

Rzeszów

19.05.2022

# NIEOKREŚLONE ZAGROŻENIA

*Zbigniew Plewako<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska

## FAILNOMORE

Mitigation of the risk of progressive collapse  
in steel and composite building frames  
under exceptional events



Research Fund for Coal & Steel

**FAIL** **NO  
MORE**



POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

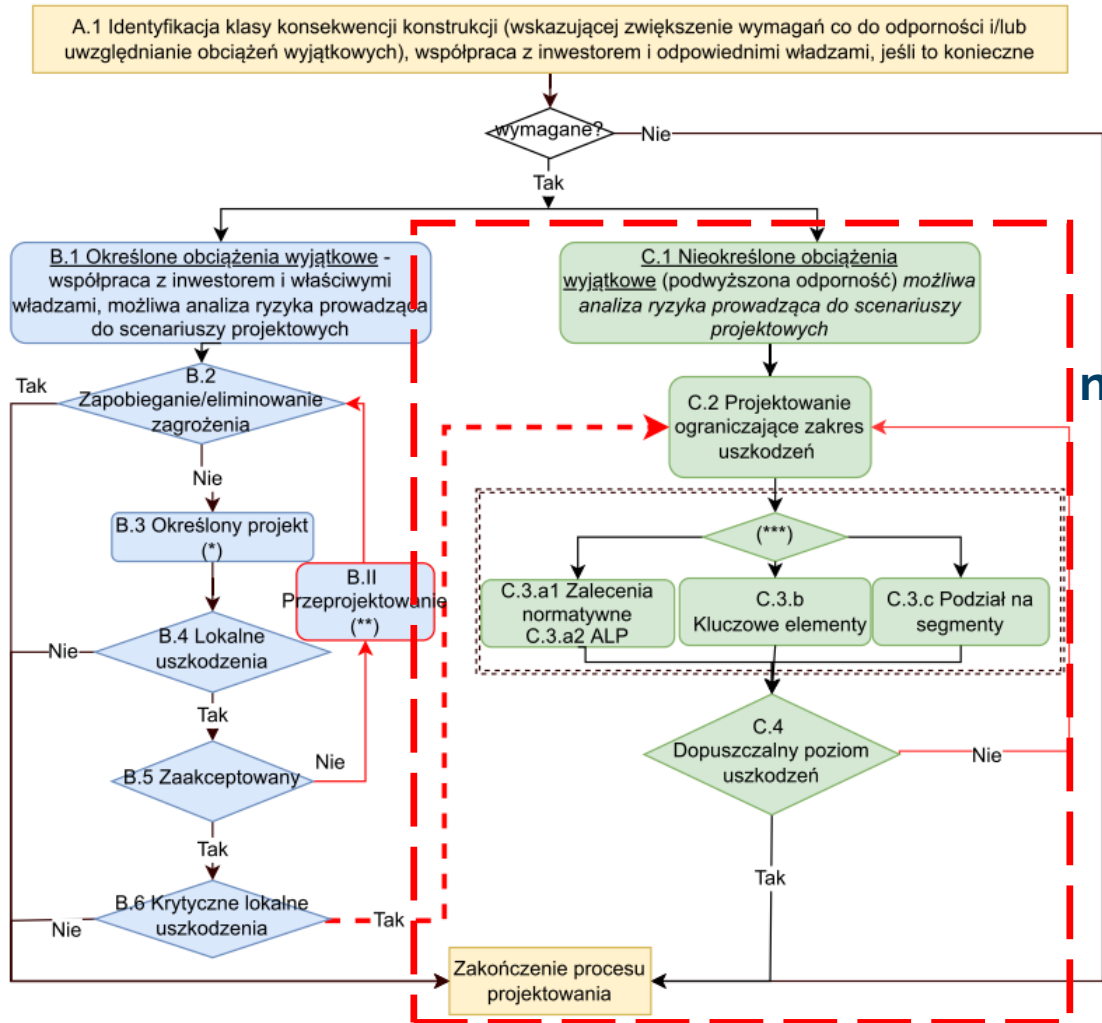
# 1. WPROWADZENIE

1. Wstęp
2. Wybór strategii projektowych
3. Identyfikacja zniszczeń miejscowych
4. Metoda alternatywnych ścieżek obciążenia (ALPM)
5. Metoda elementu kluczowego
6. Metoda podziału na segmenty
7. Wnioski

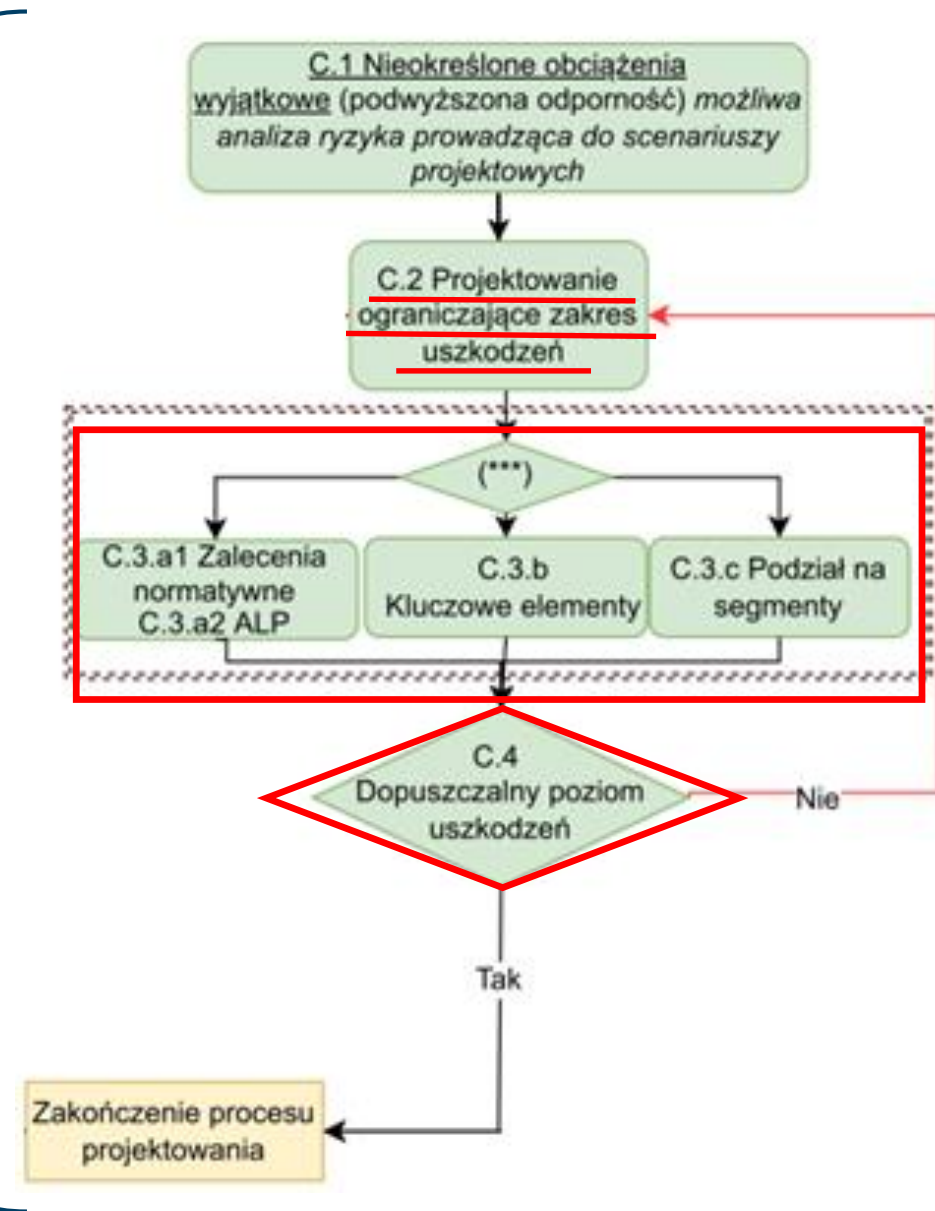
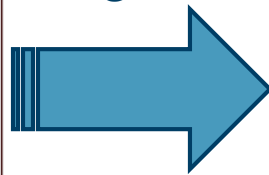
## ■ Plan prezentacji:

1. Wstęp
2. Wybór strategii projektowych
3. Identyfikacja zniszczeń miejscowych
4. Metoda alternatywnych ścieżek obciążenia (ALPM)
  - 4.1 informacje ogólne
  - 4.2 Metody normatywne
  - 4.3 Metody analityczne
  - 4.4 Uprozczone podejścia numeryczne
  - 4.5 Pełne podejście numeryczne
  - 4.6 Wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej na podstawie odpowiedzi statycznej
5. Metoda elementu kluczowego
6. Metoda podziału na segmenty
  - 5.1 Słabe granice segmentów
  - 5.2 Mocne granice segmentów
7. Wnioski

# 1. WPROWADZENIE - PRZEGLĄD



Procedura w przypadku nieokreślonych zagrożeń



## 2. STRATEGIE PROJEKTOWE

- Zagrożenia nieokreślone odnoszą się do oddziaływań wyjątkowych, które nie zostały ujęte w normach, oraz nie zostały zgłoszone przez inwestora lub inne zainteresowane strony.
- Nieokreślone zagrożenia z definicji nie mogą zostać scharakteryzowane, w związku z czym pozostają nieokreślone.
- W związku z tym przyjęte strategie projektowe mają na celu ograniczenie zasięgu miejscowego zniszczenia, niezależnie od przyczyny, która je spowodowała.
- Wybór strategii projektowej, która ma zostać przyjęta, zależy od klasy konsekwencji (CC), do której należy rozpatrywana konstrukcja.



# 2. STRATEGIE PROJEKTOWE

## ■ Dla konstrukcji CC1:

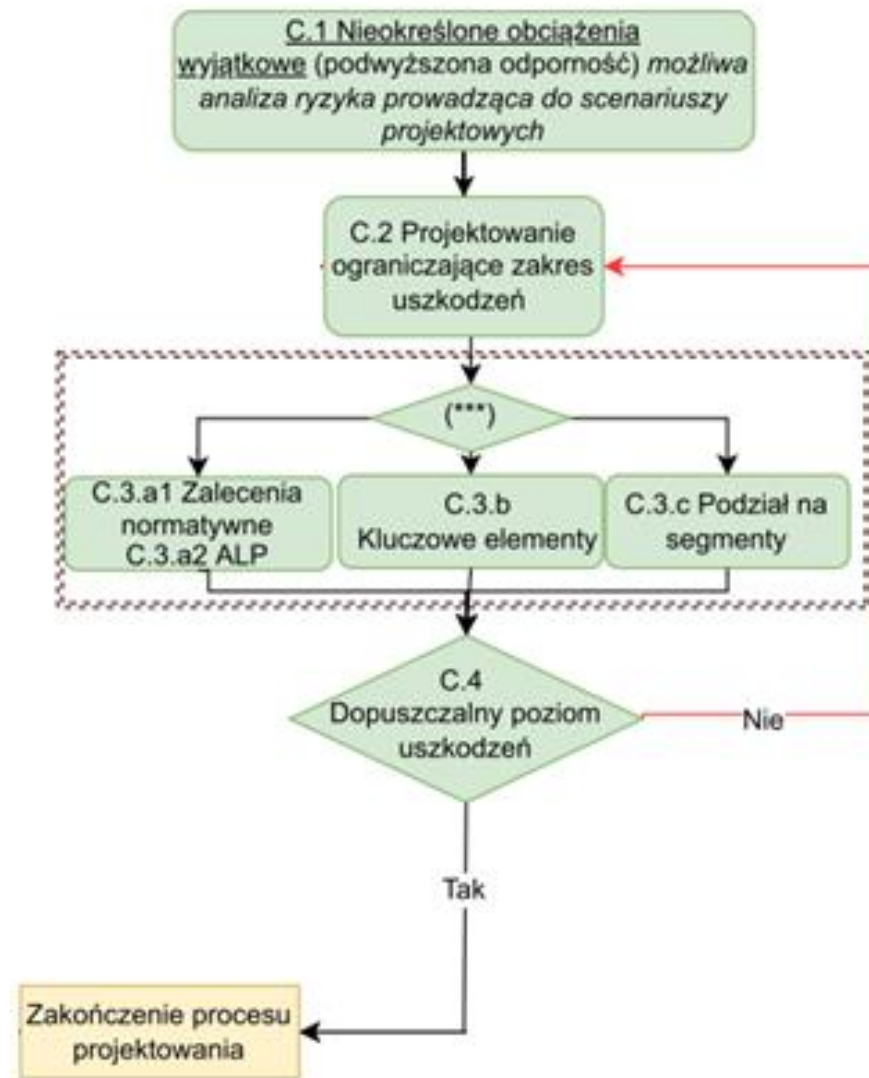
- Brak konkretnych wymagań

## ■ Dla konstrukcji CC2 - grupa niższego ryzyka (CC2a):

- Podjęcie normatywne w celu zapewnienia skutecznych stężeń poziomych

## ■ Dla konstrukcji CC2 – grupa wyższego ryzyka (CC2b):

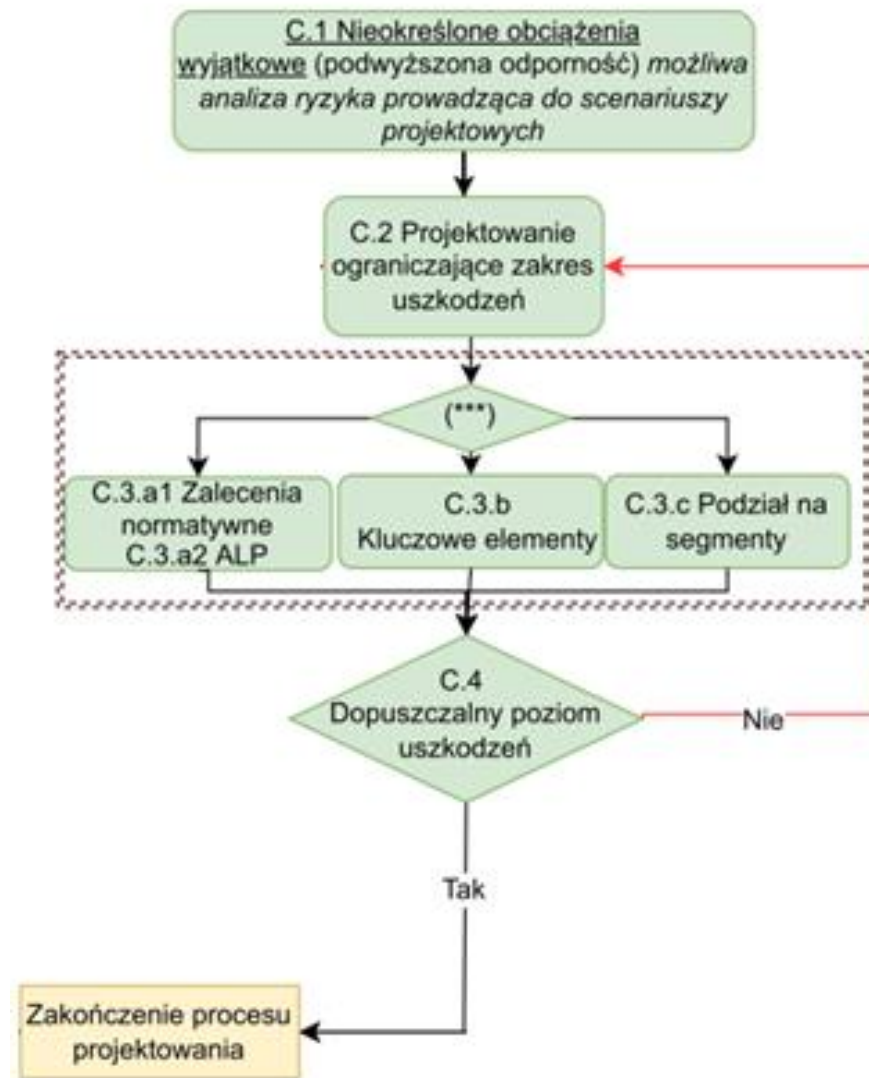
- Podjęcie normatywne w celu zapewnienia skutecznych poziomych i pionowych stężeń lub ...
- Metoda alternatywnych ścieżek obciążenia (ALPM) lub ...
- Metoda elementu kluczowego lub ...
- Metoda podziału na segmenty



# 2. STRATEGIE PROJEKTOWE

## ■ Dla konstrukcji CC3:

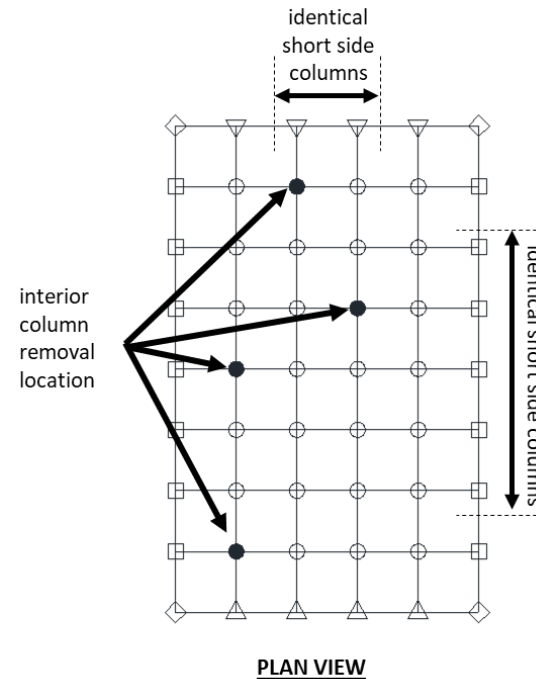
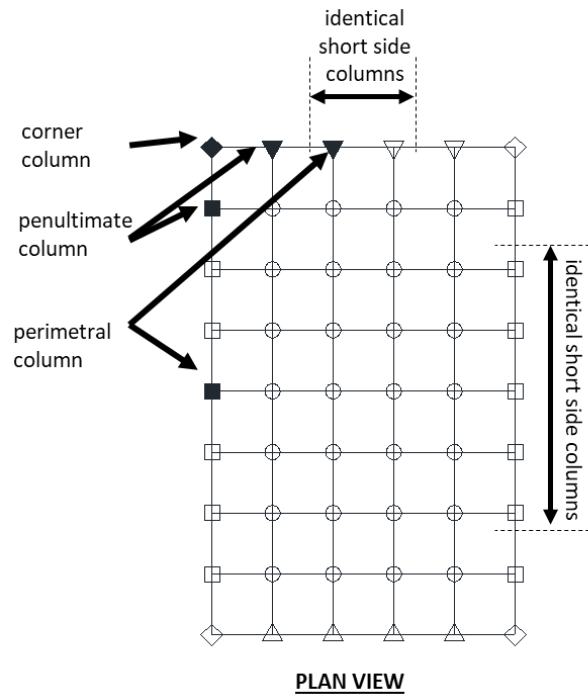
- Podejścia projektowe zaproponowane dla CC2, grupy wyższego ryzyka (CC2b), pozostają aktualne, **ale...**
- Może to wymagać przeprowadzenia analizy ryzyka i zastosowania wyrafinowanych metod, np. pełnych analiz dynamicznych, modeli nieliniowych...



# 3. ZNISZCZENIA MIEJSCOWE

- Zgodnie z normą EN1991-1-7 zniszczenie miejscowe, które należy uwzględnić w przypadku konstrukcji budowlanych objętych CC2b, to umowne usunięcie dowolnego słupa nośnego lub dowolnej belki podpierającej słup.
- Może to oznaczać znaczny nakład pracy!
- Istnieją możliwości ograniczenia liczby scenariuszy utraty słupa, które należy rozważyć, w szczególności w przypadku typowych konstrukcji budowlanych

# 3. IDENTYFIKACJA ZNISZCZEŃ MIEJSCOWYCH



## ■ Lokalizacja pod względem poziomu kondygnacji:

- Pierwsza kondygnacja nadziemna;
- Kondygnacja bezpośrednio pod dachem;
- Kondygnacja w połowie wysokości;
- Kondygnacja powyżej styku montażowego słupów lub zmiany przekroju słupa

(DoD 2016)

# 3. IDENTYFIKACJA ZNISZCZEŃ MIEJSCOWYCH

- W normie EN1991-1-7 nie określono, czy usuwanie słupa należy przyjąć jako natychmiastowe, czy też jako "quasi-statyczne".
- Uwzględnienie quasi-statycznej utraty słupa pozwala na:
  - Wykorzystanie prostych narzędzi analitycznych, ponieważ nie ma potrzeby uwzględniania efektów dynamicznych
  - Uzyskanie dobrego poglądu na zdolność konstrukcji do uaktywnienia się alternatywnych ścieżek obciążenia pod wpływem efektów dynamicznych
- **Uwzględnienie natychmiastowości utraty słupa zapewnia górne ograniczenie odpowiedzi konstrukcji budowlanych**

# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

- Podejścia projektowe mają na celu zapewnienie w konstrukcji alternatywnych ścieżek obciążenia, które umożliwią redystrybucję sił w przypadku miejscowego zniszczenia elementu podpierającego
- Cel ten można osiągnąć poprzez zapewnienie konstrukcji odpowiedniego zakresu ciągłości, odkształcalności i statycznej niewyznaczalności i/lub zastosowanie normatywnych metod projektowania, takich jak metoda stężeń
- Metody alternatywnych ścieżek obciążenia (ALPM) są skutecznymi podejściami projektowymi stosowanymi do konstrukcji o regularnej formie
- EN 1991-1-7 → strategia projektowa alternatywnych ścieżek obciążenia (ALPM) opiera się na ograniczeniu zakresu zniszczenia miejscowego poprzez zwiększenie niewyznaczalności statycznej i uwzględnienie umownego usunięcia słupów

# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

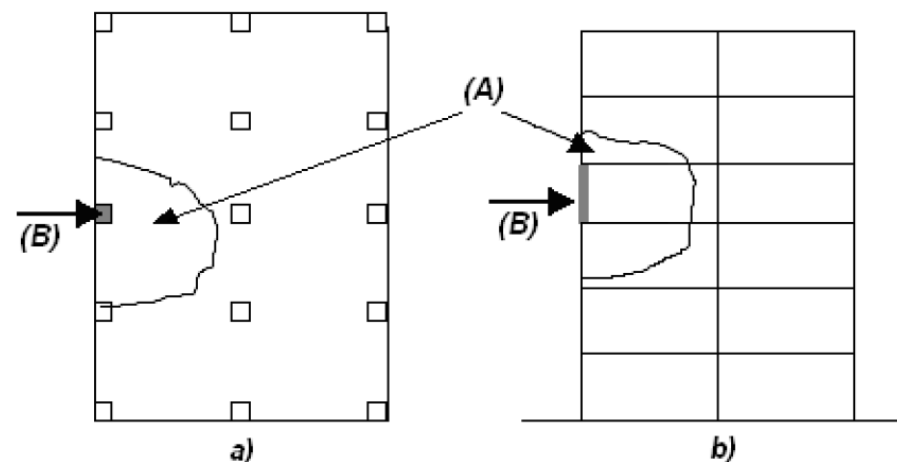
■ Stosując metodę alternatywnych ścieżek obciążenia, zgodnie z normą EN 1991-1-7, należy wykazać, że uszkodzenie miejscowe nie rozprzestrzenia się w sposób nieproporcjonalny

■ Dopuszczalne granice miejscowego uszkodzenia:

■ 15% powierzchni podłogi lub ...

■ 200 m<sup>2</sup>

w zależności od tego, która z nich jest mniejsza, na każdej z dwóch sąsiadujących kondygnacji



(A) Uszkodzenia miejscowe

(B) Umowne usunięcie stupa



# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

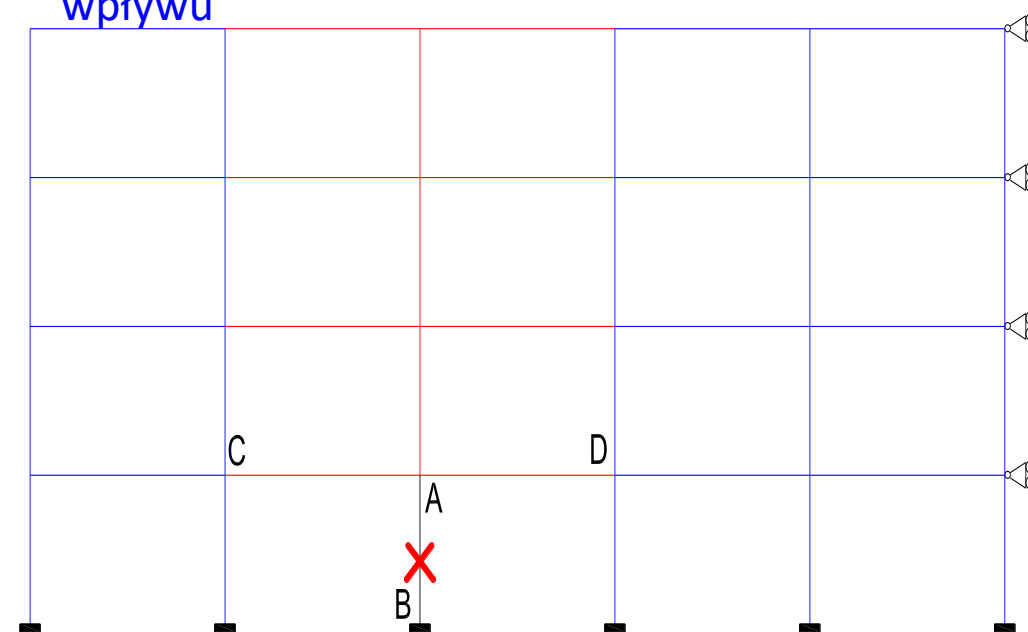
## ■ Zakładany scenariusz: utrata słupa

## ■ Konstrukcja budynku, w której usunięto słup może być podzielona na dwie główne części:

- część w strefie bezpośredniego wpływu (DAP), która reprezentuje część budynku bezpośrednio dotkniętą utratą słupa, tj. belki, słupy oraz połączenia belki ze słupem, znajdujące się tuż nad uszkodzonym słupem i ...
- część w strefie pośredniego wpływu (IAP), która obejmuje pozostałą część konstrukcji

Na czerwono: część w strefie bezpośredniego wpływu

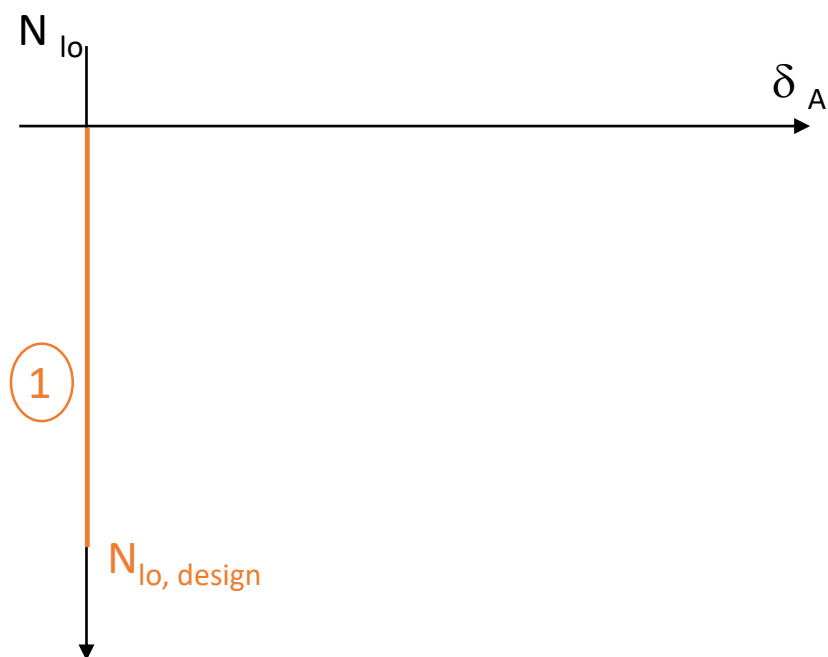
Na niebiesko: część w strefie pośredniego wpływu



Słup uznany  
za usunięty

# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

- Odpowiedź ramy po utracie słupa można podzielić na różne, następujące po sobie fazy, które rozwijają się lub nie, w zależności od przypadków



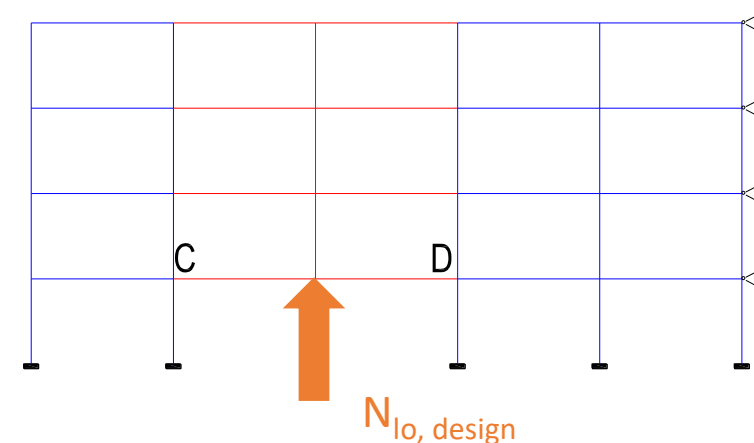
**Faza 1**



Budynek pod działaniem kombinacji oddziaływań w sytuacji wyjątkowej

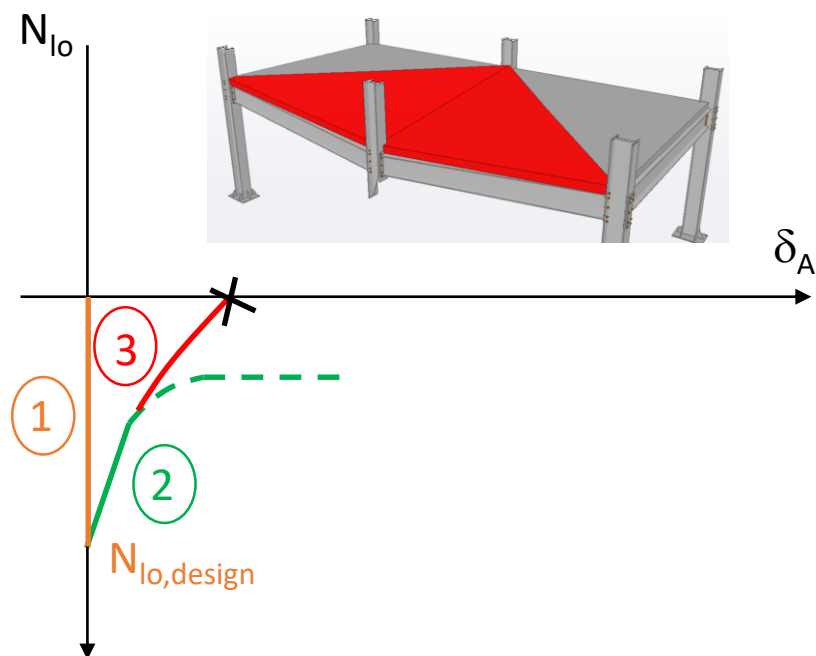


Usuwany stęp poddany obciążeniu osiowemu  $N_{lo, design}$



# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

■ Odporność może być ewentualnie zapewniona przez same płyty, jeżeli występują (płyty zespolone z belkami stalowymi lub nie)



**Faza 2** →

Początek utraty słupa



Początkowo obserwuje się odpowiedź sprężystą  
Następnie w płytach tworzą się plastyczne mechanizmy

**Faza 3** →

Pojawiają się znaczące przemieszczenia

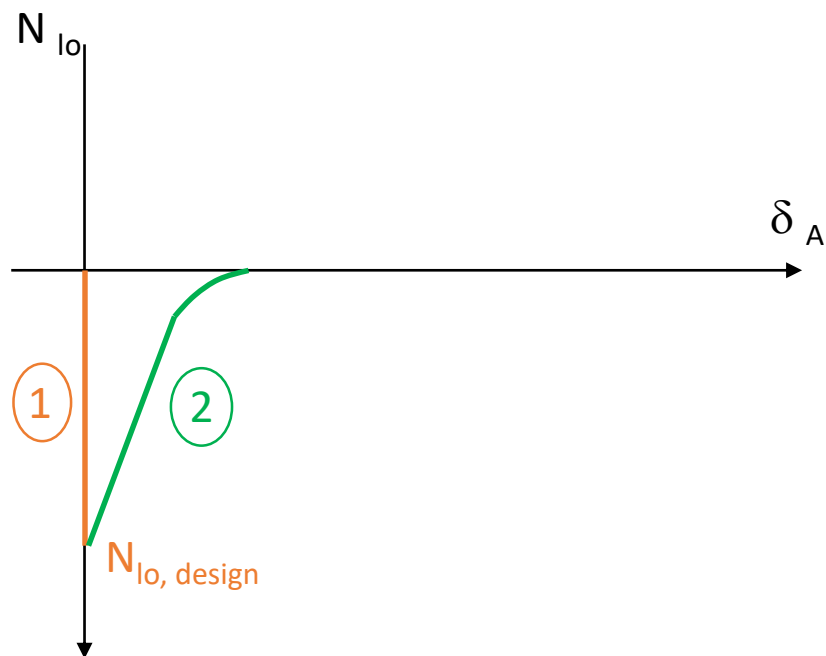
Rozwijają się efekty ciągnowe, aż do wystąpienia kruchego zniszczenia spowodowanego np. wyczerpaniem zakresu plastyczności w prętach zbrojeniowych

**Komentarz:**

jeśli odporność nie jest wystarczająca, wówczas inne elementy konstrukcyjne będą musiały zostać aktywowane, co będzie skutkowało wystąpieniem znacznych przemieszczeń, przekraczających możliwości płyty.  
W tym przypadku "Faza 3" w płycie będzie musiała zostać zignorowana.

# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

■ Jeśli odporność nie jest zapewniona przez same płyty, może być aktywowane uplastycznienie się płyt i belek DAP.



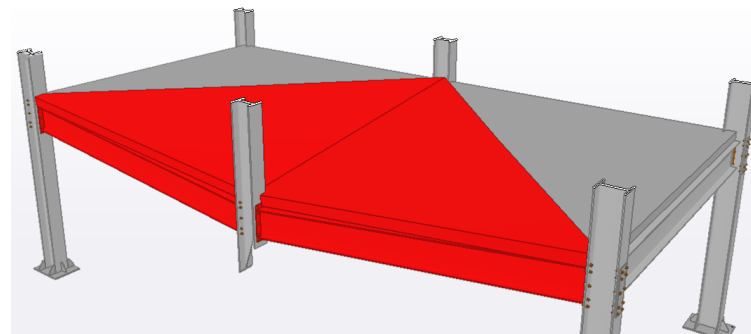
Faza 2:



Początek utraty słupa

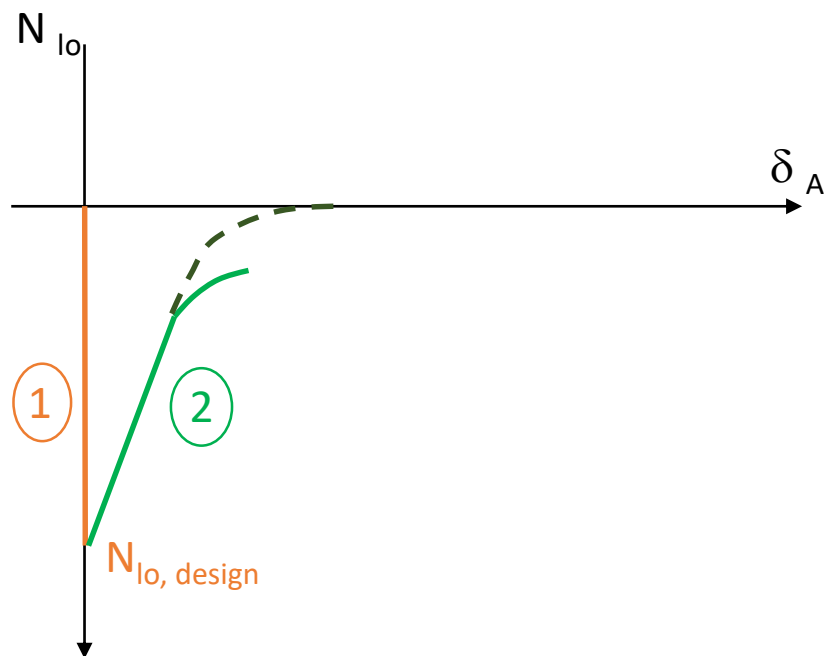


- Mechanizmy plastyczne (Johansena) w płytach
- Mechanizmy plastyczne w belkach DAP (stalowych lub zespolonych, jeśli płyty są połączone z belkami stalowymi)



# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

- Jeśli odporność nie jest zapewniona przez same płyty, może być aktywowane ugięcie płyt i belek DAP + efekty łukowe w belkach



Faza 2:

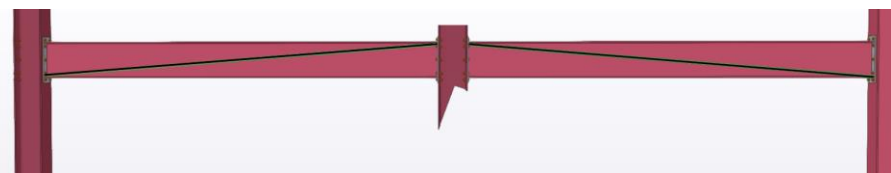


Początek utraty słupa



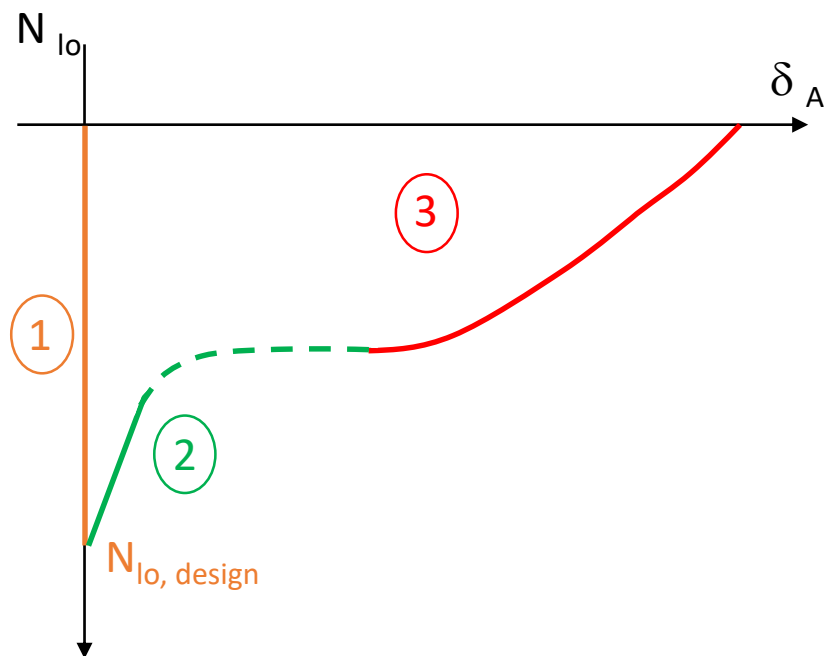
- Mechanizmy plastyczne (Johansena) w płytach
- Mechanizmy plastyczne w belkach DAP (stalowych lub zespolonych, jeśli płyty są połączone z belkami stalowymi)

Ponadto, w niektórych szczególnych przypadkach (zdefiniowanych później), w belkach DAP po rozwinięciu się mechanizmów plastycznych mogą pojawić się **efekty łukowe**.



# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

■ Jeżeli odporność wciąż nie jest wystarczająca, mogą aktywować się efekty ciągnowe w belkach



Faza 2:



Początek utraty stupa



- Mechanizmy plastyczne (Johansena) w płytach
- Mechanizmy plastyczne w belkach DAP (stalowych lub zespolonych, jeśli płyty są połączone z belkami stalowymi)
- Efekt łukowy w belkach

Przewiduje się spadek nośności w wyniku zjawiska **przeskoku** w belkach; po nim następuje spadek spowodowany kruchym zniszczeniem prętów zbrojeniowych w płytach, jeśli występują

Faza 3:



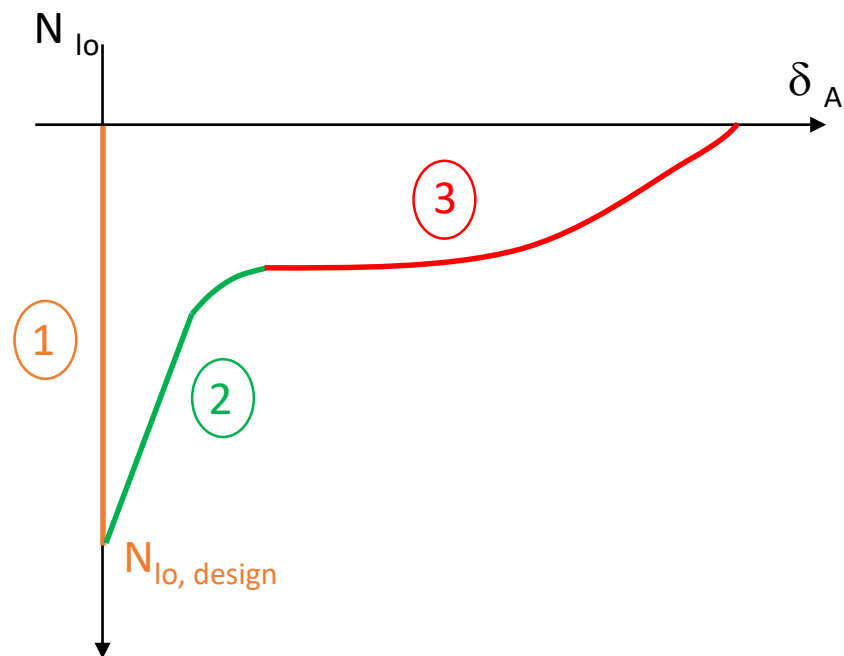
Pojawiają się znaczące przemieszczenia



W stalowych lub zespolonych belkach DAP rozwijają się efekty ciągnowe

# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

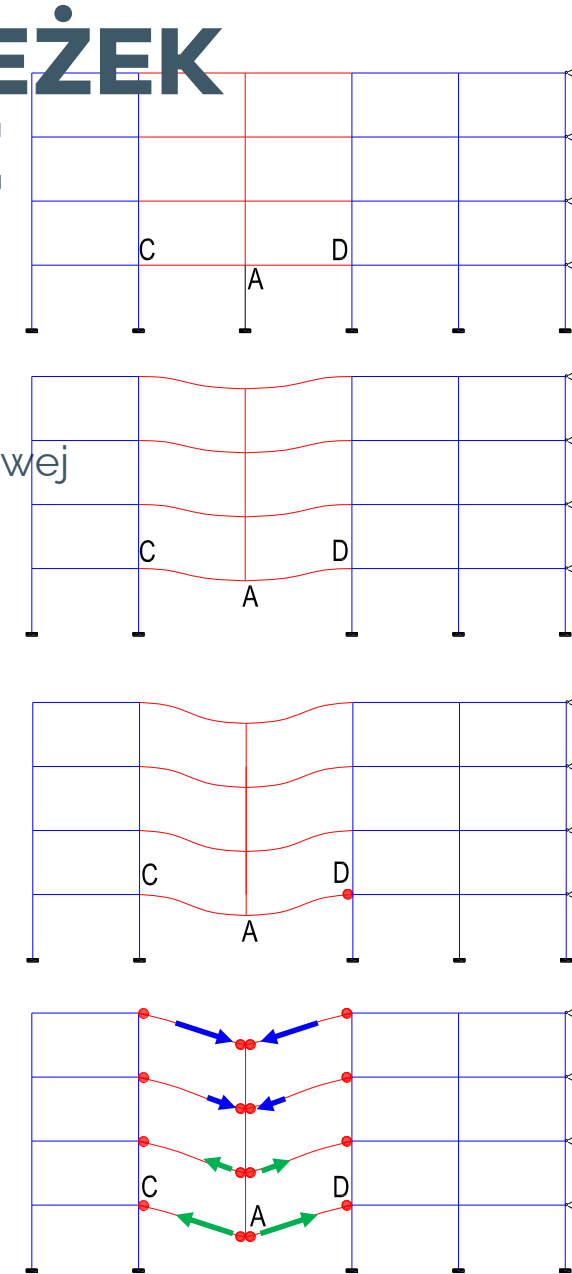
## Wizualizacja globalnej odpowiedzi konstrukcji



**Faza 1:** ➡ Budynek pod działaniem kombinacji oddziaływań w sytuacji wyjątkowej  
➡ Usuwany słup poddany obciążeniu osiowemu  $N_{lo, design}$

**Faza 2:** ➡ Początek utraty słupa  
➡ Początkowo, obserwuje się odpowiedź sprężystą  
➡ Następnie formuje się pierwszy przegub plastyczny  
➡ W końcu, w DAP tworzy się kompletny mechanizm plastyczny.

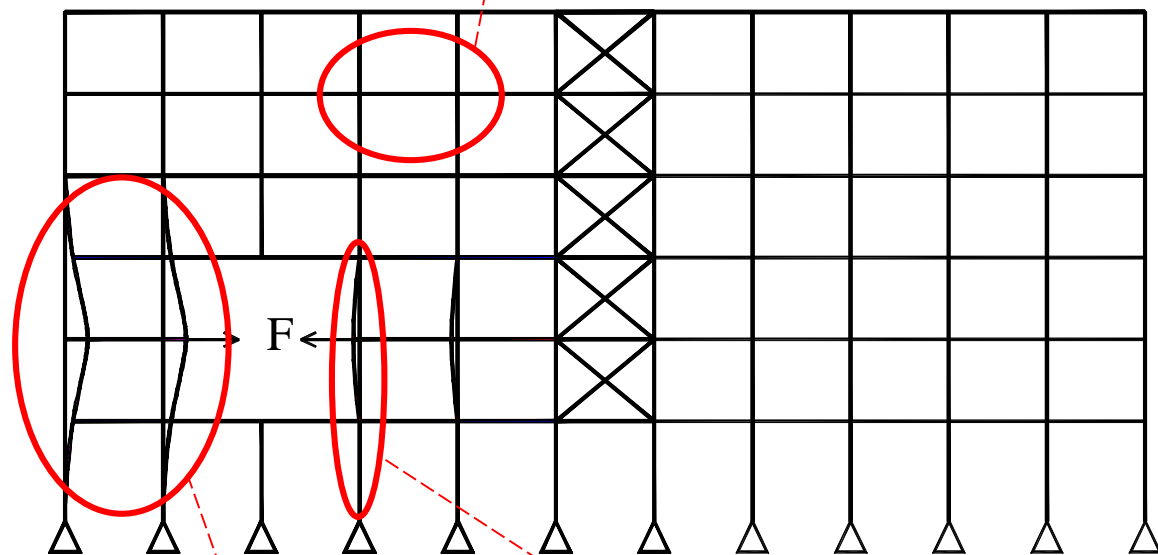
**Faza 3:** ➡ Pojawiają się znaczne przemieszczenia  
➡ Rozwój efektów II-go rzędu  
➡ Pojawiają się siły osiowe w belkach (siły membranowe/efekty ciągnowe)





# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

Wyboczenie belki wynikające  
z globalnego efektu łukowego w konstrukcji



Mechanizm plastyczny

Wyboczenie słupa

Należy sprawdzić inne możliwe mechanizmy zniszczenia:

- Wyboczenie słupów DAP przylegających do usuniętego słupa
- Globalny mechanizm plastyczny w IAP w wyniku działania sił membranowych przenoszonych z DAP na IAP konstrukcji
- Wyboczenie przy ściskaniu górnych belek DAP w wyniku rozwoju efektów łukowych

# 4.1 METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - INFORMACJE OGÓLNE

- W celu zaimplementowania metody alternatywnych ścieżek obciążenia można wykorzystać różne metody projektowe, charakteryzujące się zróżnicowanymi poziomami złożoności.
- Wyróżnia się następujące możliwości:
  - 4.2 Metody normatywne
  - 4.3 Metody analityczne
  - 4.4 Uproszczone podejście numeryczne
  - 4.5 Pełne podejście numeryczne
  - 4.6 Przewidywanie odpowiedzi dynamicznej na podstawie odpowiedzi statycznej

# PROJEKTOWANIE NA NIEOKREŚLONE ZAGROŻENIA

---

*Rzeszów*

**19.05.2022**

## \* METODA NORMATYWNA (ALPM)

*Katarzyna Sieńkowska<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska

## **FAILNOMORE**

Mitigation of the risk of progressive collapse  
in steel and composite building frames  
under exceptional events



Research Fund for Coal & Steel

**FAIL** **NO  
MORE**

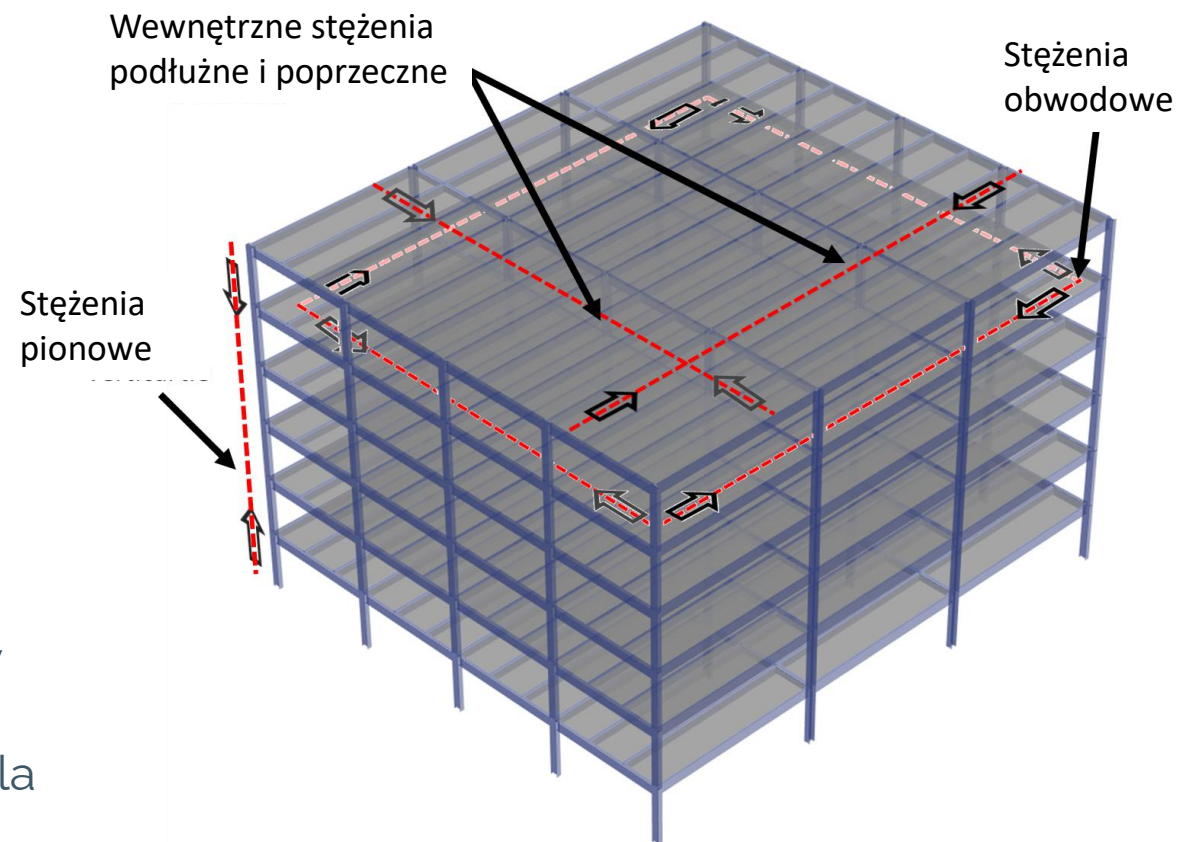
# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## Metoda stężeń jest normatywną metodą projektowania, która

- zapewnia minimalny poziom ciągłości i nośności pomiędzy elementami konstrukcyjnymi;
- wykorzystuje poziome i pionowe elementy stężące;
- wybiera elementy stężące na podstawie poziomu ryzyka i klas konsekwencji;
- jest sugerowana dla konstrukcji o niskim/średnim ryzyku.

## Norma EN 1991-1-7 zaleca:

- Stosowanie stężeń poziomych dla budynków CC2a;
- Stosowanie stężeń poziomych i pionowych dla budynków CC2b.



# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

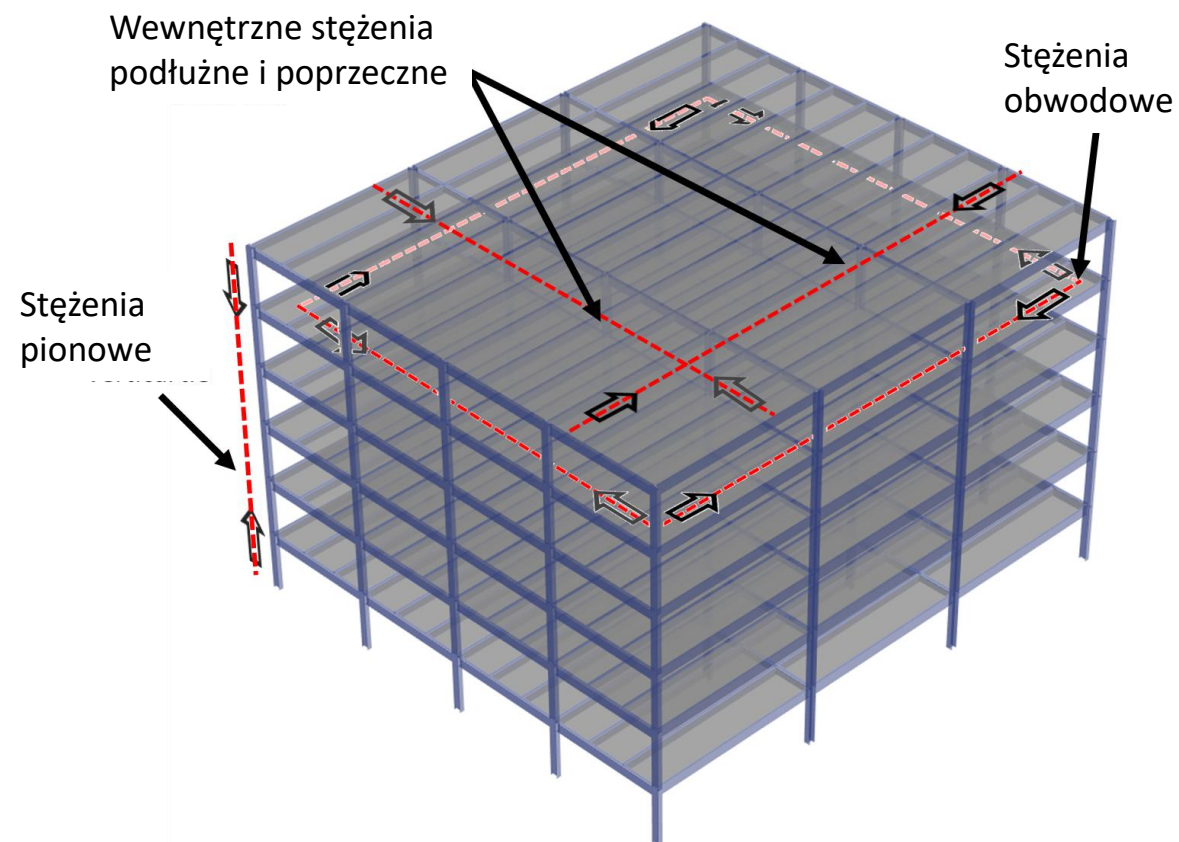
## STĘŻENIA POZIOME

### ■ Stężenia poziome należy stosować

- dokoła każdej kondygnacji,
- stężenia wewnętrzne w dwóch prostokątnych kierunkach łączące słupy i ściany.

### ■ Stężenia poziome powinny być

- ciągłe na całej długości,
- w przypadku stężeń obwodowych, zlokalizowane jak najbliżej krawędzi stropu,
- w przypadku stężeń między słupami rozmieszczone w linii słupów,
- co najmniej 30% stężeń powinno być umieszczone w bezpośrednim sąsiedztwie siatki słupów.



# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

### WYMAGANIA DLA KONSTRUKCJI SZKIELETOWYCH (EN 1991-1-7)

**Stężenia wewnętrzne**  $\Rightarrow T_i = 0,8(g_k + \psi q_k)sL \geq 75 \text{ kN}$

**Stężenia obwodowe**  $\Rightarrow T_p = 0,4(g_k + \psi q_k)sL \geq 75 \text{ kN}$

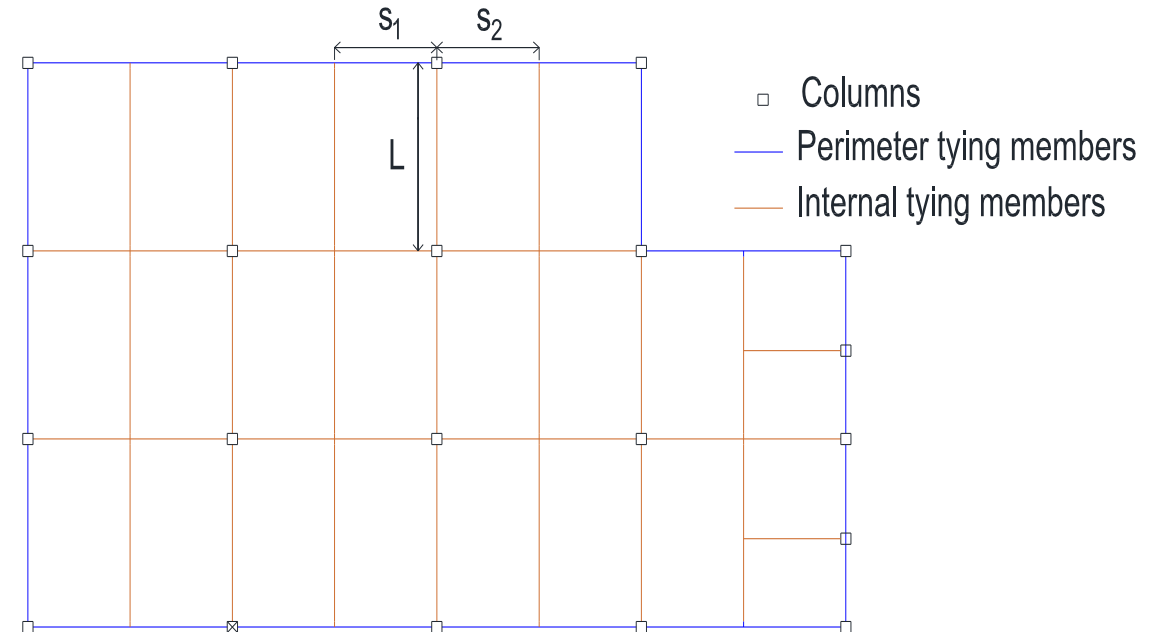
$g_k$  charakterystyczne obciążenie stałe na jednostkę powierzchni stropu

$q_k$  charakterystyczne obciążenie zmienne na jednostkę powierzchni stropu

$s$  średni rozstaw sąsiadujących stężeń ( $s = (s_1 + s_2)/2$ )

$L$  rozpiętość stężenia

$\psi$  odpowiedni współczynnik wartości kombinacyjnej w wyjątkowej sytuacji projektowej (EN 1990)





# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

- **Zasady umożliwiające określenie charakterystyk węzłów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom osiowym zaproponowano w Załączniku A.3.1.**
- **Aby umożliwić ewentualną aktywację elementów stężących, wymagane jest zapewnienie minimalnego poziomu ciągłości.**

1. Jeśli na końcach belki występują węzły o nośności zdecydowanie większej niż nośność belki, to wystarczającą ciągłość wymaga się tylko dla elementu belki - zaleca się stosowanie przekrojów klasy 1 przy zginaniu (dla momentu dodatniego i ujemnego).
2. Jeśli zastosowano węzły o pełnej nośności, wymagana jest ciągłość w węźle i belce.
3. W przypadku zastosowania węzłów o niepełnej nośności lub przegubowych, ciągłość/zdolność do obrotu jest wymagana na poziomie węzłów.



# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

Obliczone minimalne siły rozciągające określone przy użyciu metody normatywnej, zdefiniowane są w celu uzyskania minimalnego uciągnięcia konstrukcji.



Siły te nie odzwierciedlają rzeczywistego poziomu sił rozciągających, które mogą wystąpić w przypadku całkowitej utraty słupa.



Nie można również jednoznacznie określić zależności pomiędzy nośnością stężenia a rzeczywistą odpornością na katastrofę postępującą.



**Skuteczność metody normowej może być dyskusyjna**

# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

### Nowa metoda zaproponowana przez Grupę Projektową PT 2 w obrębie 6 CEN TC250

**CEN/TC250/WG6, 2020** → 
$$T \geq \eta \cdot \rho \cdot \left( \frac{i_f}{\bar{\alpha}} \right) \cdot P$$

$T$  siła rozciągająca, która ma być przeniesiona przez dany element stężający

$\eta$  współczynnik zwiększający uwzględniający ewentualne efekty dynamiczne

$\rho$  współczynnik redukcyjny, uwzględniający różne efekty, takie jak wzmocnienie materiału w interakcji pomiędzy obciążeniem rozciągającym a zginaniem

$i_f$  współczynnik intensywności siły stężającej zależny od rozpatrywanego systemu stężającego

$\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{0,2}$  współczynnik uwzględniający zdolność do obrotu pasa  $\alpha$  (w rad) dla różnych rodzajów stropu

$P$  równoważne, uwzględniające obciążenia przyłożone do analizowanego stropu

Metoda:

- dokładniej przewiduje obciążenie rozciągające,
- uwzględnia różne poziomy ciągłości i rodzaje stropów
- uwzględnia efekty dynamiczne

# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

### Nowa metoda zaproponowana przez Grupę Projektową PT 2 w obrębie 6 CEN TC250

**CEN/TC250/WG6, 2020** → 
$$T \geq \eta \cdot \rho \cdot \left( \frac{i_f}{\bar{\alpha}} \right) \cdot P$$

$T$  siła rozciągająca, która ma być przeniesiona przez dany element stężący

$\eta$  współczynnik zwiększający uwzględniający ewentualne efekty dynamiczne

$\rho$  współczynnik redukcyjny, uwzględniający różne efekty, takie jak wzmocnienie materiału w interakcji pomiędzy obciążeniem rozciągającym a zginaniem

$i_f$  współczynnik intensywności siły stężącej zależny od rozpatrywanego systemu stężącego

$\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{0,2}$  współczynnik uwzględniający zdolność do obrotu pasa  $\alpha$  (w rad) dla różnych rodzajów stropu

$P$  równoważne, uwzględniające obciążenia przyłożone do analizowanego stropu

W (CEN/TC250/WG6, 2020) zaproponowano różne wartości  $i_f$  oraz  $P$  dla belek dwuprzęsłowych, dwukierunkowych stężeń stropowych oraz jednokierunkowych stężeń stropowych poddanych różnym obciążeniom.

# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

### Nowa metoda zaproponowana przez Grupę Projektową PT 2 w obrębie 6 CEN TC250

**CEN/TC250/WG6, 2020** → 
$$T \geq \eta \cdot \rho \cdot \left( \frac{i_f}{\bar{\alpha}} \right) \cdot P$$

$T$  siła rozciągająca, która ma być przeniesiona przez dany element stężający

$\eta$  współczynnik zwiększający uwzględniający ewentualne efekty dynamiczne

$\rho$  współczynnik redukcyjny, uwzględniający różne efekty, takie jak wzmocnienie materiału w interakcji pomiędzy obciążeniem rozciągającym a zginaniem

$i_f$  współczynnik intensywności siły stężającej zależny od rozpatrywanego systemu stężającego

$\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{0,2}$  współczynnik uwzględniający zdolność do obrotu pasa  $\alpha$  (w rad) dla różnych rodzajów stropu

$P$  równoważne, uwzględniające obciążenia przyłożone do analizowanego stropu

Poszukiwana zdolność do obrotu nie jest tym samym co zdolność do obrotu w rozumieniu zdolności do uzyskania przegubu plastycznego, lecz taką, która odpowiada zniszczeniu elementu konstrukcyjnego.

# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

### Nowa metoda zaproponowana przez Grupę Projektową PT 2 w obrębie 6 CEN TC250

**CEN/TC250/WG6, 2020** → 
$$T \geq \eta \cdot \rho \cdot \left( \frac{i_f}{\bar{\alpha}} \right) \cdot P$$

$T$  siła rozciągająca, która ma być przeniesiona przez dany element stężający

$\eta$  współczynnik zwiększający uwzględniający ewentualne efekty dynamiczne

$\rho$  współczynnik redukcyjny, uwzględniający różne efekty, takie jak wzmocnienie materiału w interakcji pomiędzy obciążeniem rozciągającym a zginaniem

$i_f$  współczynnik intensywności siły stężającej zależny od rozpatrywanego systemu stężającego

$\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{0,2}$  współczynnik uwzględniający zdolność do obrotu pasa  $\alpha$  (w rad) dla różnych rodzajów stropu

$P$  równoważne, uwzględniające obciążenia przyłożone do analizowanego stropu

W przypadku braku dokładniejszych informacji, wpływ efektów dynamicznych na siłę rozciągającą można bezpiecznie oszacować przyjmując współczynnik  $\eta = 2$ .

