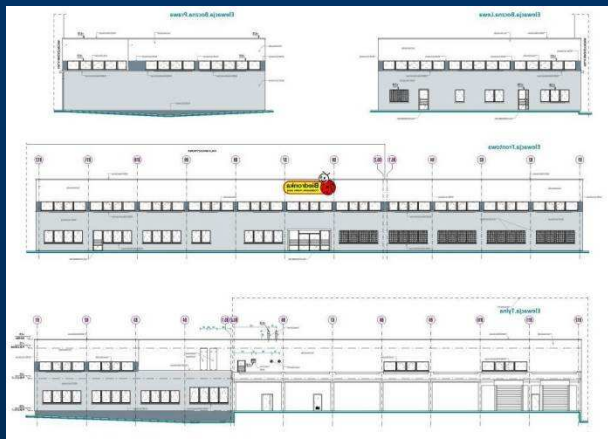


Konstrukcje metalowe 2



Opracowano z wykorzystaniem materiałów:

- [1] Trebilcock P, Lawson M., *Architectural Design in Steel*, Spon Press, 2004
- [2] Biegus A., *Konstrukcje stalowe hal*, Arkady, Warszawa 2003
- [3] Pawlak Z., *Ekonomiczna rozpiętość nawy hali stalowej*, Nowoczesne hale,
- [4] strony www dostępne w dniu 17-11-2013

Leszek CHODOR, dr inż. bud, inż.arch.

leszek@chodor.co ; lch@polskie-inwestycje.pl

Hale metalowe – ogólna charakterystyka

Szacuje się, że **50%** walcowanej stali zużywa się na konstrukcje parterowych hal, co stanowi ok **40%** całkowitego zużycia stali w Europie.

Hale – najczęściej budynki parterowe o przeznaczeniu:

- Budynki produkcyjne i magazynowe (najliczniejsze)
- Hale obsługowe (hangary, zajezdnie, stacje obsługi)
- Hale użyteczności publicznej (handlowe, wystawowe, sportowe, widowiskowe, dworce kolejowe i lotnicze)

Ze względu na zastosowany transport wewnętrzny:

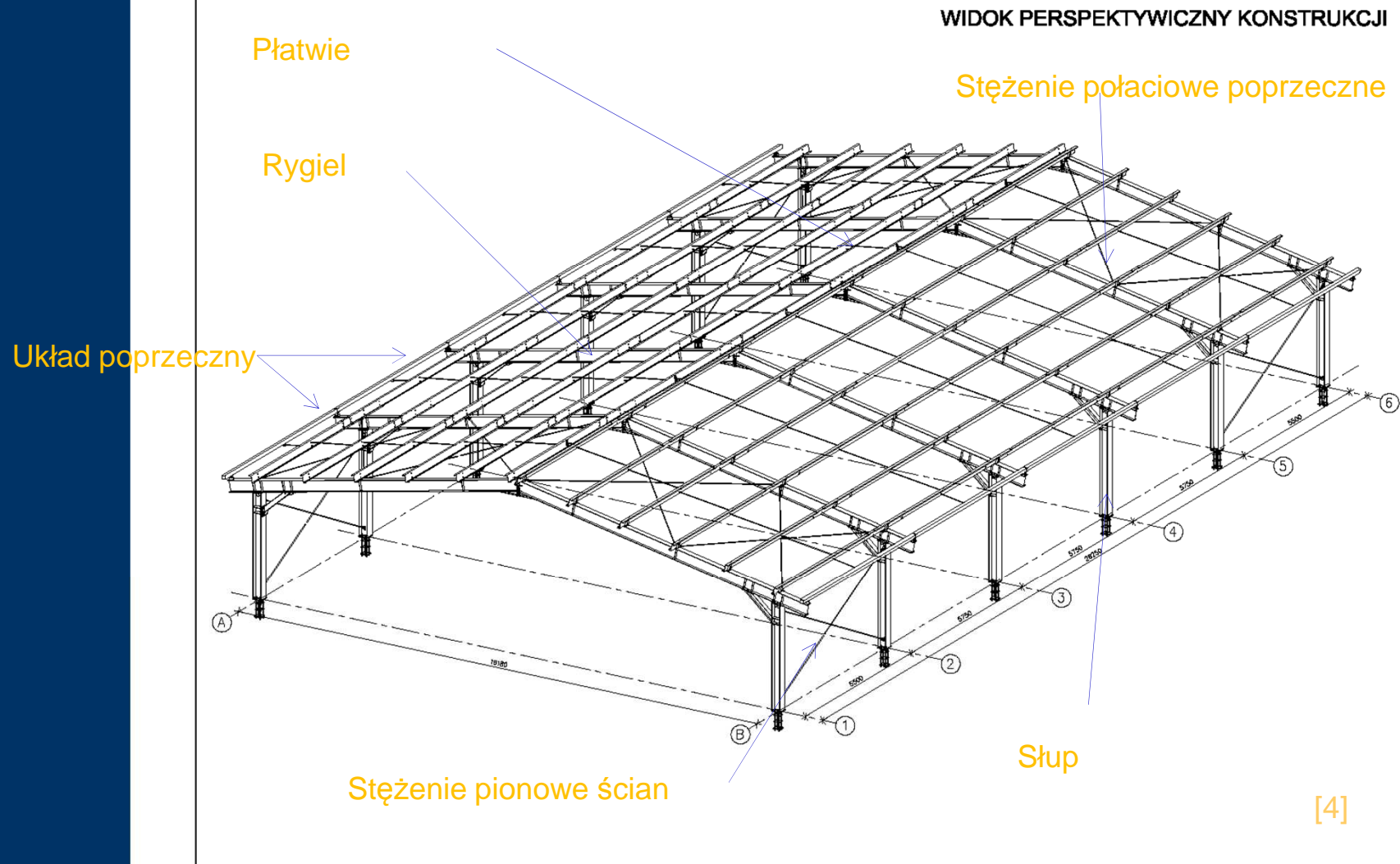
- Transport kołowy (wózki, podnośniki)
- Suwnice (transport podparty) lub wciągarki (transport podwieszony) - wyposażone w belki podsuwnicowe lub tory jezdne wciągników.

Ze względu na obudowę: ocieplone, nieocieplone.

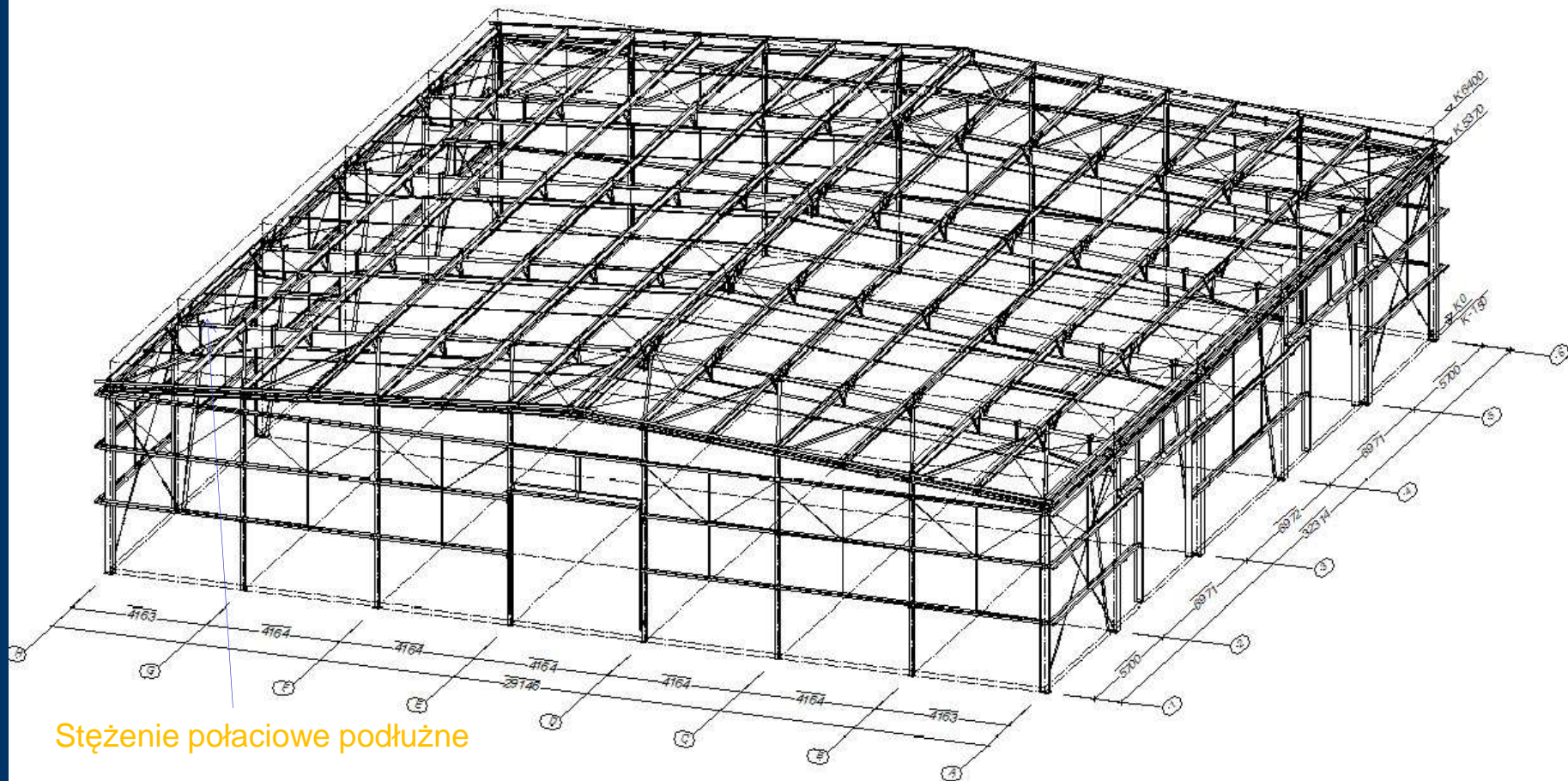
Można wprowadzać inne kryteria podziału, ale są one mniej istotne z punktu widzenia konstrukcyjnego

Wymagania: nośność, użytkowość, niskie zużycie stali, mała pracochłonność przy wytwarzaniu, łatwy montaż -> proste połączenia warsztatowe (spawane) i montażowe (śrubowe), stosowanie prętowych wyrobów hutniczych (standardowych).

