

Rzeszów 19.05.2022

PROJEKTOWANIE NA OKREŚLONE ZAGROŻENIA

UDERZENIE

Angelika Raczak¹

¹ 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

WPROWADZENIE

■ W tej części opisano sposoby ograniczania skutków oddziaływań i metody projektowe stosowane do określonych typów oddziaływań wyjątkowych:

1. Uderzenie

- 1.1 Równoważne podejście statyczne
- 1.2 Uproszczone podejście dynamiczne
- 1.3 Podejście w pełni dynamiczne

2. Eksplozja

- 2.1 Eksplozja zewnętrzna
- 2.2 Wewnętrzna eksplozja gazu

3. Pożar jako zdarzenie wyjątkowe

4. Trzęsienie ziemi jako zdarzenie wyjątkowe

PROJEKTOWANIE NA OKREŚLONE ZAGROŻENIA

RODZAJE KONSTRUKCJI

Nazwa	Rodzaje konstrukcji
SS/NS	Konstrukcja stalowa w strefie asejsmicznej
CS/NS*	Konstrukcja zespolona w strefie asejsmicznej
SS/S	Konstrukcja stalowa w strefie sejsmicznej
CS/S	Konstrukcja zespolona w strefie sejsmicznej

* Konstrukcja występuje w dwóch wariantach – pierwszy ze słupami stalowymi, drugi ze słupami zespolonymi. W obu przypadkach belki i płyty stropowe są projektowane jako zespolone.

- **W przypadku oddziaływań wyjątkowych, projektowanie na odporność wymaga najpierw przyporządkowania konstrukcji do klasy konsekwencji**
- **Wszystkie rozpatrywane konstrukcje zaliczono do klasy Konsekwencji 2b (grupa podwyższonego ryzyka)**

PROJEKTOWANIE NA OKREŚLONE ZAGROŻENIA

■ Rodzaje metod dla określonych oddziaływań i ich zastosowanie

Konstrukcja	Uderzenie			Eksplozja zewnętrzna		Eksplozja wewnętrzna		Pożar zlokalizowany	Oddziaływania sejsmiczne	
	Równoważne podejście statyczne	Uproszczona analiza dynamiczna	Pełna analiza dynamiczna	Uproszczona metoda SDOF	Pełna analiza dynamiczna	Równoważne podejście statyczne	Metoda dynamiczna (równoważnika TNT)	Modele pożaru zlokalizowanego	Reguły normatywne	Zaawansowana analiza numeryczna (wiele zagrożeń)
SS/NS										
CS/NS										
SS/S										
CS/S										



Zalecane wymagania dla klasy Konsekwencji 2b (minimalne wymagania)

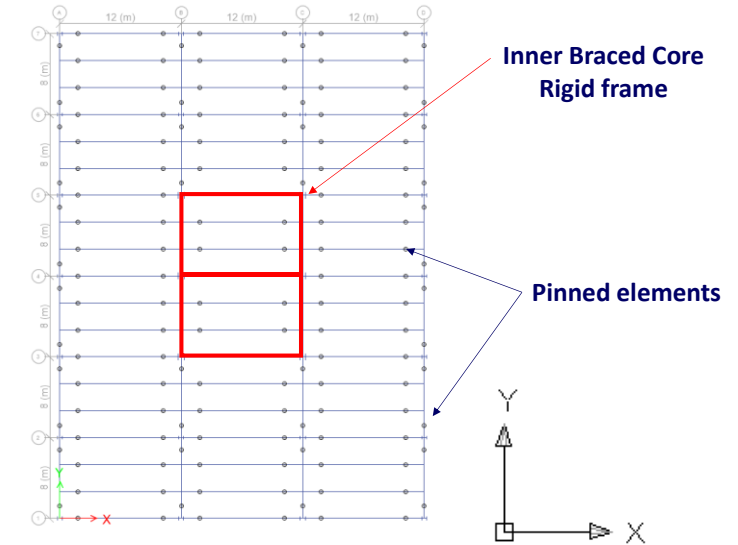
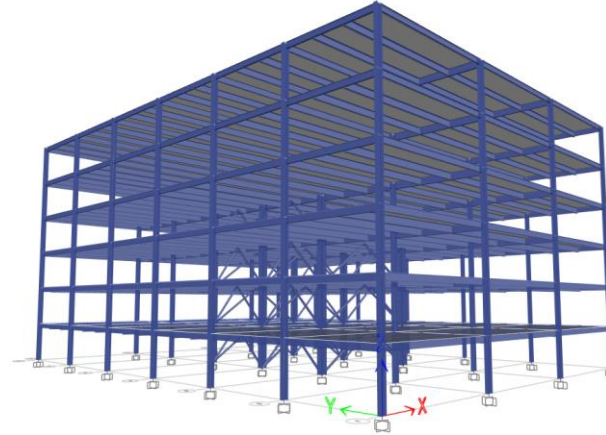
Dodatkowe rozwiązania

PROJEKTOWANIE NA OKREŚLONE ZAGROŻENIA

GEOMETRIA I UKŁADY KONSTRUKCYJNE

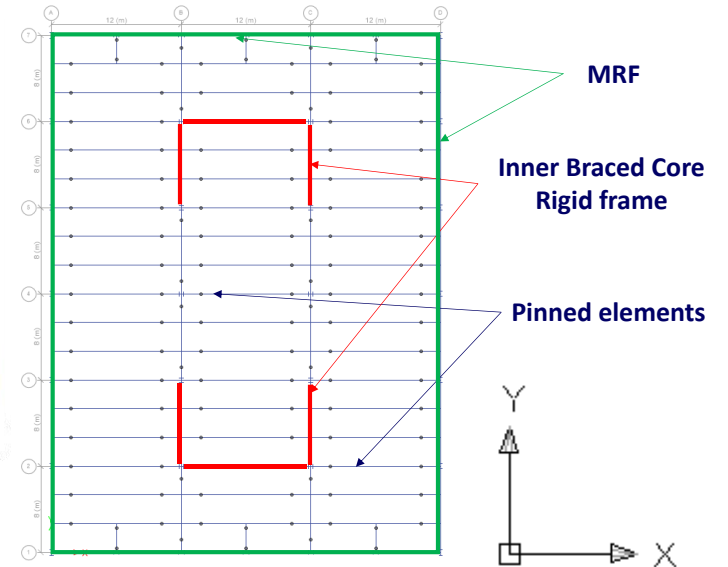
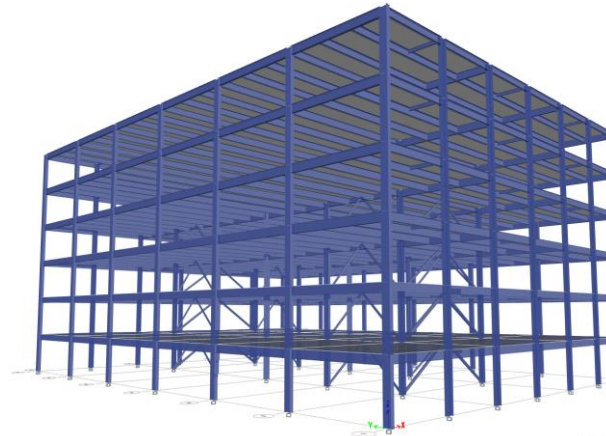
■ Strefa asejsmiczna:

- 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



■ Strefa sejsmiczna

- 6 kondygnacji o wysokości 4m 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 ,Y- ramy zewnętrzne



PROJEKTOWANIE NA OKREŚLONE ZAGROŻENIA

1. UDERZENIE

- Obciążenie wyjątkowe działające w bardzo krótkim czasie (zwykle ułamek sekundy)
- Obciążenie o małym prawdopodobieństwie wystąpienia, ale wywołujące znaczne konsekwencje
- Uderzenie samochodu w budynek jest częste w przypadku:

- Lokalizacji budynków przy drogach
- Parkingów samochodowych zlokalizowanych w budynku lub w pobliżu budynku
- Budynków, do których dozwolony jest wjazd pojazdów



Bariery state



1. UDERZENIE

ZAPOBIEGANIE/ ELIMINOWANIE ZAGROŻENIA

■ Ograniczenie skutków koncentruje się na zmniejszeniu prędkości obiektu uderzającego (np. pojazdu) i/lub ograniczeniu jego dostępu do budynku

■ Najczęściej stosowane zabezpieczenia to:

- Właściwe planowanie dróg dojazdowych
- Stosowanie blokad/barier (statycznych lub automatycznych)



Concrete Temporary Barriers (J-J Hooks):

Steel or Water Temporary Barriers:

Bariery stałe

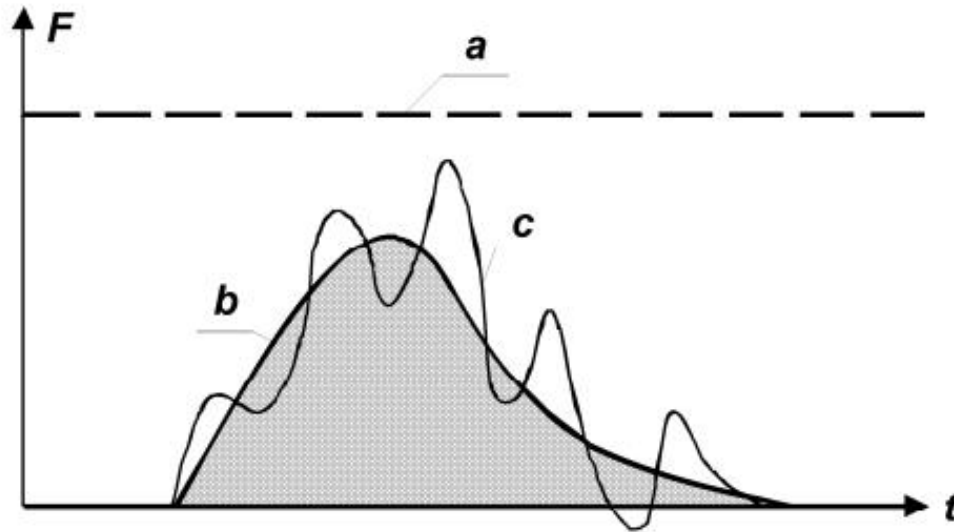


Blokady automatyczne

1. UDERZENIE

METODY PROJEKTOWANIA

- **"Uderzenie jest zjawiskiem interakcji między poruszającym się obiektem i konstrukcją, w którym energia kinetyczna obiektu jest nagle przekształcana w energię deformacji"**
PN-EN 1991-1-7