Założenia o wystarczającej sztywności otaczającej konstrukcji oraz stężeń.



# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME – Stropy zespolone

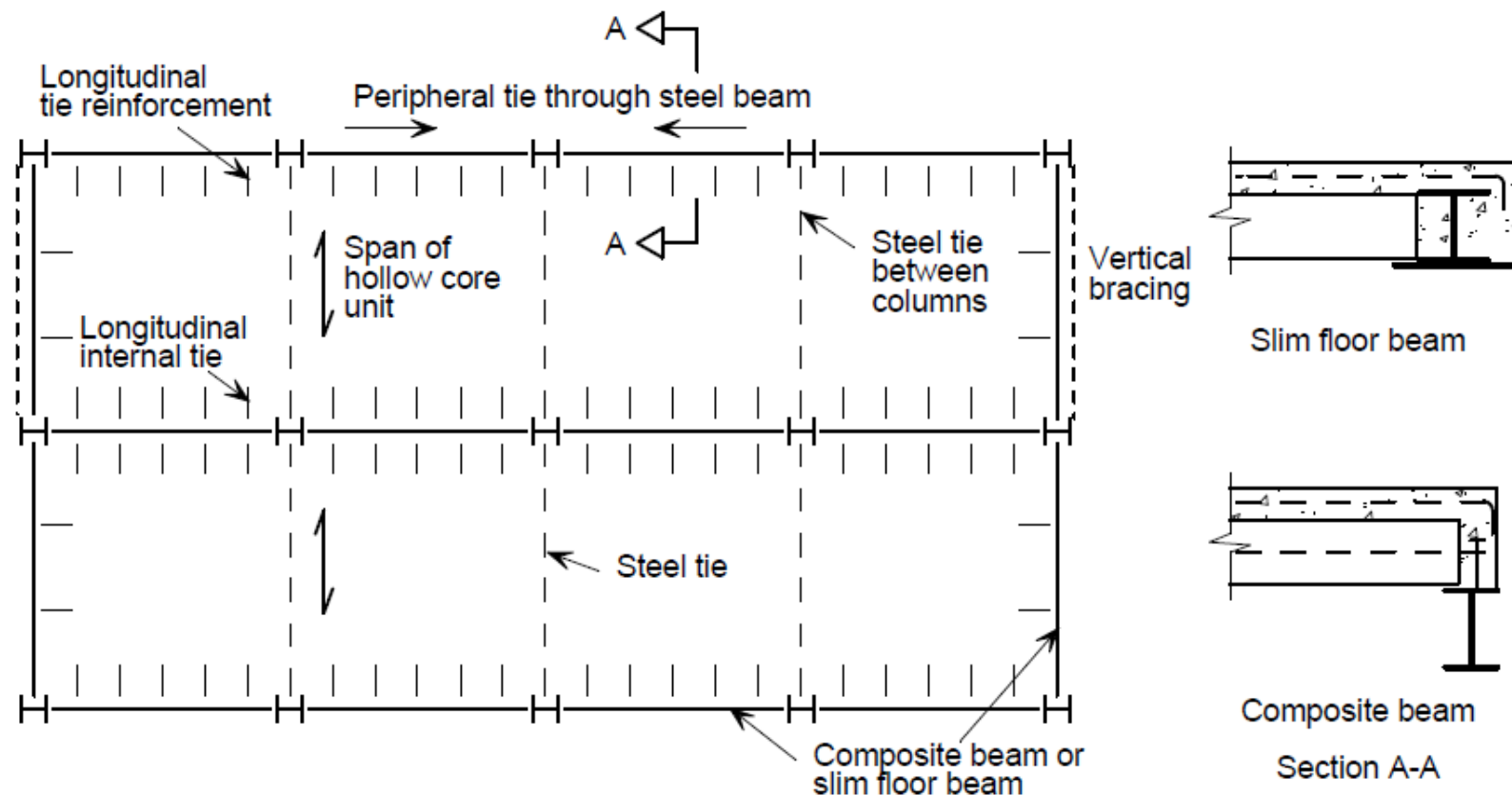
- Stropy zespolone są efektywnym rozwiązaniem konstrukcyjnym, aktywującym alternatywne ścieżki obciążenia w przypadku scenariusza utraty słupa.
- Umożliwiają one aktywację sił membranowych w obrębie połączonej płyty, jednocześnie wymagając znacznie mniejszej zdolności do odkształceń na końcach belki.
- Zaleca się stosowanie rusztów z belek stalowych, których górne półki są połączone z płytą w dwóch głównych kierunkach
- W przypadku współpracy płyt proponuje się przestrzegać zaleceń normy EN1992-1-1 (punkt 9.10.2), gdzie podano minimalne wymagania związane z zapewnieniem systemu stężącego w stropie

# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA POZIOME

## Przykład systemu stężeń w płytach prefabrykowanych

- W przypadku współpracującej płyty żelbetowej, wykonywanej na miejscu budowy można bezpośrednio stosować wymagania zawarte w Eurokodzie 2.
- W przypadku płyt współpracujących wykonanych z prefabrykatów betonowych, szczegółowe zasady zaproponowano w (CEN/TC250/SC4, 2020)
- Dla płyt zespolonych na blachach fałdowych nie ma jeszcze dostępnych żadnych konkretnych zaleceń.



Nr ref.: CEN/TC250/SC4 2020

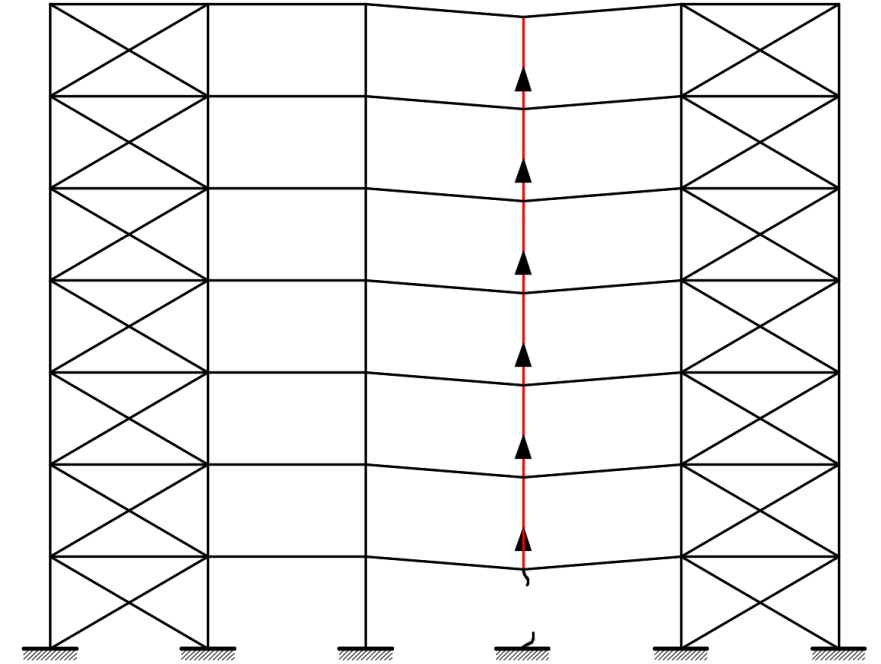
"N 2040 Inne rodzaje stropów z wykorzystaniem prefabrykatów betonowych"



# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA PIONOWE

- W konstrukcjach CC2b należy zastosować stężenia pionowe.
- Rolą stężeń pionowych jest umożliwienie **redystrybucji obciążeń, poprzez tworzenie alternatywnych ścieżek przekazywania obciążenia**.
- **Wymagania dotyczące stężeń pionowych:**
  - wszystkie słupy w konstrukcji powinny być ze sobą połączone w sposób ciągły od fundamentu aż po dach,
  - wszystkie stężenia powinny być zdolne do przeniesienia obliczeniowej wyjątkowej siły rozciągającej równej największej obliczeniowej pionowej stałej i zmiennej reakcji od obciążenia przyłożonego ze słupa każdej pojedynczej kondygnacji.

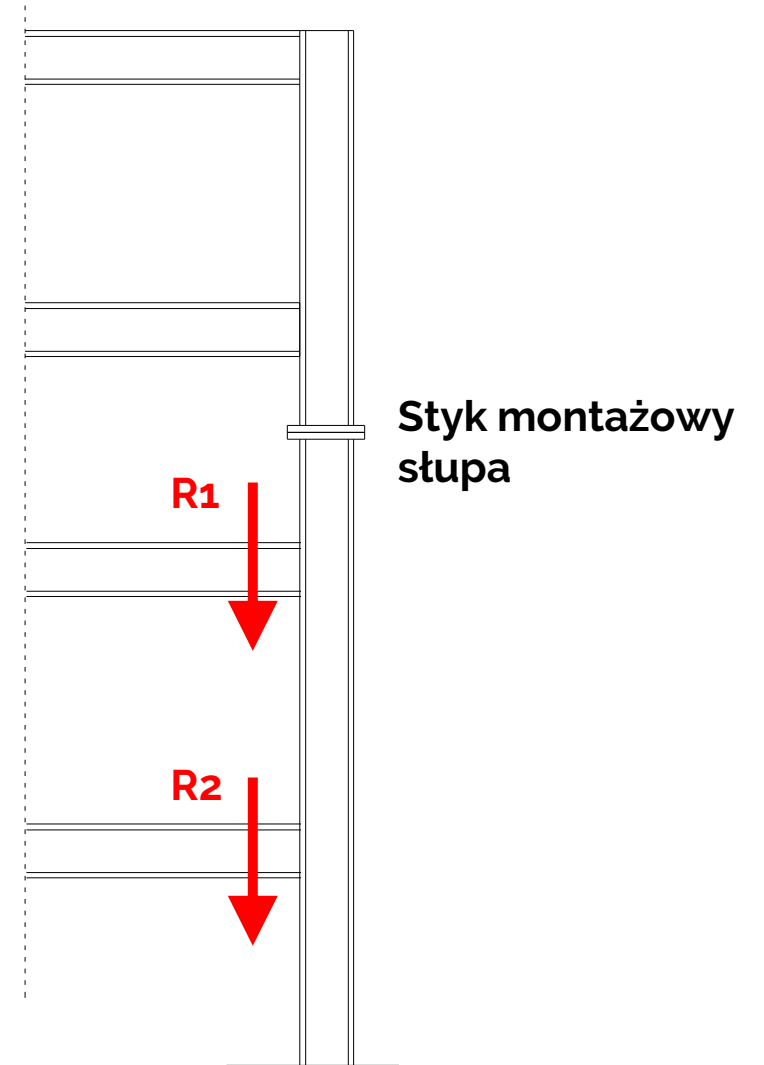


*Alternatywne ścieżki przekazywania obciążeń wywołane poprzez pionowe stężenia*

# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

## STĘŻENIA PIONOWE

- W praktyce, elementami konstrukcyjnymi podlegającymi kontroli są styki montażowe słupów.
- Styki montażowe słupów powinny być zaprojektowane tak, aby były w stanie przetransmitować największe wypadkowe reakcje podporowe belek przyłożone na pojedynczym piętrze.
- Reakcje podporowe powinny być obliczane dla standardowej kombinacji obciążeń, a nie dla kombinacji obciążeń wyjątkowych.
- Kontrola styków montażowych słupów poddanych siłom rozciągającym nie jest wyraźnie ujęta w Eurokodach.



# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

Przykład zastosowania metody stężeń dla belek i ich połączeń (stężenia poziome).

## ■ Konstrukcja zespolona w strefie asejsmicznej

6 kondygnacji o wysokości 4,0 m każda

6 przęseł po 8,0 m w kierunku Y;

3 przęsta po 12 m w kierunku X.

Obciążenia stałe

$$g_k = 5 \frac{kN}{m^2}$$

Obciążenia zmienne

$$q_k = 3 \frac{kN}{m^2}$$

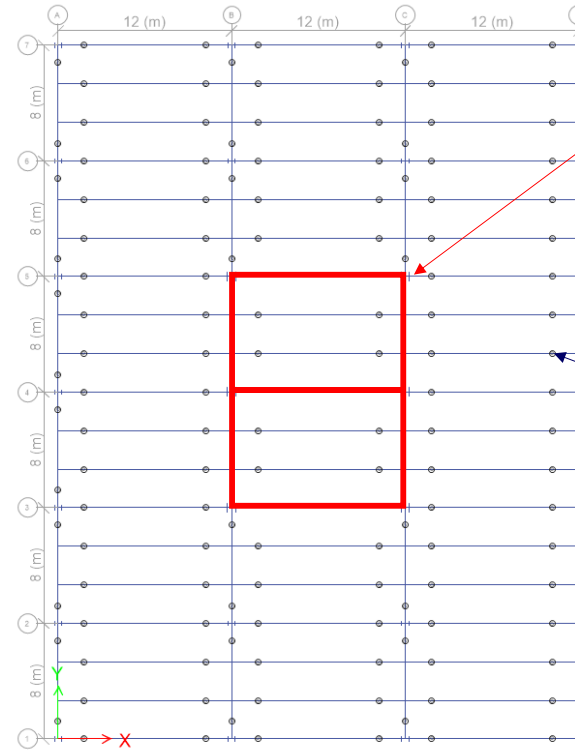
Współczynnik wartości kombinacyjnej dla powierzchni biurowych  
Rozstaw stężeń (belek głównych)

$$\Psi = 0.5$$

$$s = 12 m$$

Rozpiętość stężeń

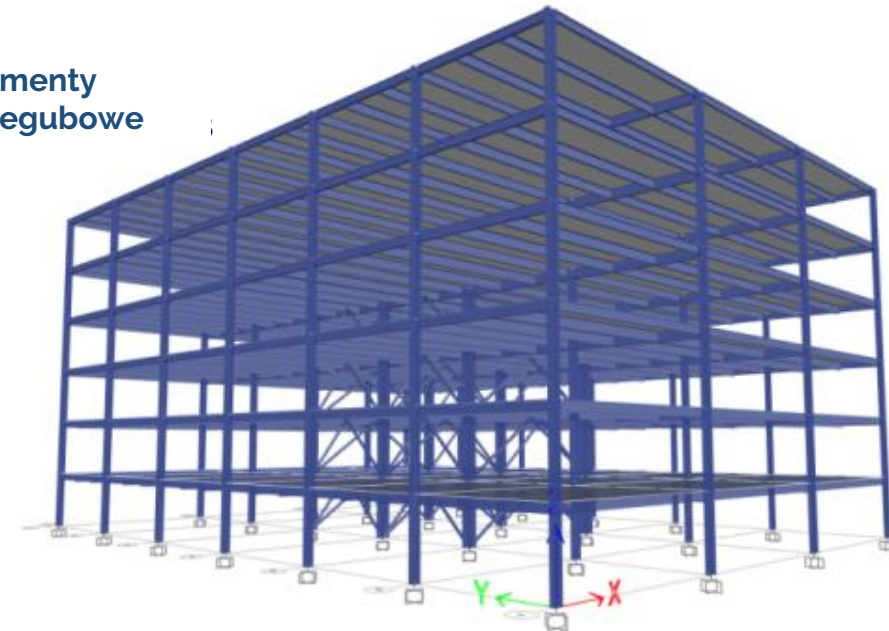
$$L = 8 m$$



Wewnętrzny układ stężający  
Rama sztywna

Widok układu konstrukcyjnego konstrukcji w strefie asejsmicznej

Elementy przegubowe



# 4.2 ALPM- METODY NORMATYWNE

Przykład zastosowania metody stężeń dla belek i ich połączeń (stężenia poziome).

## ■ POZIOME SIŁY STĘŻAJĄCE (na podstawie EN 1991-1-7)

**Stężenia wewnętrzne**  $\Rightarrow T_i = 0,8(g_k + \psi q_k)sL \geq 75 \text{ kN}$

**Stężenia obwodowe**  $\Rightarrow T_p = 0,4(g_k + \psi q_k)sL \geq 75 \text{ kN}$

## ■ OBLICZENIOWE OBCIĄŻENIE ROZCIĄGAJĄCE DLA STĘŻEŃ WEWNĘTRZNYCH

$$T_i = \max[0,8 \times (5 + 0,5 \times 3) \times 12 \times 8; 75 \text{ kN}] = 499,2 \text{ kN}$$

## ■ OBLICZENIOWE OBCIĄŻENIE ROZCIĄGAJĄCE DLA STĘŻEŃ OBWODOWYCH

$$T_p = \max[0,4 \times (5 + 0,5 \times 3) \times 12 \times 8; 75 \text{ kN}] = 249,6 \text{ kN}$$

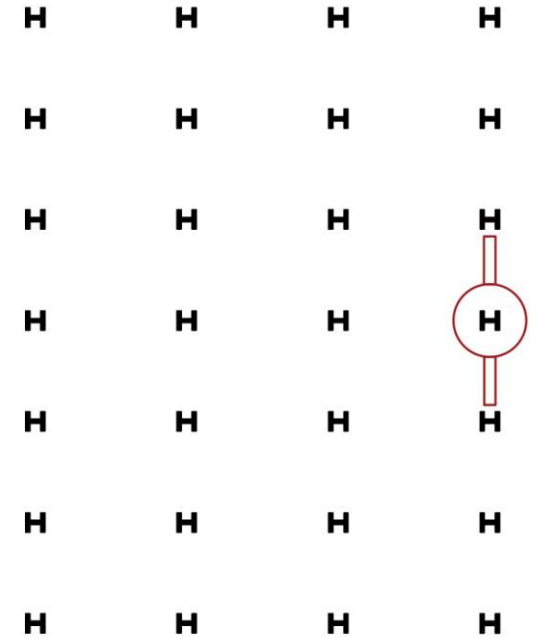
## ■ SPRAWDZENIE WYKORZYSTANIA PRZEKROJU DLA BELEK

Współczynniki wykorzystania -  
belki wewnętrzne (IPE 360)

$$U_i = \frac{T_i}{N_{pl,i}} = \frac{499,2}{2581} = 0.19$$

Współczynniki wykorzystania -  
belki obwodowe (IPE 450)

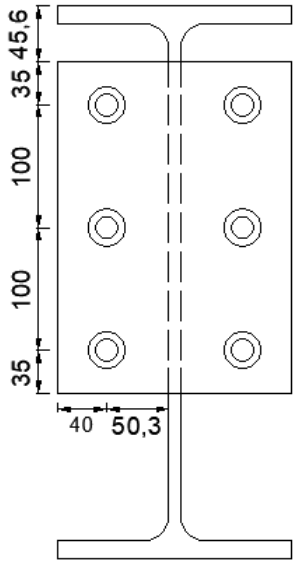
$$U_p = \frac{T_p}{N_{pl,p}} = \frac{249,6}{3507,4} = 0.07$$



*Belki uwzględniane  
w metodzie normatywnej*

## SPRAWDZENIE POŁĄCZEŃ

### Z blachą głowicową



Typ śruby:  
M16 kl. 8.8 (6 śrub)

Blacha:

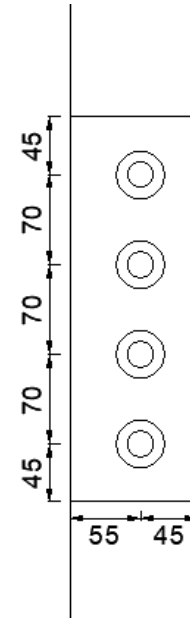
Grubość:  $t_p = 10mm$

Wysokość:  $h_p = 270mm$

Szerokość:  $b_p = 190mm$

Spoina:  $a_w = 2X6mm$

### Z przykładką środnika



Typ śruby:  
M 20 kl. 8.8 (4 śruby)

Blacha:

Grubość:  $t_p = 10mm$

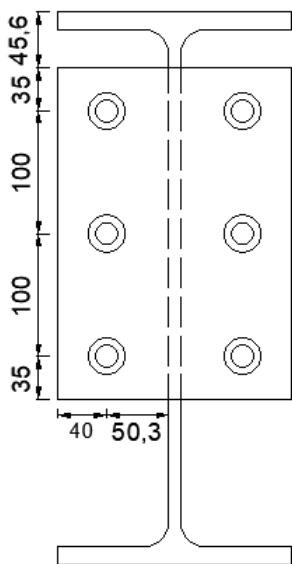
Wysokość:  $h_p = 300mm$

Szerokość:  $b_p = 100mm$

Spoina:  $a_w = 2X6mm$

## SPRAWDZENIE POŁĄCZEŃ

### Z blachą głowicową



Śruby rozciągane  $N_{u1} = 602,88 \text{ kN}$

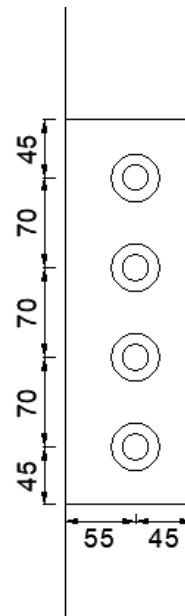
**Blacha czołowa zginana  $N_{u2} = 271,17 \text{ kN}$**

Element główny rozciągany  $N_{u3} = 383,08 \text{ kN}$

Środek belki rozciągany  $N_{u4} = 954,29 \text{ kN}$

Nośność połączenia  $N_u = 271,17 \text{ kN}$  na siły stężające

### Z przykładką środka



Śruby ścinane  $N_{u1} = 376,32 \text{ kN}$

Blacha przykładki przy docisku  $N_{u2} = 512,73 \text{ kN}$

Blacha przykładki rozciągana: brutto  $N_{u2} = 1128,00 \text{ kN}$

Blacha przykładki rozciągana: netto  $N_{u4} = 717,41 \text{ kN}$

Docisk do środka belki  $N_{u5} = 481,96 \text{ kN}$

Środek belki rozciągany: brutto  $N_{u6} = 1060,32 \text{ kN}$

Środek belki rozciągany: netto  $N_{u7} = 674,36 \text{ N}$

**Środek stupa zginany  $N_{u8} = 350,99 \text{ N}$**

Nośność połączenia na siły stężające  $N_u = 350,99 \text{ kN}$

### WYKORZYSTANIE NOŚNOŚCI (Węzły poddane rozciąganiu)

$$U = \frac{T_p}{N_u} = 0,92$$

$$U = \frac{T_p}{N_u} = 0,71$$



## SPRAWDZENIE POŁĄCZEŃ

### WNIOSKI

- Belki są w stanie przenieść obciążenie rozciągające określone w normach.
- Połączenia zostały obliczone jako przegubowe (tj. z pominięciem wpływu zespolenia: pręty zbrojeniowe na poziomie węzłów mogą działać jako elementy stężające, jeśli układ prętów jest ciągły w całym stropie budynku).

*Połączenie sprawdzone według metody stężeń*

Typ połączenia	ULS UF	Stężenie UF	Mechanizm zniszczenia
Błacha głowicowa	0,73	0,92	Błacha czołowa poddana zginaniu
Błacha przykładki	0,71	0,71	Stup poddany zginaniu

- W przedstawionym przykładzie zastosowanie połączenia zaprojektowanego na wyężenie w stanie granicznym nośności wynoszące 70% pozwoliło na przeniesienie siły wynikającej z pracy jako stężenie bez zniszczenia węzła.



Rzeszów

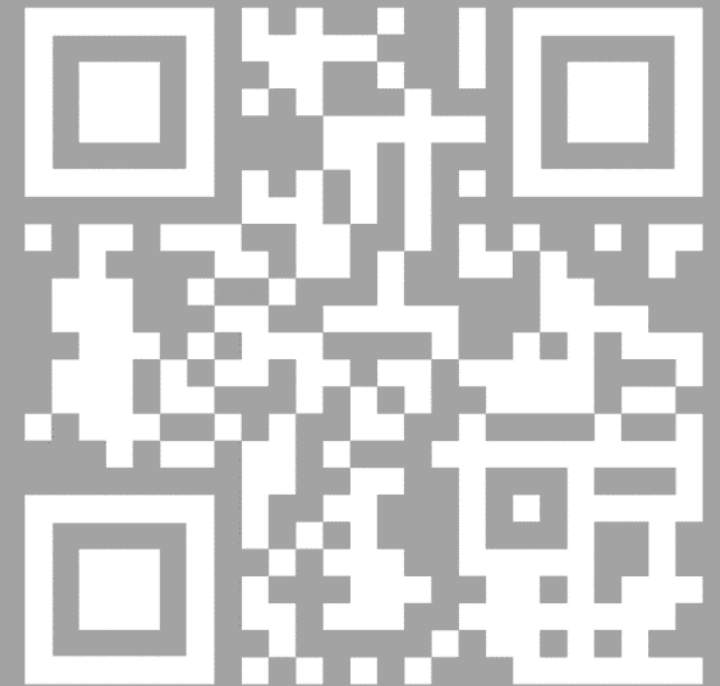
19.05.2022

**DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ.**

*Katarzyna Sieńkowska*

[k.sienkowska@prz.edu.pl](mailto:k.sienkowska@prz.edu.pl)

[steelconstruct.com/eu-projects/failnomore](https://steelconstruct.com/eu-projects/failnomore)



# 4.3 METODY ANALITYCZNE ALPM

## ■ Metody oceny odporności zaproponowane w podręczniku do projektowania to:

- Uproszczona metoda dla konstrukcji z węzłami przegubowymi
- Uproszczona metoda dla konstrukcji z węzłami o niepełnej nośności
- Uprozczone metody dla konstrukcji z węzłami o przewymiarowanej nośności
- Metoda zaawansowana

## ■ Metody uproszczone są pokrótce opisane w dalszej części prezentacji

## ■ Metoda zaawansowana została opisana w podręczniku do projektowania (załącznik A.8)

## ■ Wszystkie istotne zasady stosowania tych metod również są podane w podręczniku do projektowania.

# 4.3 METODY ANALITYCZNE ALPM

## UPROSZCZONA METODA DLA KONSTRUKCJI Z WĘZŁAMI PRZEGUBOWYMI

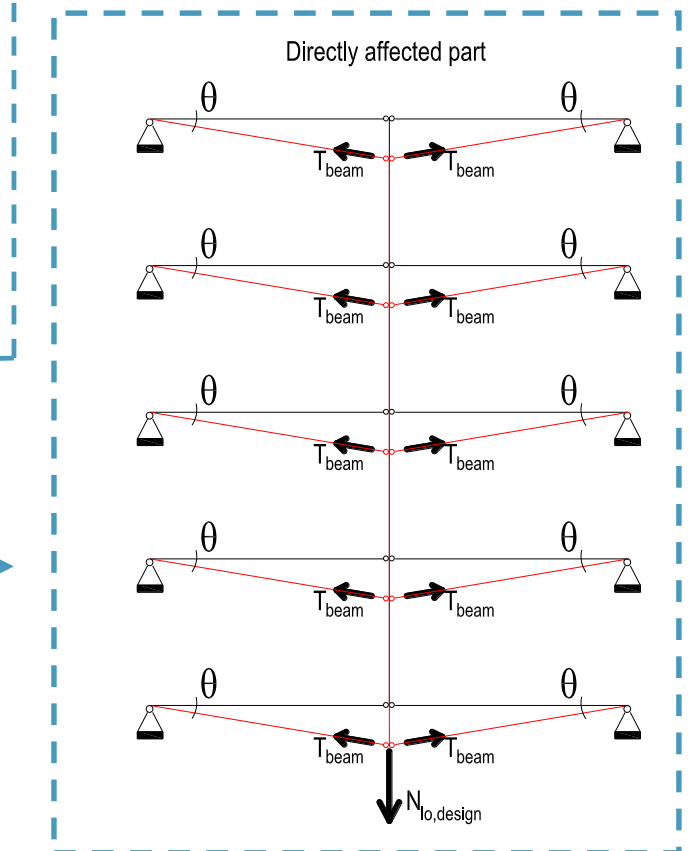
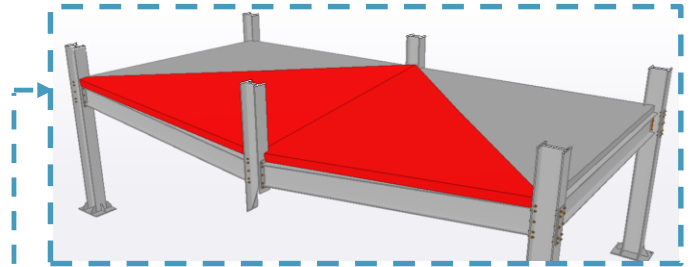
■ Płyty uwzględnione na każdym piętrze (działające jak membrany)

■ Można rozważyć dwie możliwości:

■ Albo odporność jest zapewniona przez płyty (mechanizmy plastyczne + efekty ciągnowe w płycie)

■ Albo odporność jest zapewniona przez DAP (efekty ciągnowe w belkach)

■ Kontrola IAP: słupy sąsiadujące z usuniętym



# 4.3 METODY ANALITYCZNE ALPM

## UPROSZCZONA METODA DLA KONSTRUKCJI Z WĘZŁAMI O NIEPEŁNEJ NOŚNOŚCI

■ Płyty uwzględnione na każdym piętrze (działające jak membrany)

■ Można rozważyć dwie możliwości:

■ Albo odporność jest zapewniona przez płyty  
(mechanizmy plastyczne w płycie + efekty ciągnowe w belkach)

■ Albo odporność jest zapewniona przez płytę + belki DAP  
(mechanizmy plastyczne w płycie i w belkach + efekty łukowe)

~~■ Albo odporność jest zapewniona przez belki DAP  
(mechanizmy plastyczne w belkach + efekty ciągnowe w belkach)~~

■ Kontrola IAP: słupy sąsiadujące z usuniętym

Wymagane zaawansowane modele

# 4.3 METODY ANALITYCZNE ALPM

## UPROSZCZONA METODA DLA KONSTRUKCJI Z WĘZŁAMI O PRZEWYMIAROWANEJ NOŚNOŚCI

■ Płyty uwzględnione na każdym piętrze (działające jak membrany)

■ Można rozważyć dwie możliwości:

■ Albo odporność jest zapewniona przez płyty (mechanizmy plastyczne w płycie + efekty ciągnowe w belkach)

■ Albo odporność jest zapewniona przez płytę + belki DAP (mechanizmy plastyczne w płycie i w belkach + efekty łukowe)

~~■ Albo odporność jest zapewniona przez belki DAP (mechanizmy plastyczne w belkach + efekty ciągnowe w belkach)~~

■ Kontrola IAP: słupy sąsiadujące z usuniętym

Wymagane zaawansowane modele

# NIEOKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA

## \* **Metoda alternatywnej ścieżki obciążenia (ALPM)**

### *Podejście analityczne*

Ten przykład przedstawia sposób projektowania na nieokreślone oddziaływania z wykorzystaniem podejścia analitycznego ALPM

#### \* **ODDZIAŁYWANIA UWZGLĘDNIONE W WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ**

- \* Obciążenie stałe DL
- \* Obciążenie zmienne LL

#### \* **KOMBINACJA ODDZIAŁYWAŃ W WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ**

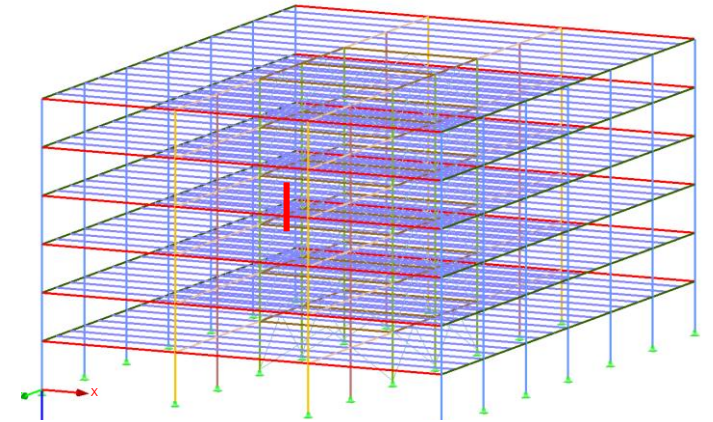
#### \* **OKREŚLENIE SCENARIUSZA:** usunięcie stupa w lokalizacji B2, parter

#### \* **ROZPATRYWANE ELEMENTY**

- \* Belka B1/B3 – IPE550
- \* Belka C2w/C3w – IPE600

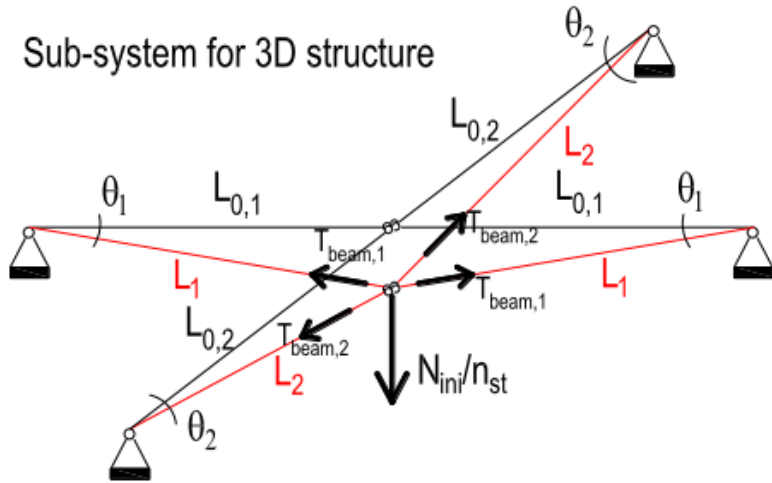
#### \* **ZAŁOŻENIA DLA WĘZŁÓW**

- \* Rozwiązanie 1: węzły przegubowe
- \* Rozwiązanie 2: węzły o niepełnej nośności



# Rozwiązanie 1 - Siły ciągnowe w przypadku węzłów przegubowych

Procedura projektowania polega na rozwiązaniu układu 4 równań



3D Structures with simple joints	
Eq. 1	$\frac{N_{ini}}{n_{st}} = 2 \cdot T_{beam,1} \cdot \sin \theta_1 + 2 \cdot T_{beam,2} \cdot \sin \theta_2$
Eq. 2	$T_{beam,1} = \frac{1 - \cos \theta_1}{\cos \theta_1} \cdot E \cdot A_1$
Eq. 3	$T_{beam,2} = \frac{1 - \cos \theta_2}{\cos \theta_2} \cdot E \cdot A_2$
Eq. 4	$L_{0,1} \cdot \tan \theta_1 = L_{0,2} \cdot \tan \theta_2$

belka,1 - IPE550

belka,2 - IPE600

$N_{ini}$  wyznaczona w analizie konstrukcji z uwzględnieniem kombinacji oddziaływań wyjątkowych.