Hale metalowe – widok perspektywiczny v1



Hale metalowe – widok perspektywiczny v2



Stężenie połaciowe podłużne

[4]

Hale metalowe – podstawowe wymiary

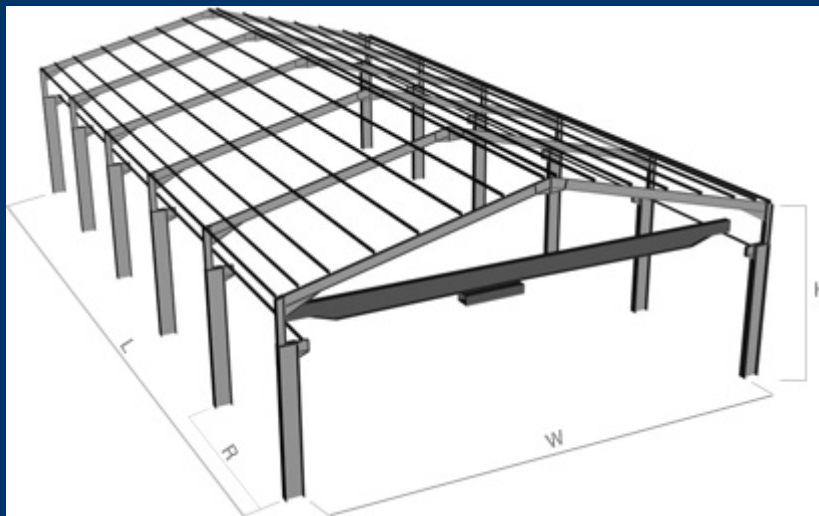


Inwestor i Architekt określają wymiary zewnętrzne hali (po elewacji). Zależą one przede wszystkim od wielkości potrzebnej powierzchni magazynowej lub produkcyjnej, a także od wymiarów działki na której ma powstać inwestycja.

Wysokość obiektu też wynika ze względów funkcjonalnych, a czasami zależy od MPZP.

Gdy wymiary obiektu są znaczne, pojawia się problem, czy wewnątrz hali potrzebne będą słupy.

Jaka jest „ekonomiczna” rozpiętość nawy ?



[4]

Optymalizacja jest wielokryterialna. Odpowiedź zależy od wielu czynników:

1) od czynników funkcjonalnych - użytkowych – tutaj najbardziej praktyczne są hale bez słupów i ścian wewnętrznych (łatwa zmiana technologii i sposobu użytkowania) – ten aspekt w małym stopniu zależy od projektanta konstrukcji.

2) od kryterium minimalnego kosztu konstrukcji , czyli od zużycia stali - wyboru dokona konstruktor analizując wiele schematów statycznych w tym wariantując rozpiętości elementów.

Hale metalowe – czy mogą być bez słupów wewnętrznych ?

Hale stalowe mogą osiągać znaczne rozpiętości bez konieczności stosowania słupów wewnętrznych . Należy jednak stosować rozwiązania niestandardowe (przekrycia strukturalne, łuki, kopuły, konstrukcje ciągnowe itp.).

Przykład: Aquapark Tropical Island pod Berlinem (2006)
- największa samonośna konstrukcja świata .



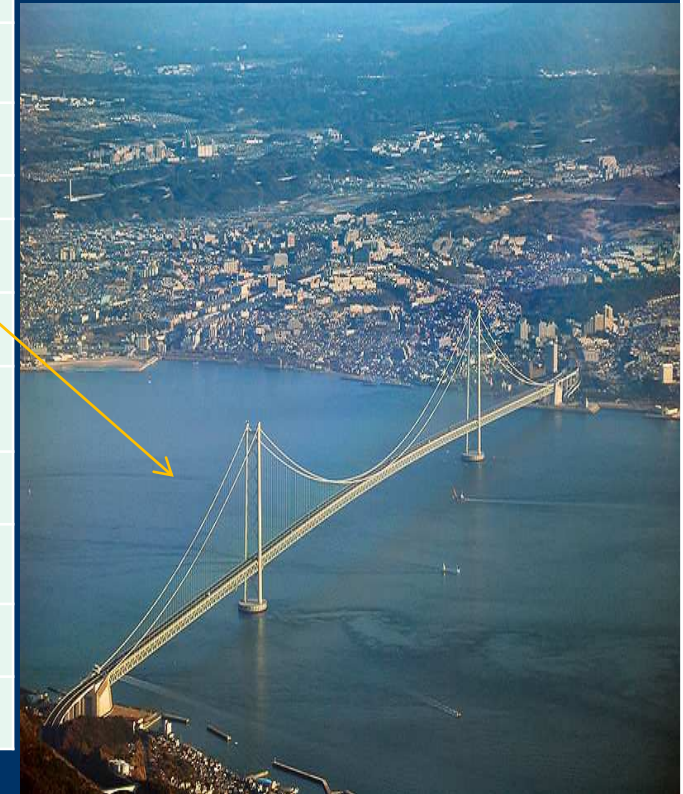
360 metrów długości, 210 metrów szerokości, 107 metrów wysokości. Kubatura 5,5 mln m³. Koszt budowy 78 mln Euro. Głównym elementem nośnym są łuki pełnościenne

[4] Wikipedia

Hale metalowe – dobór wymiarów , a optymalizacja

Przykładem konstrukcji stalowych niekubaturowych o dużych rozpiętościach są mosty:

Lp.	Nazwa mostu	Rozpiętość (m)	Miejscowość	Rok budowy
1	Akashi Kaikyo	1991	Kobe Naruto, Japonia	1998
2	Great Belt East	1624	Halsskov Sprog, Dania	1998
3	Humber	1410	Hull, Anglia	1981
4	Jiangyin	1385	Jiangsu Prov., Chiny	1999
5	Tsing Ma	1377	Hongkong, Chiny	1997
6	Verrazano Narrows	1298	New York, USA	1964
7	Golden Gate	1280	San Francisco, USA	1937
8	Haga Kusten	1210	Veda, Szwecja	1997
9	Mackinac	1158	Mackinaw City, USA	1957
10	Minami Bisansato	1100	Kojima Sakaide, Japonia	1988



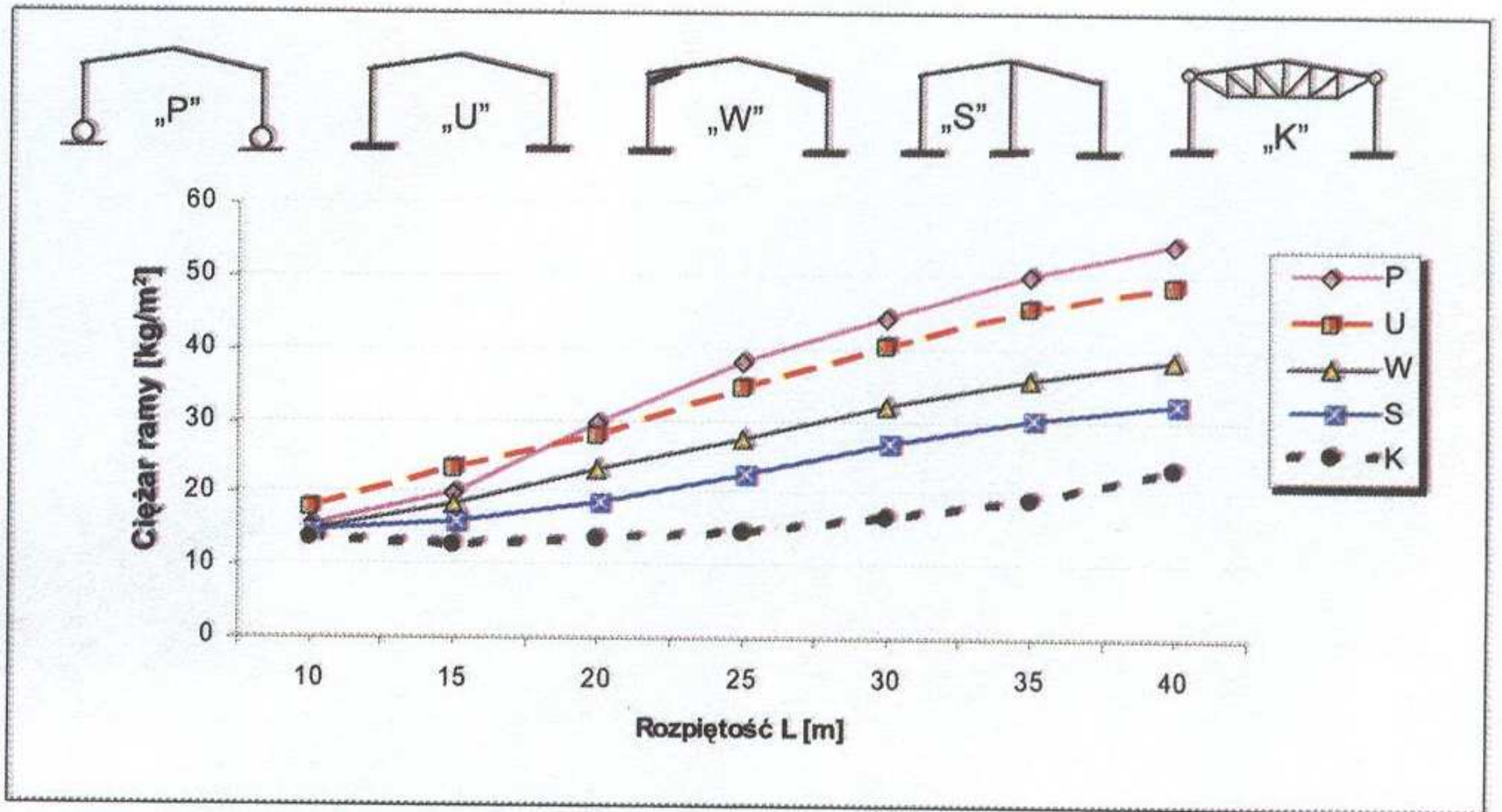
[4]

