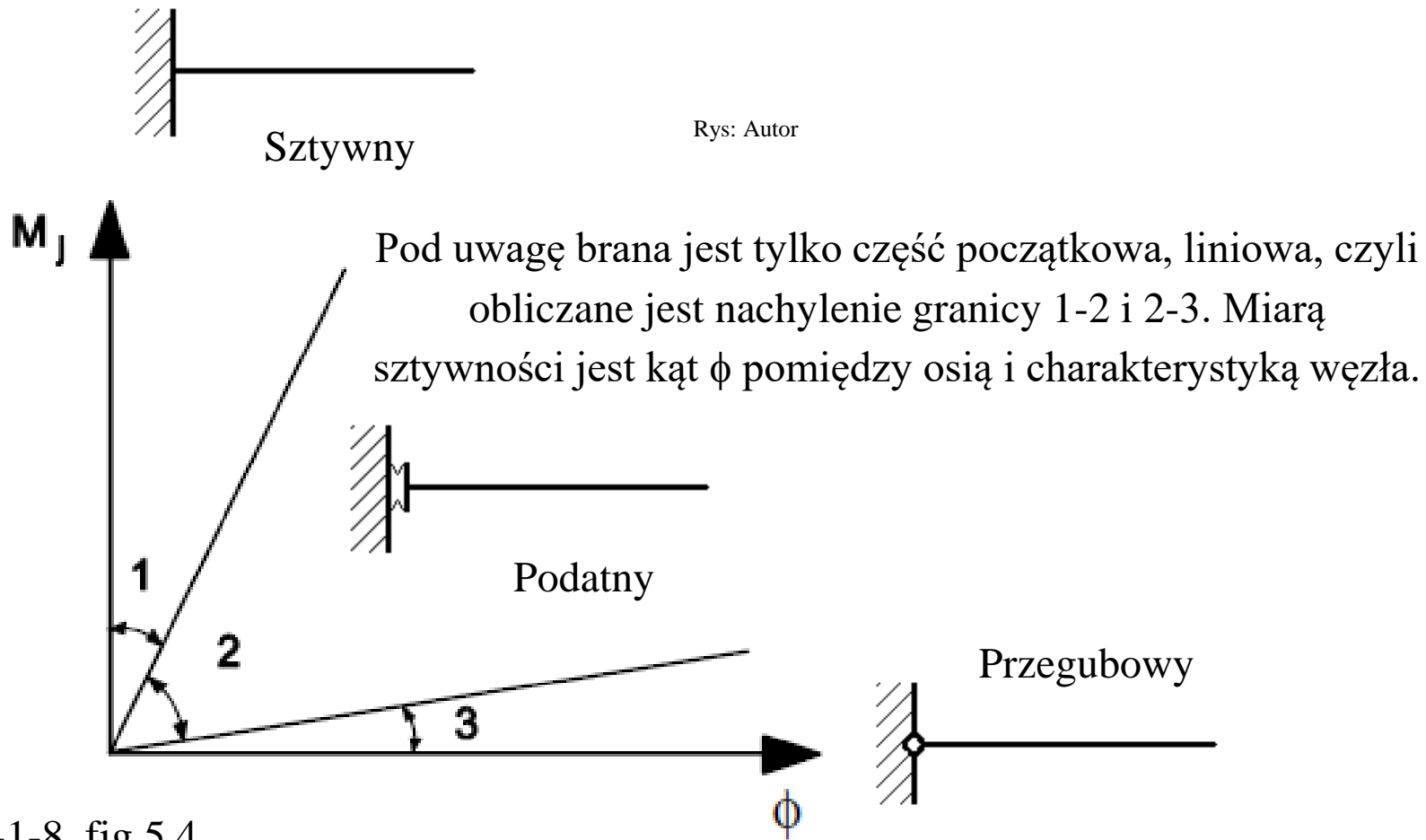
Dopuszczalne i zalecane metody analizy:

Obliczenia	Analiza sprężysta (prosta)	Analiza plastyczna (skomplikowana)
Nowoprojektowana konstrukcja	Zalecana	Dopuszczalna
Przeliczenie istniejącej konstrukcji (ekspertyza lub zmiana obciążenia)	Dopuszczalna	Zalecana

Przykłady obliczeń obciążenia metodami w projektach na I stopniu studiów:

Projekt	Analiza sprężysta	Analiza plastyczna
I (kratownica)	Całość	Nic
II (strop stalowy)	Całość	Nic
III (rama)	Całość	Nic

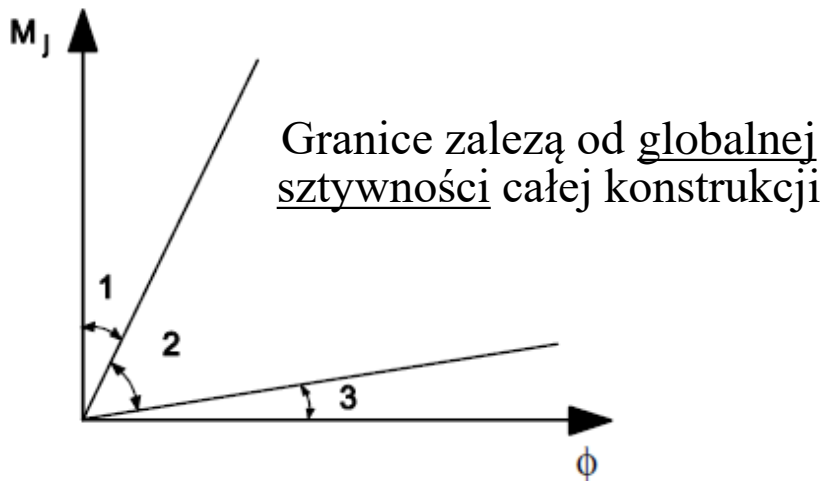
Obliczenia w analizie sprężystej



EN 1993-1-8 fig 5.4

Musimy udzielić odpowiedzi na dwa pytania:

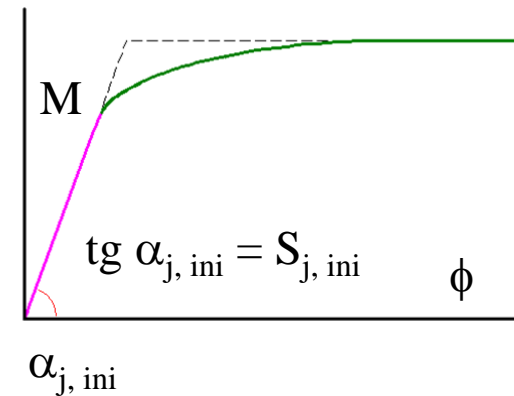
1. Jakie są granice 1-2 i 2-3 między różnymi rodzajami węzłów? → #t / 87-95
2. Jak wygląda charakterystyka $M-\phi$ dla rozważanego węzła? → #t / 96 & wykład #15