Legenda

- a – równoważna siła statyczna
- b – siła dynamiczna
- c – reakcja konstrukcji

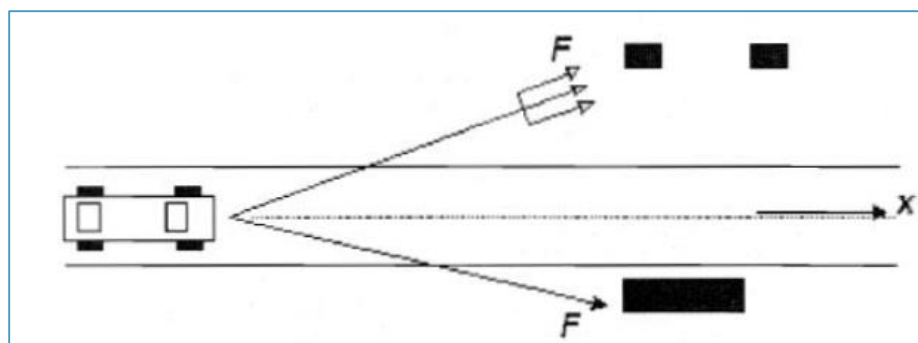
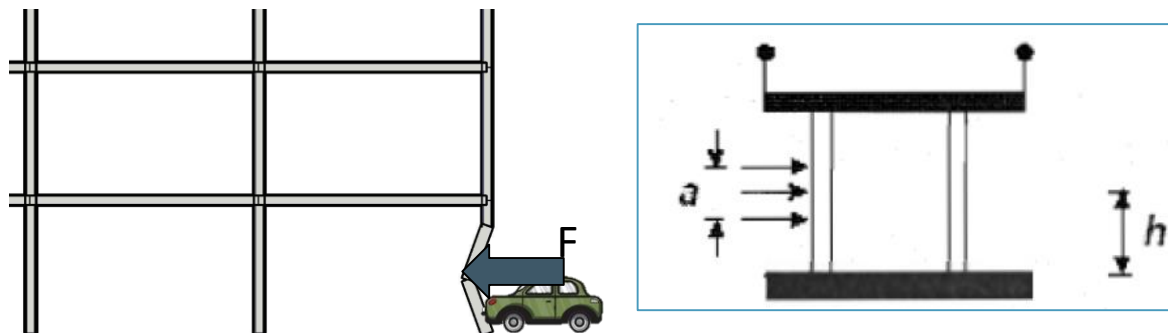
- **Uderzenie twarde** - konstrukcja jest uważana za sztywną, a uderzający obiekt rozprasza całą energię uderzenia (założenie konserwatywne)
- **Uderzenie miękkie** - konstrukcja ulega odkształceniu w celu rozproszenia energii wprowadzonej przez uderzenie

Reprezentacja obciążenia uderzeniowego(PN-EN 1991-1-7, 2006)

1.1 RÓWNOWAŻNE PODEJŚCIE STATYCZNE

■ **Obciążenie uderzeniowe zastąpione jest równoważną siłą statyczną**

■ **Stosowane jest do uderzenia twardego i konstrukcji należących do klasy konsekwencji CC1 i CC2**



Kategoria ruchu	Siła F_{dx} ^a [kN]	Siła F_{dy} ^a [kN]
Autostrady, drogi krajowe i główne	1000	500
Drogi krajowe w obszarze niezabudowanym	750	375
Drogi w obszarze zabudowanym	500	250
Place i garaże z dostępem: – Samochodów osobowych – Samochodów ciężarowych ^b	50 150	25 75

^a x = główny kierunek jazdy, y = kierunek prostopadły do głównego kierunku jazdy.
^b Określenie „samochód ciężarowy” odnosi się do pojazdów o maksymalnym ciężarze całkowitym większym niż 3,5 tony.

a – wysokość zalecanego pola przyłożenia siły. Zakresy od 0,25 m (samochody osobowe) do 0,5 m (samochody ciężarowe)
 h – położenie wypadkowej siły zderzenia F , tzn. wysokość ponad poziomem jezdni. Zakresy od 0,5 m (samochody osobowe) do 1,5 m (samochody ciężarowe).
 x – oś środkowa pasa ruchu

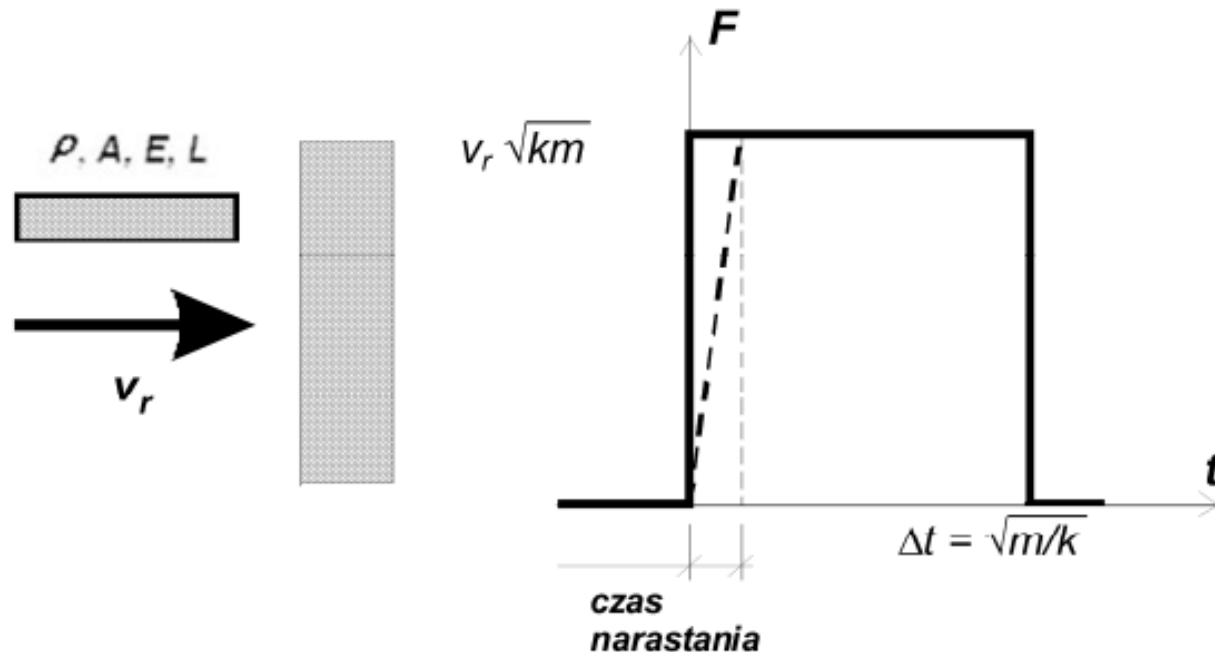
Siła zderzenia w konstrukcje podporowe mostów i konstrukcje wsporcze budynków w sąsiedztwie pasm ruchu (Eurokod 1, 2006)

■ **Metoda ta umożliwia sprawdzenie nośności, przemieszczeń i odkształceń konstrukcji**

1.2 UPROSZCZONE PODEJŚCIE DYNAMICZNE

■ Procedura ta dopuszcza dwie różne definicje oddziaływania (załącznik C normy PN-EN 1991-1-7):

- Uderzenie twarde → do klasy konsekwencji konstrukcji CC2b
- Uderzenie miękkie → do klasy konsekwencji konstrukcji CC3



Model uderzenia, F – siła dynamicznej interakcji

■ Współczynnik obciążenia dynamicznego (DLF) może być stosowany do zwiększenia wartości siły spowodowanej efektami dynamicznymi:

- Krok obliczeniowy (czas początkowy = 0 sec): **DLF = 2.0**
- Obciążenie impulsem: **DLF** określony ilościowo (**DLF = 1.0 do 1.8**)

1.2 UPROSZCZONE PODEJŚCIE DYNAMICZNE

■ Uderzenie twarde

Wartość maksymalnej wypadkowej siły dynamicznej interakcji (impuls prostokątny):

$$F = v_r \sqrt{k \cdot m}$$

F – siła dynamicznej interakcji

v_r – prędkość obiektu w chwili uderzenia

k, m – sztywność i masa obiektu uderzającego

■ Uderzenie miękkie

A. Nośność konstrukcji zapewniona przez zdolność do odkształceń sprężystych

- Jak w przypadku uderzenia twardego, ale k jest tu sztywnością konstrukcji

B. Nośność konstrukcji zapewniona przez zdolność do odkształceń plastycznych

- Konstrukcja powinna posiadać zdolność do odkształceń plastycznych, aby pochłonąć całkowitą energię kinetyczną obiektu uderzającego:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_r^2$$