$N_{ini}$	$n_{st}$	E	$A_1$	$L_{0,1}$	$A_2$	$L_{0,2}$
4078.51 kN	6	210000 MPa	134 cm <sup>2</sup>	12 m	156 cm <sup>2</sup>	8 m

$$17866.67 \tan(x) (1 - \cos(\tan^{-1}(0.67 \tan(x)))) + 31200 \tan(x) (1 - \cos(x)) - 3.24 = 0$$

**Rozwiązanie**

$\theta_1$	$\theta_2$	$T_{beam,1}$ - IPE550	$T_{beam,2}$ - IPE600
0.03659 rad	0.05485 rad	<b>1884 kN</b>	<b>4934 kN</b>

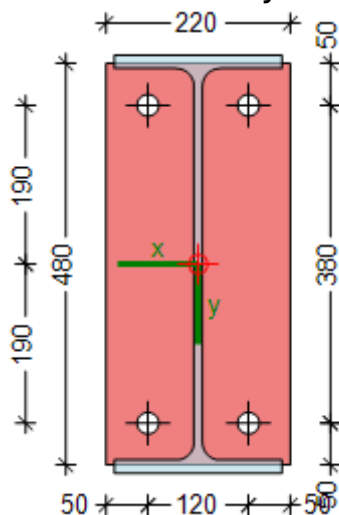


# Rozwiązanie 1 – Siły ciągnowe w przypadku węzłów przegubowych

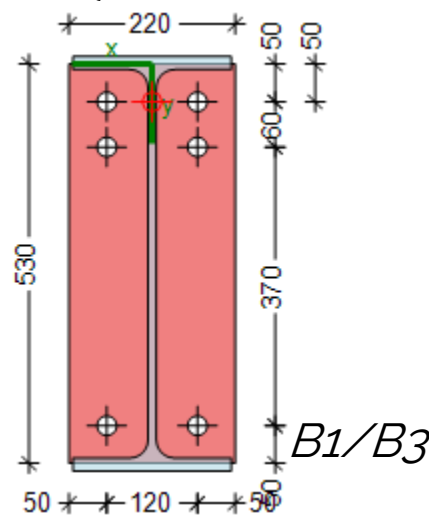
- UWAGI**
- \* W porównaniu z metodą numeryczną (następny przykład) uzyskane wyniki są o około 8% wyższe (1741 kN dla IPE550 i 4565 kN dla IPE600). Podejście analityczne charakteryzuje się jednak pewnym zawyżeniem wartości sił rozciągających. Wartości sił potwierdzają zakres i walidują wyniki analiz numerycznych.
  - \* Wyniki wskazują na potrzebę przeprojektowania konstrukcji pod kątem nośności. Przyczyną są węzły konstrukcji, które nie są w stanie przenieść tak znaczących wartości sił (patrz metoda stężeń).

## Rozwiązanie 2 – Podejście alternatywne w przypadku węzłów o niepełnej nośności

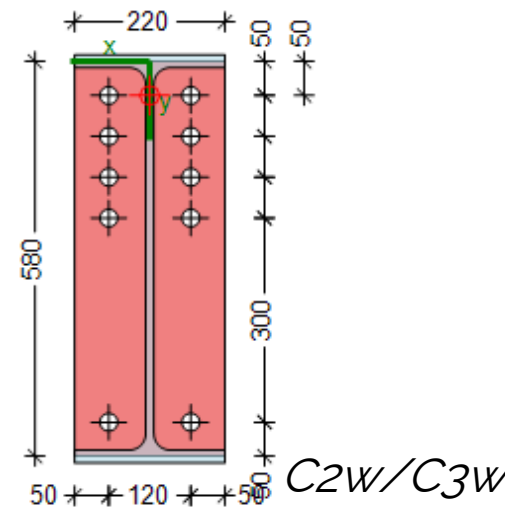
Węzły o niepełnej nośności mogą być dobrą alternatywą dla węzłów przegubowych w aspekcie zwiększenia odporności konstrukcji. Celem sprawdzenia tej tezy główne węzły belka-stęp zostaną zmienione na typ doczołowy z blachą wpuszczoną.



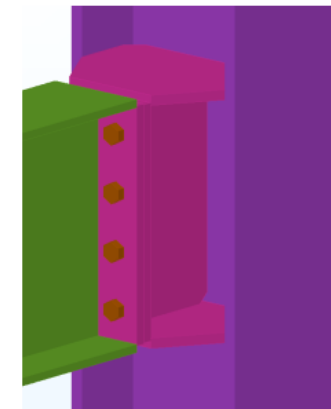
A1/A2



B1/B3



C2W/C3W



Spawana część węzła doczołowego z blachą wpuszczoną na kierunku słabej osi przekroju stupa

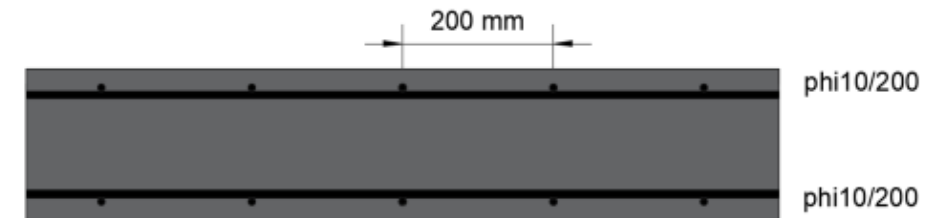
# Uproszczona metoda analityczna w przypadku węzłów o niepełnej nośności uwzględnia następujące czynniki:

- \* Wpływ mechanizmu plastycznego w belkach
- \* Wpływ płyty stropowej
- \* Wpływ efektu łukowego

W przypadku gdy suma powyższych wpływów jest niewystarczająca, dochodzi do zwiększania się przemieszczeń konstrukcji i pojawienia się efektu ciągnowego w belkach, podobnie jak w przykładzie z węzłami przegubowymi. Praca ciągnowa belek wymaga w tej sytuacji większej zdolności do obrotu węzłów konstrukcji. W związku z tym w analizowanym przypadku (węzły o niepełnej nośności) projektowanie z uwagi na odporność będzie opierać się na optymalizacji trzech wymienionych powyżej wpływów tak, aby efekt ciągnowy w belkach nie wystąpił.

## \* UDZIAŁ PŁYTY STROPOWEJ

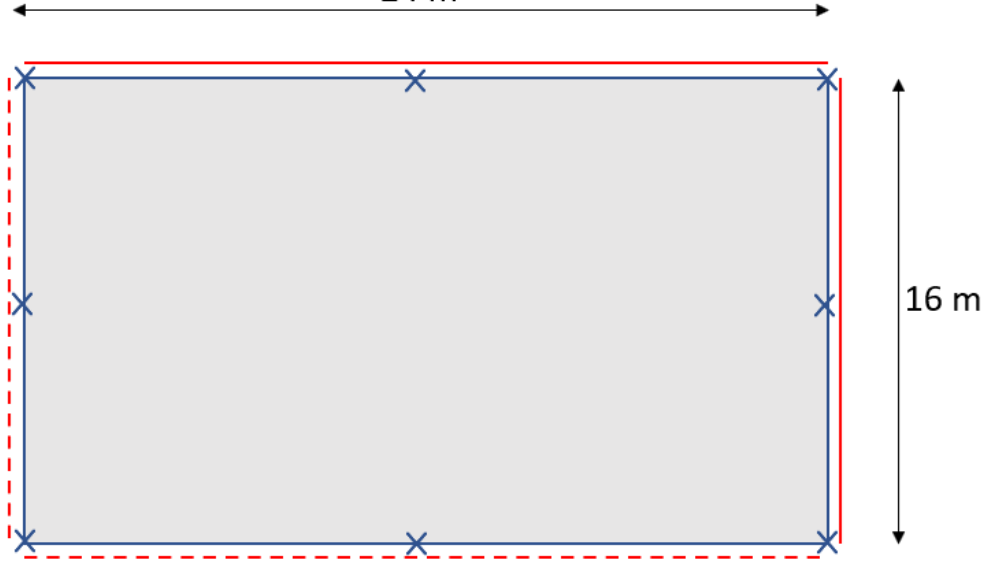
Klasa betonu	t	c	Stal zbrojeniowa	$A_{sx}$ (górną i dół)	$A_{sy}$ (górną i dół)	$M_{Rd}$ (rozciąganie dołem/ rozciąganie górną)	Mechanizm zniszczenia
C30/37	20 cm	20 mm	B500S	3.93 $\text{cm}^2/\text{m}$	3.93 $\text{cm}^2/\text{m}$	26.9 kNm	Uplastycznienie zbrojenia



Płyta stropowa została zaprojektowana tak, aby spełnić warunki ULS i SLS. Pole przekroju poprzecznego i rozstaw prętów stali zbrojeniowej odpowiada minimalnym wartościom według EN 1992-1 Rozdz. 9.

## \* UDZIAŁ PŁYTY STROPOWEJ

24 m



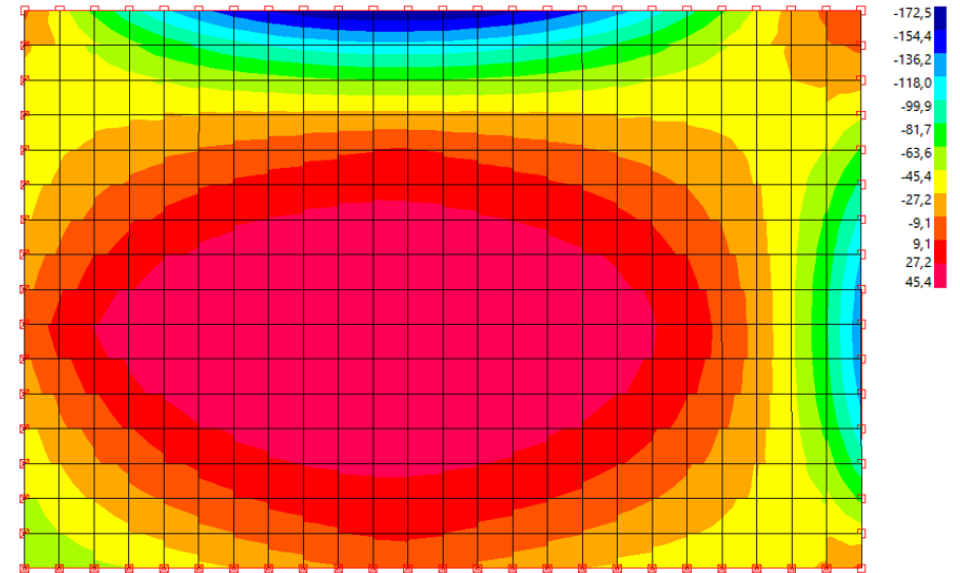
- - - Peripheral beams (free rotation)
- Slab continuity (restrained rotation)
- X Columns

16 m

*Schemat statystyczny płyty betonowej po utracie słupa*

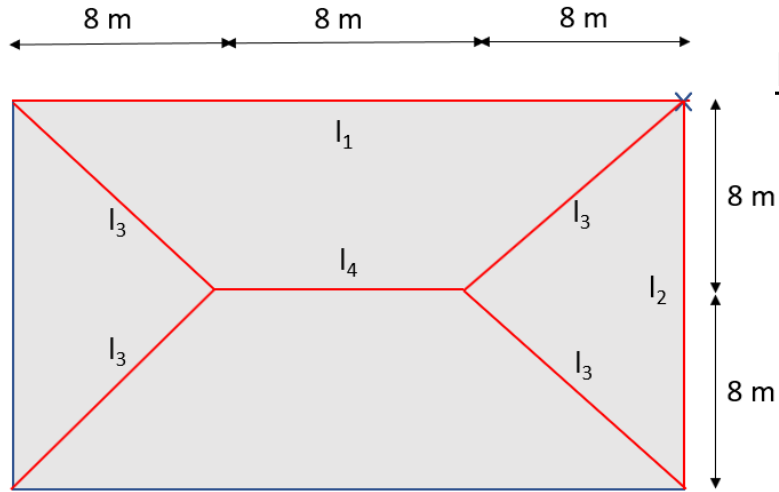
Płyta może nadal przyczyniać się do zapewnienia odporności konstrukcji. Udział ten wyraża się za pomocą pionowej siły skupionej  $P_{slab}$  (w miejscu utraty słupa) potrzebnej do rozwinięcia się mechanizmu plastycznego.

Obciążenia wyjątkowe ( $1 \times G + 0.5 \times Q$ )  
wynoszą  $6.5 \text{ kN/m}^2$



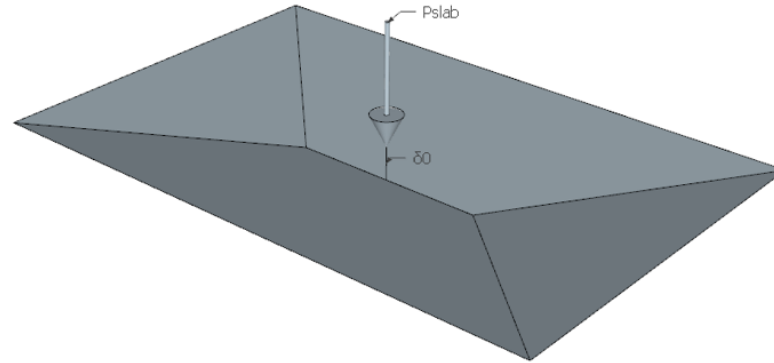
*Moment zginający w betonowej płycie  
po utracie słupa  
( $M_{Ed} = -172.5 \text{ kNm}$ )*

# \* UDZIAŁ PŁYTY STROPOWEJ (2)

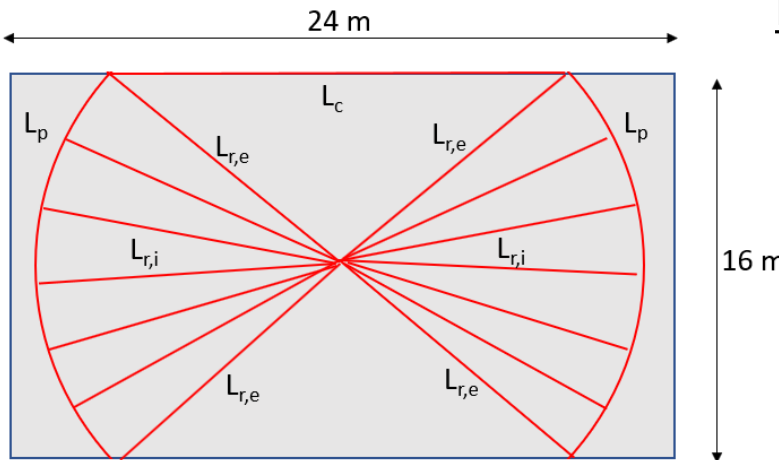
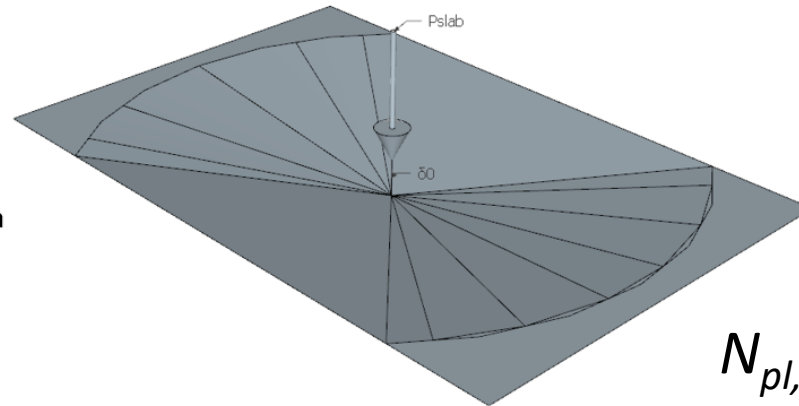


— Yielding lines

Niekołowy model mechanizmu plastycznego



Kołowy model mechanizmu plastycznego



Zasada prac wirtualnych

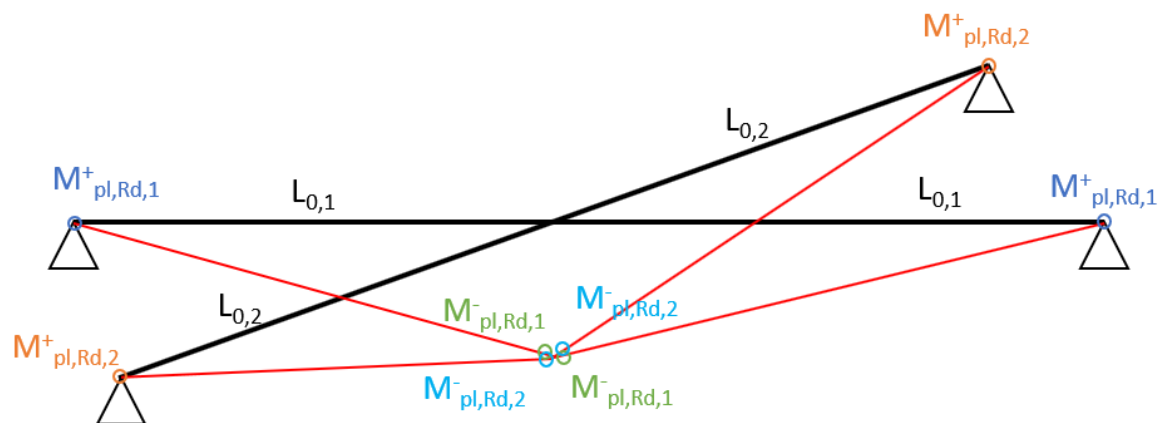
Dla mechanizmu niekołowego uzyskano siłę **313.6 kN**

Dla mechanizmu kołowego uzyskano siłę **330.4 kN**

$$N_{pl,slab} = \min(313.6 \text{ kN}; 330.4 \text{ kN}) = 313.6 \text{ kN}$$

# \* UDZIAŁ MECHANIZMU PLASTYCZNEGO BELKI STALOWEJ

Węzły o niepełnej nośności □ siła pionowa związana z rozwojem mechanizmu plastycznego belek na skutek powstawania przegubów plastycznych w węzłach obliczana jest w obu kierunkach



Nośność na zginanie węzłów o niepełnej nośności

Węzeł B1/B3		Węzeł C2/C3	
$M_{pl,Rd,1}^+$ (rozciąganie góra)	$M_{pl,Rd,1}^-$ (rozciąganie dół)	$M_{pl,Rd,2}^+$ (rozciąganie góra)	$M_{pl,Rd,2}^-$ (rozciąganie dół)
306.1 kNm	224.7 kNm	416.6 kNm	305.6 kNm

## \* UDZIAŁ EFEKTU ŁUKOWEGO

- \*  $N_{arch}$  pionowa siła skupiona potrzebna do pokonania efektu łukowego
- \* Efekty łukowe występują, jeżeli nośność na ściskanie dowolnego aktywowanego składnika systemu po wytworzeniu się powyższego mechanizmu nie jest decydująca, innymi słowy, jeżeli przyczyną zniszczenia nie jest składnik (tj. połączenie lub belka) poddany ścisaniu. W takich warunkach, efekt łukowy może być uruchomiony w belkach w strefie bezpośredniego wpływu (DAP) przy pojawieniu się mechanizmu plastycznego.

Węzeł	Zwrot momentu	Postać zniszczenia
B1/B3	Rozciąganie górną (+)	Środek słupa przy ścisaniu
B1/B3	Rozciąganie dołem (-)	Środek słupa przy ścisaniu
C2/C3	Rozciąganie górną (+)	Środek słupa przy ścisaniu
C2/C3	Rozciąganie dołem (-)	Środek słupa przy ścisaniu

- \* Efekty łukowe nie mogą zostać określone, ponieważ przyczyną zniszczenia rozpatrywanych węzłów jest składnik poddany ścisaniu. W związku z tym  $N_{arch} = 0 \text{ kN}$
- \* Wpływy pochodzące od mechanizmu plastycznego belek, płyty stropowej i efektu łukowego mogą być rozpatrywane łącznie, ponieważ ich aktywacja wymaga ograniczonej zdolności do odkształceń

**OSTATECZNIE NOŚNOŚĆ JEST RÓWNA**



## \* WERYFIKACJA KONSTRUKCJI

$$N = N_{slab} + N_{pl} + N_{arch} = 313.6 + 269.0 + 0.0 = 582.6 \text{ kN} < 694.2 \text{ kN (Siła w usuniętym słupie)}$$

□ W konsekwencji, znaczne pionowe przemieszczenia w strefie bezpośredniego wpływu będą rozwijać się wraz z pojawieniem się sił membranowych  $N_{membrane}$  w belkach. W tym przypadku wpływy pochodzące od płyty stropowej i efektu łukowego nie mogą być brane pod uwagę, gdyż znikają po osiągnięciu dużych deformacji.

- \* Udział sił membranowych  $N_{membrane}$  wymagałby znacznej zdolności do odkształceń węzłów o niepełnej nośności.
- \* Modelem zniszczenia połączeń jest w tym przypadku środek słupa poddany ścisłaniu pod wpływem działania momentów zginających. W rozpatrywanym przypadku, węzły nie wykazują się dostateczną ciągliwością → węzły należy przeprojektować.

## \* PRZEPROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI Z WĘZŁAMI O NIEPEŁNEJ NOŚNOŚCI

W ramach niniejszego przykładu konstrukcja stalowa została zachowana w obecnym stanie (zaprojektowana z siłami wewnętrznymi wyznaczonymi na podstawie schematu statycznego z węzłami przegubowymi). Modelowanie węzłów podatnych jako przegubów stanowi bezpieczne i uzasadnione podejście w przypadku, gdy połączenia te mają wystarczającą plastyczność i zdolność do obrotu.

Aby spełnić wymagania dotyczące odporności można zastosować następujące zabiegi:

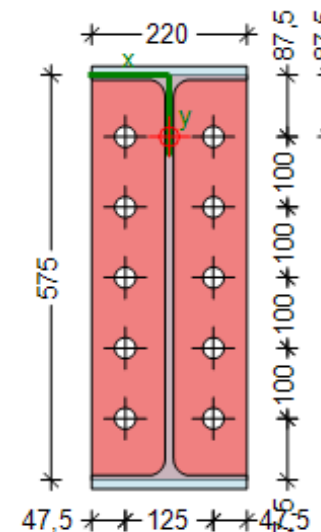
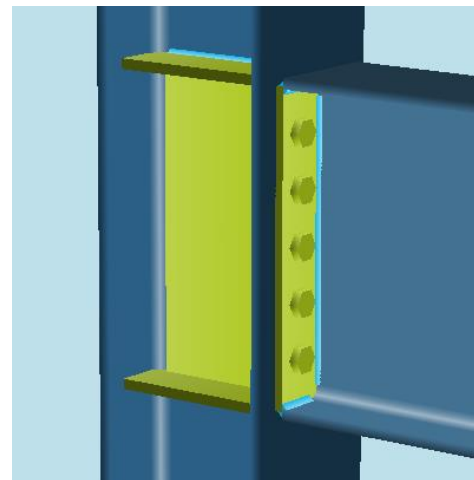
- \* Zmodyfikować projekt płyty, aby zwiększyć udział mechanizmu płyty;
- \* Wzmocnić węzły w jednym lub obu kierunkach w celu zwiększenia udziału mechanizmu belki;
- \* Wzmocnić elementy ściskane, aby umożliwić powstanie efektów łukowych.

## \* PRZEPROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI Z WĘZŁAMI O NIEPEŁNEJ NOŚNOŚCI (2)

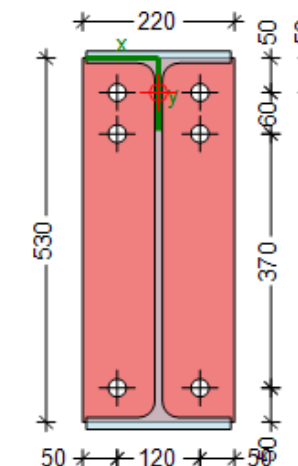
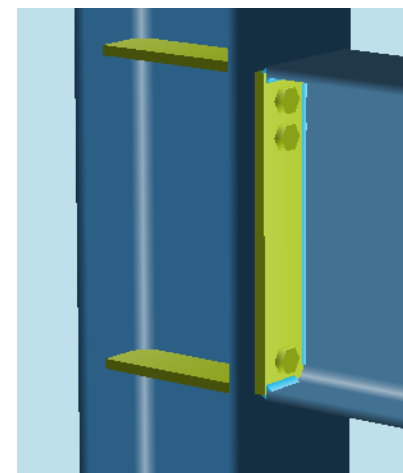
### ZMIANY DLA WĘZŁÓW C2/C3 I B1/B3

- \* Wprowadzono żebra poprzeczne środnika w słupie (o tej samej grubości co pasy belek);
- \* Wprowadzono nakładki środnika w słupie (dla węzła C2/C3);
- \* Dostosowano układ śrub;
- \* Zwiększono grubość spoin pasów z 6 do 7 mm;
- \* Średnicę śrub zwiększono z M24 do M27 (dla węzła C2/C3).

**Zmiany w tym węźle pozwalają na zwiększenie nośności połączenia na zginanie, a tym samym powstanie mechanizmu w belce. Układ śrub pozostaje niezmienny.**



Węzeł  
C2/C3



Węzeł  
B1/B3

# \* PRZEPROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI Z WĘZŁAMI O NIEPEŁNEJ NOŚNOŚCI (3)

## \* UDZIAŁ PŁYTY STROPOWEJ

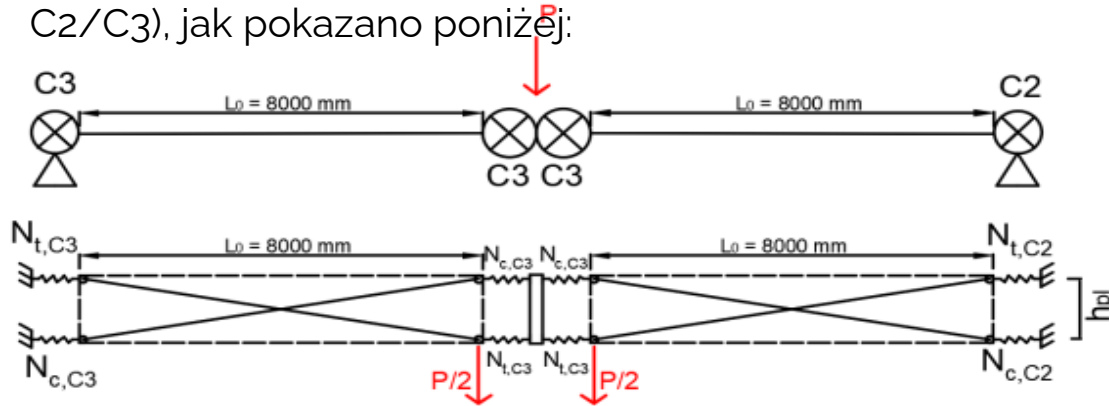
- \* Udział płyty stropowej pozostaje bez zmian gdyż nie wprowadzono w tym elemencie żadnych modyfikacji ( $N_{slab} = 313.6 \text{ kN}$ )

## \* UDZIAŁ MECHANIZMU PLASTYCZNEGO BELEK

- \* Siła  $N_{pl}$  jest równa 334.7 kN

## \* UDZIAŁ EFEKTU ŁUKOWEGO

- \* W ramach tego przykładu uwzględniono jedynie efekt łukowy pochodzący z ramy krótkiej (IPE600 z węzłami C2/C3), jak pokazano poniżej:



Węzeł B1/B3		Węzeł C2/C3	
$M_{pl,Rd,1}^+$ (rozciąganie górą)	$M_{pl,Rd,1}^-$ (rozciąganie dołem)	$M_{pl,Rd,2}^+$ (rozciąganie górą)	$M_{pl,Rd,2}^-$ (rozciąganie dołem)
368.9 kNm	285.4 kNm	451.3 kNm	451.3 kNm
CWS	CWS	EPB	EPB
Pionowe przemieszczenie belki			$\Delta_{beam}$ 36.9 mm
Pionowe przemieszczenie wynikające z obrotu w węzłach			$\Delta_{joints}$ 63.3 mm
Całkowite przemieszczenie pionowe wynikające z przejścia belki w mechanizm			$\Delta_{pl}$ 1369.4 kN
Suma sił rozciągających w węzle przy przejściu belki w mechanizm			$F_t$ 1369.4 kN
Efektywna sztywność węzła przy ściskaniu			$k_{eff,c}$ 9.461 mm
Sprężyste skrócenie węzła przy ściskaniu			$\delta_{c,el}$ 0.689 mm
Długość pręta (krzyżulca) ściskanego przy przejściu belki w mechanizm (efekt łuku)			$L_D$ 8017.0 mm
Nośność węzła przy ściskaniu			$F_c$ 1783 kN
Plastyczne skrócenie węzła przy ściskaniu w momencie zniszczenia			$\delta_{c,pl}$ 0.897 mm
Nachylenie pręta (krzyżulca) ściskanego w momencie zniszczenia (efekt łukowy)			$\theta$ 0.062 rad
Nośność przy wyboczeniu pręta (krzyżulca) ściskanego (efekt łukowy – podejście bezpieczne)			$N_{b,Rd}$ 231.7 kN

Po zsumowaniu wszystkich uwzględnionych wpływów, **całkowita nośność** wynosi:

$$N_{arch} = 51.0 \text{ kN}$$

$$N = N_{slab} + N_{pl} + N_{arch} = 313.6 + 334.7 + 51.0 = 699.3 \text{ kN}$$

## \* PODSUMOWANIE

- \* Nośność jest w tym przypadku większa od pionowej siły podłużnej 694.2 kN, stąd konstrukcję po przeprojektowaniu można uznać za odporną.