Elementy wpływające na ciężar konstrukcji

1. Obciążenia klimatyczne oraz technologiczne (na dachu)
2. Transport: hale z suwnicami mają znaczne ograniczenia na przemieszczenia poziome – muszą być o wiele sztywniejsze, a co za tym idzie cięższe (nawet 3x)
3. Rozwiązania konstrukcyjne:
 - rodzaj rygla: pełnościenny, czy kratowy,
 - sposób zamocowania słupów w fundamencie (utwierdzone, przegubowe),
 - sposób połączenia między elementami hali (gdzie wkonstruować przeguby ?),
 - rozpiętość naw układu poprzecznego,
 - rozstaw między układami poprzecznymi (rozpiętość płatwi),
 - dach płatwiowy, czy bezpłatwiowy,
 - rodzaj płatwi (walcowane, gięte na zimno, ażurowe czy kratowe),
 - sposób oparcia świetlików, klap dymowych i urządzeń na dachu – tzw wymiany,
 - sposób stężenia hali: prętowe, ramy stężające, sztywne węzły, ...

Czynniki te są wzajemnie zależne i dają w konsekwencji wiele wariantów, które konstruktor powinien przeanalizować przed przyjęciem ostatecznego rozwiązania

Analiza rozpiętości i schematu ramy



[3]

Wnioski:

1. Najkorzystniejsze są ramy z rygłem kratowym

Uwaga: efektywne kratownice to takie, których wysokość mieści się w granicach 8 do 10% rozpiętości, co powoduje zwiększenie kubatury hali (ogrzewanie, oddymianie). Powierzchnia malowania kraty jest większa od dźwigara pełnościennego i trudniej jest zabezpieczyć ją pożarowo (mały współczynnik masywności). Koszt robocizny przy wykonaniu kratownicy jest większy niż rygla pełnościennego.

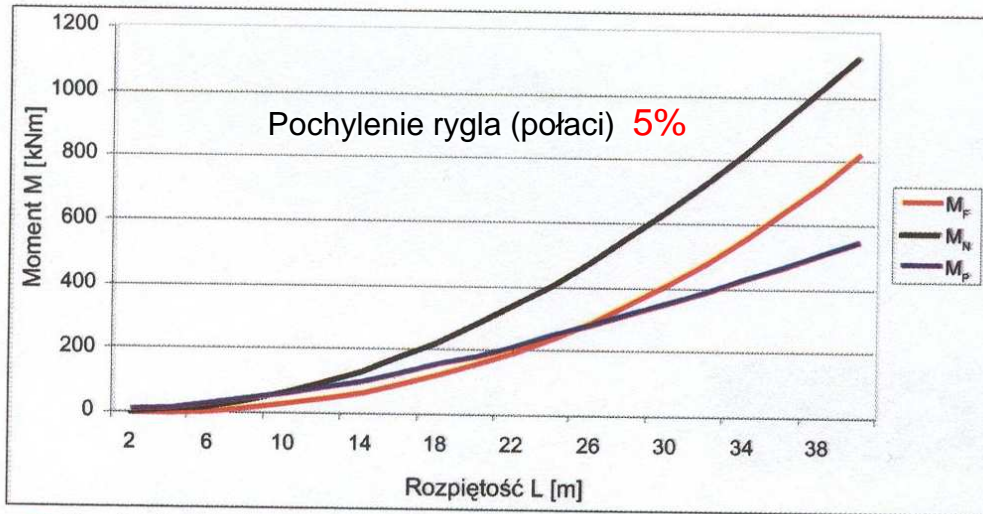
2. Dla dźwigarów pełnościennych warto rozbudować naroże lub zastosować rygle o pasach zbieżnych. Zyskujemy wtedy ok. 20% na ciężarze konstrukcji (wykres „W” i „U”). Naroże rozbudowuje się na odcinku ok. 10% rozpiętości rygla.

3. Korzystne jest wstawienie słupa w środku rozpiętości, bo korzyści z tego powodu wahają się w granicach 20-do 30%.

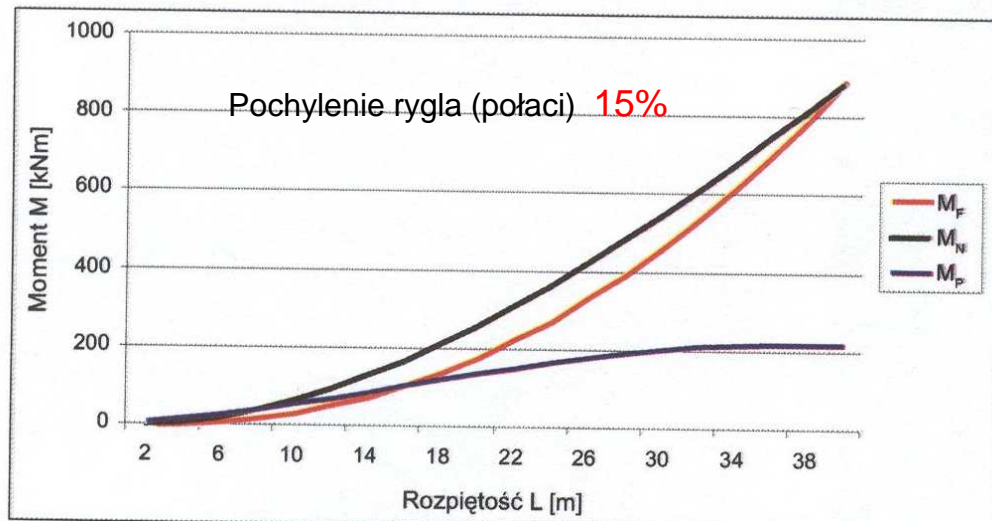
4. Korzystne jest stosowanie słupów żelbetowych i stalowej konstrukcji przekrycia. W miejsce stalowych wiązarów rozważyć również zastosowanie elementów z betonu sprężonego lub drewnianych dźwigarów klejonych.

5. Utwierdzenie słupa jest korzystne, gdy rozpiętość ramy przekracza 20 m. Jednak korzyść jest niewielka w porównaniu z pozostałymi rozwiązaniami.

Analiza rozpiętości i schematu ramy



— Rys. 3a. Rozkład momentów zginających w zależności od rozpiętości ramy



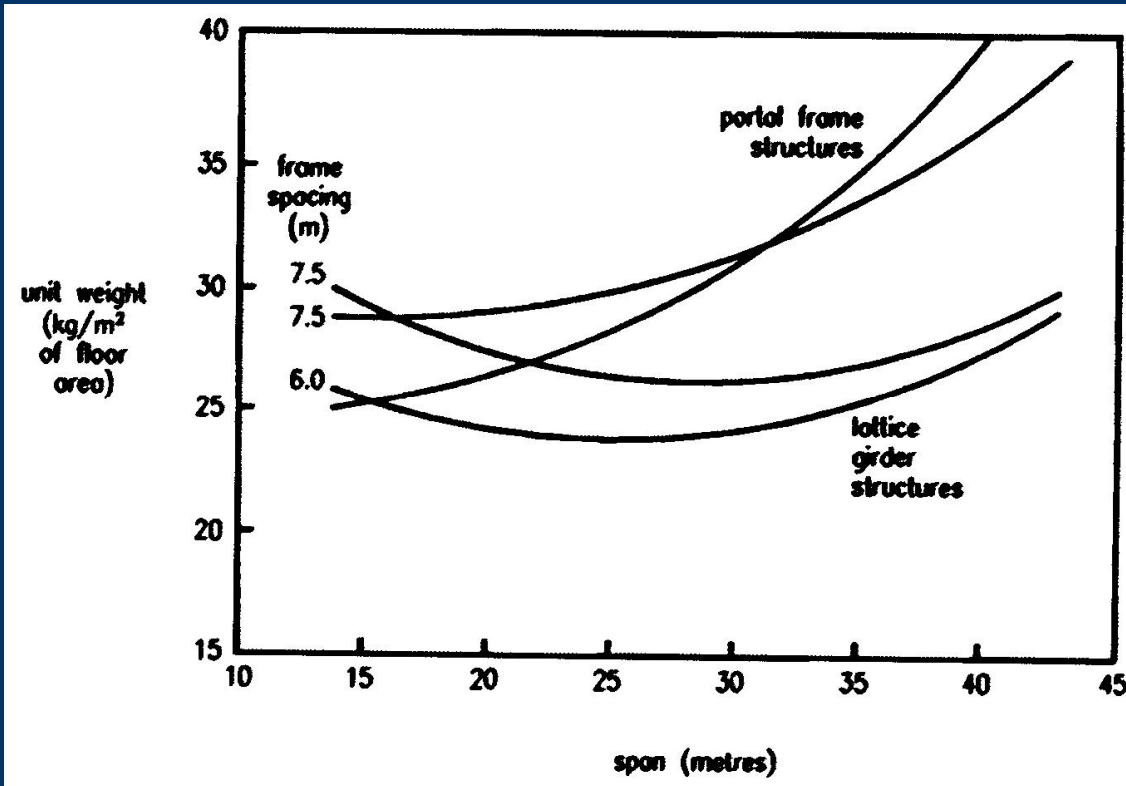
Ważnym czynnikiem jest spadek połaci dachowej.