- W przypadku sztywno-plastycznej odpowiedzi

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_r^2 \leq F_o y_o$$

F_o – Nośność plastyczna konstrukcji

y_o – zdolność do deformacji

1.3 PODEJŚCIE W PEŁNI DYNAMICZNE

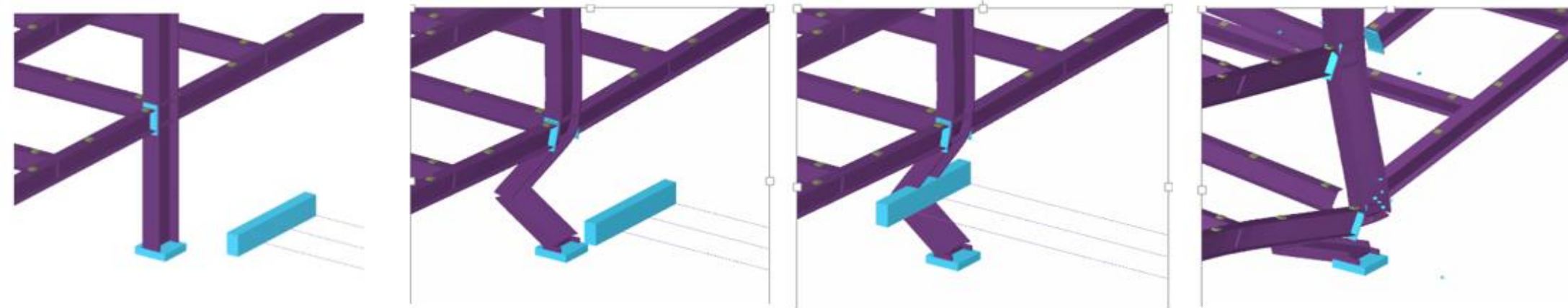
■ Dwie dostępne metody

■ Dokładne modelowanie obciążenia uderzeniem:

- Najbardziej realistyczne podejście
- Wpływ prędkości przyrostu odkształcenia na materiał: poprzez współczynniki DIF

■ Analiza alternatywnych ścieżek obciążenia

- Słup uważa się za zniszczony z powodu uderzenia (patrz sekcja nieokreślone zagrożenia)
- Metoda bardziej praktyczna niż poprzednie, z zadowalającą dokładnością pozwala na oszacowanie nośności konstrukcji



Dokładne modelowanie obciążenia uderzeniem (analiza przeprowadzona przy użyciu ELS)

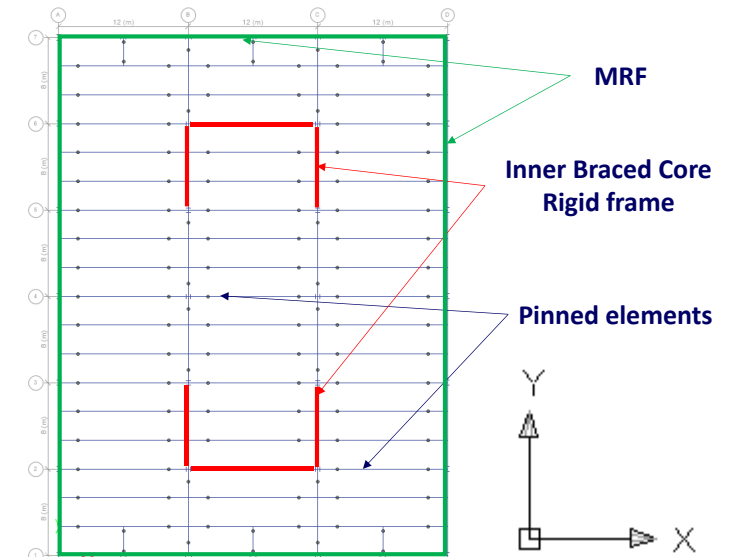
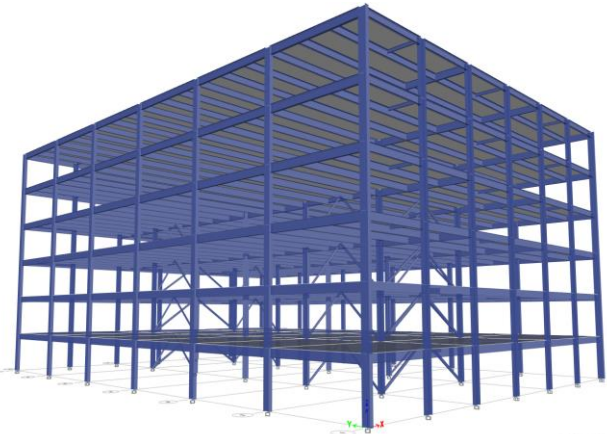
1. UDERZENIE – PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

KONSTRUKCJA ZESPOŁONA W STREFIE SEJSMICZNEJ - CS/S

GEOMETRIA I UKŁAD KONSTRUKCYJNY

■ Strefa sejsmiczna

- 6 kondygnacji o wysokości 4m każda
- 6 przęseł po 8.0 m w kierunku Y
- 3 przęsta po 12.0 m w kierunku X
 - ramy wewnętrzne
- 6 przęseł po 6.0 m w kierunku X,Y – ram zewnętrzne



- Konstrukcję zaliczono do klasy Konsekwencji 2b (grupa podwyższonego ryzyka)

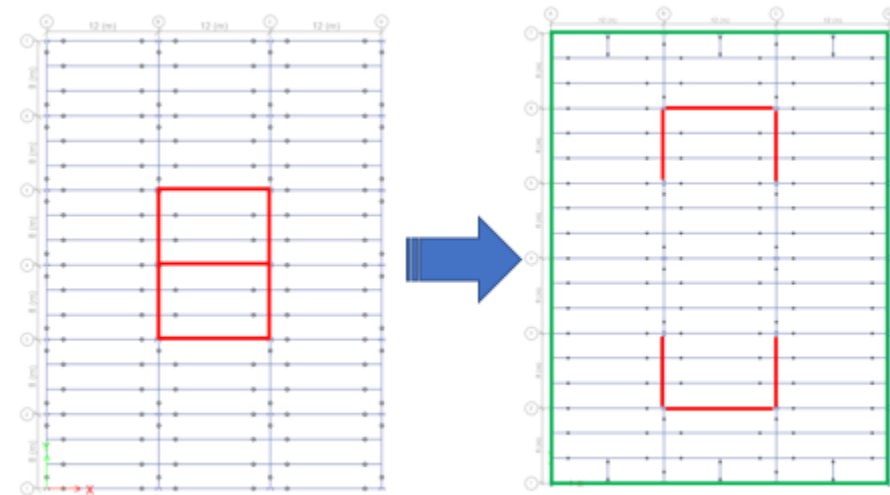
ODDZIAŁYWANIA UWZGLĘDNIONE W PROCESIE PROJEKTOWANIA

■ Trwała sytuacja obliczeniowa

Obciążenie	Konstrukcja
	CS/S
	Lokalizacja
	Timisoara, RO
Obciążenie stałe	- Strop: $g_k = 5 \text{ kN/m}^2$ - Elewacja (oparta na belkach obwodowych): $g_k = 4 \text{ kN/m}$
Obciążenie zmienne	- Obciążenie użytkowe dla budynków biurowych: $q_k = 3 \text{ kN/m}^2$ - Obciążenie wykonawcze $q_k = 1 \text{ kN/m}^2$ (stropy i dach).
WIATR	
Bazowa prędkość wiatru	$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$
Ciśnienie prędkości wiatru	$q_b = 0,4 \text{ kN/m}^2$
Kategoria terenu	III
Obciążenie śniegiem	$s_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$

■ Sytuacja obliczeniowa sejsmiczna – Eurokod 8

Obciążenie sejsmiczne	Konstrukcja – CS/S
Spektrum odpowiedzi sprężystej	Typ 1
Rodzaj podłoża	B
Projektowe przyspieszenie gruntu, a_g	0,25 g
Współczynnik zachowania konstrukcji, q	$q = 4,8$ (Układ podwójny: rama stężona osiowo CBF+ rama przenosząca momenty MRF)



■ DODATKOWE KROKI W PROJEKTOWANIU DLA KONSTRUKCJI ODPORNÝCH SEJSMICZNIE:

- Stężone przęsta przeniesione na zewnątrz (patrz rysunek)
- Na obwodzie, z wszystkich stron dodano MRF

PRZEKROJE POPRZECZNE – WSKAŹNIKI WYKORZYSTANIA

Stupy	Kształtownik	Gatunek stali	Wskaźnik wykorzystania
Stupy narożne	HE550B	S355	0.48
Stupy obwodowe	HE500B	S355	0.71
Stupy trzonu stężącego	HD400X463	S355	0.95

Belki stalowe w pełni zespolone z płytą 12cm poprzez **Kotki Nelsona** (sworznie głowkowe) $\varnothing=19\text{mm}$, $h=100\text{ mm}$ / $a=160\text{ mm}$

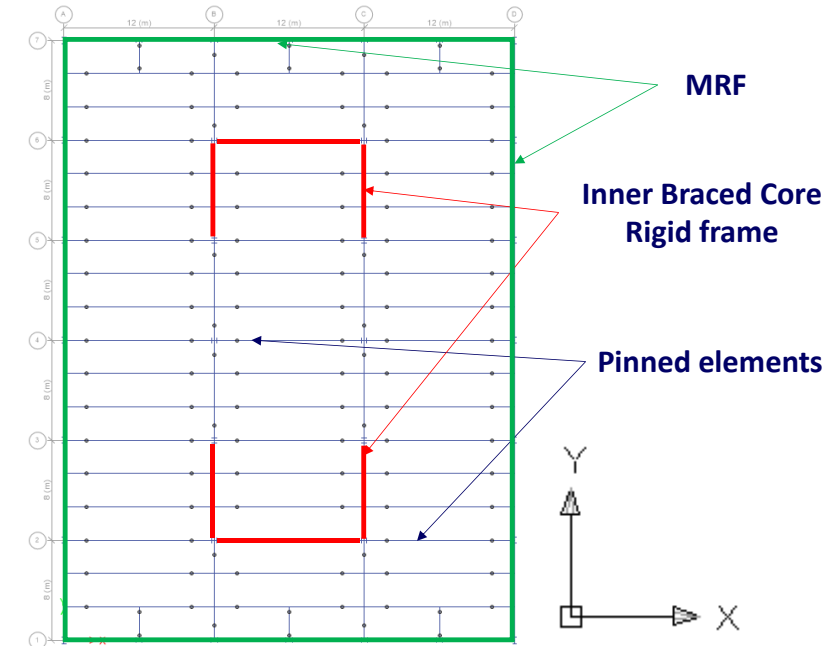
Belki	Kierunek ¹	Kondygnacja	Kształtownik	Gatunek stali	Wskaźnik wykorzystania	
					Nośność	Ugięcie ²
Belki obwodowe	X	1-6	IPE550	S355	0.278	0.178
	Y	1-6	IPE600	S355	0.302	0.157
Belki wewnętrzne	X	1-6	IPE550	S355	0.627	0.971
	Y	1-6	IPE550	S355	0.874	0.94
Belki trzonu stężącego	X	1-3	³ H800*	S420	0.936	-
		4-5	HEM800	S420	0.953	-
		6	HEM700	S420	0.789	-
	Y	1-3	HEM500	S420	0.859	-
		4-6	HEB500	S420	0.878	-

¹Orientacja osi - patrz rysunek

²Kryteria sprawdzenia ugięcia: $L/250$ dla belek drugorzędnych, $L/350$ dla belek głównych

³H800* jest kształtownikiem złożonym, $h=814\text{ mm}$, $b=380\text{ mm}$, $t_f=50\text{ mm}$ i $t_w=30\text{ mm}$.