# 4.4 ALPM- UPROSZCZONE PODEJŚCIA NUMERYCZNE

## ■ Stan graniczny odporności

- Scenariusz nagłej utraty słupa
- Zapobieganie zawaleniu się wyższych kondygnacji
- Dopuszczalne duże odkształcenia
- Granica ciągliwości

## ■ Wielopoziomowa ocena konstrukcji szkieletowych z uwzględnieniem ciągliwości

- Nieliniowa odpowiedź statyczna
- Uproszczona ocena dynamiczna
- Ocena ciągliwości

## ■ Uwzględnienie ciągliwości, statycznej niewyznaczalności, absorpcji energii i efektów dynamiczne

## ■ Podejście praktyczne

## ■ Nie ma potrzeby przeprowadzania rozbudowanej nieliniowej analizy dynamicznej

# 4.4 ALPM- UPROSZCZONE PODEJŚCIA

## NUMERYCZNE

### ■ Idealizacja konstrukcji

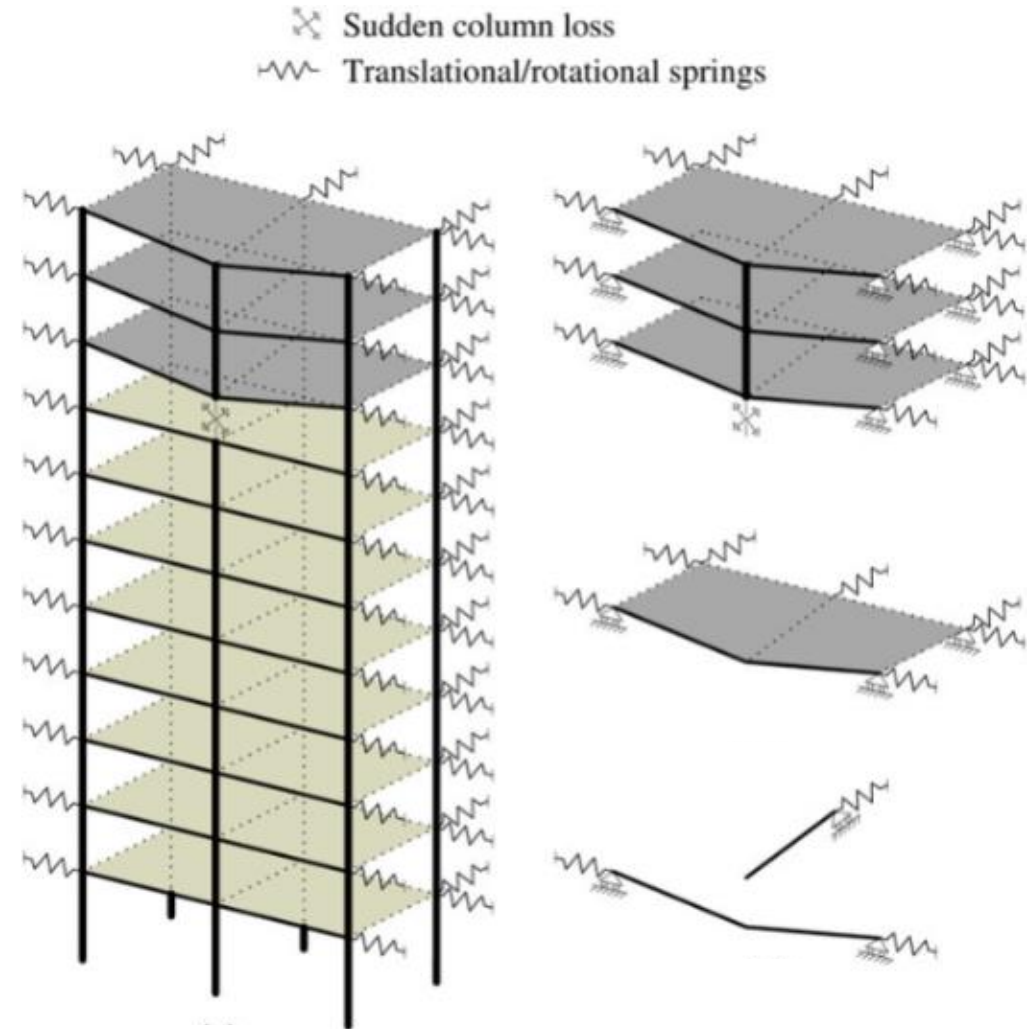
- Fragment poddany obciążeniu
- Kondygnacja(-e) nad usuniętym słupem
- Pojedyncza kondygnacja nad usuniętym słupem
- Pojedyncza belka stalowa/zespolona nad usuniętym słupem

■ Odpowiedź na wyższych poziomach może być zrealizowana przy użyciu modeli niskopoziomowych

■ Przybliżenie rusztowe kondygnacji może być wykonane przy pomocy pojedynczych modeli belkowych

■ Przyjęty model stropu może być wykorzystany do uzyskania odpowiedzi SDOF dla systemu wielokondygnacyjnego pod warunkiem założenia sztywnych słupów

SDOF= pojedynczy stopień swobody

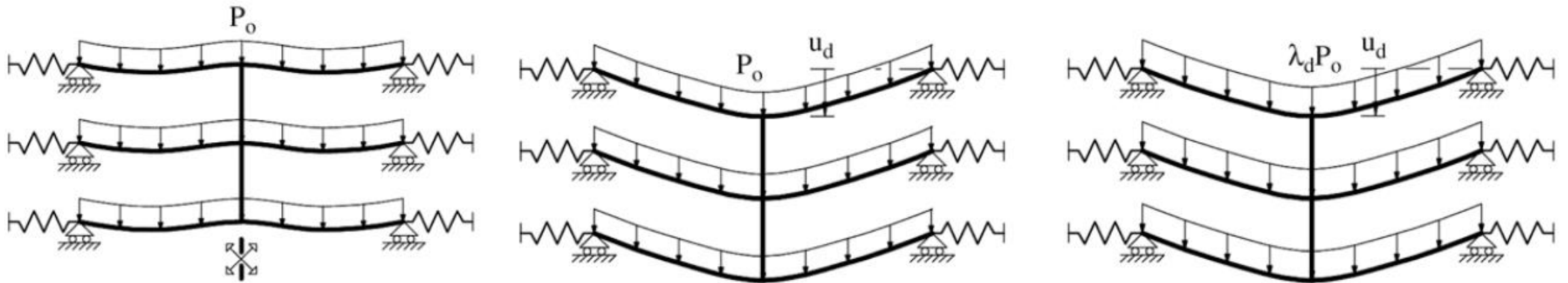




# 4.4 ALPM- UPROSZCZONE PODEJŚCIA NUMERYCZNE

## ■ Nieliniowa odpowiedź statyczna

- Efekt nagłego usunięcia słupa może być traktowany podobnie do nagłego przyłożenia obciążenia grawitacyjnego ( $P_o$ ) dla danej konstrukcji
- Maksymalną odpowiedź dynamiczną można dokładnie oszacować na podstawie nieliniowej odpowiedzi statycznej pod wzmożonym obciążeniem grawitacyjnym ( $\lambda_d P_o$ )

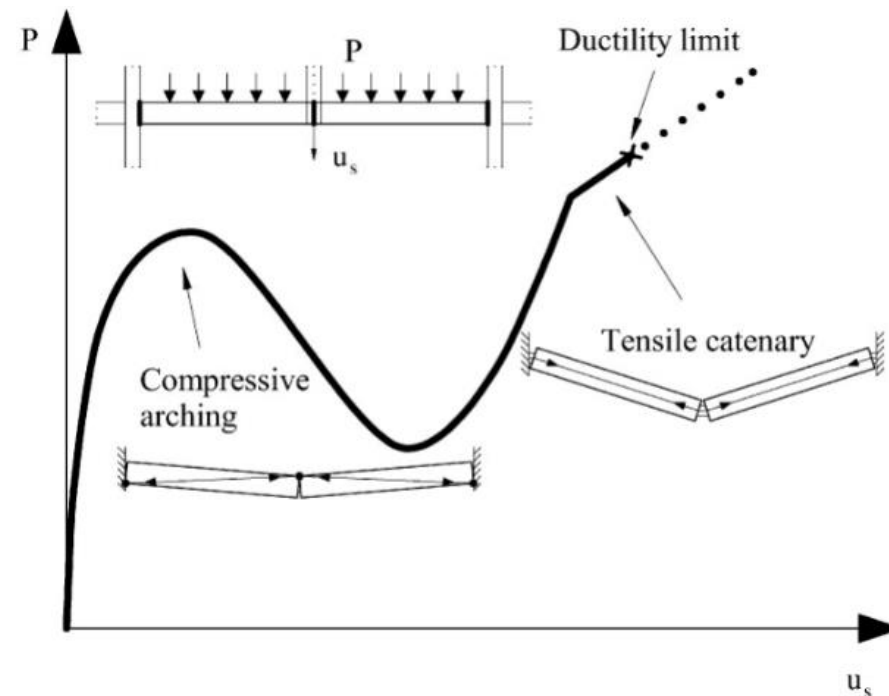
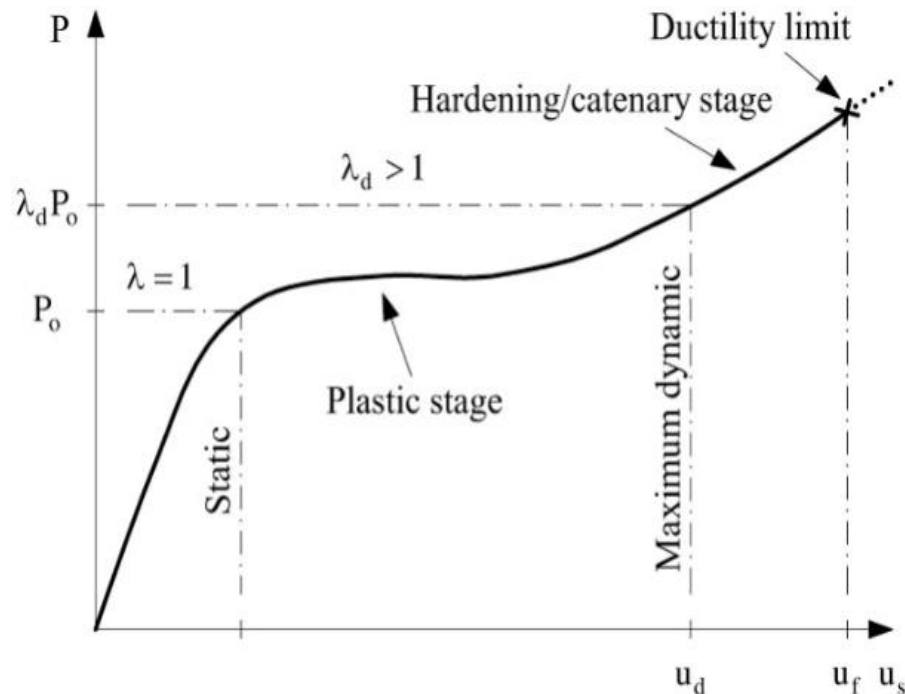




# 4.4 ALPM- UPROSZCZONE PODEJŚCIA NUMERYCZNE

## ■ Nieliniowa odpowiedź statyczna

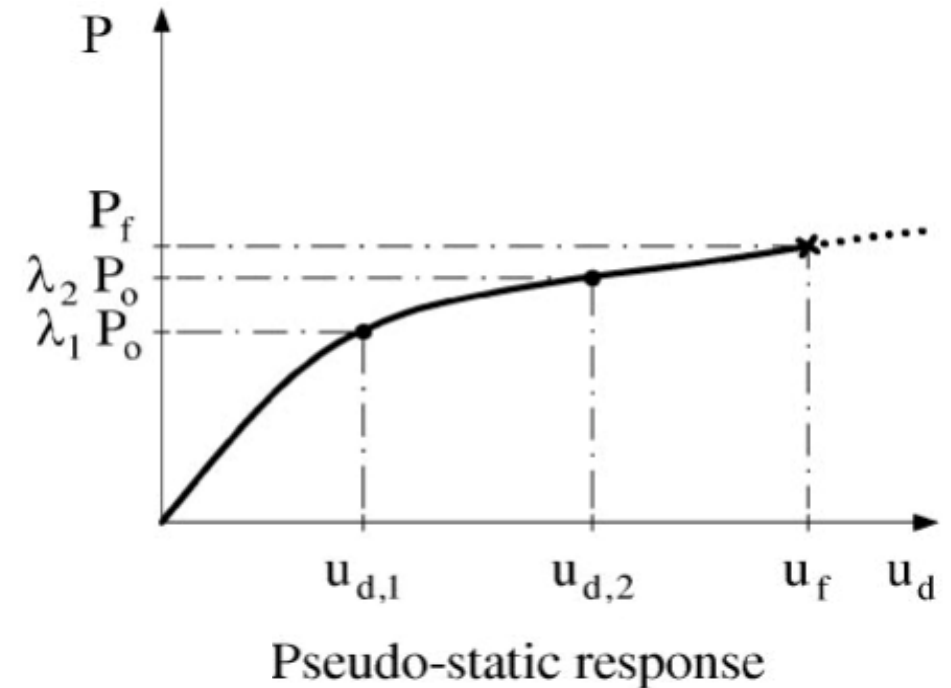
- Uwzględnia: wzmocnienie materiału, rozciąganie od efektów ciągnowych i ściskanie od efektów łukowych
- Można stosować modele szczegółowe lub uproszczone w zależności od zakładanego poziomu idealizacji konstrukcji



# 4.4 ALPM- UPROSZCZONE PODEJŚCIA NUMERYCZNE

## ■ Uproszczona ocena dynamiczna

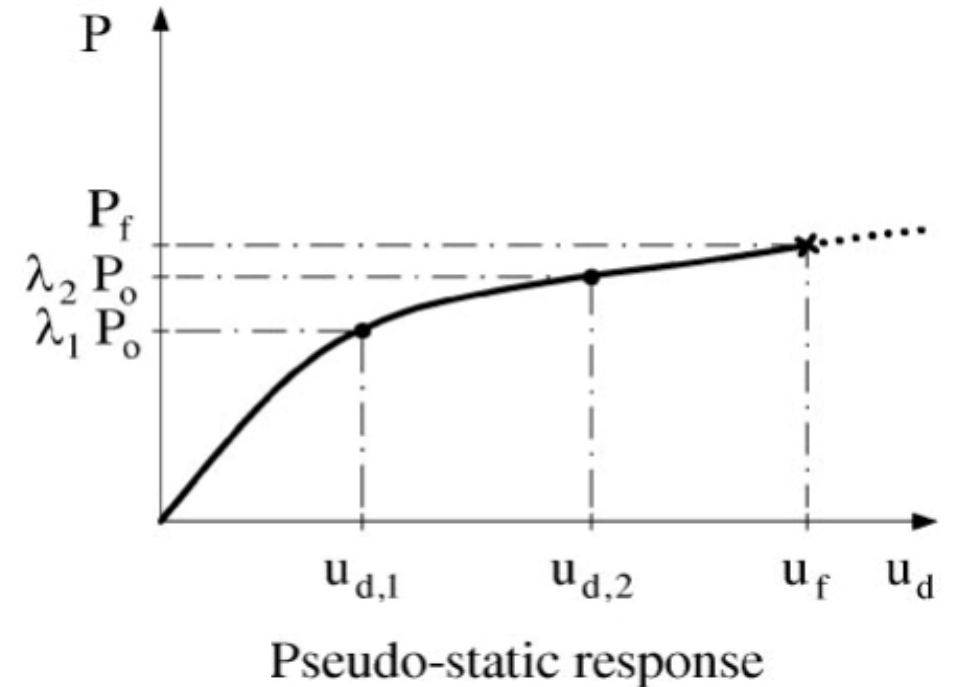
- Maksymalna odpowiedź dynamiczna konstrukcji powinna być uwzględniana, gdy zachodzi konieczność oszacowania wymaganej ciągłości
- Do określenia maksymalnej odpowiedzi dynamicznej stosuje się podejście uproszczone
- Nie ma potrzeby przeprowadzania zaawansowanej nieliniowej analizy dynamicznej
- Dokładniejsza niż tradycyjne podejście z dynamicznym współczynnikiem wzmocnienia
- Dynamiczna odpowiedź "pseudo-statyczna" ( $P, u_d$ ) określona na podstawie nieliniowej odpowiedzi statycznej ( $P, u_s$ )
- Więcej szczegółów w kolejnych rozdziałach



# 4.4 ALPM- UPROSZCZONE PODEJŚCIA NUMERYCZNE

## ■ Ocena ciągłości

- Maksymalne przemieszczenie dynamiczne ( $u_d$ ) uzyskane w wyniku odpowiedzi pseudostatycznej przy ( $P=P_o$ ) porównuje się z wartością graniczną ciągłości ( $u_f$ )
- Granicę ciągłości ( $u_f$ ) określa się jako minimalną wartość ( $u_d$ ), przy której wymagane odkształcenie przewyższa zapas ciągłości w którymkolwiek z węzłów
- Deformacje występujące w węzłach można wyznaczyć dla przemieszczeń na najniższym poziomie rozpatrywanego podsystemu
- Wymagania dotyczące ciągłości w różnych składnikach węzła można następnie uzyskać na podstawie całkowitych deformacji węzła i porównać je z zapasem ciągłości różnych składników



# PROJEKTOWANIE NA NIEOKREŚLONE ZAGROŻENIA

Rzeszów

19.05.2022

## \* METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA (ALPM)

- \* Pełne podejście numeryczne
- \* Wyznaczanie odpowiedzi dynamicznej na podstawie odpowiedzi statycznej

## \* METODA PODZIAŁU NA SEGMENTY

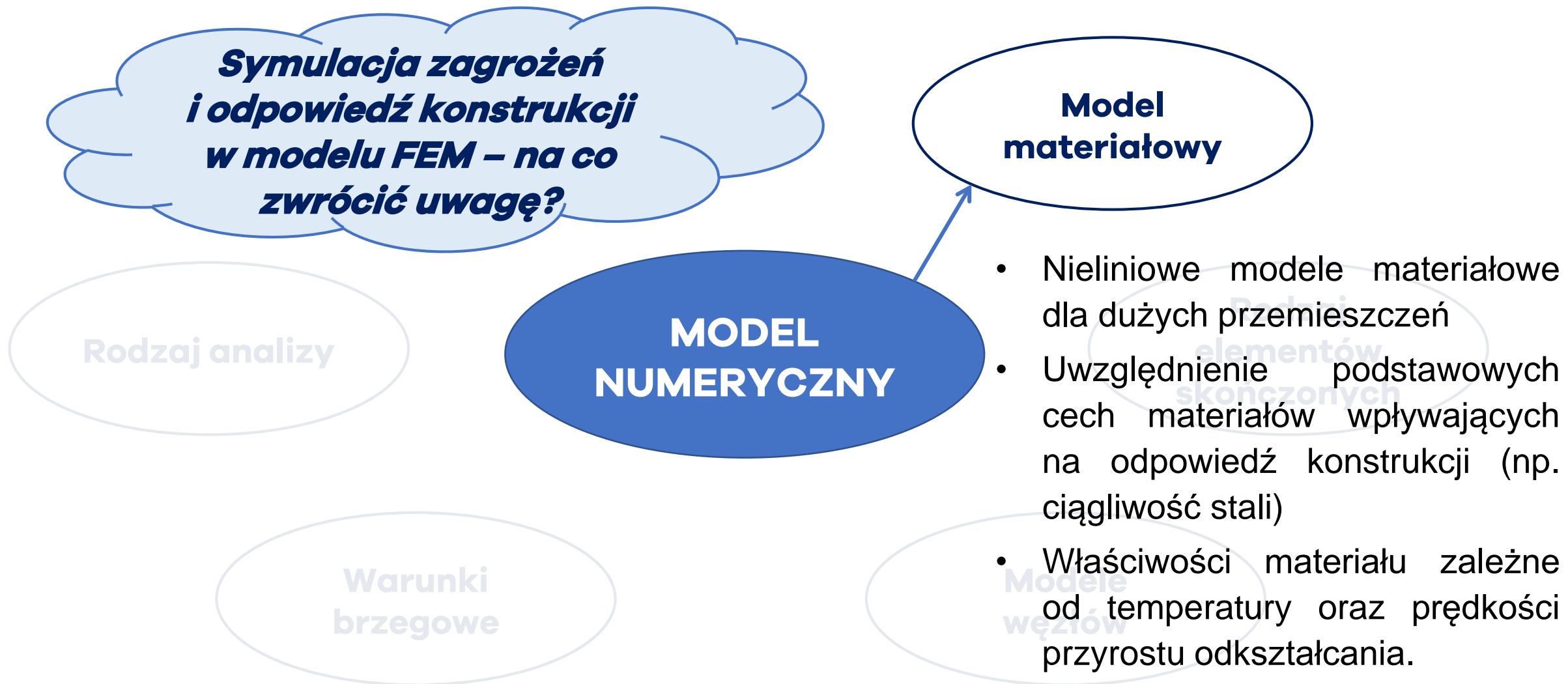
*Rafał Budziński<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska

## FAILNOMORE

Mitigation of the risk of progressive collapse  
in steel and composite building frames  
under exceptional events

# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - PEŁNE PODEJSCIE NUMERYCZNE



# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - PEŁNE PODEJSCIE NUMERYCZNE

***Symulacja zagrożeń  
i odpowiedź konstrukcji  
w modelu FEM – na co  
zwrócić uwagę?***

**Model  
materiałowy**

Rodzaj analizy

**MODEL  
NUMERYCZNY**

**Rodzaj  
elementów  
skończonych**

Warunki  
brzegowe

- Elementy liniowe, powierzchniowe, objętościowe lub elementy specjalne, takie jak masa, sprężyna itd. dostosowane do zachowania konstrukcji, metody analizy i materiału.

# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - PEŁNE PODEJSCIE NUMERYCZNE

***Symulacja zagrożeń  
i odpowiedź konstrukcji  
w modelu FEM – na co  
zwrócić uwagę?***

**Model  
materiałowy**

Rodzaj analizy

**MODEL  
NUMERYCZNY**

**Rodzaj  
elementów  
skończonych**

- „Zaawansowane” (elementy bryłowe lub powłokowe) lub uproszczone (elementy belkowe, prętowe, sprężyny) np. za pomocą metody składnikowej (określenie nośności, sztywności i zdolności do odkształceń)

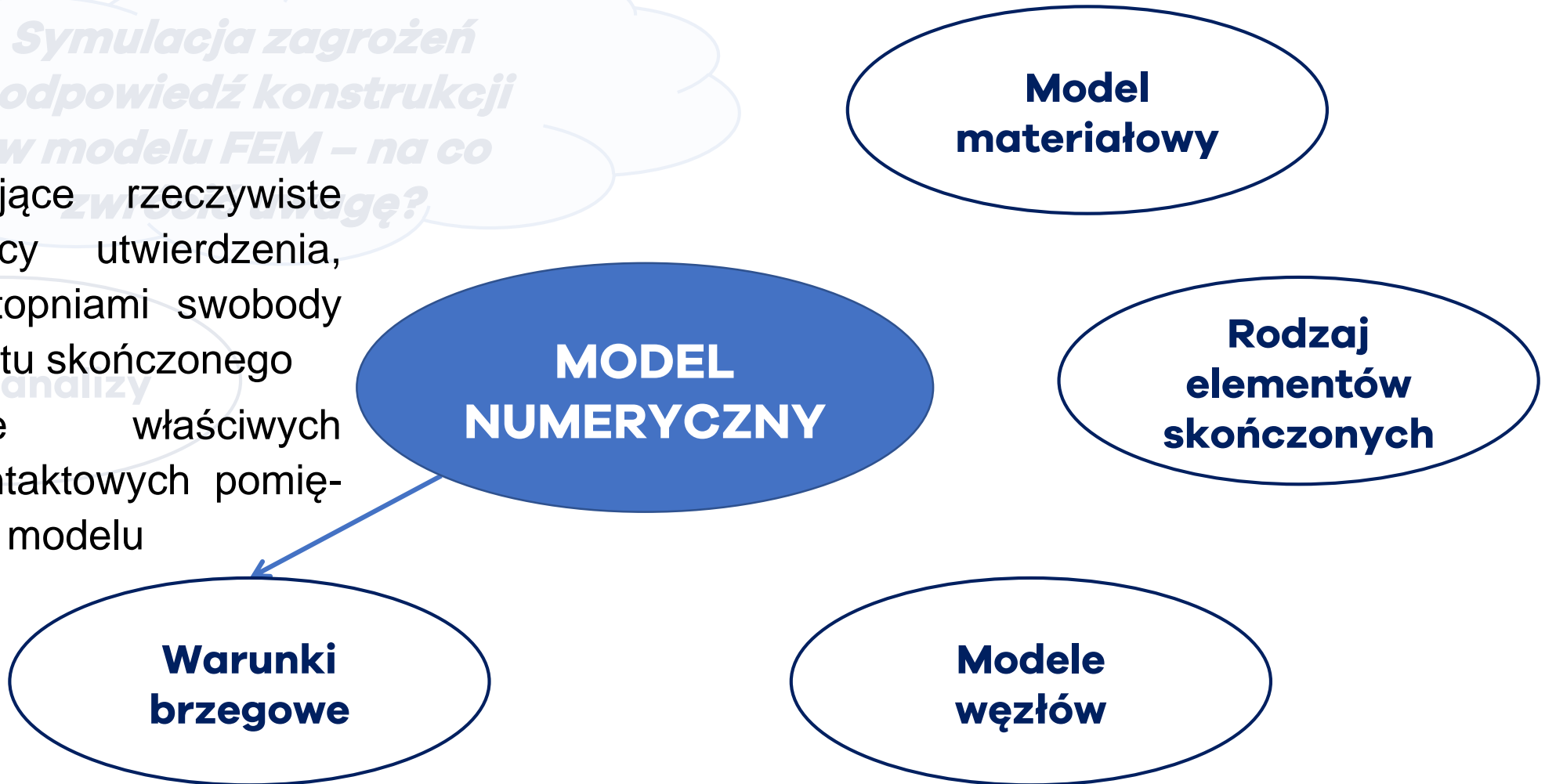
**Modele  
węzłów**



# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - PEŁNE PODEJSCIE NUMERYCZNE

*Symulacja zagrożeń  
i odpowiedź konstrukcji  
w modelu FEM – na co  
zwrócić uwagę?*

- Odzwierciedlające rzeczywiste warunki pracy utwierdzenia, zgodne ze stopniami swobody (DOF) elementu skończonego
- Uwzględnienie właściwych obszarów kontaktowych pomiędzy częściami modelu



# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - PEŁNE PODEJSCIE NUMERYCZNE

- Zalecane jest wykorzystanie bardziej złożonej analizy nieliniowej, która w przeciwieństwie do prostszej analizy liniowej jest w stanie uwzględnić główne źródła nieliniowości typowe dla scenariusza katastrofy postępującej.



# NIEOKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE (SS/NS)

## \* Metoda alternatywnych ścieżek obciążenia ALPM

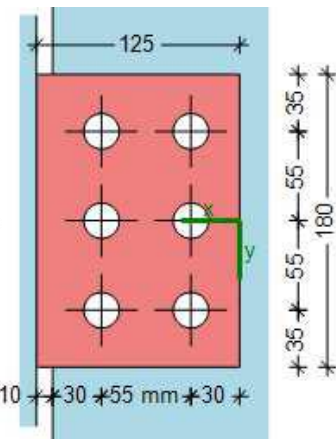
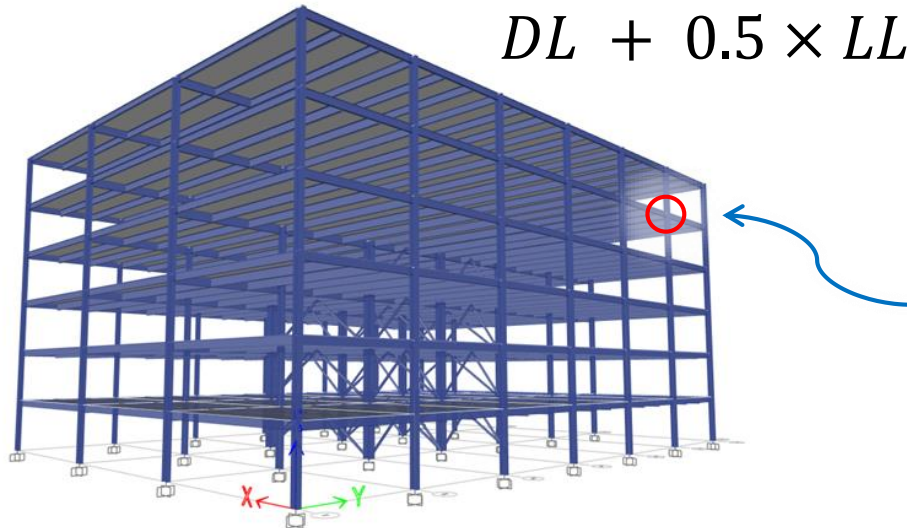
### *Pełne podejście numeryczne*

#### \* ODDZIAŁYWANIA DLA WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

- \* Obciążenia stałe DL
- \* Obciążenia zmienne LL

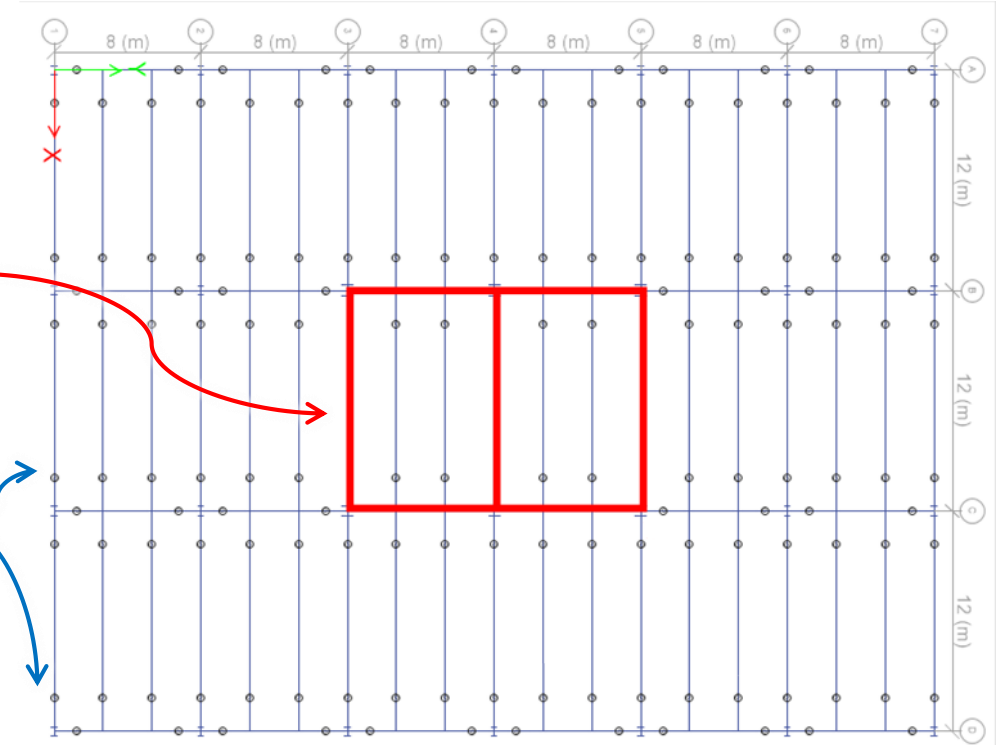
#### \* KOMBINACJA ODDZIAŁYWAŃ DLA WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

$$DL + 0.5 \times LL$$



Wewnętrzny trzon stężący – Rama sztywna

Elementy przegubowe



#### Strefa asejsmiczna (NS):

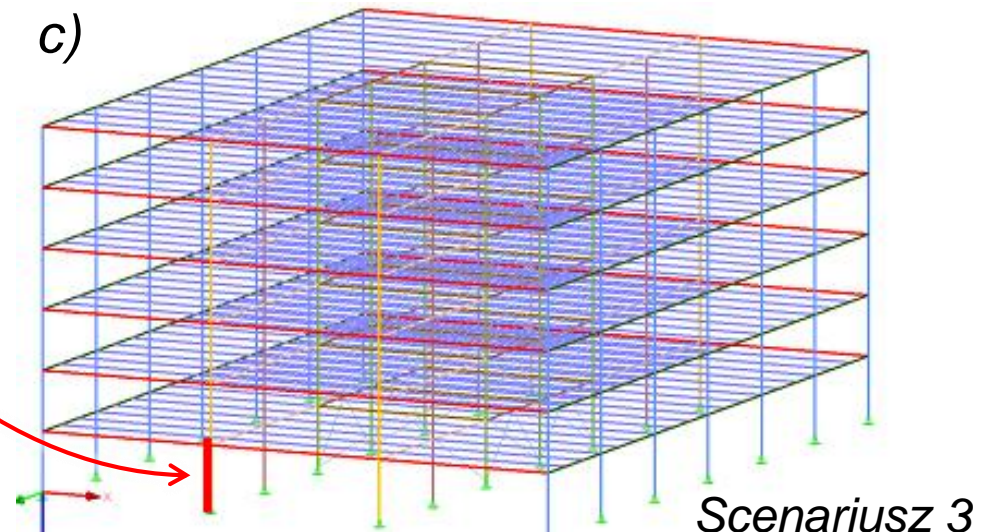
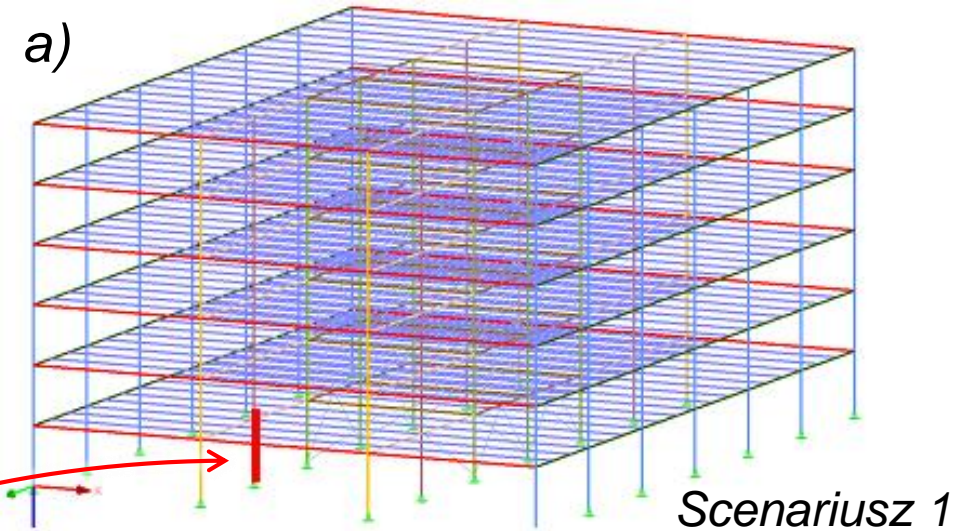
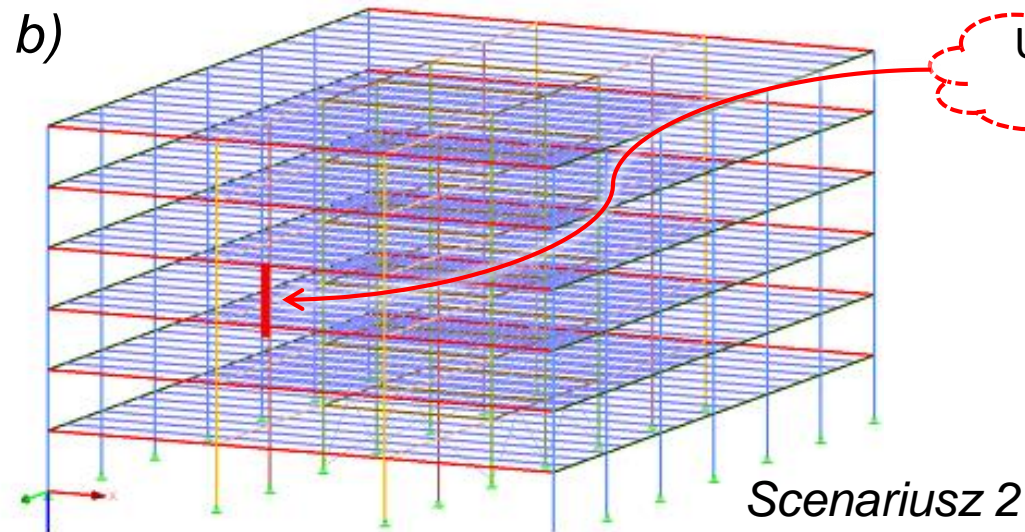
- \* 6 kondygnacji o wysokości 4 m każda
- \* 6 przęseł po 8.0 m w kierunku Y
- \* 3 przęsła po 12.0 m w kierunku X



# OKREŚLENIE SCENARIUSZY USUWANIA SŁUPA

- a) Scenariusz 1: Utrata słupa wewnętrznego na kondygnacji 0;
- b) Scenariusz 2: Utrata słupa elewacji na kondygnacji 0;
- c) Scenariusz 3: Utrata słupa wewnętrznego kondygnacji pośredniej.