← Na wykresach pokazano ekstremalne wartości momentów zginających dla spadku połaci 5% i 15%. Rozważano ramę portalową zbudowaną z profili o stałej wysokości, ze słupami utwierdzonymi w słupach i z dachem dwuspadkowym. Wyznaczono momenty zginające:

M_N (czarne, górne) w narożu ramy,
 M_F (czerwone) u podstawy słupa
 M_P (niebieskie, dolne) w przęśle
Wnioski:

1. W ramie o mniejszym kącie nachylenia rozkład momentów jest zrównoważony. Wraz ze zwiększaniem rozpiętości wszystkie momenty zwiększają się proporcjonalnie
2. W przypadku większych kątów wzrost rozpiętości powyżej 20 m daje znaczne zwiększenie momentów w słupie.
3. Wraz ze wzrostem spadku, lepiej stosować ramy z blachownic o pasach zbieżnych i ramy ze wzmocnionymi narożami.

Analiza rozpiętości, rodzaju rygla oraz rozstawu ram [1]



[1]

Układy poprzeczne hal stosowane są najczęściej z rygłem kratowym dla rozpiętości ok 24 do 30 m, ale często również o rozpiętości większej do 60 m. Powyżej stosujemy już inne rozwiązania konstrukcyjne (np. łuki- często kratowe)

Na wykresach pokazano statystyczne badania hal stosowanych w Wielkiej Brytanii w funkcji

- rozpiętości rygla (span 10 do 45 m)
- rodzaju rygla (pełnościenny – portal, kratowy- lattice)
- Rozstawu układów poprzecznych (spacing 6,0 lub 7,5 m)

Wnioski:

1. Optymalna rozpiętość wężara kratowego, to ok 25 m, a rygla pełnościennego ok. 30m
2. W przypadku dźwigara kratowego optymalny jest rozstaw ram 6 m.
3. W przypadku rygla pełnościennego do rozpiętości 32 m optymalny jest rozstaw 6 m, a powyżej tej rozpiętości 7,5 m

Analiza płatwi

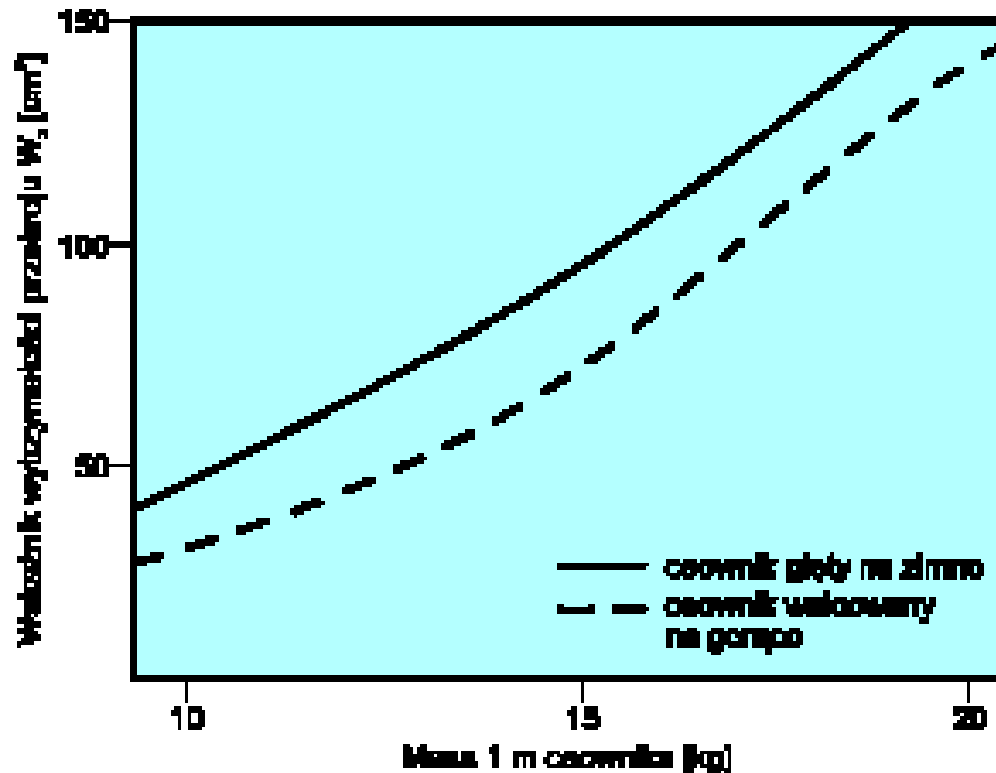


Stosowane są płatwie:

- walcowane najczęściej IPE
- gięte na zimno: zetowniki, ceowniki
- ażurowe (z otworami w środku)
- kratowe
- blachę fałdową (ten przypadek nazywa się dachem bezpłatwiewym)

Z globalnej analizy kosztowej wynika, że łączny koszt (blacha+płatwie) jest większy w przypadku dachu bezpłatwiewego.

Płatwie walcowane, a gięte na zimno



Płatwie pełnościennie bez ażuru stosowane są maksymalnie do 9 m ze względu na zbyt duże ugięcia po przekroczeniu tej rozpiętości

Powyżej 9 m stosuje się płatwie ażurowe lub kratowe, a powyżej 12 m praktycznie wyłącznie kratowe

Przekroje gięte a zimno mają lepsze charakterystyki od walcowanych dla tej samej masy. Wniosek: Lżejsze są przekroje gięte na zimno, choć cena 1 kg stali jest większa. (w większości przypadków bardziej opłacalne są płatwie gięte na zimno)

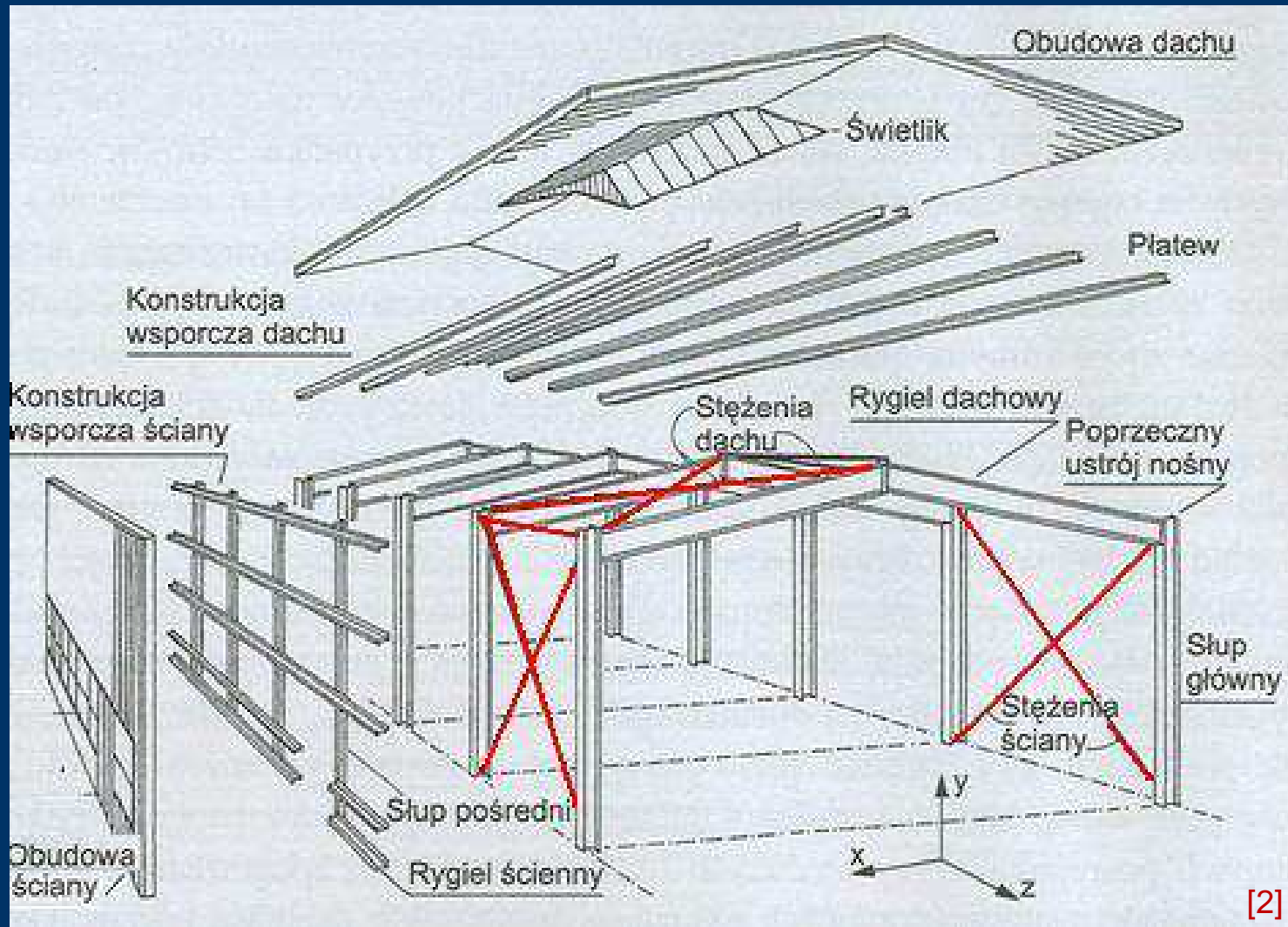
Stężenie konstrukcji hal {1}

W projektowaniu ustrojów hal fundamentalne znaczenie ma prawidłowe ukształtowanie stężeń dachowych i ściennych. Stężenia łączą główne elementy nośne w taki sposób, że powstały układ prętowy jest geometrycznie niezmienny, przez co zapewniona jest sztywność przestrzenna układu konstrukcyjnego poddanego działaniu przestrzennych obciążeń zewnętrznych: ciężar własny, śnieg, wiatr, wiatr, suwnice, temperatura, obciążenia technologiczne (użytkowe).