Stężenia	Kondygnacja	Kształtownik	Gatunek stali	Wskaźnik wykorzystania
Kierunek Y	1-3	HEA320	S355	0.41
	4	HEA260	S355	0.43
	5	HEA220	S355	0.46
	6	HEA200	S355	0.40
Kierunek X	1-3	HEB340	S355	0.41
	4-5	HEA320	S355	0.39
	6	HEA260	S355	0.26



OKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE

UDERZENIE

Równoważne podejście statyczne

ODDZIAŁYWANIA W WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

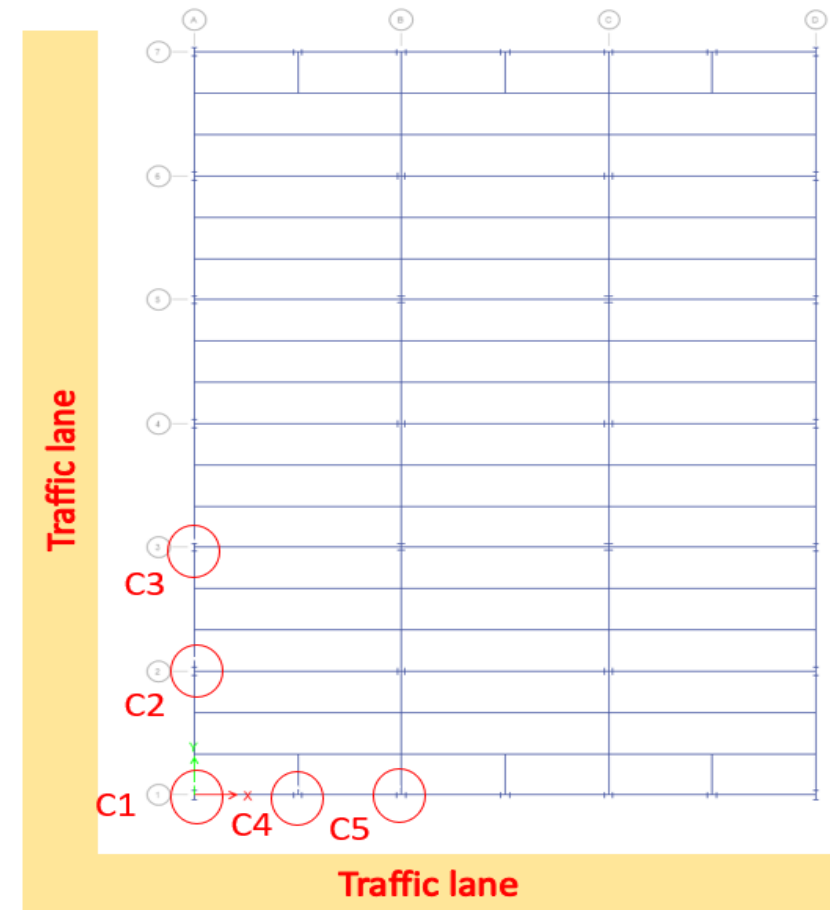
- Obciążenia stałe **DL**
- Obciążenia zmienne **LL**
- Oddziaływanie spowodowane uderzeniem A_{Ed}

KOMBINACJA ODDZIAŁYWAŃ W PRZYPADKU WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

$$DL + 0.5 \times LL + A_{Ed}$$

SCENARIUSZ UDERZENIA

- Obejmuje słupy obwodowe (skrajne) usytuowane wzdłuż pasów ruchu
- W tym przykładzie narażone są zarówno elewacje podłużne (wzdłuż pasa ruchu pionowego), jak i poprzeczne (wzdłuż pasa ruchu poziomego).



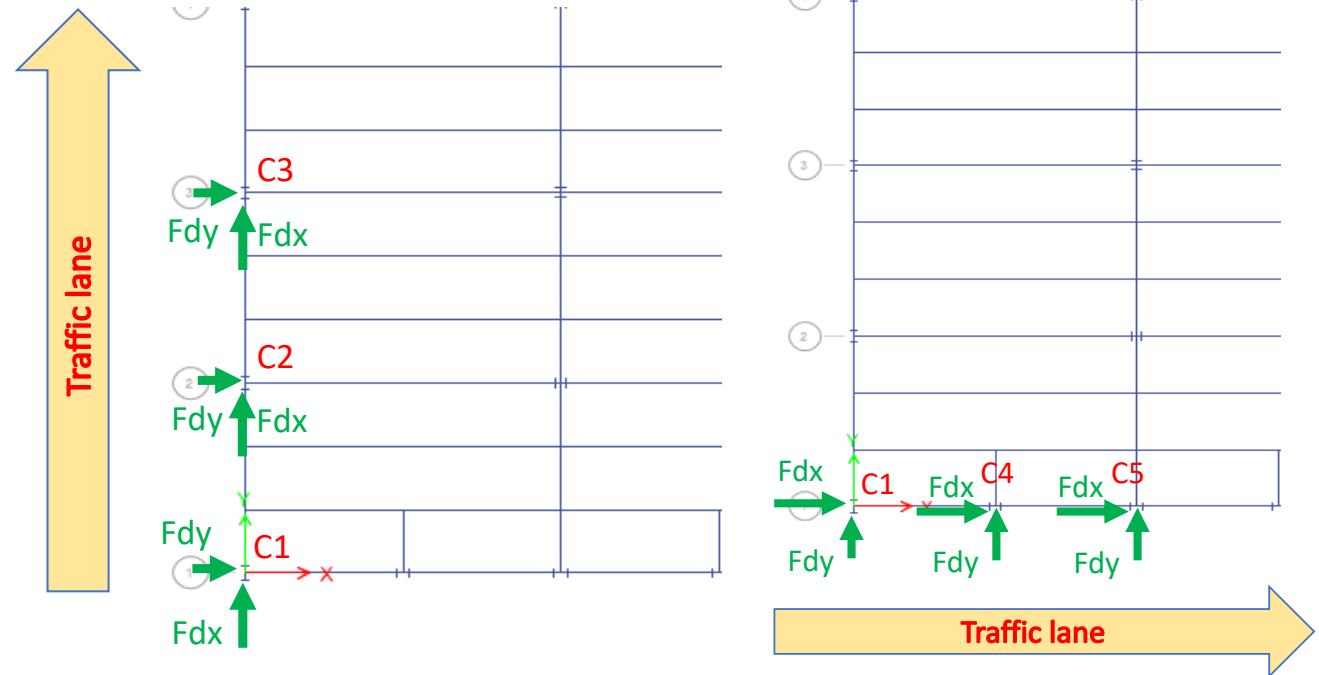
■ OBCIĄŻENIA OD UDERZENIA

- Obliczane są na podstawie danych z Tablicy 4.1 normy (PN - EN 1991-1-7 2006), uwzględniając przypadek: *Autostrady, drogi krajowe i główne*.

■ ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE UDERZENIA

- Narażone słupy: pierwsze piętro (C1-C5)
- Wysokość punktu uderzenia: 1,5 m
- Siły uderzenia (patrz tabela poniżej)

Przypadek	F_{dx} (kN)	F_{dy} (kN)
C1	1000	500
	500	100
C2	1000	500
C3	1000	500
C4	1000	500
C5	1000	500



■ ANALIZA KONSTRUKCJI

- **Liniowa analiza sprężysta** jest przeprowadzana na pełnym modelu 3D, przy użyciu oprogramowania SAP2000. Przekroje elementów przyjęto takie, jakie wynikają z wstępnego projektowania (na trwałe i sejsmiczne sytuacje obliczeniowe).

Przy-padek	Kształ-townik	Siła uderzenia [kN]	Oś	Podpora dolna	N [kN]	M [kNm]	U.F. [-]	Krytyczna siła uderzenia **[kN]	
C1	HEB550	1000	Mocna	Sztywna	1048	670	0.478	2700	
		500	Słaba	Sztywna	1053	230	0.656	800	
		500	Mocna	Sztywna	*				
		1000	Słaba	Sztywna	1074	625	1.313	-	
C2	HEB500	1000	Mocna	Sztywna	2218	677	0.899	1250	
		500	Słaba	Sztywna	2216	342	1.044	-	
C3	HEB500	1000	Mocna	Sztywna	2229	681	0.9	1250	
		500	Słaba	Sztywna	2238	342	1.048	-	
C4	HEB500	1000	Mocna	Sztywna	591	755	0.63	1300	
		500	Słaba	Sztywna	647	339	0.74	700	
C5	HEB500	1000	Mocna	Sztywna	1687	787	0.864	1800	
		500	Słaba	Sztywna	1696	340	0.954	550	

* Scenariusz jest niemiarodajny, ponieważ słup został już wcześniej zweryfikowany pod wpływem tego samego obciążenia, przyłożonego względem słabej osi przekroju.