Określenie scenariusza, który jest najbardziej istotny przy projektowaniu odporności konstrukcji jest zadaniem projektanta.



Usuwany  
słup

# ANALIZA KONSTRUKCJI

## \* CEL ANALIZY:

- \* Umożliwienie rozwoju efektów membranowych i weryfikacja stężeń (elementów konstrukcyjnych i połączeń) z uwagi na nośność na siły rozciągające.

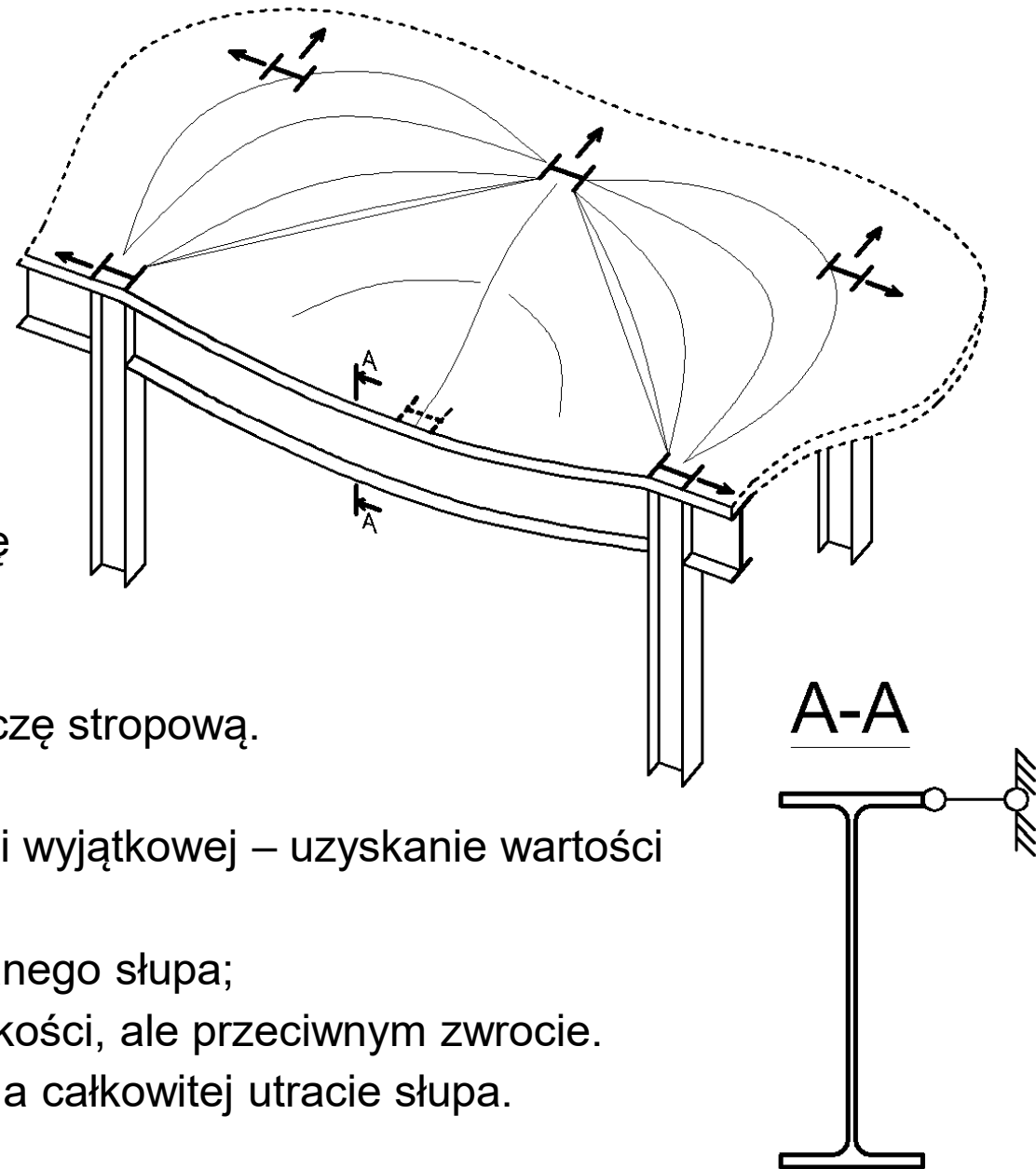
## \* METODOLOGIA I ZAŁOŻENIA:

- \* Analiza FEM z wykorzystaniem algorytmu Newtona-Raphsona, który pozwala na implementację dużych deformacji;
- \* Brak zwichrzenia belek przegubowych z uwagi na podparcie boczne strefy ściskanej przez sztywną tarczę stropową.

## \* MODELOWANIE SCENARIUSZA UTRATY SŁUPA:

- \* Krok 1 – analiza konstrukcji ze słupem dla kombinacji wyjątkowej – uzyskanie wartości siły ściskającej w usuwanym słupie;
- \* Krok 2 – przyłożenie wyliczonej siły w miejscu usuwanego słupa;
- \* Krok 3 – stopniowe przykładanie siły o tej samej wielkości, ale przeciwnym zwrocie.

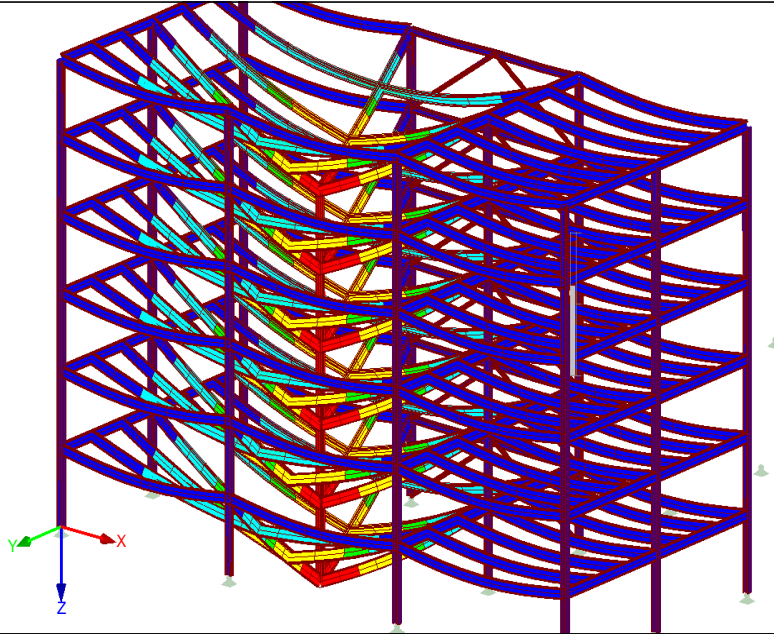
Po ostatnim kroku obciążenia układ statyczny odpowiada całkowitej utracie słupa.



# WYNIKI I WERYFIKACJA

## SCENARIUSZ 1: (SŁUP WEWNĘTRZNY/KONDYGNACJA 0)

CO165: Column loss simulation  
Global Deformations u [mm]  
Increment: 40 - 1.000



Max u: 424.0, Min u: 0.0 [mm]  
Factor of deformations: 15.00

### WERYFIKACJA KONSTRUKCJI

- \* Zwiększenie sił w sąsiadujących słupach nie przekraczające obliczeniowych sił ściskających z ULS.
- \* Nośność rygli rami IPE550 (kierunek X), zaprojektowanych z uwagi na SLS (ugięcia) jest wystarczająca.
- \* Nośność rygli rami IPE600 (kierunek Y) przekroczone o 15% przy działaniu dużych sił rozciągających.

### WYNIKI ANALIZY

Scenariusz	Kształownik	Połączenie	Siła rozciągająca [kN]	Moment zginający [kNm]
1	IPE550	B1/B3	1741	274
	IPE600	C2/C3	4565	536

### WERYFIKACJA ELEMENTÓW

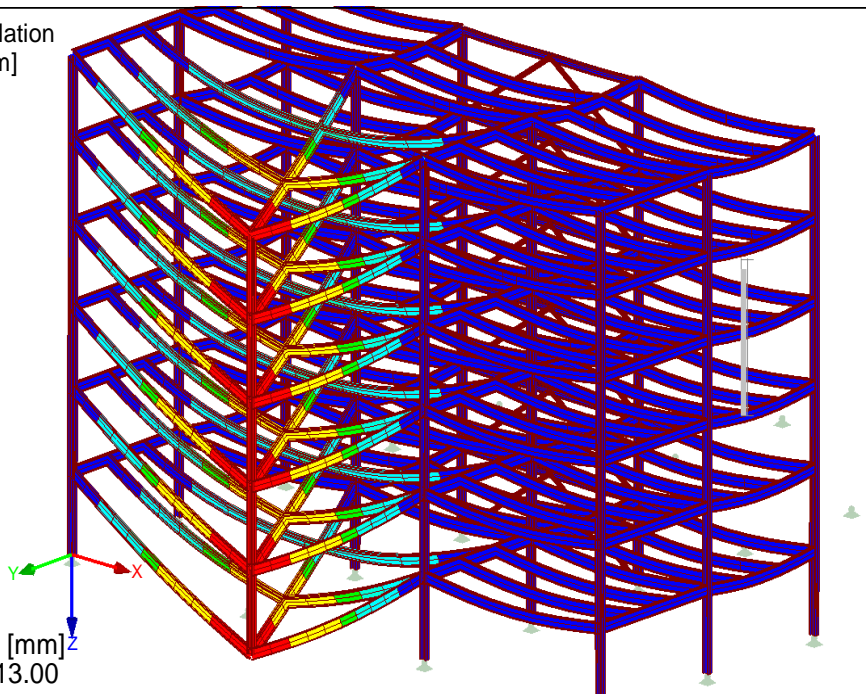
Element	Przekrój	Siły rozciągające/ściskające [kN]	Moment zginający [kNm]	Wykorzystanie nośności UF
Słupy elewacji Y	HEB340	-2910	0	0.66
Słupy elewacji X	HEB360	-3763	0	0.72
Słupy wewnętrzne	HEM300	-4887	0	0.60
Wewnętrzne belki X	IPE550	1736	274	0.58
Wewnętrzne belki Y	IPE600	4562	536	1.15



# WYNIKI I WERYFIKACJA

## SCENARIUSZ 2: (SŁUP ELEWACJI/ KONDYGNACJA 0)

CO165: Column loss simulation  
Global Deformations u [mm]  
Increment: 40 - 1.000



Max u: 486.4, Min u: 0.0 [mm]  
Factor of deformations: 13.00

### WERYFIKACJA KONSTRUKCJI

- \* Wszystkie elementy konstrukcyjne przeszły pozytywnie weryfikację nośności
- \* Weryfikacja nośności nie została spełniona w przypadku połączeń A1s/A2s - **przeprojektować**

### WYNIKI ANALIZY

Scenariusz	Kształownik	Połączenie	Siła rozciągająca [kN]	Moment zginający [kNm]
2	IPE500	A1s/A2	1620	195

### WERYFIKACJA ELEMENTÓW

Element	Przekrój	Siły rozciągające/ściskające [kN]	Moment zginający [kNm]	Wykorzystanie nośności UF
Słupy elewacji Y	HEB340	-2473	15	0.58
Słupy elewacji X	HEB360	-3521	14	0.77
Słupy wewnętrzne	HEM300	-5383	3	0.69
Belki elewacji X	IPE500	1615	195	0.59

### WERYFIKACJA POŁĄCZEŃ

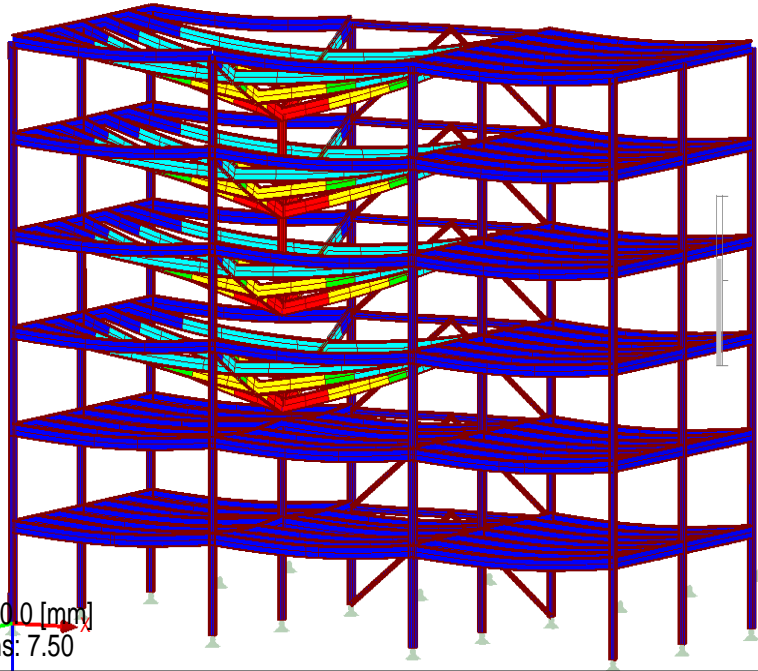
Pozycja s = mocna oś w = słaba oś	Siła rozciągająca [kN]	Model zniszczenia	Wykorzystanie nośności UF
A1s / A2s	1620	Docisk do blachy węzłowej	3.71



# WYNIKI I WERYFIKACJA

## SCENARIUSZ 3: (SŁUP WEWNĘTRZNY/KONDYGNACJA POŚREDNIA)

CO165: Column loss simulation  
Global Deformations u [mm]  
Increment: 40 - 1.000



WYNIKI ANALIZY - PORÓWNANIE				
Scenariusz	Kształownik	Połączenie	Siła rozciągająca [kN]	Moment zginający [kNm]
3	IPE550	B1/B3	1715	275
	IPE600	C2/C3	4493	537
1	IPE550	B1/B3	1741	274
	IPE600	C2/C3	4565	536



### WERYFIKACJA KONSTRUKCJI

- \* Wartości sił rozciągających w stężeniach poziomych są tego samego rzędu co w scenariuszu 1, stąd scenariusz 3 nie będzie rozpatrywany w dalszej części przykładu.

# PRZEPROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI: SCENARIUSZ 1

## WERYFIKACJA ELEMENTÓW I POŁĄCZEŃ

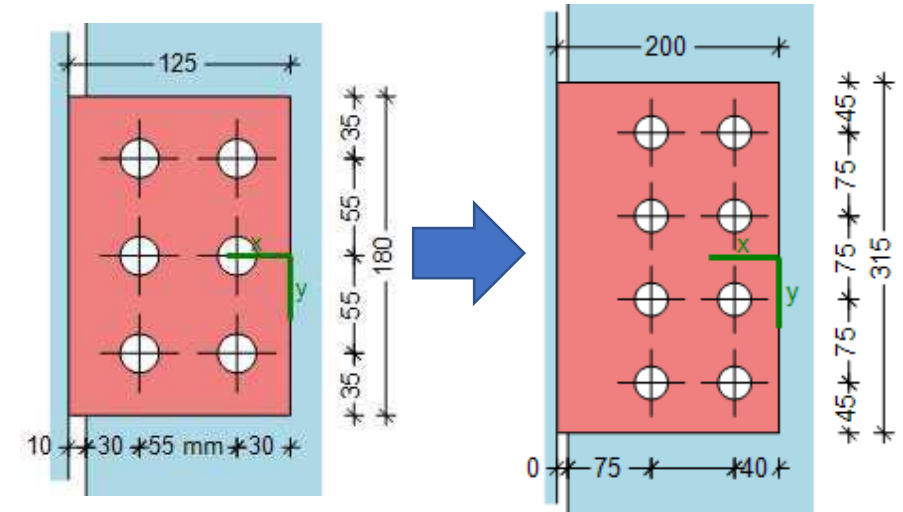
- \* Zmiana przekroju rygli na kierunku Y na IPE750x137. Rozkład sił wewnętrznych ulegnie zmianie.

Element	Przekrój	Siły rozciągające /ściskające [kN]	Moment zginający [kNm]	Wykorzystanie nośności UF
Słupy elewacji Y	HEB340	-2862	0	0.66
Słupy elewacji X	HEB360	-3827	0	0.82
Słupy wewnętrzne	HEM300	-4941	0	0.61
Wewnętrzne belki X	IPE550	1658	276	0.56
Wewnętrzne belki Y	IPE750x137	4850	565	1.03

Położenie s = mocna oś w = słaba oś	Siła rozciągająca [kN]	Model zniszczenia	Wykorzystanie nośności UF
B1 / B3	1662	Docisk do blachy węzłowej	3.80
C2w	4852	Zginanie środka słupa	11.20
C3w	4852	Zniszczenie przekroju netto blachy węzłowej przy rozciąganiu	6.17

## PRZEPROJEKTOWANIE POŁĄCZEŃ (B1/B3)

- \* Dodatkowy rząd śrub;
- \* Zmiana średnicy z M24 na M27;
- \* Dodatkowa blacha przyspawana do środka belki;
- \* Grubsza spoina (a=15mm) i blacha węzłowa (t=25mm).



Położenie s = silna oś w = słaba oś	Siła rozciągająca [kN]	Model zniszczenia	Wykorzystanie nośności UF
B1 / B3	1662	Ścinanie śrub	1.00
C2w / C3w	4852	Niewykonalne	

# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA

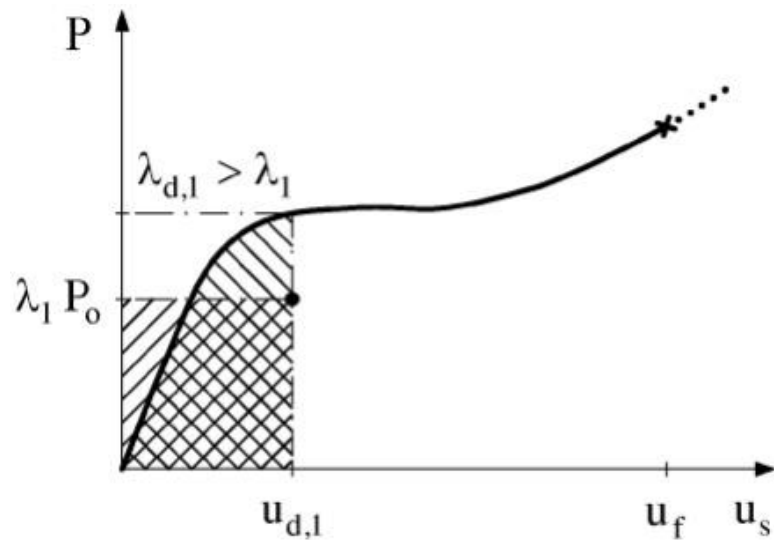
## - WYZNACZANIE ODPOWIEDZI DYNAMICZNEJ NA PODSTAWIE ODPOWIEDZI STATYCZNEJ

Maksymalną odpowiedź dynamiczną można wyznaczyć za pomocą podejścia uproszczonego, uwzględniając nieliniową odpowiedź statyczną.

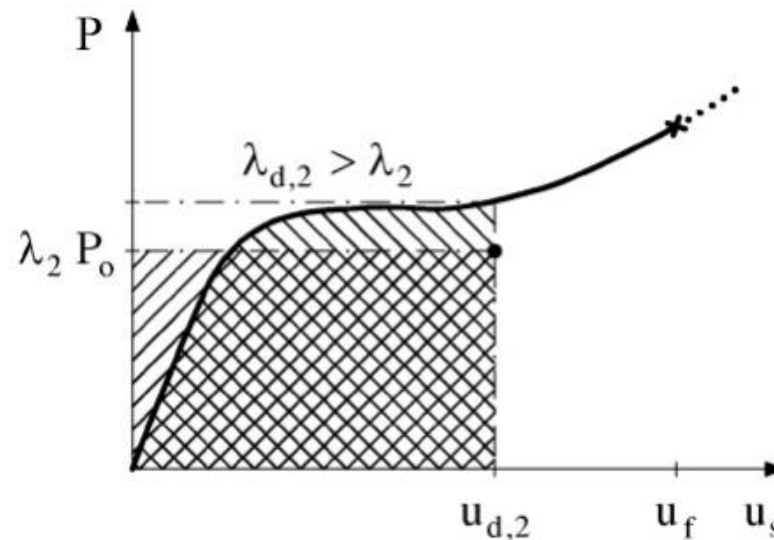
■ **NAGŁA UTRATA SŁUPA** odwzorowana jest jako nagłe przyłożenie obciążenia grawitacyjnego w strefie bezpośredniego wpływu (DAP).



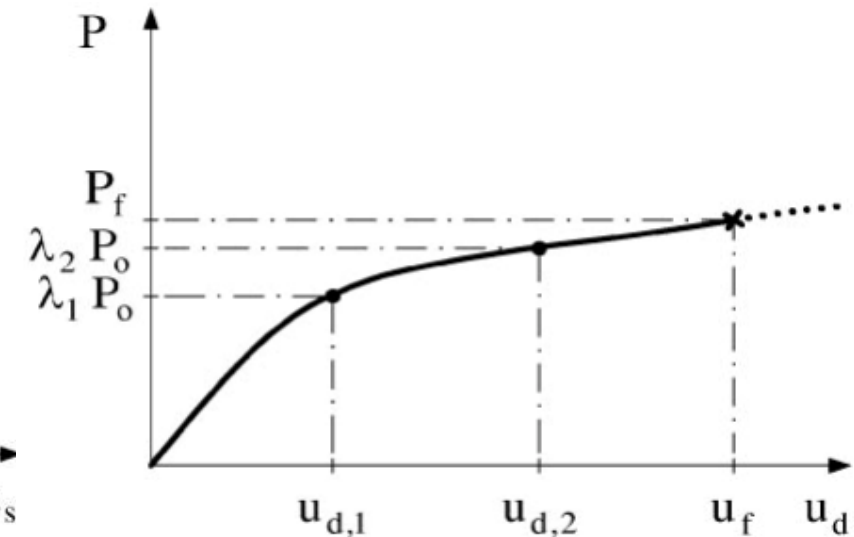
# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA - WYZNACZANIE ODPOWIEDZI DYNAMICZNEJ NA PODSTAWIE ODPOWIEDZI STATYCZNEJ



(a) Dynamic response ( $P = \lambda_1 P_0$ )



(b) Dynamic response ( $P = \lambda_2 P_0$ )



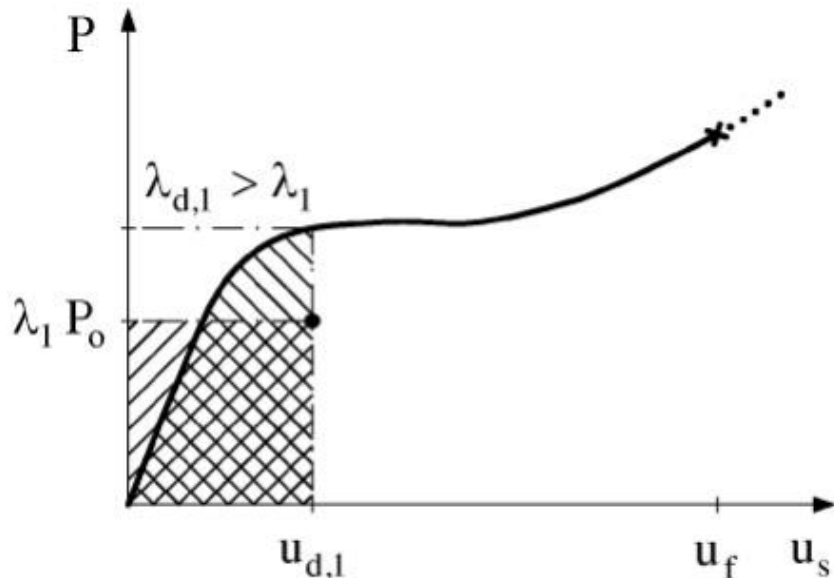
(c) Pseudo-static response

■ Odpowiedź "pseudo-statyczną" można uzyskać poprzez narysowanie zależności przyłożonego obciążenia grawitacyjnego ( $P_n$ ) względem maksymalnego przemieszczenia dynamicznego ( $u_{d,n}$ ) dla różnych poziomów obciążenia ( $\lambda_n$ ).

# METODA ALTERNATYWNYCH ŚCIEŻEK OBCIĄŻENIA

## - WYZNACZANIE ODPOWIEDZI DYNAMICZNEJ NA PODSTAWIE ODPOWIEDZI STATYCZNEJ

- Maksymalne dynamiczne przemieszczenie związane z nagłym przyłożeniem obciążenia grawitacyjnego  $\lambda P_0$  można określić na podstawie bilansu energetycznego pomiędzy pracą wykonaną przez obciążenie a zabsorbowaną energią wewnętrzną.
- Dla przypadku o jednym stopniu swobody równowagę pomiędzy pracą zewnętrzną ( $W_n$ ) i energią wewnętrzną ( $U_n$ ) można uzyskać poprzez zrównanie zakreskowanych obszarów na rysunku.



$$W_n = \alpha \lambda_n P_0 u_{d,n} \quad U_n = \int_0^{u_{d,n}} \alpha P du_s \quad W_n = U_n$$

$$P_n = \lambda_n P_0 = \frac{1}{u_{d,n}} \int_0^{u_{d,n}} P du_s \quad *$$

\*całka reprezentuje obszar pod nieliniową krzywą statyczną ( $P, u_s$ ) do  $u_{d,n}$



# NIEOKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE (SS/S)

## \* Metoda alternatywnych ścieżek obciążenia ALPM

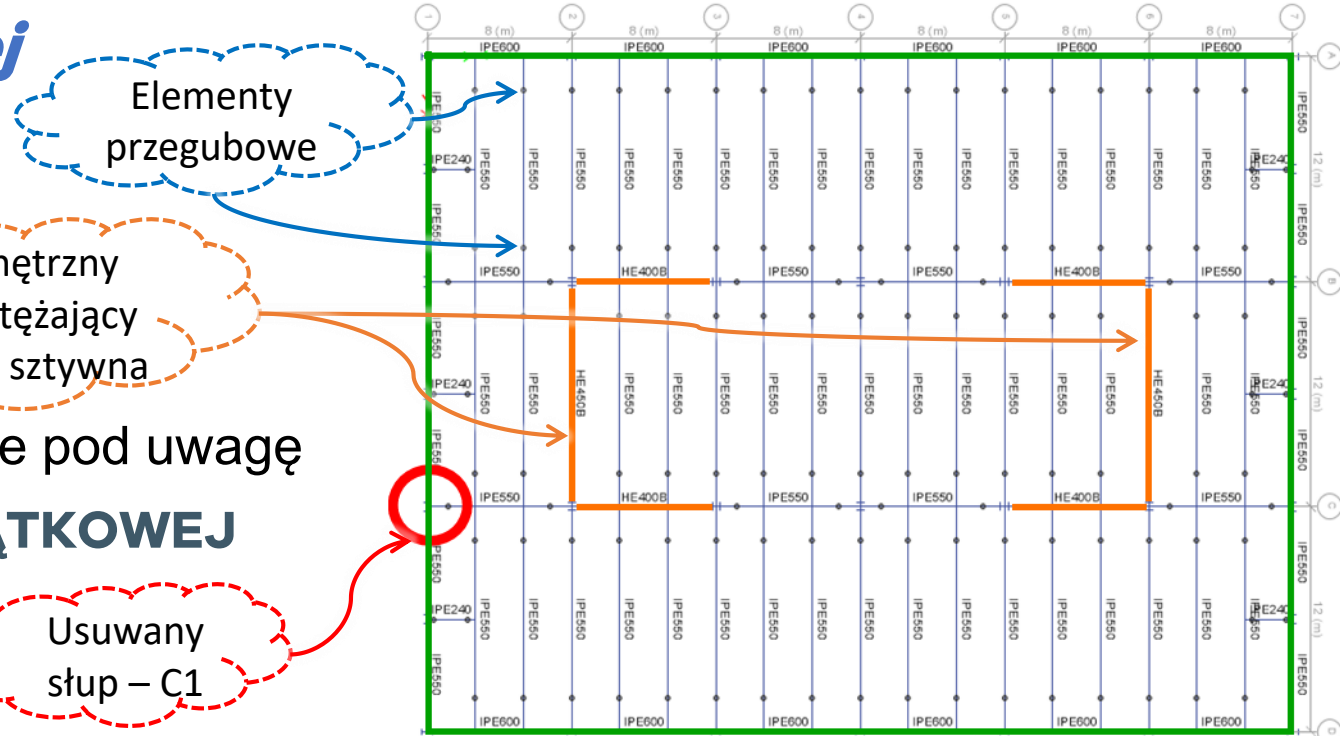
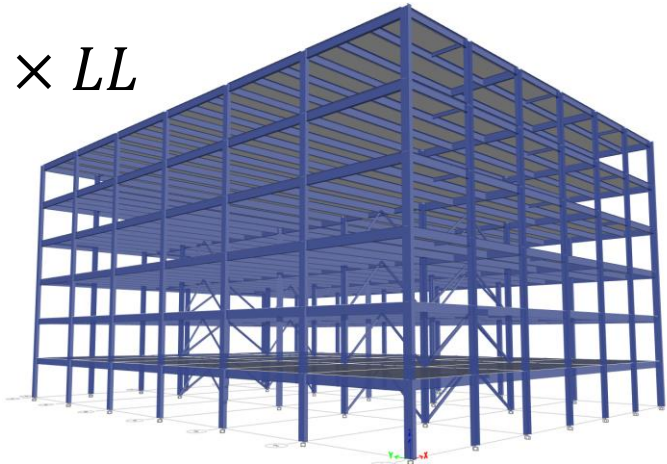
*Uproszczona prognoza dynamicznej odpowiedzi konstrukcji*

### \* ODDZIAŁYWANIA DLA WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

- \* Obciążenia stałe DL
- \* Obciążenia zmienne LL
- \* Oddziaływania wyjątkowe nie zostały wzięte pod uwagę

### \* KOMBINACJA ODDZIAŁYWAŃ DLA WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

$$DL + 0.5 \times LL$$



### Strefa sejsmiczna (S):

- \* 6 kondygnacji o wysokości 4 m każda
- \* 6 przęseł po 8.0 m w kierunku Y
- \* 3 przęsła po 12.0 m w kierunku X – ramy wewnętrzne
- \* 6 przęseł po 6.0 m w kierunku X – ramy zewnętrzne

# ANALIZA KONSTRUKCJI

## \* CEL ANALIZY

Ustalenie maksymalnej wymaganej ciągłości oraz weryfikacja stosunku tej wielkości względem nośności przez zastosowanie uproszczonej metody numerycznej.