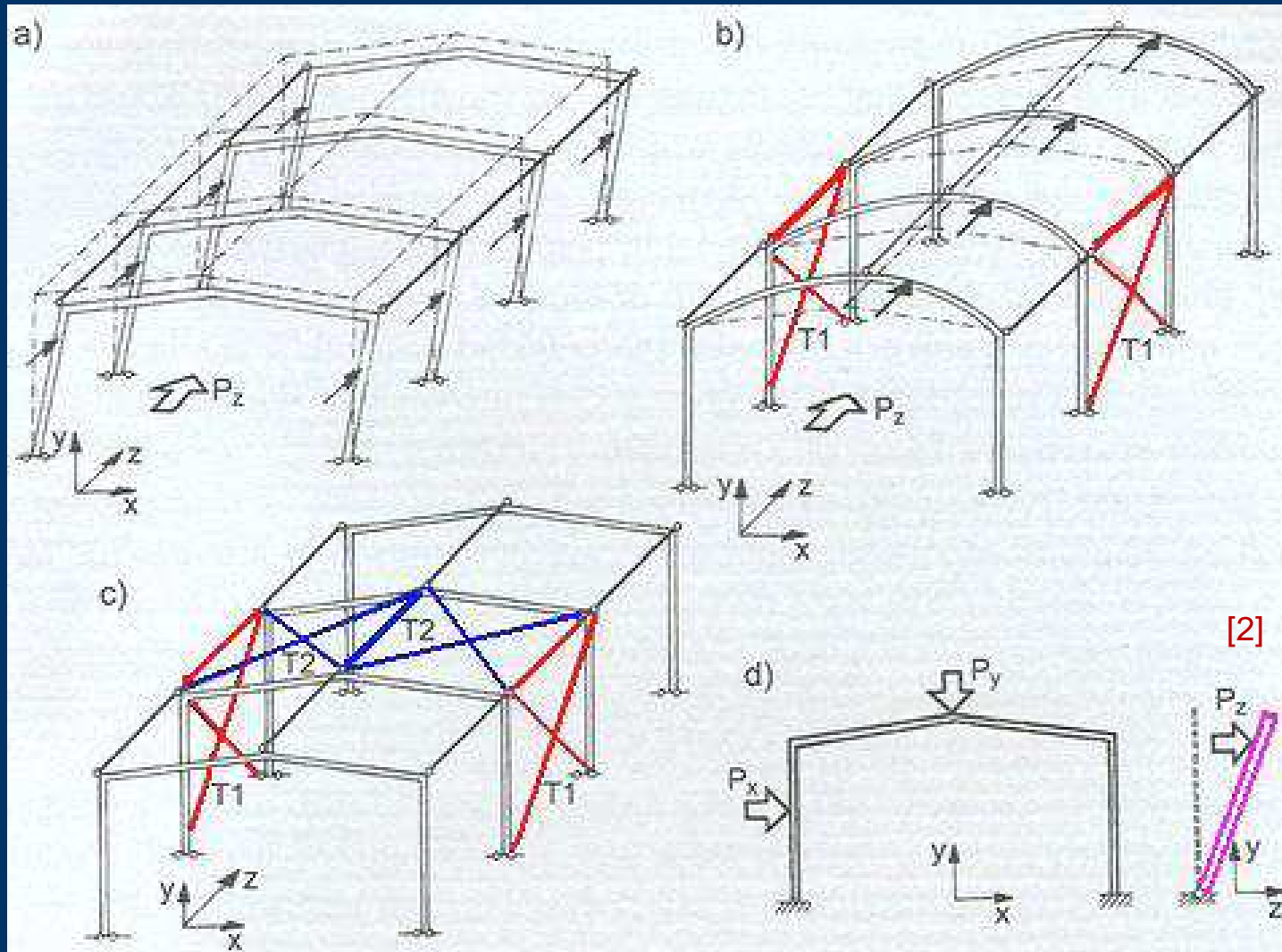
Ustroje poprzeczne i stężenia (tworzące razem ustrój geometrycznie niezmienny w przestrzeni trójwymiarowej) są **jednakowo ważnymi elementami konstrukcji** nośnej hali, gdyż przejmują one wspólnie wielokierunkowe obciążenia działające na obiekt.

Analiza geometrycznej niezmienności konstrukcji jest podstawowym zadaniem projektanta w kształtowaniu głównego ustroju nośnego hali. Zadanie to nie jest łatwe szczególnie w nietypowych sytuacjach projektowych. Układ geometryczny, rozmieszczenie i rodzaj tężników zależy od indywidualnych sytuacji projektowych, np. rodzaju rygla dachowego (kratowy, pełnościenny), rozpiętości nawy, rozstawu ram, obciążeń technologicznych itp.

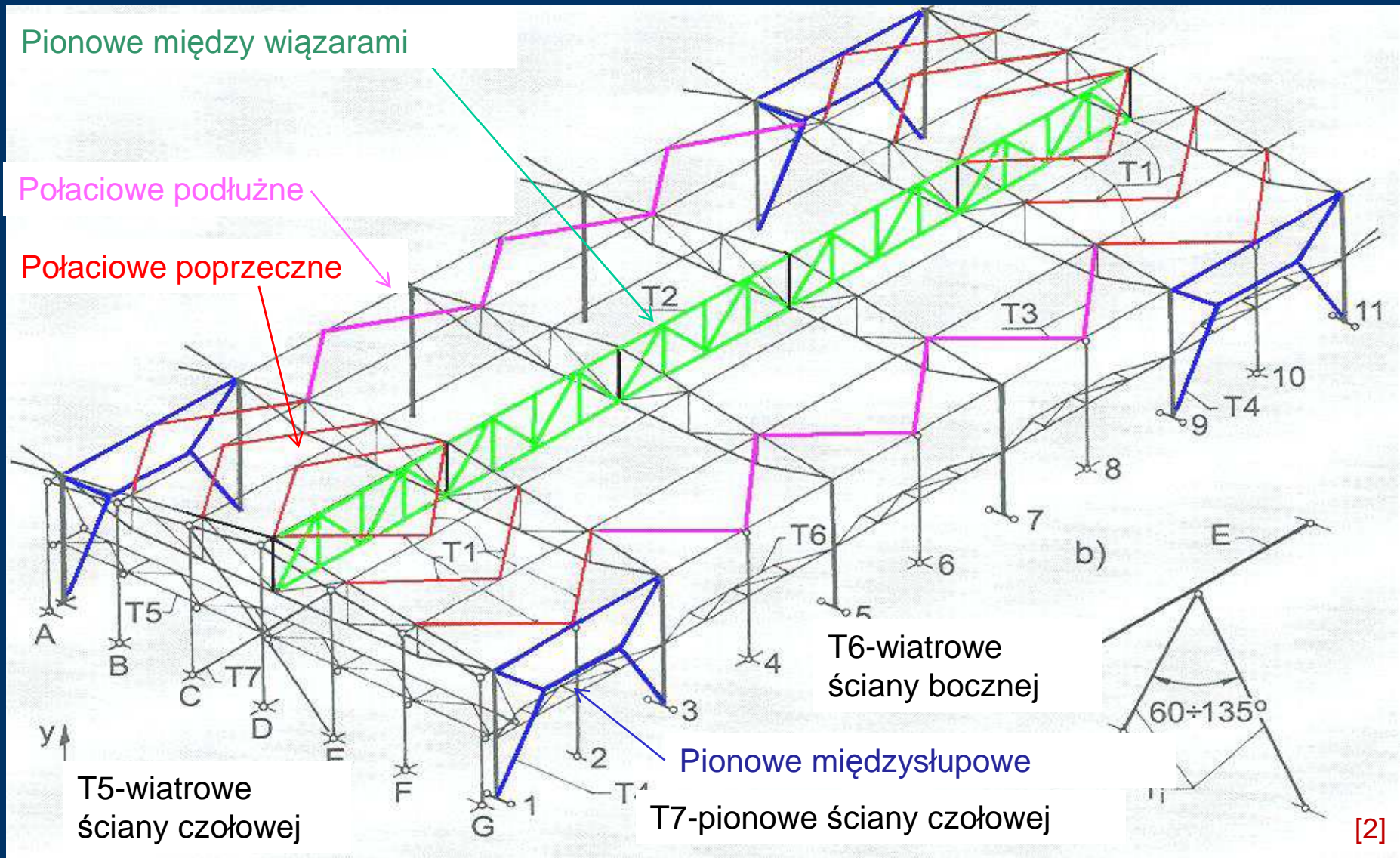
Stężenie konstrukcji hal {2}



Stężenie konstrukcji hal {2} – analiza geometrycznej zmienności hali



Stężenie konstrukcji hal {3} – rozmieszczenie stężeń



[2]

Stężenie konstrukcji hal {4} Warunki dla prętów stężeń

Użycie stężeń i ich rozmieszczenie zależy od rodzaju i wielkości obciążeń oraz od układu geometrycznego i sztywności elementów i ich połączeń.

Nie wszystkie wymienione typy stężeń muszą być stosowane zawsze.

O ich zastosowaniu decyduje projektant z warunku zapewnienia geometrycznej niezmienności i sztywności układu przestrzennego hali. Przykładem stężeń, które nie muszą wystąpić są stężenia połączeniowe podłużne, które są stosowane praktycznie tylko wówczas, gdy płatwie są obciążone słupkami obudowy między węzłami.