** Siła uderzenia powodująca uszkodzenie słupa (UF=1).

ANALIZA KONSTRUKCJI

- **Nieliniową analizę dynamiczną** przeprowadzono na pojedynczym słupie (wyizolowanym z konstrukcji), przy użyciu oprogramowania **SAP2000**.

■ Analiza została podzielona na dwa etapy:

- **Etap pierwszy:** przyłożenie pionowego obciążenia w wierzchołku słupa, jako podłużnej siły ściskającej, o wartości wynikającej z kombinacji oddziaływań w sytuacji wyjątkowej (**DL + 0,5×LL**).
- **Etap drugi:** przyłożenie siły uderzenia, poprzecznie do kierunku słabszej osi przekroju, stosując dynamiczną analizę nieliniową i mechanikę uderzenia twardego, w sposób następujący:

$$F = v_r \sqrt{k \cdot m} \quad \Delta t = \sqrt{m/k}$$

- v_r - prędkość uderzenia
- m - masa uderzenia
- k - sztywność obiektu uderzającego

- $v_r = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ [m/s]}$
- $m = 3500 \text{ kg}$
- $K = 300 \text{ [kN/m]} = 300000 \text{ [N/m]}$

$$F = v_r \sqrt{k \cdot m} = 25 \sqrt{300000 \cdot 3500} = 810 \text{ kN}$$

ANALIZA KONSTRUKCJI

- Wpływ szybkości przyłożenia obciążenia jest uwzględniony przez zastosowanie do wytrzymałości materiału **współczynnika dynamicznego (DIF – Dynamic Increase Factor)**.
- Do wyznaczenia współczynnika DIF dla stali walcowanej na gorąco, o granicy plastyczności do 420 N/mm², może być przyjęta metodą zgodną z (CEB 1988).

$$\text{DIF} = \frac{f_{dy}}{f_y} = 1 + \frac{6.0}{f_y} \ln \frac{\dot{\epsilon}}{5 \times 10^{-5}}$$

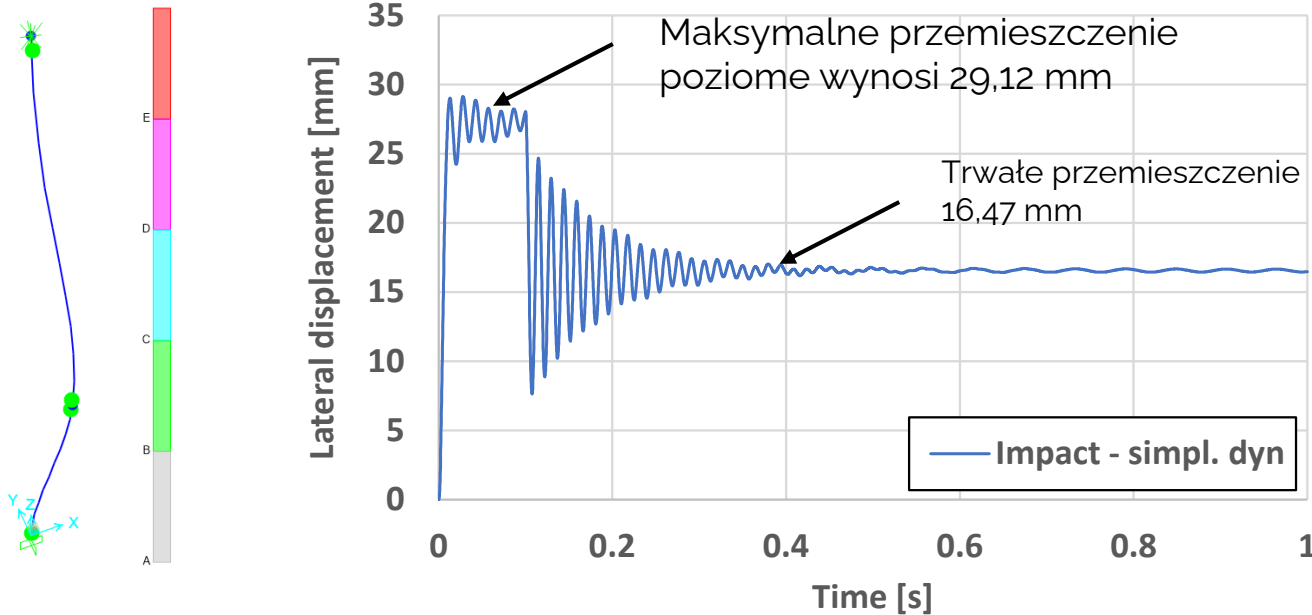
$$\text{DIF} = \frac{f_{du}}{f_u} = 1 + \frac{7.0}{f_u} \ln \frac{\dot{\epsilon}}{5 \times 10^{-5}}$$

$$\text{DIF (dla } f_y) = 1,118$$

- Szybkość przyrostu odkształcenia ($\dot{\epsilon}$)** określa się w procedurze iteracyjnej.
 - W pierwszej iteracji stosunek między określonym odkształceniem a czasem potrzebnym do chwili osiągnięcia granicy plastyczności jest obliczany na podstawie wyników analizy bez stosowania DIF.
 - Następnie analiza jest przeprowadzana ponownie, ze zmodyfikowanymi właściwościami materiału przy użyciu DIF, po której następuje ponowne obliczenie DIF.

WYNIKI

- Stup może przetrzymać siłę uderzenia, ale odkształcenia plastyczne w początkowej fazie są równe:
 - **0,054%** w punkcie uderzenia
 - **0,073%** w podstawie
 - **0,036%** przy wierzchołku stupa.



Deformacja stupa i lokalizacja przegubów plastycznych (po lewej) oraz przemieszczenie poprzeczne w funkcji czasu (po prawej)

WNIOSKI

- Zgodnie ze schematem blokowym dotyczącym projektowania pod kątem odporności wszystkie wymagania uważa się za spełnione (tj. uszkodzenie nie jest krytyczne), stąd zakończono obliczenia (Koniec projektowania).

OKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE

UDERZENIE

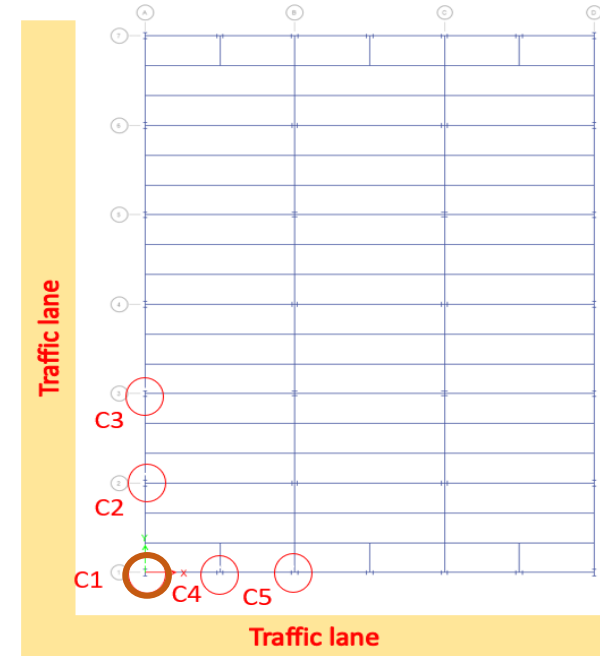
Pełna analiza dynamiczna

- ODDZIAŁYWANIA W WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ
 - Obciążenia stałe **DL**
 - Obciążenia zmienne **LL**
 - Oddziaływanie spowodowane uderzeniem **A_{Ed}**
- KOMBINACJA ODDZIAŁYWAŃ W PRZYPADKU WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

$$DL + 0.5 \times LL + A_{Ed}$$

SCENARIUSZE UDERZENIA

Scenariusz uderzenia obejmuje tylko jeden słup tj. **C1** (**UF = 1,313**), gdzie uderzenie wywiera wpływ względem słabszej osi przekroju, co wywołuje powstanie najwyższej wartości UF, w przypadku zastosowania równoważnego obciążenia statycznego.



ZAŁOŻENIA

- Kierunek uderzenia: względem osi słabej: **m=3,5 tony** (masa pojazdu); **vr= 90 km/h** (prędkość pojazdu)
- Słup wykonany jest z kształtownika HEB500, ze stali gatunku S355 o wysokości 4,0 m

MODELOWANIE I ANALIZA KONSTRUKCJI

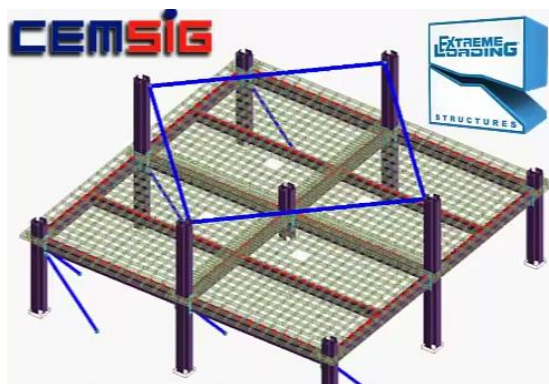
- ❑ W celu rozpatrzenia złożonego zachowania konstrukcji, zdecydowano się na bezpośrednie zamodelowanie uderzenia pojazdem. Przeprowadzono nieliniową analizę dynamiczną, na pełnym modelu 3D, z zastosowaniem **oprogramowania ELS**
- ❑ W celu odwzorowania bezwładności elementów obciążenia stałe i zmienne zostały zdefiniowane poprzez **obiekty masowe**.