## \* ZAŁOŻENIA ANALIZY

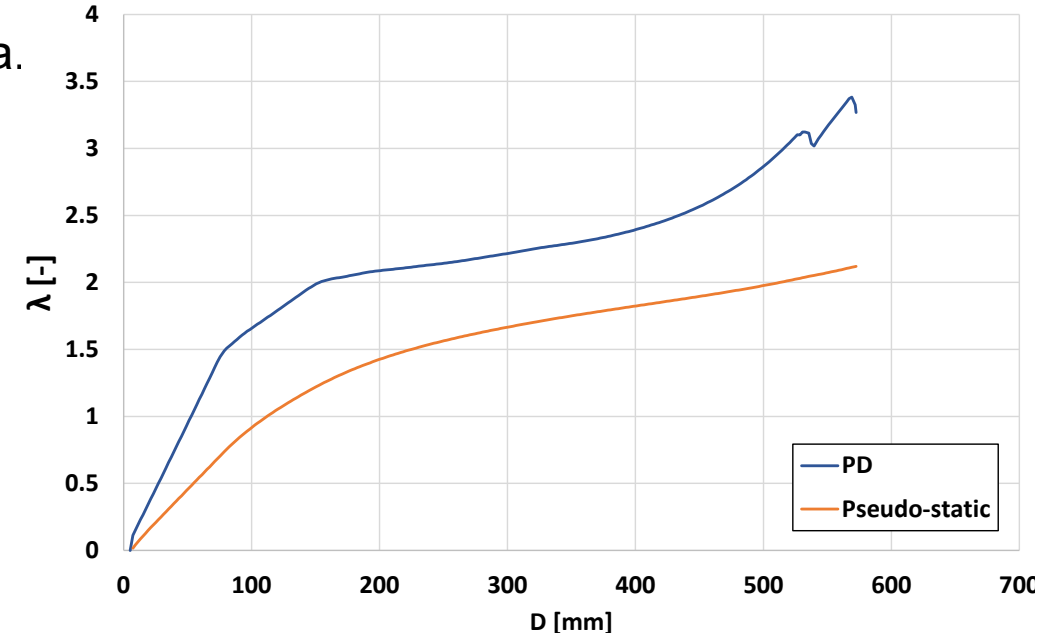
- \* Nieliniowa analiza statyczna w programie SAP2000
- \* Obciążenie przyłożone bezpośrednio obok słupa – w pierwszych dwóch przęsłach ramy skrajnej na kierunku X oraz pierwszym przęśle ramy przyskrajnej na kierunku Y.
- \* Przemieszczenie słupa zadawane do osiągnięcia zniszczenia.
- \* Nieliniowość geometryczna i materiałowa (przeguby plastyczne).

## \* WYNIKI

Na wykresie wykreślono porównawcze krzywe zależności mnożnika obciążenia grawitacyjnego  $\lambda$  ( $\lambda=1$  dla przyłożonego obciążenia 1,0 DL + 0,5 LL) względem przemieszczenia. Na podstawie analizy uzyskano krzywą „push-down” (niebieska). Po wykonaniu bilansu energetycznego (Izzuddin i in., 2008), wyznaczono krzywą pseudo-statyczną (pomarańczowa).

Obszar obciążenia

Usuwany słupek – C1





# METODA PODZIAŁU NA SEGMENTY

## Wprowadzenie

- Metoda podziału na segmenty polega na odizolowaniu części konstrukcji ulegającej zniszczeniu od pozostałej konstrukcji za pomocą granic segmentów. Dzięki temu możliwe jest zapobiegnięcie lub ograniczenie rozprzestrzeniania się zniszczenia w całej konstrukcji.
- Każda wydzielona część (przedział lub segment) jest w stanie ulec niezależnemu zniszczeniu, bez wpływu na bezpieczeństwo pozostałych części.
- Strategie podziału na segmenty mogą być oparte na słabych granicach segmentów lub mocnych granicach segmentów
- Metoda ta jest zalecana, gdy zakłada się, że początkowy rozmiar zniszczenia jest duży
- Podział na segmenty może być stosowany razem z metodami ALP, które mogą być wykorzystywane w ramach poszczególnych segmentów.

# METODA PODZIAŁU NA SEGMENTY

## PORÓWNANIE METOD SŁABYCH/MOCNYCH GRANIC SEGMENTÓW

### SŁABE GRANICE SEGMENTÓW



- \* uszkodzenie określonego segmentu bez progresji uszkodzenia na inne sąsiednie segmenty poprzez wyeliminowanie ciągłości pomiędzy sąsiadującymi segmentami lub zmniejszenie sztywności w celu uwzględnienia dużych deformacji i przemieszczeń na granicach segmentów;
- \* metoda korzystna w przypadku, gdy metoda ALPM jest niepraktyczna lub zbyt kosztowna.

### MOCNE GRANICE SEGMENTÓW



- \* zapobieganie postępowi katastrofy konstrukcji przy zapewnieniu wysokiej nośności miejscowej, zdolnej do przejęcia stosunkowo dużych sił;
- \* zapewnienie alternatywnej ścieżki obciążenia, przez co odporność na lokalne uszkodzenia jest osiągana przy małych deformacjach;
- \* metoda korzystna w przypadku konstrukcji pionowych (np. budynki wielokondygnacyjne).

# NIEOKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE (SS/NS)

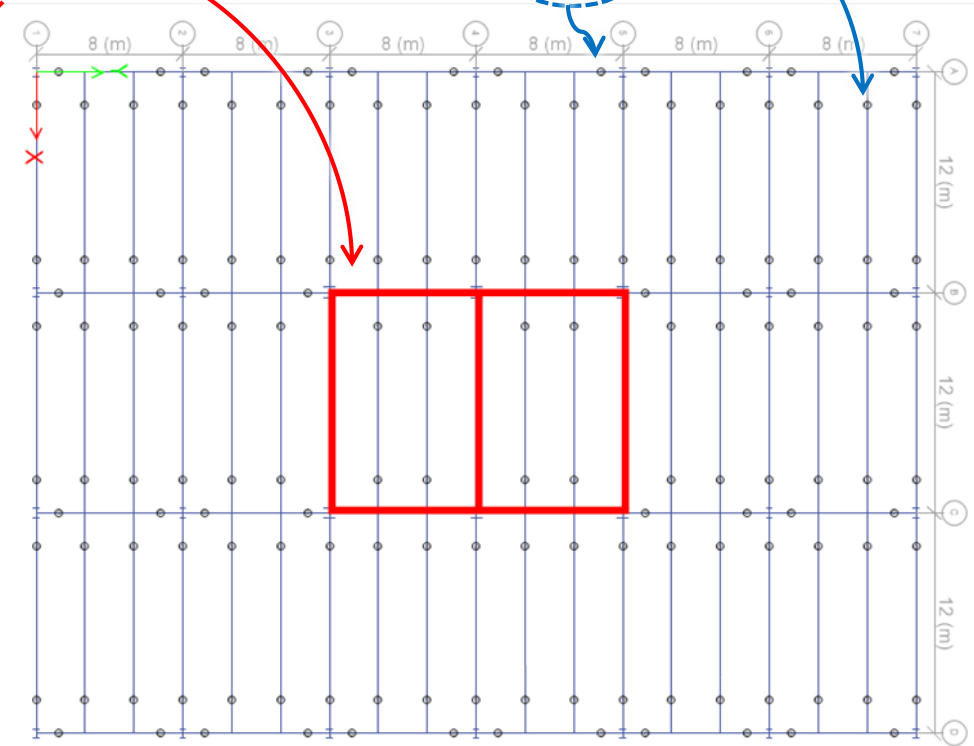
## \* Podział na segmenty

### *Słabe granice segmentów / Mocne granice segmentów*

- \* W przypadku analizowanego budynku niskiego (SS/NS) można wykorzystać strategię **słabej granicy segmentów**. Wyniki uzyskane na drodze podejścia analitycznego i numerycznego ALPM potwierdziły, że połączenia przegubowe z przykładką średnika belki zaprojektowane w ULS nie są w stanie przenieść dużych sił rozciągających wywołanych efektem membranowym w przypadku utraty słupa.
- \* W praktyce tego typu węzły działają jak „bezpieczniki” w sytuacji usunięcia słupa, a zawalenie się konstrukcji jest ograniczone do obszaru w bezpośrednim sąsiedztwie usuwanego słupa (poziome ograniczenie zniszczenia). Jeśli węzły wykazują się dostateczną ciągłością, ich zniszczenie będzie poprzedzone dużymi przemieszczeniami, co zabezpieczy konstrukcję przed nagłym, kruchym zniszczeniem.

Wewnętrzny  
trzon stężający  
– Rama sztywna

Elementy  
przegubowe



### **Strefa asejsmiczna (NS):**

- \* 6 kondygnacji o wysokości 4 m każda
- \* 6 przęseł po 8.0 m w kierunku Y
- \* 3 przęsła po 12.0 m w kierunku X

Rzeszów

19.05.2022

**DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ.**

*Rafał Budziński*

[r.budzinski@prz.edu.pl](mailto:r.budzinski@prz.edu.pl)



[steelconstruct.com/eu-projects/failnomore](https://steelconstruct.com/eu-projects/failnomore)



Research Fund for Coal & Steel

**FAIL** **NO**  
**MORE**

*Rzeszów*

**19.05.2022**

# NIEOKREŚLONE ZAGROŻENIA

## **METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO**

**Dr inż. Joanna Zięba**

**Dr inż. Wiesław Kubiszyn**

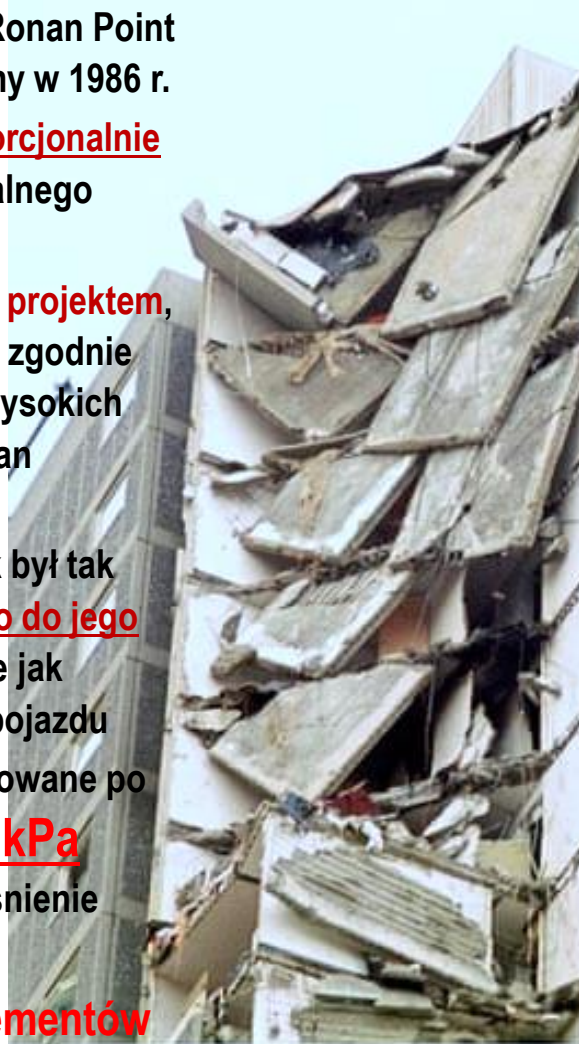
## **FAILNOMORE**

Mitigation of the risk of progressive collapse  
in steel and composite building frames  
under exceptional events



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO – GENEZA

- **Doświadczenia z analizy** katastrofy 23-piętrowego wieżowca Ronan Point w Londynie, maj 1968 r. (2 miesiące po wybudowaniu)/zburzony w 1986 r.
- Wybuch gazu na 5 kondygnacji od góry spowodował **nieproporcjonalnie duże** (do przyczyny) uszkodzenie narożnika budynku mieszkalnego wykonanego z prefabrykatów betonowych
- Spektakularny charakter awarii (spowodowanej zarówno **złym projektem**, jak i **wadliwym wykonawstwem** – niezrealizowanie konstrukcji zgodnie z projektem) doprowadził do utraty zaufania publicznego do wysokich budynków mieszkalnych, co doprowadziło do poważnych zmian w przepisach budowlanych w Wielkiej Brytanii
- Wprowadzone zmiany w przepisach, wymagają, żeby budynek był tak skonstruowany, aby w razie wypadku (np. eksplozji) **nie doszło do jego zniszczenia w stopniu nieproporcjonalnym do przyczyny**, takie jak ponadnormatywne ciśnienie wiatru, eksplozje lub uderzenie pojazdu
- Wszystkie nowe budynki o ponad pięciu kondygnacjach zbudowane po listopadzie 1968 r. musiały wytrzymać ciśnienie eksplozji **34 kPa** (4,9 psi) Istniejące budynki (bez gazu) powinny wytrzymać ciśnienie wybuchu 17 kPa ( 2,5 psi) ↓
- Obciążenie **34 kN/m<sup>2</sup>** wykorzystywane w projektowaniu **elementów kluczowych**, o zwiększonej nośności, niż wynika to z normowych zaleceń projektowych!



**Narożnik budynku runął jak „domek z kart”**

# WPROWADZENIE – strategie odporności dla obliczeniowych sytuacji wyjątkowych [PN-EN 1991-1-7]



## Element kluczowy

Element konstrukcyjny, od którego zależy stateczność reszty konstrukcji

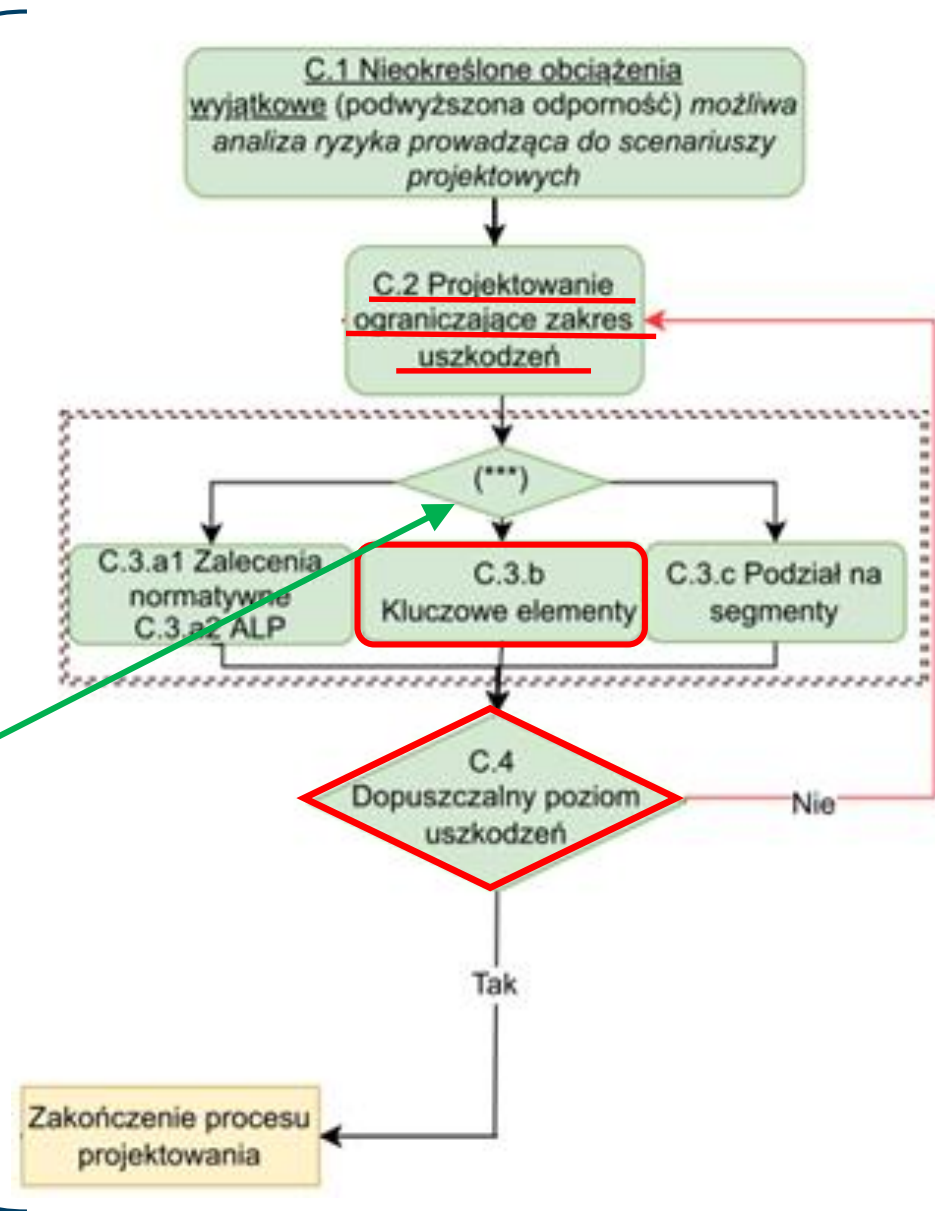
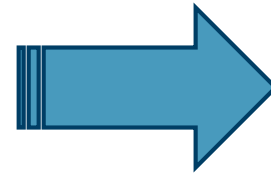


# WPROWADZENIE – strategie projektowania

## Schemat blokowy odzwierciedlający proces projektowania z uwagi na odporność



Procedura w przypadku nieokreślonych zagrożeń



**Strategie projektowania z uwagi na odporność nie wykluczają się wzajemnie i mogą być stosowane pojedynczo lub w połączeniu**

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## ZAŁOŻENIA:

- Metoda elementu kluczowego strategia projektowania jako **alternatywa** w odniesieniu do innych metod, m.in. metody alternatywnych ścieżek obciążenia
- Opiera się ona na zaprojektowaniu kluczowego elementu konstrukcyjnego, tj. elementu konstrukcyjnego lub fragmentu konstrukcji, którego **zniszczenie skutkuje utratą stateczności/nośności** lub naruszeniem funkcji użytkowej obiektu
- Projektowanie elementu kluczowego jest realizowane przy założeniu **zdefiniowanego poziomego obciążenia, działającego w dowolnym kierunku**
- Nie ma konieczności zapewnienia **zdolności do redystrybucji obciążenia**
- Elementy kluczowe muszą być zaprojektowane tak, aby uzyskać pełną nośność bez uszkodzenia samego elementu lub jego połączeń, często jest **wymagana nośność większa, niż wynika to z normowych zaleceń projektowych!**, np. w trwałej sytuacji obliczeniowej
- Takie podejście jest często jedynym **racjonalnym podejściem** podczas projektowania **modernizacji** istniejących budynków

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## ZASTOSOWANIE I PRZYKŁADY:

- **Metoda elementu kluczowego** jest często przyjmowana w przypadku konstrukcji o ograniczonym poziomie statycznej niewyznaczalności, takich jak konstrukcje ciągnowe, dwu- i trójwymiarowe systemy kratownicowe, konstrukcje podwieszane i wiszące
- **Elementy kluczowe** mogą być również stosowane jako dodatkowe podejście jednocześnie z innymi metodami projektowania odporności budynków o podwyższonym poziomie ryzyka – CC2b.
- W zależności od rodzaju obiektu, **elementami kluczowymi** mogą być słupy, podciągi, ściany nośne budynku, ściany usztywniające z połączonymi z nimi innymi prostopadłymi ścianami, połączenia (węzły) pomiędzy ścianami, podpory mostów w układach belek ciągłych lub kable/cięgna w konstrukcjach wiszących oraz podwieszanych

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## ETAPY PROJEKTOWANIA:

- Identyfikacja **elementu kluczowego**
- Zaprojektowanie **elementów kluczowych** w taki sposób, aby były odporne na wyjątkowe oddziaływanie obliczeniowe  $A_d$  przyłożone odrębnie w kierunku poziomym i pionowym. Zgodnie z PN-EN 1991-1-7 zalecana wartość  $A_d = \underline{34 \text{ kN/m}^2}$
- W uzasadnionych przypadkach można jednak uwzględnić **inne wartości przedmiotowego oddziaływania wyjątkowego**, w przypadku połączenia z elementem kluczowym elementów płytowych – ścian lub płyt stropowych
- Uwzględnienie wypadkowego (kombinacyjnego) **oddziaływania obliczeniowego** przyłożonego **do elementu kluczowego** i każdego połączonego z nim elementu konstrukcyjnego

W procesie projektowania **kluczowych elementów** i dołączonych do nich elementów oraz ich połączeń powinna być stosowana **kombinacja obciążeń wyjątkowych** według EC-0, tj. PN-EN 1990

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## KOMBINACJE ODDZIAŁYWAŃ w przypadku WYJĄTKOWYCH SYTUACJI OBL.

- **Element kluczowy** i dołączone do niego elementy konstrukcyjne oraz połączenia muszą być zaprojektowane **w wyjątkowej sytuacji** projektowej/obliczeniowej. Kombinacja oddziaływań dla elementów kluczowych i dołączonych elementów powinna być wyrażona jako:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

$G_{k,j}$  - charakterystyczne obciążenie stałe

$A_d$  - obciążenie wyjątkowe, wartość  $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$

$Q_{k,1}$  - charakterystyczne dominujące obciążenie zmienne

$Q_{k,i}$  - charakterystyczne towarzyszące obciążenie zmienne

$\psi_{1,1}$  - współczynnik dla częstej wartości obciążenia zmiennego

$\psi_{2,i}$  - współczynnik dla quasi – stałej wartości obciążenia zmiennego

Tablica A 1.1 – Zalecane wartości współczynników  $\psi$  dla budynków

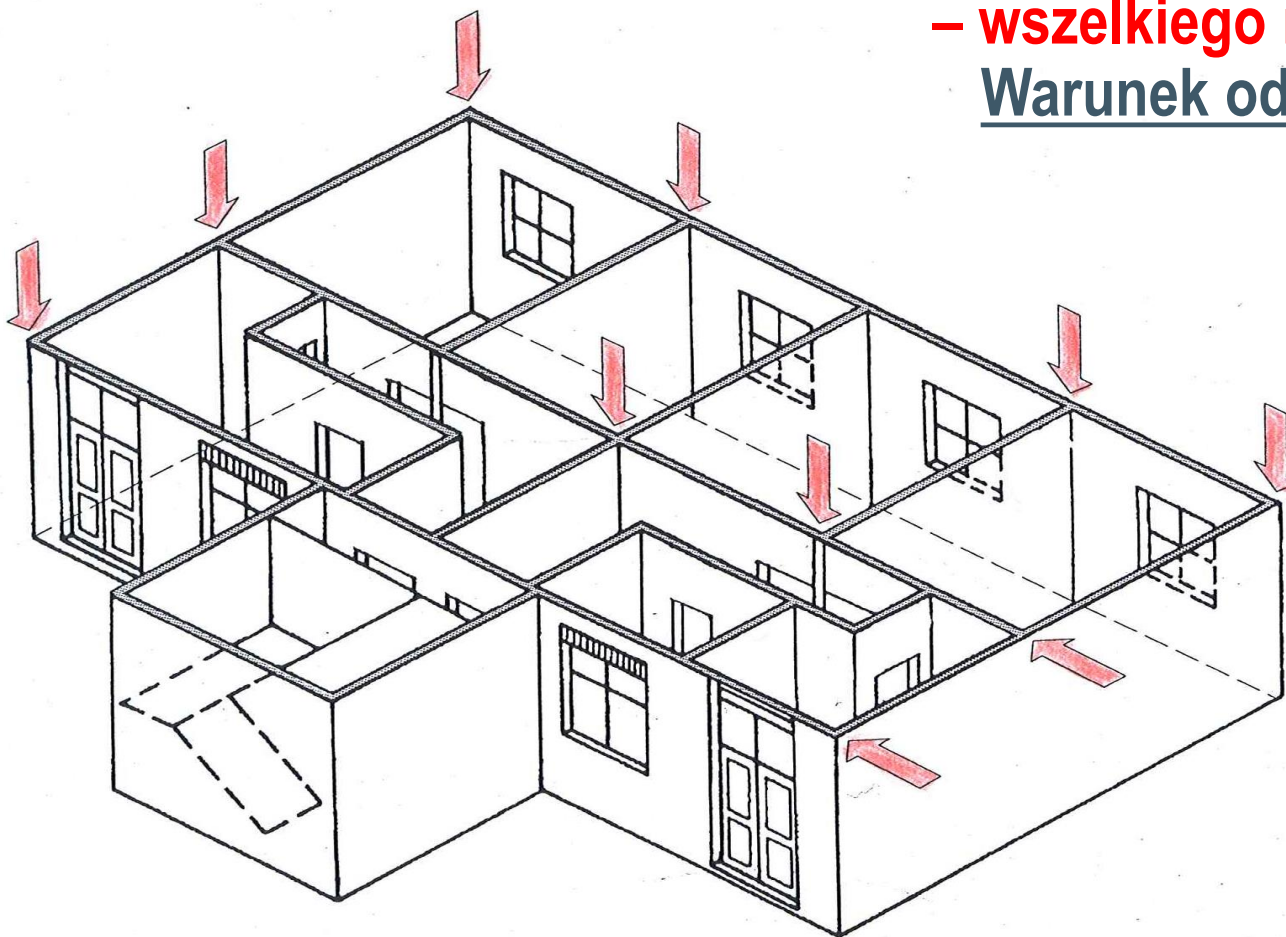
Oddziaływania	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Obciążenie zmienne w budynkach, kategoria (patrz EN 1991-1-1)			
Kategoria A: powierzchnie mieszkalne	0,7	0,5	0,3
Kategoria B: powierzchnie biurowe	0,7	0,5	0,3
Kategoria C: miejsca zebrań	0,7	0,7	0,6
Kategoria D: powierzchnie handlowe	0,7	0,7	0,6
Kategoria E: powierzchnie magazynowe	1,0	0,9	0,8
Kategoria F: powierzchnie ruchu pojazdów pojazdy $\leq 30 \text{ kN}$	0,7	0,7	0,6
Kategoria G: powierzchnie ruchu pojazdów $30 \text{ kN} < \text{ciężar pojazdu} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Kategoria H: dachy	0	0	0,0



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## USTRÓJ ŚCIANOWY BETONOWY/ŻELBETOWY

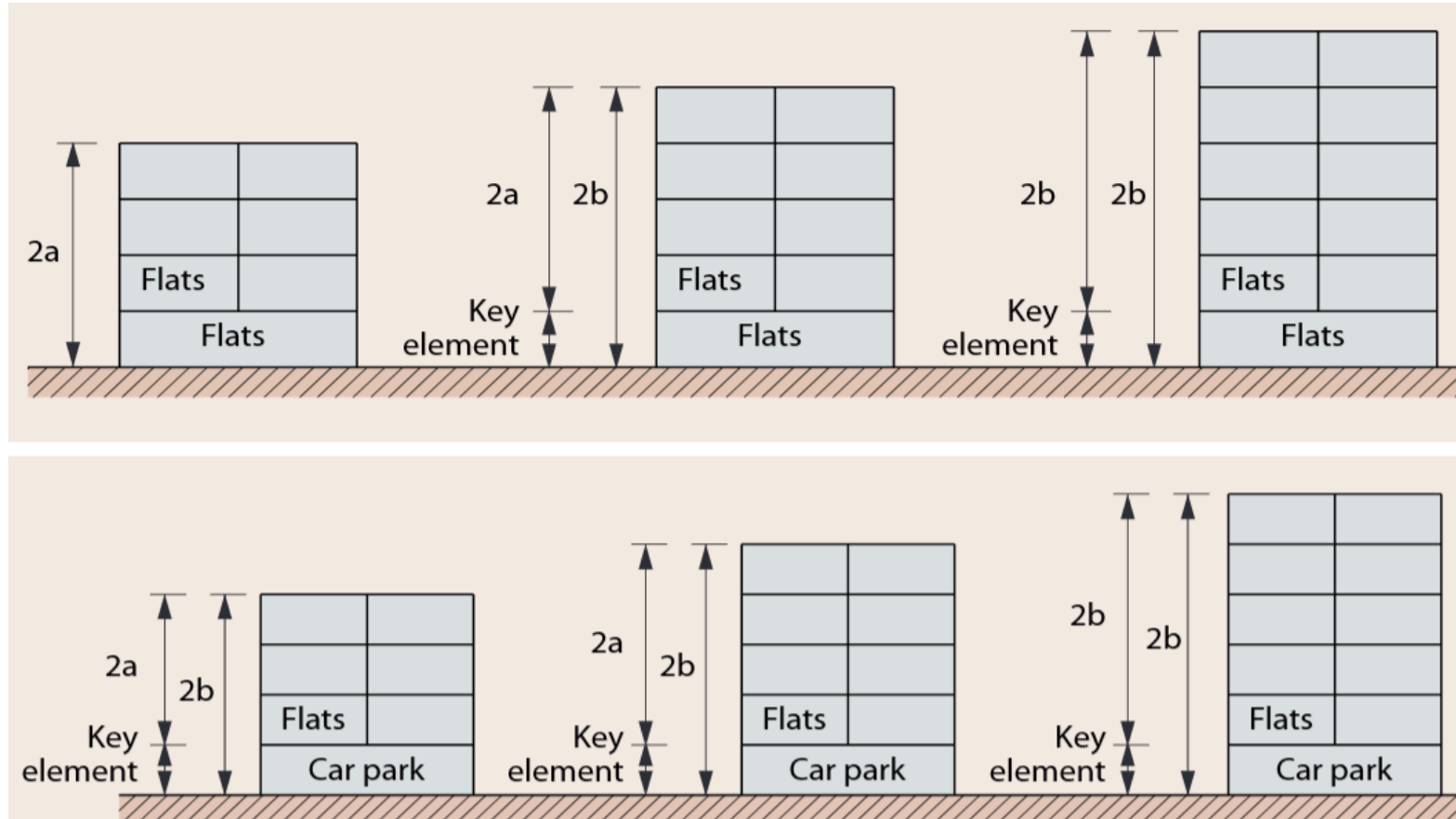
strzałki wskazują przykładowe strefy mogące pełnić funkcje elementów kluczowych – **wszelkiego rodzaju narożniki i skrzyżowania ścian.**  
Warunek odpowiednie wzajemne połączenie ścian!