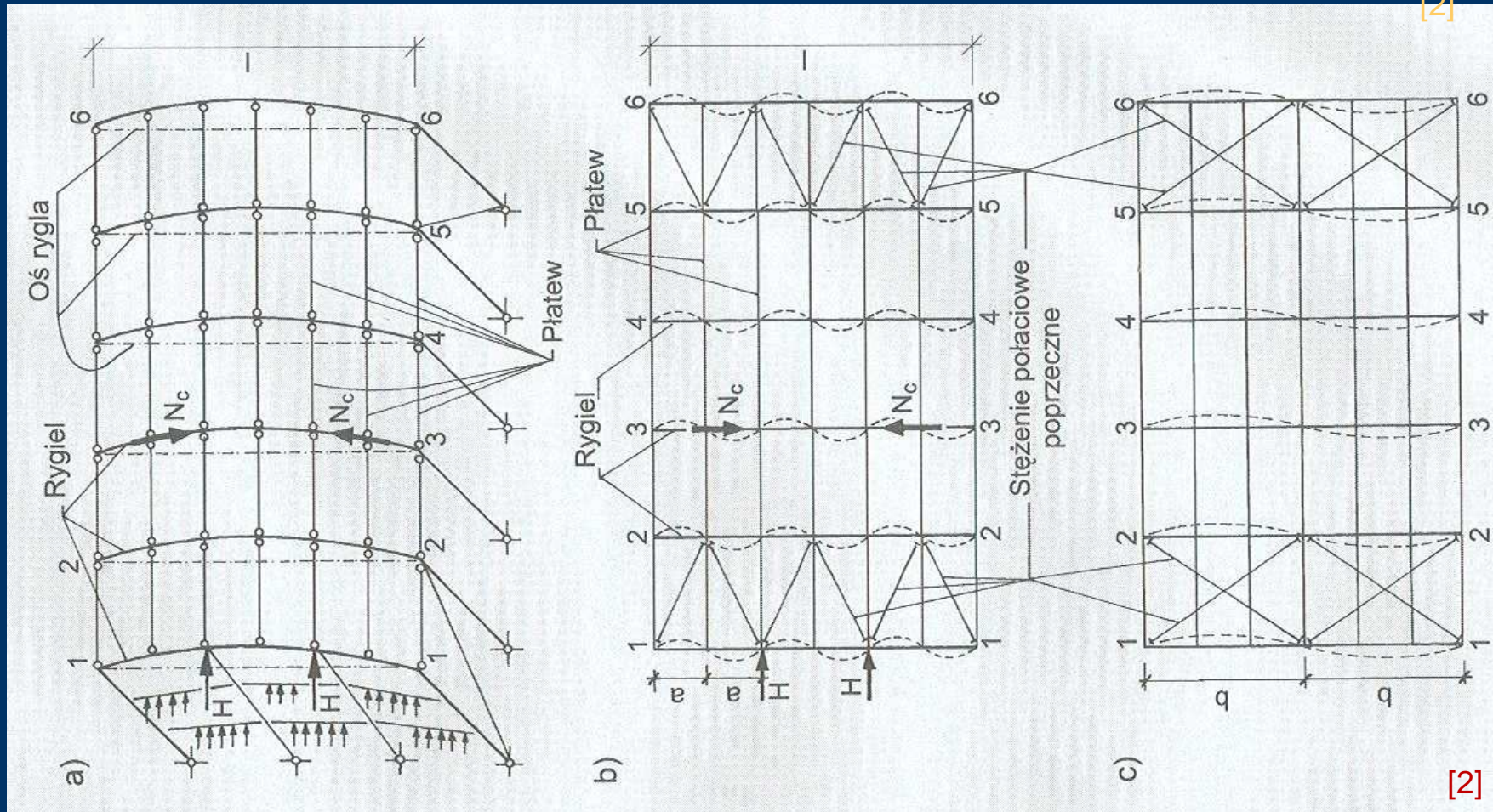
Element można uważać za podparty w płaszczyźnie prostopadłej do swej osi, jeżeli:

1) jest połączony z tarczą (prętową lub płytową), która ma zapewnioną stabilność.

Połączenie jest realizowane za pomocą co najmniej dwóch prętów, przecinających się w osi elementu i tworzących kąt w granicach 60 do 135°. Pręty podpierające muszą być połączone z punktami stałymi, to znaczy takimi, które nie doznają przemieszczeń większych od granicznych (dopuszczalnych).

2) Pręty łączące zapewniają przeniesienie siły ok **1/100** siły występującej w elemencie podpieranym. Uwaga: Dokładną wartość siły wyznacza się zgodnie z EC z siły q_d (omówionej w dalszej części wykładu).

Stężenia połączeniowe poprzeczne {1}

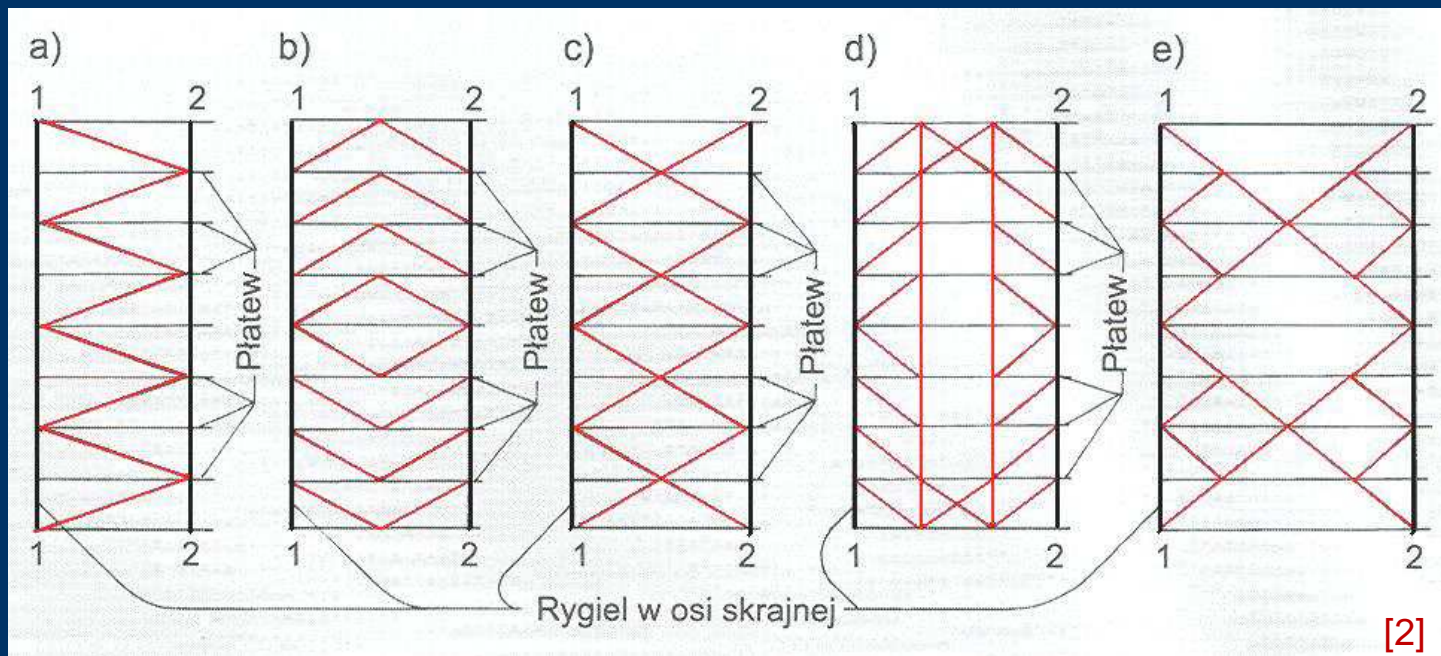


Schemat zachowania się elementów konstrukcji w płaszczyźnie dachu bez stężeń (a) i ze stężeniami (b),(c)

Stężenia połączeniowe poprzeczne {2} - zasady rozmieszczanie

Poprzeczne stężenia połączeniowe odgrywają bardzo znaczną rolę i zalecamy je do obowiązkowego stosowania dla projektantów, nie będących ekspertami. Zasady rozmieszczania:

- 1) na całej szerokości hali
- 2) w polu skrajnym lub przedskrajnym
- 3) nie rzadziej niż co 8-me pole
- 4) w każdym oddylatowanym segmencie hali [Eurokod 3 nie podaje zasad rozmieszczania]