Analizę przeprowadzono w dwóch etapach:

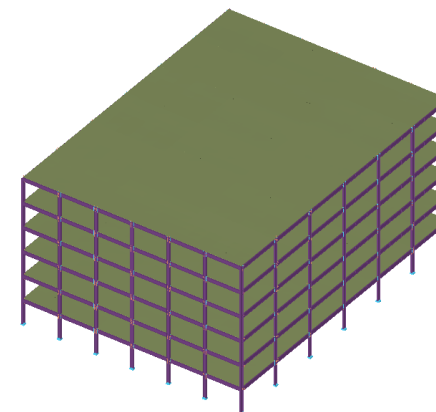
- **Etap pierwszy:** do konstrukcji przyłożono obciążenia stałe i zmienne w statycznej analizie nieliniowej
- **Etap drugi:** obiekt uderzający styka się z słupem C2 w dynamicznej analizie nieliniowej.

ZAŁOŻENIA MODELU WPŁYWU

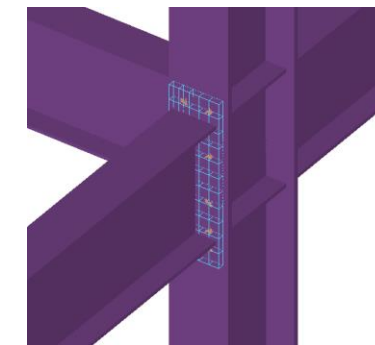
Obiekt uderzający (tj. pojazd) może poruszać się tylko po płaszczyźnie poziomej, na wysokości **1,5 m** i posiada masę **3,5 tony**. Prędkość początkowa obiektu wynosi **25 m/s**.



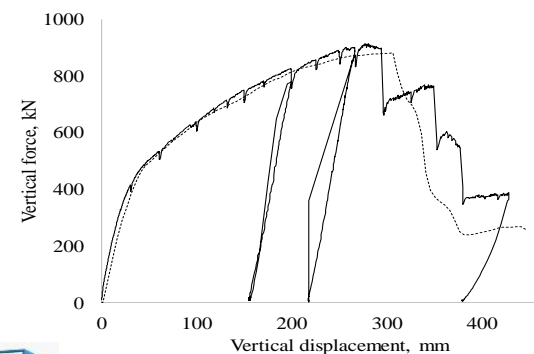
Walidowany model



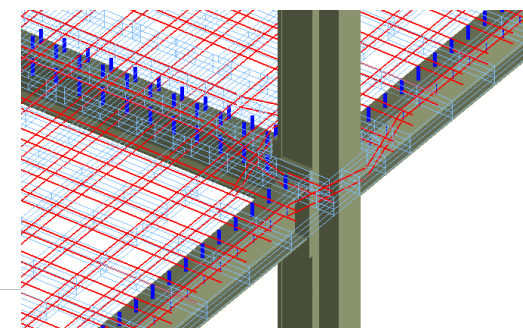
Ogólny widok modelu CS/S



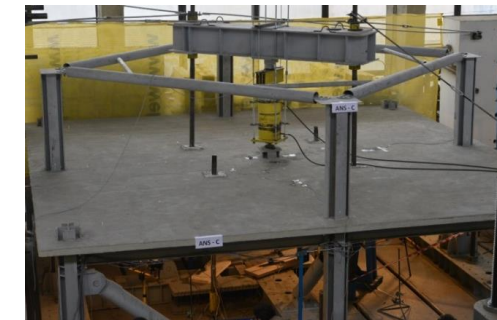
Szczegóły dotyczące połączeń



Krzywe siła-przemieszczenie



Model płyty



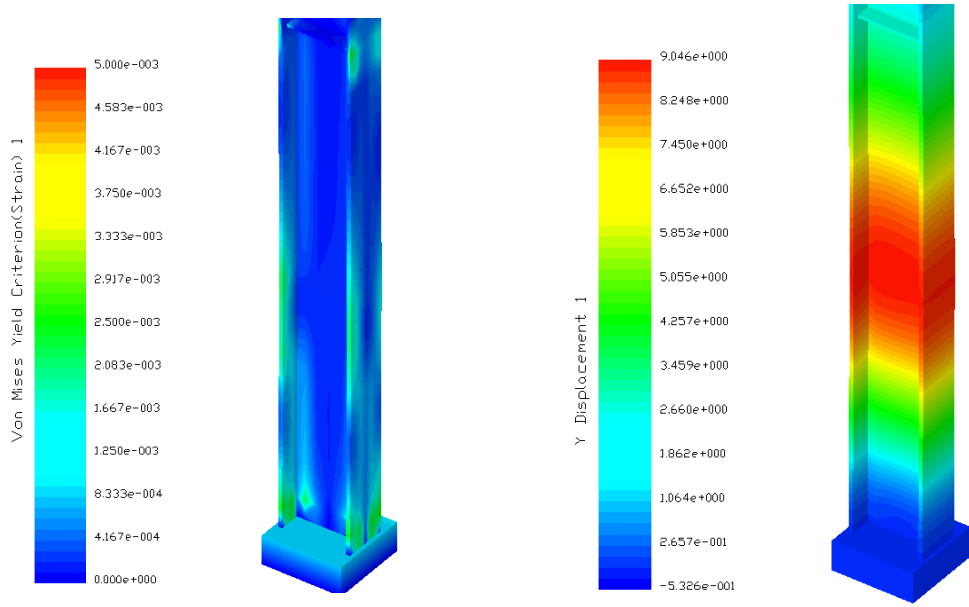
Element próbnny przed i po wylaniu płyty żelbetowej

ZAŁOŻENIA MODELOWANIA UDERZENIA

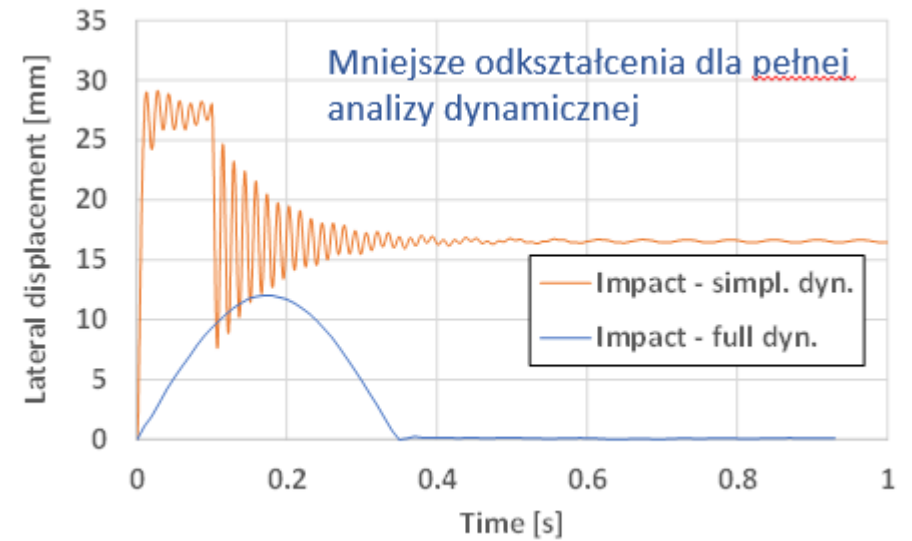
Obiekt uderzający składa się z płyty stykowej, płyty z przypisaną masą oraz podłużnych sprężyn między nimi. Wysokość strefy styku między pojazdem a słupem wynosi **0,6 m**. Sztywność obiektu uderzającego wynosi **300 kN/m** i jest uwzględniana za pomocą sprężyn.

WYNIKI

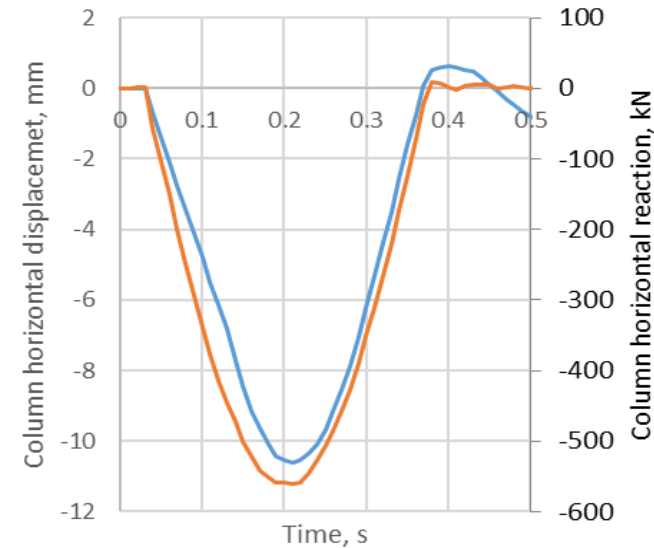
Wyniki pokazują powstanie ograniczonego odkształcenia plastycznego w uderzonym słupie, z maksymalnym **ugięciem poprzecznym** o wartości **10,6 mm**.