Rys: EN 1993-1-8 fig 5.4

Granice zależą od globalnej sztywności całej konstrukcji

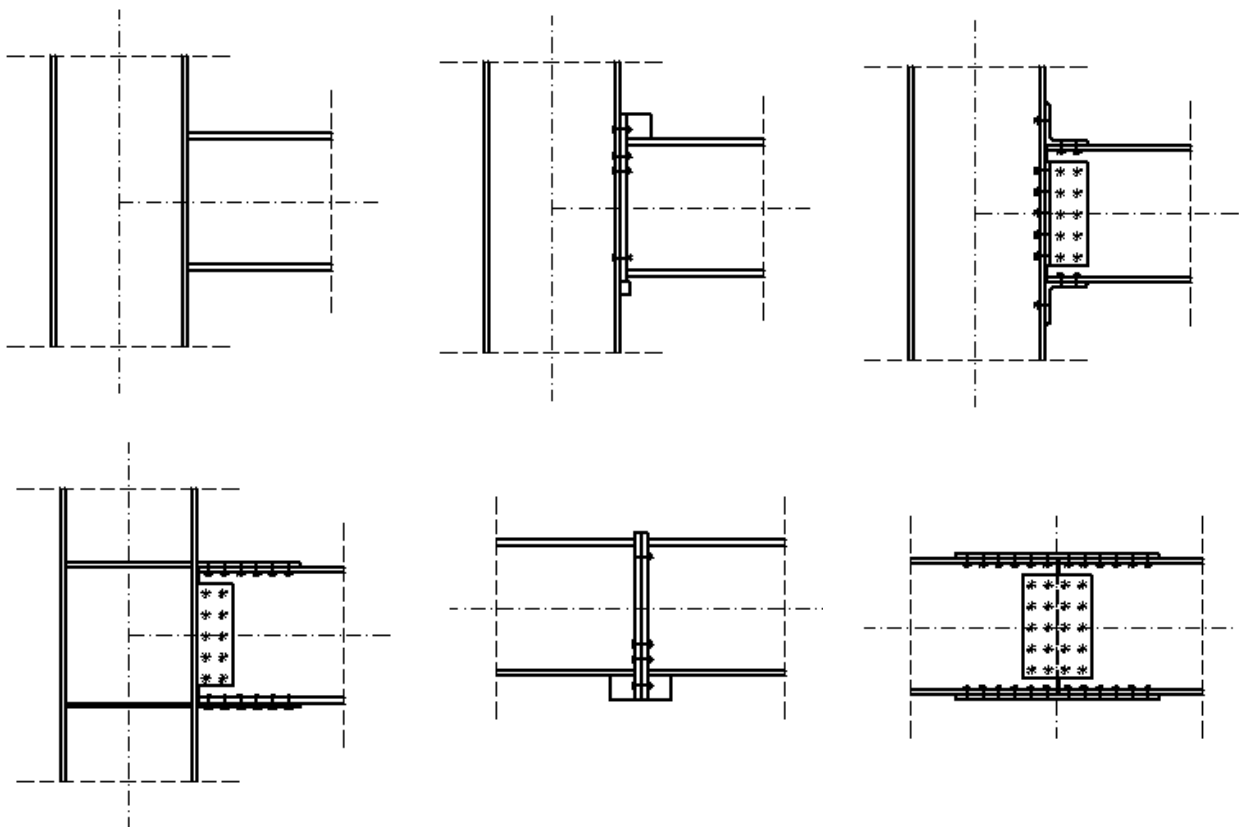
Rys: Autor



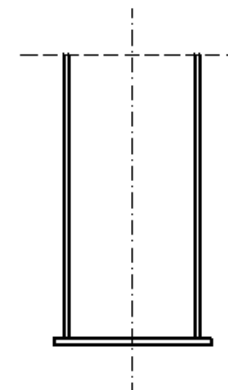
Charakterystyki zależą od sztywności lokalnej części składowych węzła

Zgodnie z EN, węzły dzielone są na dwie grupy:

Węzły ramowe

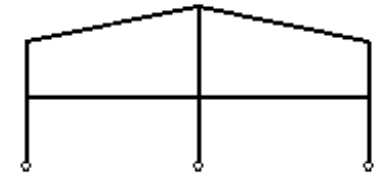
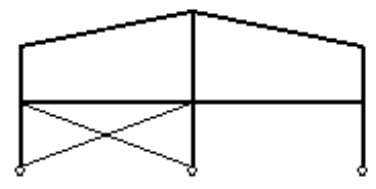


Węzeł podporowy

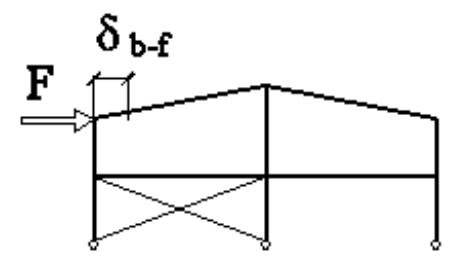
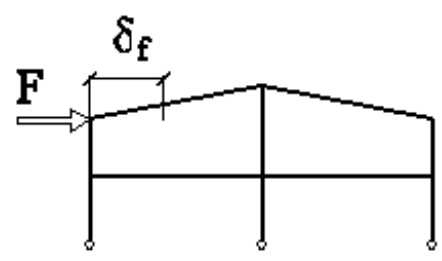