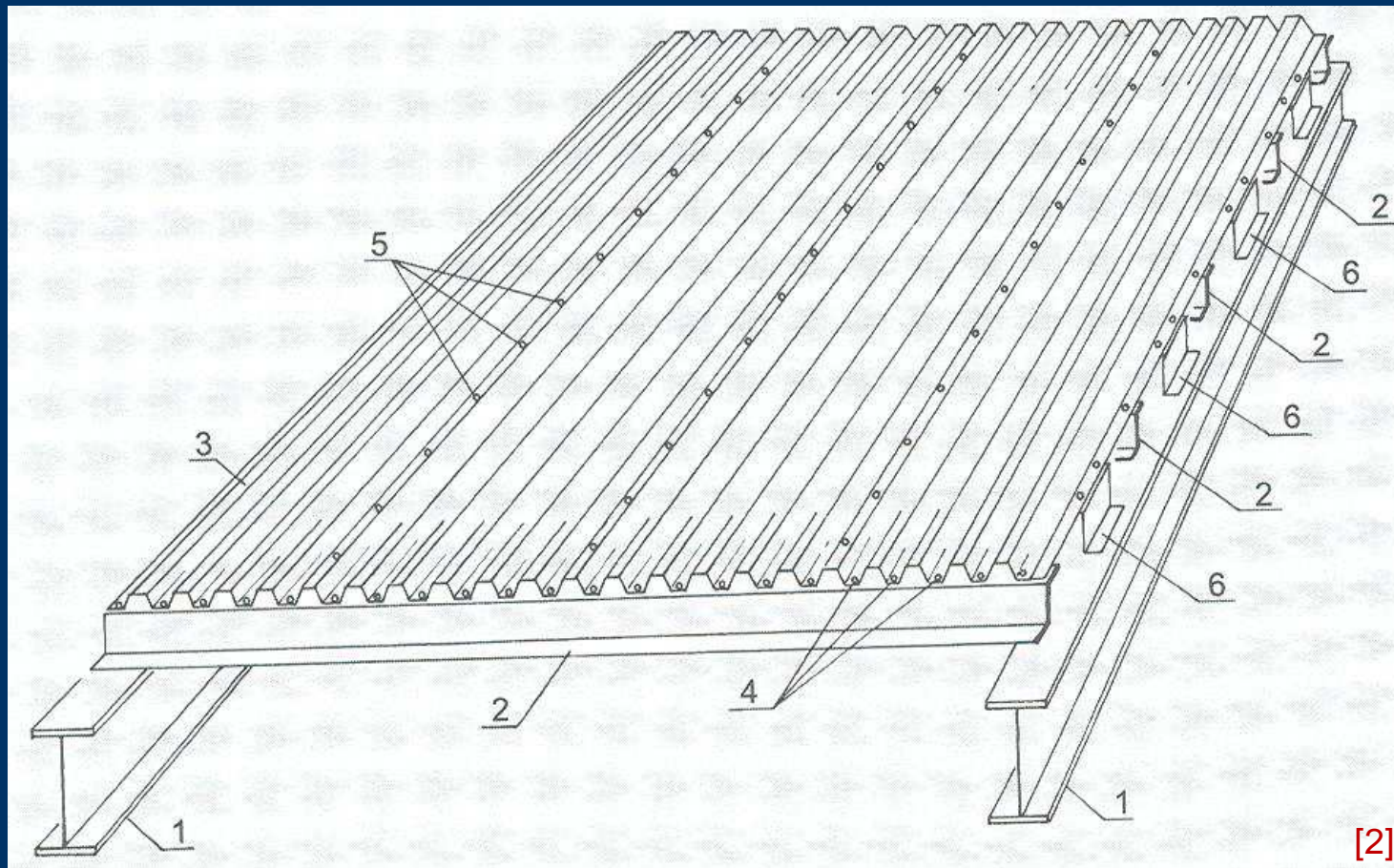


Przykłady kształtowania geometrycznego stężeń poprzecznych połączeniowych

Uwaga kąt pomiędzy prętami nie może być mniejszy od 30°

Stężenia połączeniowe poprzeczne {3} - blacha fałdowa

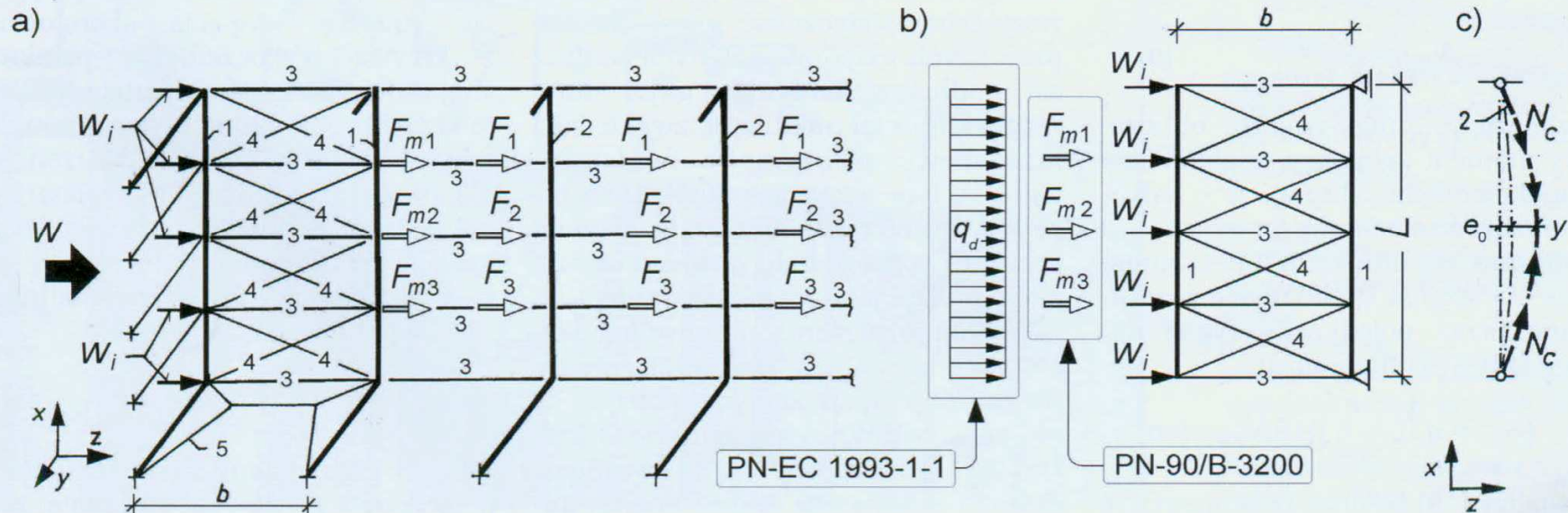
Jako stężenie połączeniowe można wykorzystać dachową blachę fałdową
Uwaga: W takim przypadku należy spełnić szereg szczegółowych kryteriów.



- 1- rygiel dachowy
- 2- płatew
- 3- blacha fałdowa
- 4- łączniki główne blachy fałdowej
- 5- łączniki uszczelniające
- 6- elementy pośrednie

Stężenia połączeniowe poprzeczne {4} - model obliczeniowy

Rys. 2. Schemat obliczeniowy stężenia połączeniowego poprzecznego hali: 1, 2 – rygle dachowe, 3 – płatew, 4 – pręt stężenia połączeniowego poprzecznego, 5 – stężenie międzystupowe.



[2]

Jako schemat statyczny stężenia połączeniowego przyjmuje się kratownicę o rozpiętości równej szerokości dachu. Pasy kratownicy stanowią pasy górne wiązarów. Płatwie są słupkami, a stężenia krzyżulcami. Obciążenia kratownicy, to :

1) siły od wiatru na ścianę czołową, 2) siły zastępcze od imperfekcji wywołane niedoskonałościami geometrycznymi, montażowymi i innymi.

Stężenia połączeniowe poprzeczne {5} - formuła obliczeniowa

Według Eurokodu 3 siły imperfekcji stanowią obciążenie poprzeczne

$$q_d = \sum 8N_{Ed} \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}$$

gdzie:

N_{Ed} – maksymalna siła ściskająca w stężanym pręcie,

δ_q – ugięcie stężenia od oddziaływania q i wszystkich obciążeń zewnętrznych, uzyskane z analizy I rzędu.

Gdy w analizie ustroju stosuje się teorię II rzędu, to można przyjąć $\delta_q=0$.

Zastępcze imperfekcje geometryczne można obliczać ze wzoru dla ściskanego pręta z wstępnymi wygięciami łukowymi

$$e_0 = \alpha_{m,EC} \frac{L}{500}, \quad \alpha_{m,EC} = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

L - rozpiętość kratownicy stężanej, m - liczba stężanych prętów (rygli).

W przypadku, gdy stężenia stabilizuje rygiel o stałej wysokości H , zginany momentem M_{Ed} , to $N_{Ed} = M_{Ed} / H$

Stężenia pionowe międzysłupowe {1} - zasady rozmieszczania

Pionowe stężenia międzysłupowe umieszcza się w linii słupów głównych w kierunku podłużnej osi hali. Umieszczane są nie tylko wzdłuż podłużnych ścian zewnętrznych, ale również w linii słupów wewnętrznych hal wielonawowych (w każdym rzędzie słupów głównych).

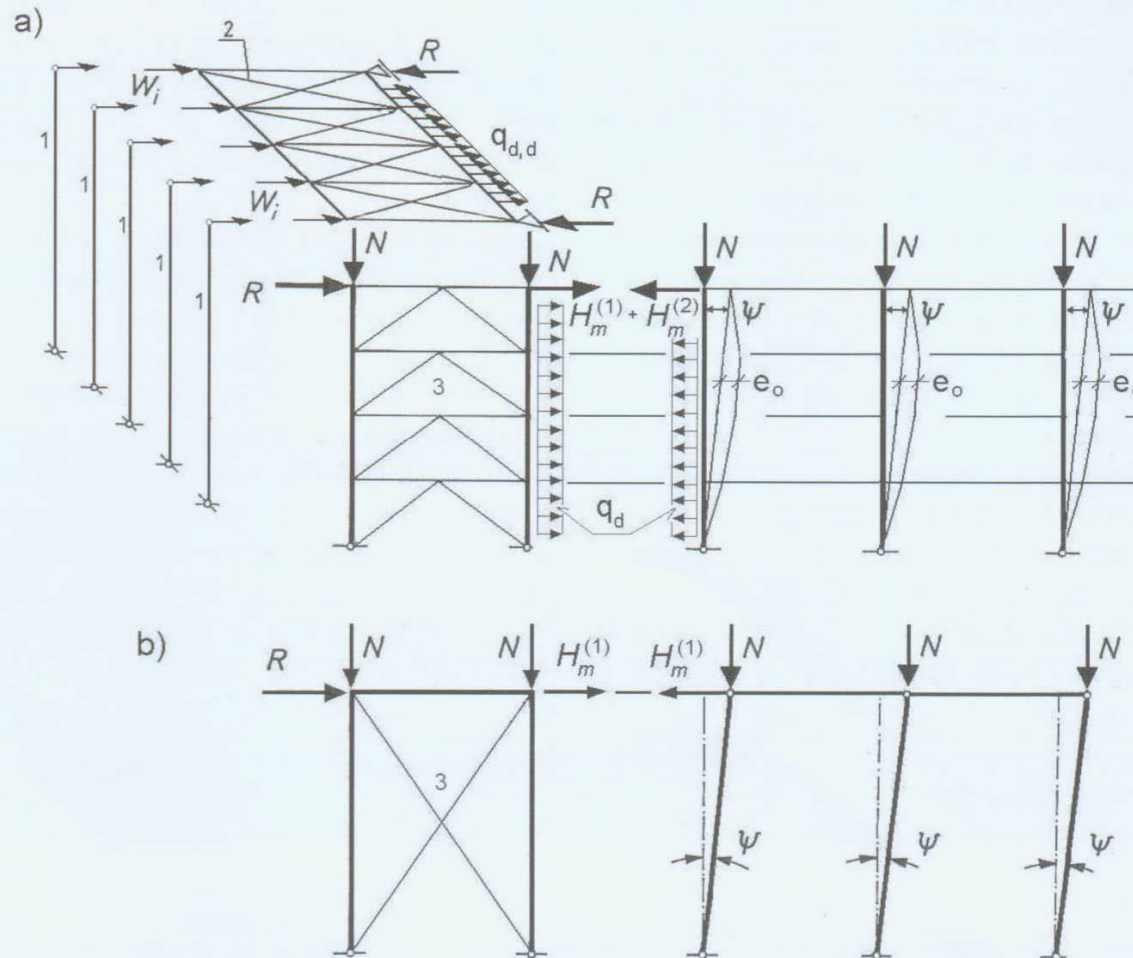
Zapewniają one przede wszystkim stateczność płaskich poprzecznych układów głównych wzdłuż osi podłużnej budynku, gdyż słupy w tym kierunku zwykle traktuje się jako przegubowo połączone z fundamentami. Stężenia zapewniają stateczność podłużną i ogólną szkieletu nośnego hali zarówno w trakcie montażu jak i użytkowania.