Mapy odkształceń i przemieszczeń



Porównanie wyników uzyskanych w podejściach dynamicznych



Reakcja pozioma w podstawie (kolor pomarańczowy) i poziome przemieszczenie w punkcie uderzenia (kolor niebieski)

Rzeszów 19.05.2022

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

FAILNOMORE

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

Rzeszów 19.05.2022

OKREŚLONE ZAGROŻENIA EKSPLOZJA

Andrzej Wojnar¹

¹ Politechnika Rzeszowska

FAILNOMORE

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

niniejsza prezentacja ogranicza się głównie do odpowiedzi konstrukcji
na obciążenie ciśnieniem - falą uderzeniową

nie podano wytycznych dotyczących uwzględnienia oddziaływania
termicznego lub uderzenia odłamkami, nawet jeśli w niektórych
przypadkach ich skutki mogą być znaczące

EKSPLOZJA

niezwykle gwałtowne uwolnienie energii w postaci fali ciśnienia, ciepła, dźwięku i światła



1 – fala uderzeniowa, 2 – fala odbita od ziemi



- ❑ zazwyczaj budynki nie są projektowane z myślą o obciążeniach generowanych przez eksplozje - wyjątek stanowią obiekty odporne na takie działania
- ❑ na skutek eksplozji budynki poddawane są tak ekstremalnym obciążeniom, że mogą doznać rozległych uszkodzeń
- ❑ należy przewidzieć możliwość uszkodzenia podstawowych elementów konstrukcyjnych i podjąć środki w celu ograniczenia skutków uszkodzeń

EKSPLOZJA

materiały wybuchowe - ciała stałe, gazy, opary lub pyły
deflagracja a detonacja

W zależności od rodzaju materiału wybuchowego i warunków lokalnych, eksplozja może przebiegać jako deflagracja lub gwałtownie się rozprzestrzeniać i generować fale uderzeniowe jako detonacja

Deflagracja -

propagacja strefy spalania z prędkością, która jest mniejsza niż prędkość dźwięku w ośrodku obojętnym (np. wybuch gazu wewnątrz budynku)

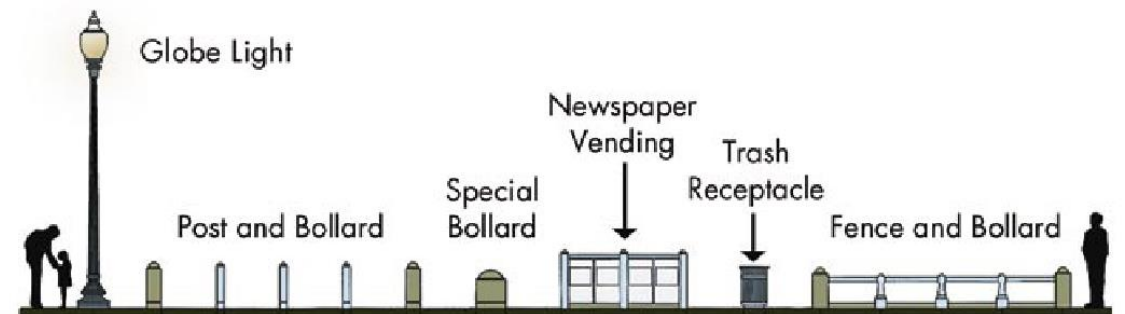
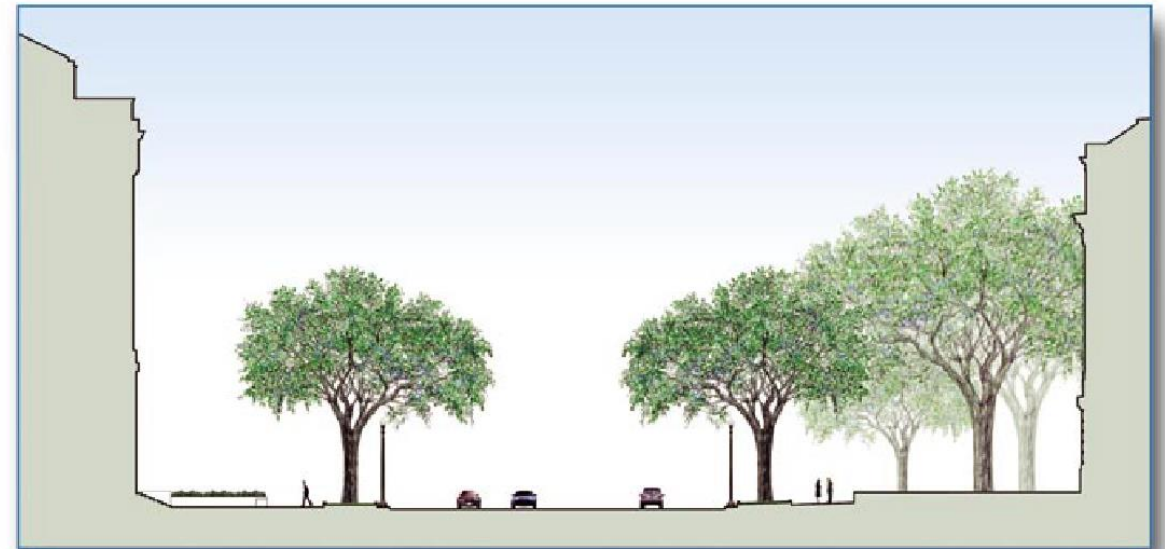
Detonacja -

propagacja strefy spalania z prędkością, która jest większa niż prędkość dźwięku w ośrodku obojętnym (np. przemysłowe materiały wybuchowe)

EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

zapobieganie / eliminowanie zagrożenia

- ❑ maksymalizacja odległości od miejsca eksplozji zmniejsza skutki eksplozji
- ❑ elementy małej architektury miejskiej jako przeszkody na drodze fali uderzeniowej
- ❑ stosowanie ścian odpornych na wybuch
- ❑ niestosowanie na elewacjach elementów niekonstrukcyjnych
- ❑ odpowiedni rodzaj oszklenia, ograniczenie powierzchni okien
- ❑ elewacje o kształtach owalnych są bardziej odporne na eksplozję zewnętrzną



EKSPLOZJA WEWNĘTRZNA **wybuch gazu w budynku**



- ❑ wnioski wyciągnięte z wcześniejszych katastrof pokazują, że zapobieganie eksplozjom gazów jedynie poprzez zmniejszenie prawdopodobieństwa przypadkowego uwolnienia i zapłonu jest niewystarczające
- ❑ odpowiednie podejście na etapie projektowania obiektu eliminuje, bądź ogranicza skutki eksplozji

EKSPLOZJA WEWNĘTRZNA

wybuch gazu - zapobieganie / eliminowanie zagrożenia

proces projektowy

- odpowiednie zaprojektowanie rozkładu pomieszczeń
- oddzielenie od siebie powierzchni użytkowych

budynki o konstrukcji szkieletowej

- ściana lita (bez otworów) - lekkie panele ścienne, złagodzenie skutków eksplozji

powierzchnie upustowe

- upusty podmuchu gazu powinny być skierowane do otwartych przestrzeni, z minimalną liczbą przeszkód/przegród wewnętrznych
- powierzchnie upustowe znajdują się blisko punktu zapłonu - prędkość płomienia będzie niska, turbulencje powstające za przeszkodami będą ograniczone

EKSPLOZJA – metody obliczeniowe

Pełna analiza dynamiczna

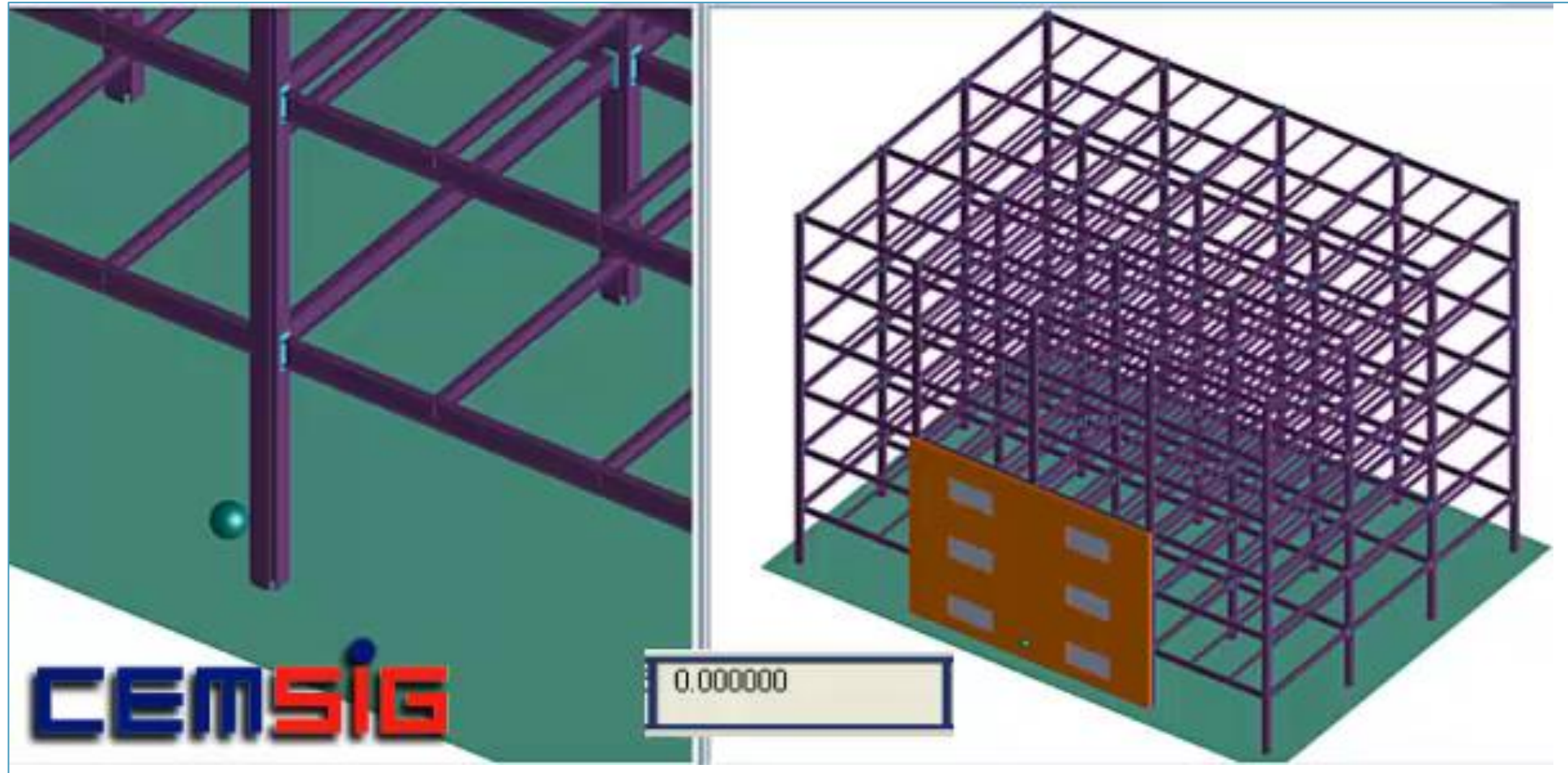
Obciążenie eksplozją i zachowanie konstrukcji (siły wewnętrzne, naprężenia, odkształcenia, ugięcia) są funkcją czasu, wymaga zatem odpowiedniego zdefiniowania i modelowania