Prawidłowe wykonawstwo **węzłów** – **wzajemnych połączeń ścian** gwarantuje **dużą odporność** na obciążenia wyjątkowe, ale **nie wyklucza** to przypadku wyrwania pojedynczego narożnego elementu w trakcie oddziaływania wyjątkowego, np. wybuchu

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## KLASA KONSEKWENCJI – określanie liczby kondygnacji



### POMINIĘCIE PARTERU

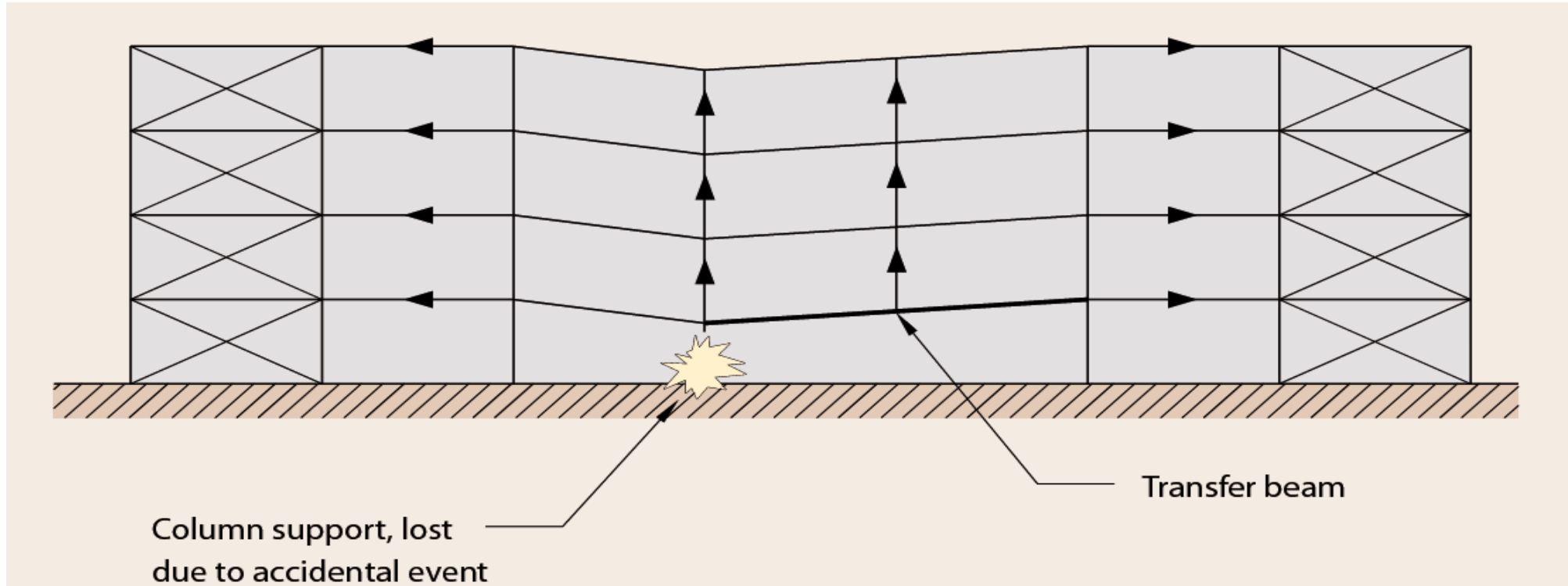
wszystkie elementy konstrukcyjne kondygnacji parteru oraz ich połączenia są zaprojektowane jako ELEMENTY KLUCZOWE

- **CC2a** – 2 klasa konsekwencji, grupa **niższego ryzyka** (bud. mieszk. max. 4k)
- **CC2b** – 2 klasa konsekwencji, grupa **wyższego ryzyka** (bud. mieszk. > 4 k)



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## BELKI TRANSFEROWE – projektowane jako elementy kluczowe



BELKI TRANSFEROWE mogą być projektowane jako elementy kluczowe zamiast stosowania metody „zabezpieczenia ciągnowego” lub metody „umownego usunięcia elementu podpierającego”

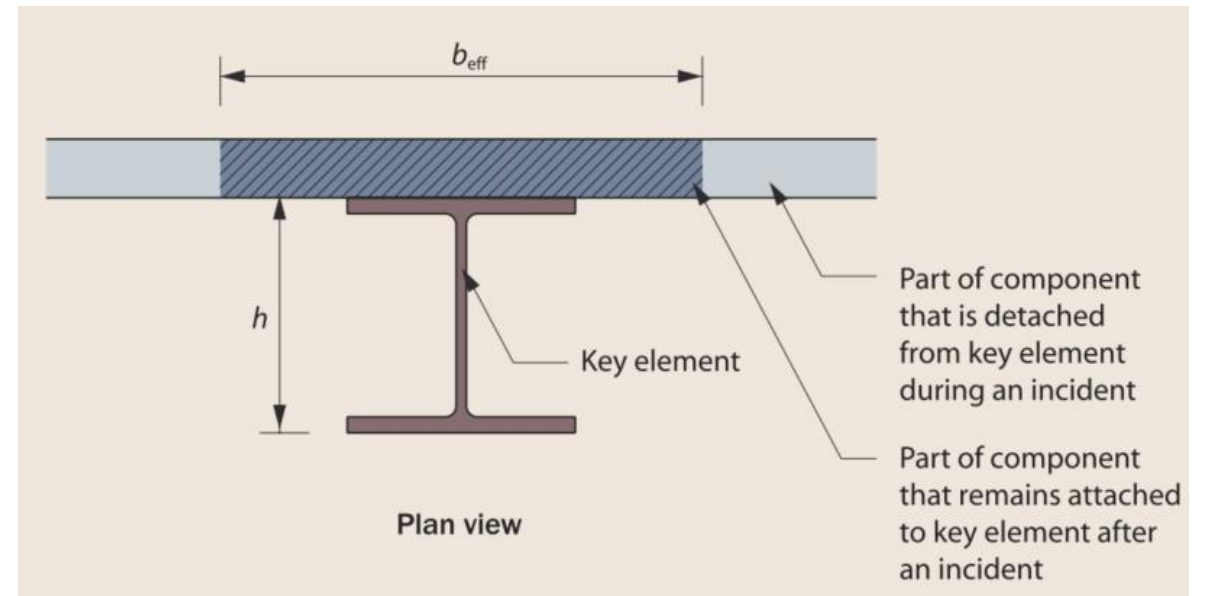
Oprócz zaprojektowania belki transferowej jako elementu kluczowego, słupy podpierające belkę transferową powinny być również zaprojektowane jako elementy kluczowe

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## ELEMENTY POŁĄCZONE Z **ELEMENTEM KLUCZOWYM**

■ W przypadku konstrukcji szkieletowych ściany i okładziny nie są zwykle elementami nośnymi. Dlatego jest prawdopodobne, że większość z nich zostanie odłączona od kluczowego elementu podczas awarii. W przypadku elementu kluczowego w postaci słupa należy przyłożyć obciążenie wyjątkowe o wartości  $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$  na szerokości  $b_{\text{eff}}$  względem osi głównej.

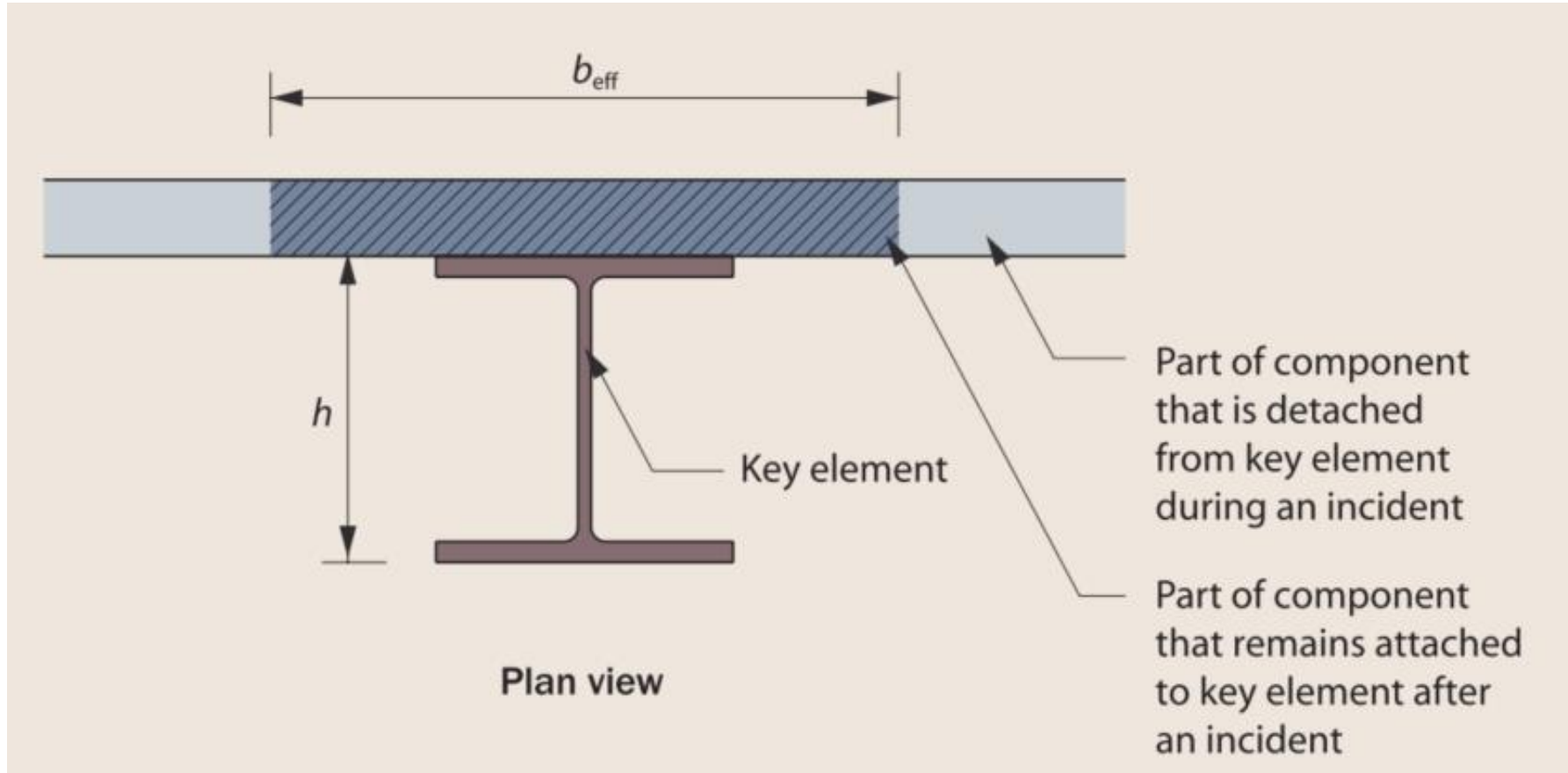
■ Przekrój słupa należy sprawdzić pod kątem kombinacji momentów i siły osiowej. Należy również uwzględnić obciążenie wyjątkowe względem osi drugorzędnej. **Obciążenie wyjątkowe należy rozpatrywać tylko jako działające jednocześnie w jednym kierunku i nie jest wymagane uwzględnianie przypadku obciążenia ukośnego.**



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## ELEMENTY POŁĄCZONE Z ELEMENTEM KLUCZOWYM

- Określenie szerokości  $b_{eff}$  jest bardzo subiektywne. Oszacowanie, co pozostanie przymocowane do elementu kluczowego (podczas obciążenia  $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$ ), zależy oczywiście od tego, co i jak jest połączone do elementu



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## ELEMENTY POŁĄCZONE Z ELEMENTEM KLUCZOWYM

- Wszelkie elementy standardowo zamocowane do elementu kluczowego, które nie wytrzymają/przeniosą obciążenia  $34 \text{ kN/m}^2$ , nie mogą być wykorzystane do unieruchomienia/staćności elementu kluczowego. Dlatego **elementy konstrukcyjne, które mają istotny wpływ na stabilność elementu kluczowego** w przypadku awarii – wystąpienia oddziaływania wyjątkowego, powinny być również zaprojektowane jako **element kluczowy**
- W przypadku gdy elementy płaskie (płytkowe) połączone z elementem kluczowym odłączyłyby się od niego przy obciążeniu mniejszym niż  $34 \text{ kN/m}^2$ , projektant powinien również rozważyć **zmniejszone oddziaływanie wyjątkowe** – podejście zdroworozsądkowe

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

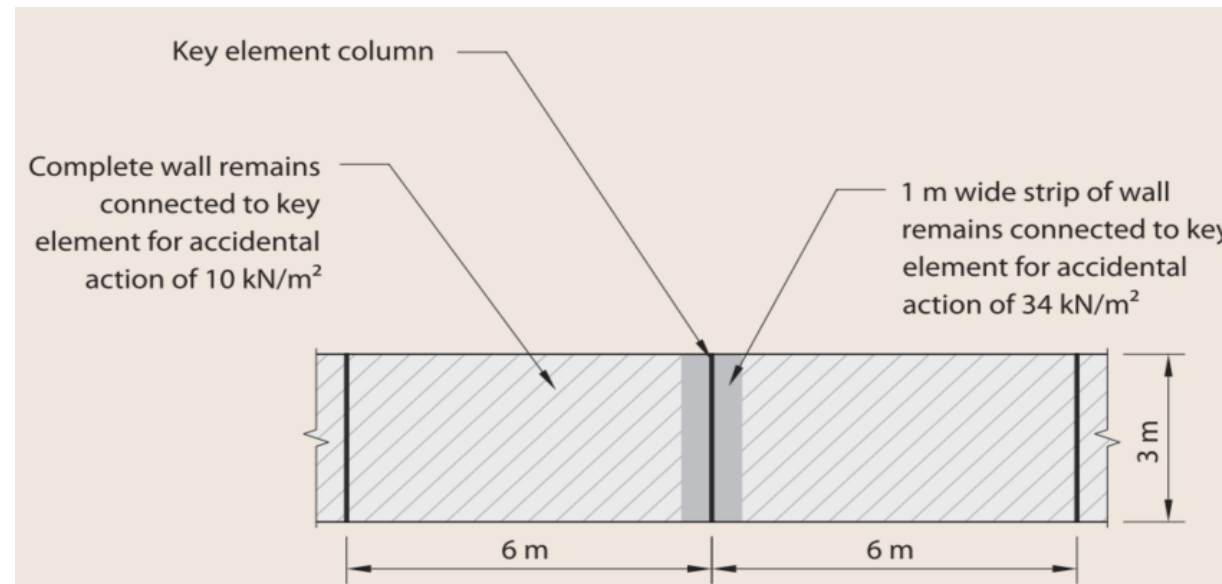
■ Przykład: **Element kluczowy w postaci słupa** o wysokości 3 m, który jest połączony ze ścianą, rozstaw słupów 6 m

Przypadek 1: Przyjmując zalecaną wartość obciążenia  $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$ , stwierdza się że ściana nie wytrzyma takiego obciążenia i zakłada się połączenie tylko pasma 1 m ściany ze słupem w sytuacji awarii. W tym przypadku obciążenie elementu kluczowego wynosi:

$$A_{d,1} = 34 \text{ kN/m}^2 \times 1 \text{ m} \times 3 \text{ m} = \underline{102 \text{ kN}}.$$

Przypadek 2: Przyjmując mniejsze obciążenie  $A_d = 10 \text{ kN/m}^2$ , stwierdza się że ściana może wytrzymać takie obciążenie i zakłada się połączenie całej ściany ze słupem w sytuacji awarii. W tym przypadku obciążenie elementu kluczowego wynosi:

$$A_{d,2} = 10 \text{ kN/m}^2 \times 6 \text{ m} \times 3 \text{ m} = \underline{180 \text{ kN}}.$$



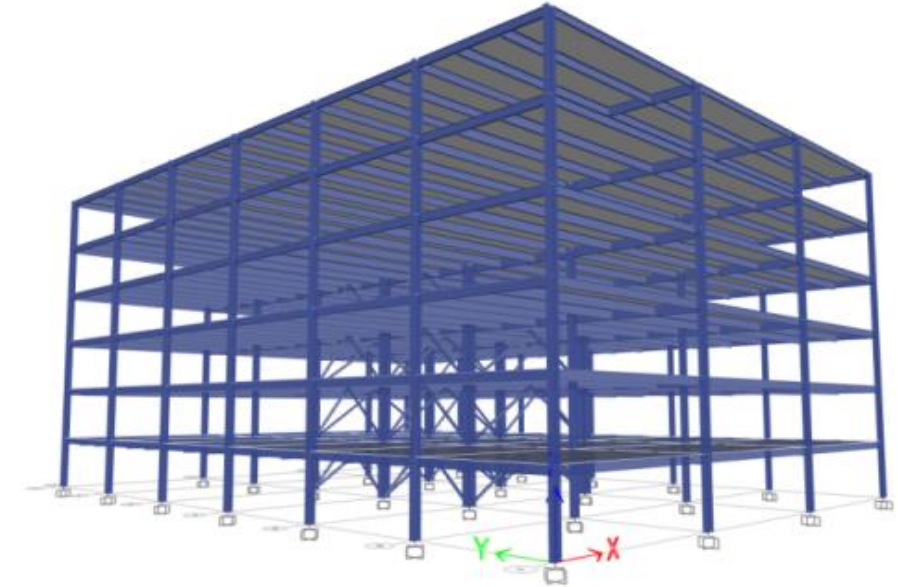
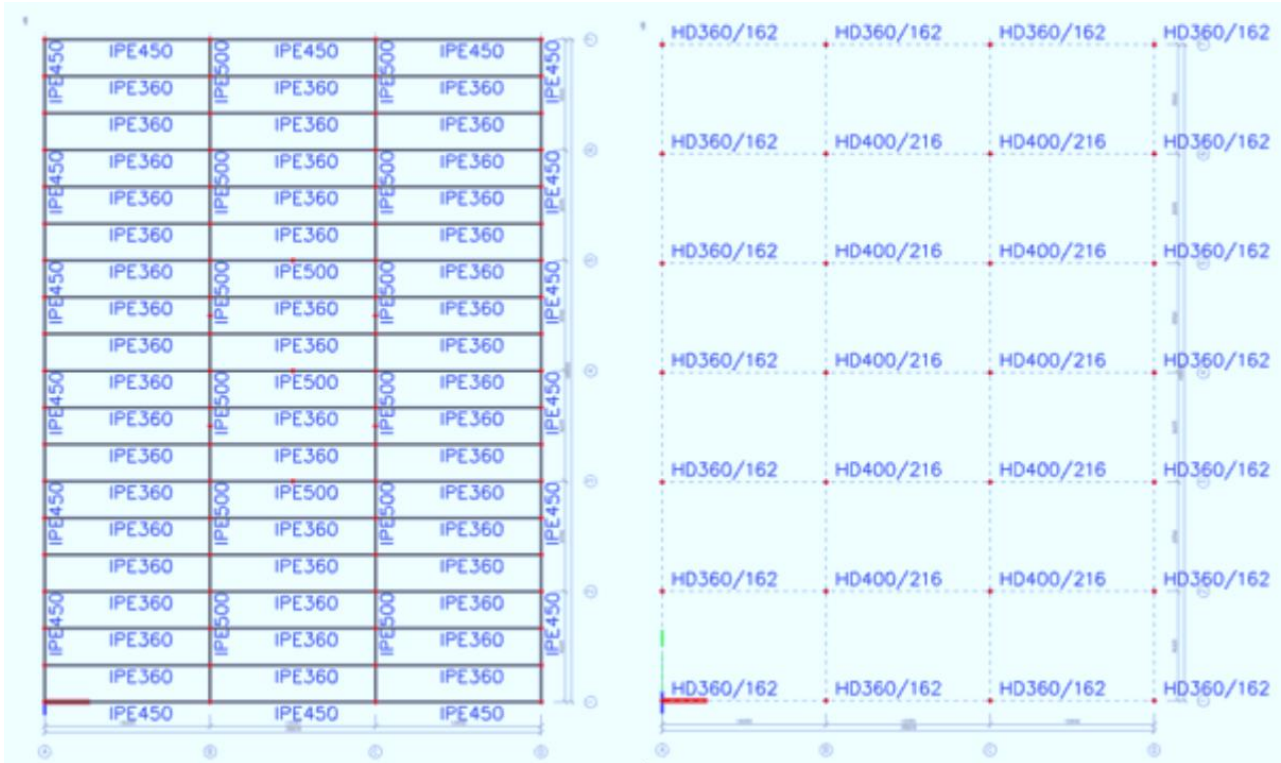


# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

Podręcznik  
Strona 172  
Pkt. 8.8.2

## PRZYKŁAD: Konstrukcja zespolona w strefie nieesejsmicznej CS/NS

### RZUT KONDYGNACJI – BELKI/SŁUPY



### Podstawowe dane o konstrukcji:

- 6 kondygnacji o wysokości 4,0 m każda
- 3 przęsła po 12 m w kierunku X
- 6 przęseł po 8,0 m w kierunku Y

Konstrukcja analizowana w dwóch wariantach:

1. ze SŁUPAMI STALOWYMI
2. ze SŁUPAMI ZESPOLONYMI

W obu wariantach BELKI I PŁYTY STROPOWE - zespolone

BETON:	C30/37
STAL ZBROJENIOWA:	B500S
STAL PROFILOWA:	S355



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

Podręcznik  
Strona 173  
Pkt. 8.8.2

## PRZYKŁAD: cd.

### Oddziaływania w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej:

Rozważone są następujące oddziaływania:

- Obciążenia stałe DL
- Obciążenia zmienne LL
- Obciążenie wyjątkowe  $A_d$

Kombinacja oddziaływań ma następującą postać:

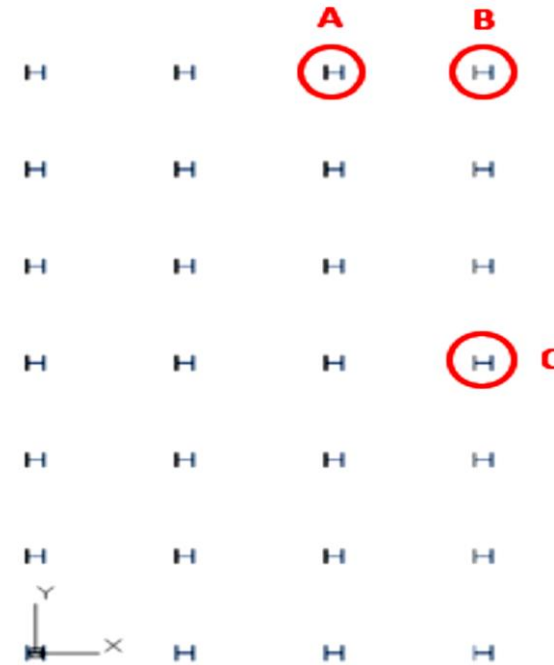
$$DL + 0,5 \times LL + A_d$$

### Określenie elementu kluczowego - słupy

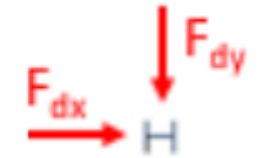
W tym przykładzie wybrane słupy (A, B i C) są zidentyfikowane jako **elementy kluczowe**. Według (EN 1991-1-7 2006), wielkość obliczeniowego oddziaływania wyjątkowego przy projektowaniu/zestawianiu obciążeń elementu kluczowego wynosi  $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$ , przyłożonego w dowolnym kierunku (ale jednocześnie tylko w kierunku pionowym lub poziomym).

Wymiary poprzeczne: słupa stalowego  $h \times b = 364 \times 371 \text{ mm}$ ; słupa zespolonego  $\Phi 450 \text{ mm}$

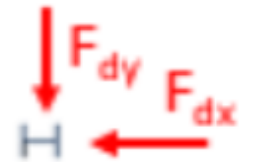
Przyjęta szerokość przegrody przed słupem  $w_p = 5,0 \text{ m}$ ; wysokość słupa  $l_c = 4,0 \text{ m}$



Cases A and B



Case C



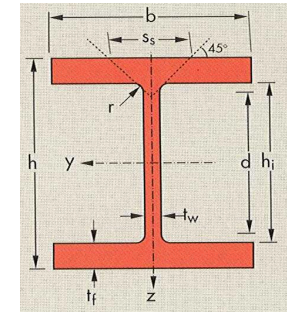
# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## PRZYKŁAD: cd.

### Obciążenia wyjątkowe elementów kluczowych – SŁUPY STALOWE

Przypadek	$F_{dx}$ (kN)	$F_{dy}$ (kN)
A.1	50,46	0
B.1	50,46	0
C.1	680	0

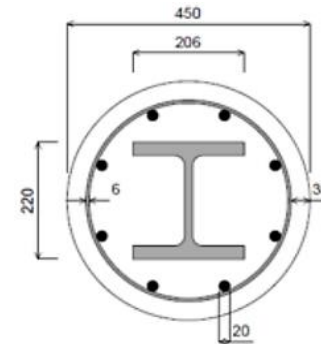
Przypadek	$F_{dx}$ (kN)	$F_{dy}$ (kN)
A.2	0	680
B.2	0	680
C.2	0	49,5



### Obciążenia wyjątkowe elementów kluczowych – SŁUPY ZESPOLONE

Przypadek	$F_{dx}$ (kN)	$F_{dy}$ (kN)
A.1	61,2	0
B.1	61,2	0
C.1	680	0

Przypadek	$F_{dx}$ (kN)	$F_{dy}$ (kN)
A.2	0	680
B.2	0	680
C.2	0	61,2



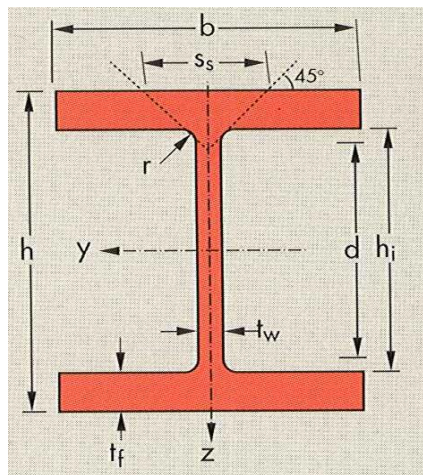
## Analiza konstrukcji

Obciążenia skupione są przyłożone bezpośrednio jako obciążenia poziome w modelu w połowie wysokości każdego z elementów kluczowych wzdłuż obu osi indywidualnie, zważając na kombinację oddziaływań w sytuacji wyjątkowej.

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

PRZYKŁAD: cd.

**Wyniki: współczynniki wykorzystania nośności (UF) i ugięcia słupów stalowych – elementów kluczowych**



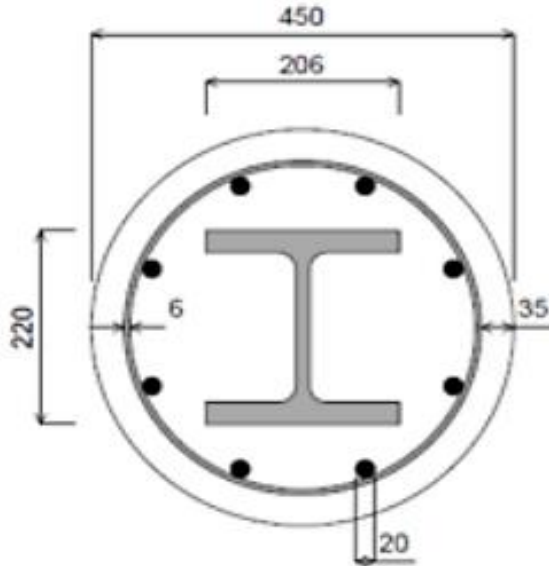
PRZY-PADEK	PRZEKRÓJ	OBCIĄŻENIE		PODPORA DOLNA	WYTĘŻENIE UF		UGIĘCIE POPRZECZNE* S355 [mm]
		$F_{dx}$ [kN]	$F_{dy}$ [kN]		S355	S460	
A.1	HD 360x162	50,46	0	Sztywna	0,39	0,28	0,7
				Przegubowa	0,39	0,28	0,8
A.2	HD 360x162	0	680	Sztywna	<b>1,03</b>	0,82	-
				Przegubowa	<b>1,25</b>	1,00	-
B.1	HD 360x162	50,46	0	Sztywna	0,22	0,16	0,7
				Przegubowa	0,23	0,17	0,8
B.2	HD 360x162	0	680	Sztywna	0,95	0,75	9,1
				Przegubowa	<b>1,14</b>	0,92	-
C.1	HD 360x162	680	0	Sztywna	0,68	0,54	5,0
				Przegubowa	0,83	0,65	8,1
C.2	HD 360x162	0	49,5	Sztywna	0,40	0,29	1,4
				Przegubowa	0,42	0,31	1,4

)\* Wartość ugięcia podano informacyjnie, gdyż w tym przypadku nie jest przedmiotem sprawdzenia

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## PRZYKŁAD: cd.

Wyniki: współczynniki wykorzystania nośności (UF) dla elementów zespolonych – elementy kluczowe



Przypadek	Obciążenie		Górna i dolna podpora	UF(-) S355
	$F_{dx}$ [kN]	$F_{dy}$ [kN]		
A.1	61,2	0	Przegubowa	0,42
A.2	0	680	Przegubowa	<b>2,29</b>
B.1	61,2	0	Przegubowa	0,24
B.2	0	680	Przegubowa	<b>1,84</b>
C.1	680	0	Przegubowa	<b>1,34</b>
C.2	0	61,2	Przegubowa	0,40

## Szczegóły przekroju zespolonego:

- Kształtownik stalowy: HEM200
- Klasa wytrzymałości betonu: C30/37
- Zbrojenie (A500):  $\phi 20$  mm /  $\phi 6$  mm



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

PRZYKŁAD: cd.

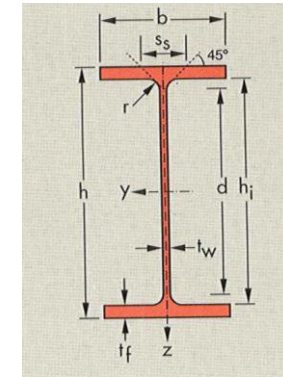
<https://www.steelconstruct.com/eu-projects/failnomore/detailed-computations-of-worked-examples/>

Brak w podręczniku ☹️



**Szczegóły przekroju belki stropowej krawędziowej parteru jako element kluczowy:**

- KSZTAŁTOWNIK: IPE 450
- STAL: S355



**Określenie elementu kluczowego - BELKI**

W tym przykładzie zaznaczona belka krawędziowa (obwodową) to **element kluczowy**. Kierunki przyłożenia obciążenia  $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$ :

- poziomo na bok belki
- pionowo „w górę” = odciążenie belki i płyty strop
- pionowo „w dół” = dociążenie belki i płyty stropowej

Pozostałe obciążenia stropu:

- ciężar płyty stropowej  $G_{k,f} = 5 \text{ kN/m}^2$
- ciężar własny belki  $G_{k,f} = 4 \text{ kN/m}$
- Obciążenie użytkowe  $Q_{k,f} = 3 \text{ kN/m}^2$

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

PRZYKŁAD – PODSUMOWANIE → **SŁUPY: OK/NG**      **BELKI: NG**

## • SŁUPY STALOWE

Wyniki pokazują, że nośność słupów stalowych przy założeniu sztywnych podpór nie przekracza nośności plastycznej (poziom wykorzystania nośności **UF=1,03** może zostać **zaakceptowany**). Jednak przy założeniu podpór przegubowych w przypadkach A.2 i B.2 **nośność plastyczna jest przekroczona**

Jak pokazano wcześniej, głównym zabiegiem jaki można wykonać w celu poprawy wyników jest **zmiana gatunku stali na S460**

## • SŁUPY ZESPOLONE STALOWO-BETONOWE

Obliczenia dla słupów zespolonych wykazały stosunkowo **gorsze wyniki**. Wynika to z faktu, że stalowa część przekroju w słupie zespolonym ma dominujący udział w jego nośności, ale jest odpowiednio mniejsza w porównaniu z przekrojem słupa stalowego

## • BELKI STROPOWE ZESPOLONE

Jeśli chodzi o belki, wykazano, że w przypadku wyjątkowych **oddziaływań poziomych i pionowych „w górę”** belka stropowa posiada **odpowiednią nośność**.

Jednak w przypadku **oddziaływań pionowo „w dół”** konstrukcja belek, aby spełniała warunki nośności metody elementów kluczowych, musiałaby zostać znacznie **wzmocniona** – prawie **7-krotne przekroczenie nośności na zginanie (6,7x)!**



# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

## PODSUMOWANIE

1. **Metoda elementu kluczowego** może być stosowana alternatywnie lub w połączeniu z innymi metodami projektowania odporności budynków zaliczonych do klasy konsekwencji CC2b, tj. **grupy wyższego ryzyka**
2. Istotne jest sprawdzenie nośności nie tylko **elementu kluczowego**, ale również wszystkich **innych** związanych z nim **elementów konstrukcyjnych i ich połączeń** (z elementem kluczowym)
3. Na wytrzymałość elementu konstrukcyjnego projektowanego jako **element kluczowy** duży wpływ mają warunki podparcia – **węzły/połączenia**, analizowany przykład – połączenie przegubowe/utwierdzenie w fundamencie
4. W ustrojach szkieletowych, w których **podciągi/belki stropowe i słupy** będą traktowane jako **elementy kluczowe**, można doprowadzić do nierealnego przewymiarowania całej konstrukcji – analizowany przykład: **belka obwodowa/krawędziowa**
5. Przy identyfikacji **elementów kluczowych** należy kierować się zdroworozsądkowym podejściem, gdyż zarówno przepisy normowe, jak i administracyjne nie dają wskazówek ani zaleceń w tym względzie
6. **Metoda elementu kluczowego**  $\equiv$  ograniczenie skali zniszczeń przy nieokreślonych zagrożeniach
7. **Metoda elementu kluczowego**  $\equiv$  wyeliminowanie uszkodzenia konstrukcji nieproporcjonalnego do przyczyny – zapobieganie nadmiernej awarii, geneza metody – wieżowiec Ronan Point

# METODA ELEMENTU KLUCZOWEGO

Na zakończenie,

w ramach podziękowania za uwagę...

- Okazuje się, że **domki z kart** wcale nie muszą być jednymi **z najmniej stabilnych konstrukcji**. Brazylijski projektant **Mauricio Arruda** zaprezentował swoje najnowsze dzieło – „karciany” stół o nośności około **250** kiloGramów!
- By dojść do takich efektów, trzeba było włożyć nieco pracy. Na zlecenie projektanta wykonano stalowe powiększone repliki kart z blachy gr. 4 mm.
- **Element kluczowy** to połączenia pomiędzy „kartami” – ich wzajemne **dopasowanie i spoiny!**