Rys: Autor

Stężenie ścian
w płaszczyźnie ramy



Rys: Autor



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



Rama niestężona

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



Rama stężona - analiza II rzędu nie jest konieczna

→ #13 / 47

Analiza II rzędu

→ wykład #13

Kiedy musimy odwołać się do analizy II rzędu (PN B 03200)

Granica 1-2, 2-3

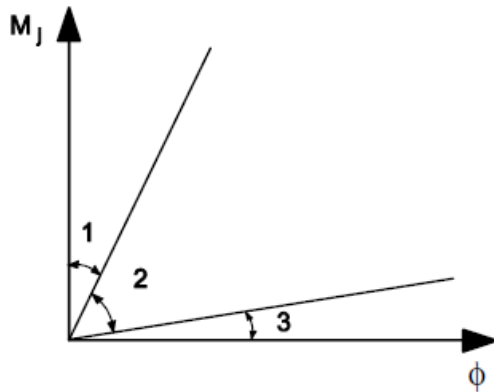
Połączenie belki ze słupem, uciąglenie słupa lub uciąglenie belki (węzeł ramowy):

$$M_j = S \phi$$

$$S_{2-3} = 0,5 E J_b / l_b$$

$$S_{1-2} = k_b E J_b / l_b$$

$$k_b = ? \rightarrow \#t / 90 - 91$$



Rys: EN 1993-1-8 fig 5.4

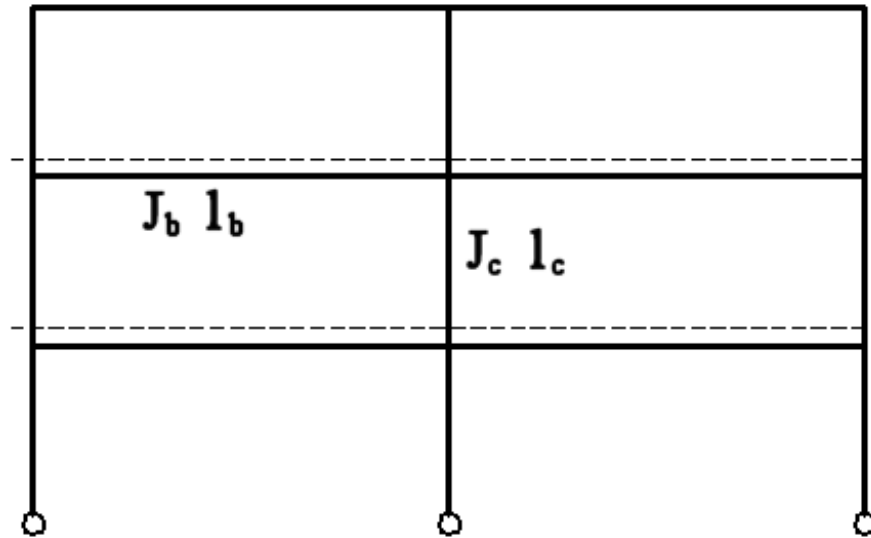
EN 1993-1-8 5.2.2.5 (1)

Różnica między ramą stężoną i niestężoną jest istotna także dla sztywności węzła:

rama stężona $\rightarrow k_b = 8$

rama niestężona $\rightarrow \#t / 91$

EN 1993-1-8 5.2.2.5 (1)