Projektanci nie będący ekspertami powinni stosować zasadę rozmieszczania **stężeń pionowych międzysłupowych w tych samych polach, co stężenia poprzeczne**. [Eurokod 3 nie podaje zasad rozmieszczania].

Usztywnienia pionowe podłużne słupów hal stosuje się najczęściej w postaci ustrojów kratowych, rzadziej zaś jako konstrukcje kratowo-ramowe lub ramowe. Kratowe stężenia umieszcza się między sąsiednimi słupami hali. Są to kratownice o schemacie wspornika. Ich pasami są pasy sąsiednich słupów lub słupy. Wykratowanie stanowią dodatkowe pręty skośne (krzyżulce), a słupkami mogą być rygle ścienne.

Stężenia pionowe międzystupowe {2} - model obliczeniowy

Rys. 3. Schemat obliczeniowy pionowych obciążeń podłużnych stóp: 1 – słupy ściany szczytowej, 2 – połaciowe stężenie poprzeczne, 3 – stężenie międzystupowe.



Model obliczeniowy stężeń międzystupowych jest sprzężony z modelem stężeń połaciowych poprzecznych (← rys.)

Reakcja pozioma R ze stężenia połaciowego poprzecznego (od wiatru działającego na ścianę szczytową W_i oraz obciążenia od imperfekcji q_d) jest przekazywana na stężenie pionowe międzystupowe. Przejmuje ono również siłę poziomą $H_m^{(1)}$ od imperfekcji przechyłowych m-podpieranych stóp głównych w płaszczyźnie podłużnej i siłę $H_m^{(2)}$ - reakcję od imperfekcji łukowych stóp w płaszczyźnie ściany podłużnej.

Stężenia pionowe międzysłupowe {3} - formuły obliczeniowe

Jeżeli siła podłużna u góry w i-tym słupie ramy wynosi N_i , to poziomą siłę od imperfekcji przechyłowej wyznacza się ze wzorów:

$$H_m^{(1)} = \phi \sum_{i=1}^m N_i$$

$$\phi = 0,01 \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right) \alpha_h}$$

$$\alpha_h = \frac{1}{\sqrt{h}}, \text{ lecz } \frac{1}{3} \leq \alpha_h \leq \frac{1}{2}$$

gdzie: N_i – siła osiowa w i-tym słupie, h – wysokość słupa, m – liczba stężonych słupów

Siłę H_m oblicza się podobnie jak reakcję R od obciążenia q_d .

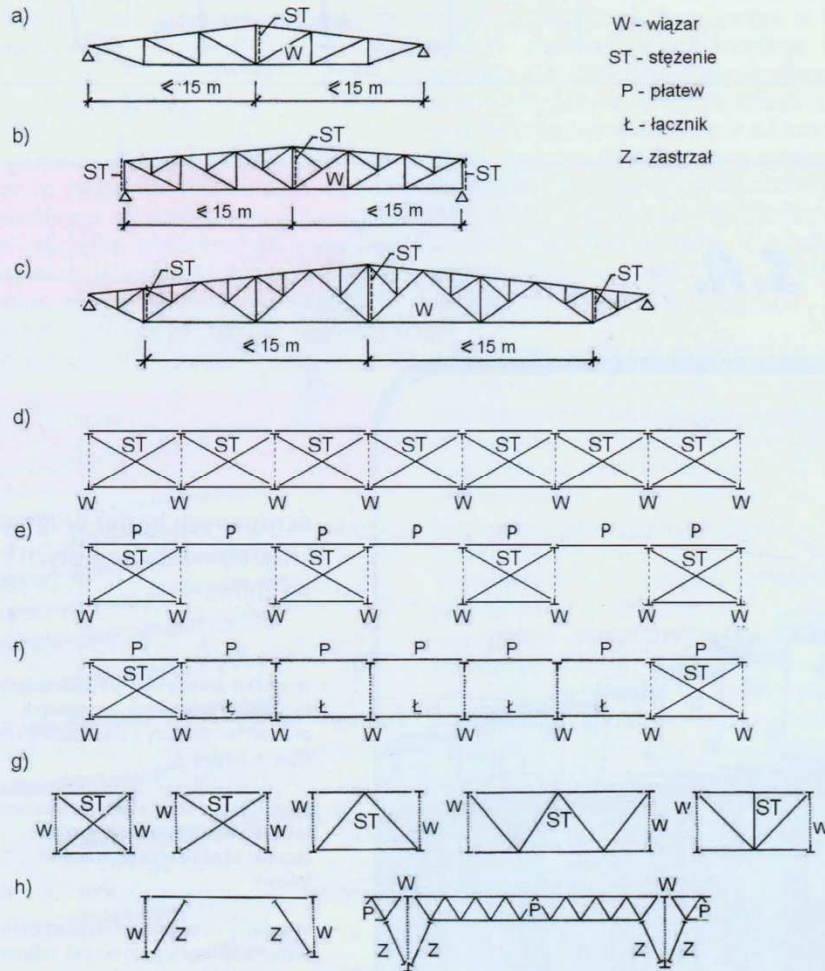
Korzysta się więc ze wzoru na q_d , zamieniając w nim rozpiętość przęsła ramy L na wysokość słupa h , sumę sił ściskających – na siłę podłużną N u góry słupa oraz przyjmując strzałkę wygięcia skorelowaną z krzywą wyboczeńiową przekroju słupa (dla przekrojów dwuteowych jest to krzywa c , dla której $e_0/h=1/200$, lub krzywa d , dla której $e_0/h=1/150$, zaś dla słupów skratowanych w płaszczyźnie ściany podłużnej $e_0/h=1/500$). Reakcję od imperfekcji łukowych słupów w płaszczyźnie ściany podłużnej oblicza się ze wzoru:

$$H_m^{(2)} = \phi \sum_{i=1}^m N_i$$

Jeżeli rygle ściany podłużnej nie są połączone z pionowymi stężeniem międzysłupowym, to słupy są podpierane w kierunku podłużnym i $H_m^{(2)}=0$

Stężenia międzywiązarowe {1} - zasady działania

Rys. 4. Zasady rozmieszczanie i przykłady konstrukcji pionowych stężeń międzywiązarowych dachów kratownicowych.



Pionowe stężenia podłużne dachów hal stosuje się przede wszystkim wtedy, gdy ich rygiel jest kratownicą. Kratowe dźwigary dachowe mają bardzo małą sztywność (giętną ze swojej płaszczyzny oraz skrętną). Ponadto w przypadku przegubowego połączenia ze słupami są podatne na obrót wzdłuż osi podłużnej. Głównym zadaniem konstrukcyjnym pionowych stężeń podłużnych jest zabezpieczyć kratownicę przed skręcaniem, pochyleniem, wywróceniem zarówno w trakcie montażu jak i podczas eksploatacji. Stężenie pionowe dachów kratowych stosuje się jako skratowania ST między sąsiednimi wiązarami (stąd są nazywane międzywiązarowymi). Przede wszystkim stabilizują one i usztywniają przestrzenny układ kratowy dachu hali w kierunku podłużnym.

Stężenia międzywiązarowe {1} - zasady rozmieszczania

Mają one zabezpieczyć rygle ram głównych przed deformacjami skrętnymi (przed zwichrzeniem). Ponadto służą do zapewnienia prawidłowego, wzajemnego ustawienia wiązarów podczas montażu (uniemożliwiając skręcanie, przechylenie i wywrócenie). Zadaniem pionowych tężników dachowych może być również zabezpieczenie drgań i poziomych przemieszczeń pasów dolnych wiązarów podczas pracy suwnicy i wciągników.

Spełniają również rolę usztywnień zapewniających potrzebną długość wyboczeniową ściskanych części rygla dachowego.

Mimo, że Eurokod 3 nie podaje zasad rozmieszczania, to projektantom, nie będącym ekspertami zaleca się, by **stężenia międzywiązarowe** (rys. 4) :

- 1) **Stosować w odległości nie większej niż co 15 m, a w przypadku dźwigarów ze słupkami podporowymi również w linii podpór. Ponadto stosujemy również w miejscach załamania pasów górnych.**
- 2) Stężenia międzywiązarowe „pełne” (rys.4d,e,f) dajemy **w polach w których występują stężenia połączeniowe poprzeczne**. W pozostałych polach pasy górne powinny być usztywnione w tych samych liniach podłużnych, w których znajdują się stężenia pionowe - za pomocą prętów sztywnych o smukłości ≤ 250 . W przypadku hal z suwnicami o dużym udźwigu stężenia międzywiązarowe stosować na całej długości hali.