$K_b = \text{średnia } (J_b / l_b)$

$K_c = \text{średnia } (J_c / l_c)$

$K_b / K_c < 0,1$	$K_b / K_c \geq 0,1$
Wszystkie węzły jako podatne	$k_b = 25$

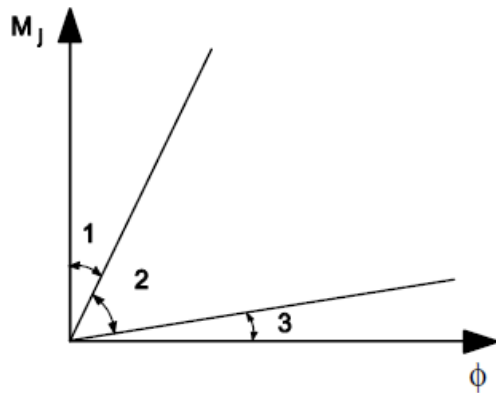
EN 1993-1-8 5.2.2.5 (1)

Oparcie słupa na fundamencie (węzeł podporowy)

$$M_j = S \phi$$

$$S_{2-3} = 0,5 E J_c / l_c$$

$$S_{1-2} \rightarrow \#t / 93 - 94$$



Rys: EN 1993-1-8 fig 5.4

EN 1993-1-8 5.2.2.5 (1), (2)

Różnica między ramą stężoną i niestężoną jest istotna także dla sztywności węzła:

rama stężona $\rightarrow \#t / 94$

rama niestężona $\rightarrow S_{1-2} = 30 E J_c / l_c$

EN 1993-1-8 5.2.2.5 (2)

$$\lambda_c = L_c / (93,9 \varepsilon i)$$

$\lambda_c \leq 0,5$	$0,5 < \lambda_c < 3,93$	$3,93 \leq \lambda_c$
Wszystkie węzły jako sztywne	$S_{1-2} = 7 (2 \lambda_c - 1) E J_c / l_c$	$S_{1-2} = 48 E J_c / l_c$

Nie sztywne i nie przegubowe = podatny

EN 1993-1-8 5.2.2.5 (2)

Charakterystyka $M-\phi : S_{j, ini}$

$S_{j, ini} \leq S_{1-2} \rightarrow$ przegub

$S_{1-2} < S_{j, ini} < S_{2-3} \rightarrow$ węzeł podatny

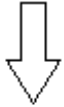
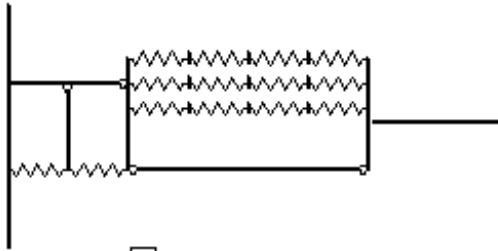
$S_{2-3} \leq S_{j, ini} \rightarrow$ węzeł sztywny

Węzły ramowe:

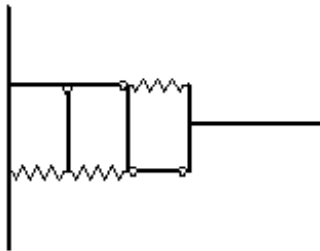
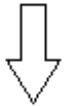
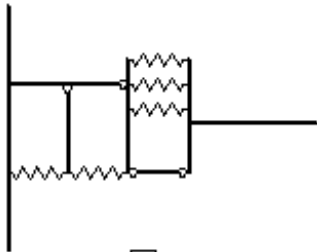
$$S_{j, ini} = E z^2 / [\Sigma (1 / k_i)]$$

Węzły podporowe:

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



Rys: Autor



Każda część węzła jest przedstawiana jako sprężynka.

Każda sprężynka jest opisana sztywnością k_i

Położenie sprężynek definiują odległości z , e , e_k

Wartości k_i , z , e , e_k , i sposób obliczenia sztywności węzła będzie przedstawiony na wykładzie #15.

Zagadnienia egzaminacyjne

Znaczenie sztywności dla obliczania węzłów

Rozwiązania techniczne dla różnych typów węzłów

Podstawowe różnice między węzłem sztywnym a przegubowym

Sztywność „lokalna” i „globalna”

Algorytm ustalania granic między węzłami sztywnymi, podatnymi i przegubowymi

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

tmichal@usk.pk.edu.pl