- modele materiałów
- scenariusze wybuchu
- warunki brzegowe i stan początkowy
- kryteria zniszczenia
- kroki obliczeniowe – iteracja

Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

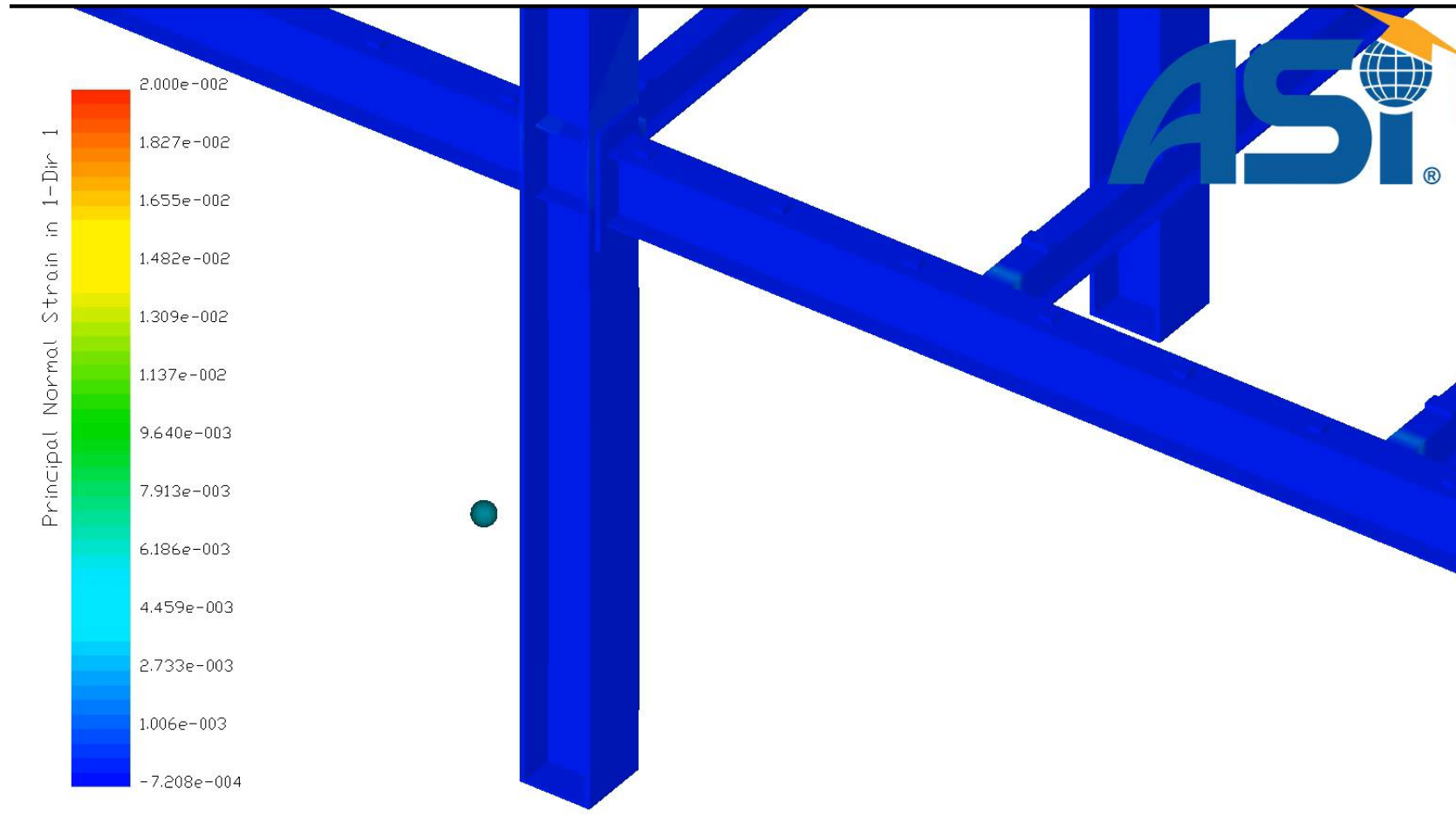
EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Pełna analiza dynamiczna



EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Pełna analiza dynamiczna



EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

- definiuje się scenariusz eksplozji
- element obciążony wybuchem jest zastępowany równoważnym elementem o jednym stopniu swobody SDOF
- definiuje się kształt wykresu obciążenia, powinien on być dopasowany do rodzaju zagrożenia wybuchem
- wyznaczenie odpowiedzi elementu w postaci kąta obrotu θ , oraz współczynnika ciągliwości, μ
- wyniki obliczeń porównywane są z wartościami granicznymi (dla całych budynków, poszczególnych elementów konstrukcyjnych)

EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Parametry obciążenia wybuchem

W pierwszej kolejności definiuje się scenariusz eksplozji:

- przewidywaną masę ładunku **W**
- rodzaj eksplozji i odległość **R** od centrum eksplozji do budynku
- parametry dotyczące wybuchu mogą być określone za pomocą wykresów przedstawionych na Rysunku 15 (podręcznik),

w zależności od przeskalowanej odległości Z , która zależy od masy materiału wybuchowego W , (w kg trotylu – TNT) i rzeczywistej odległości od środka eksplozji kulistej R (w m) do ściany budynku

EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

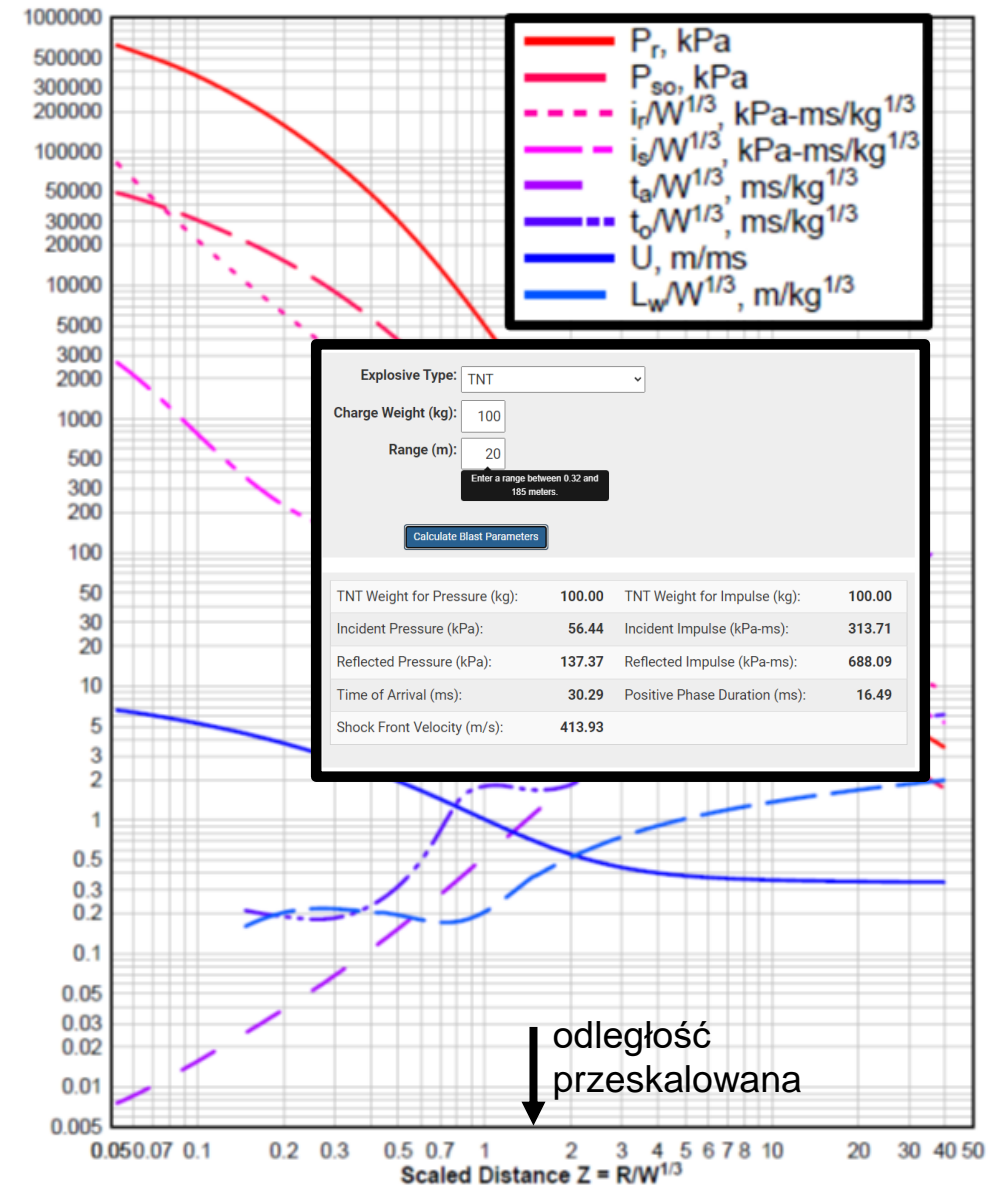
Parametry obciążenia wybuchem

- P_r - wartość szczytowa ciśnienia odbitego
- P_{so} - wartość szczytowa ciśnienia eksplozji
- i_r - wartość całkowitego impulsu odbitego
- i_s - jest wartość impulsu fali uderzeniowej
- t_a - czas nadejścia fali
- t_o - rzeczywisty czas trwania fali uderzeniowej
- U - prędkość propagacji fali uderzeniowej
- L_w - długość fali uderzeniowej

Można do tego celu wykorzystać również stronę internetową UN Safer Guard

<https://unsaferguard.org/>

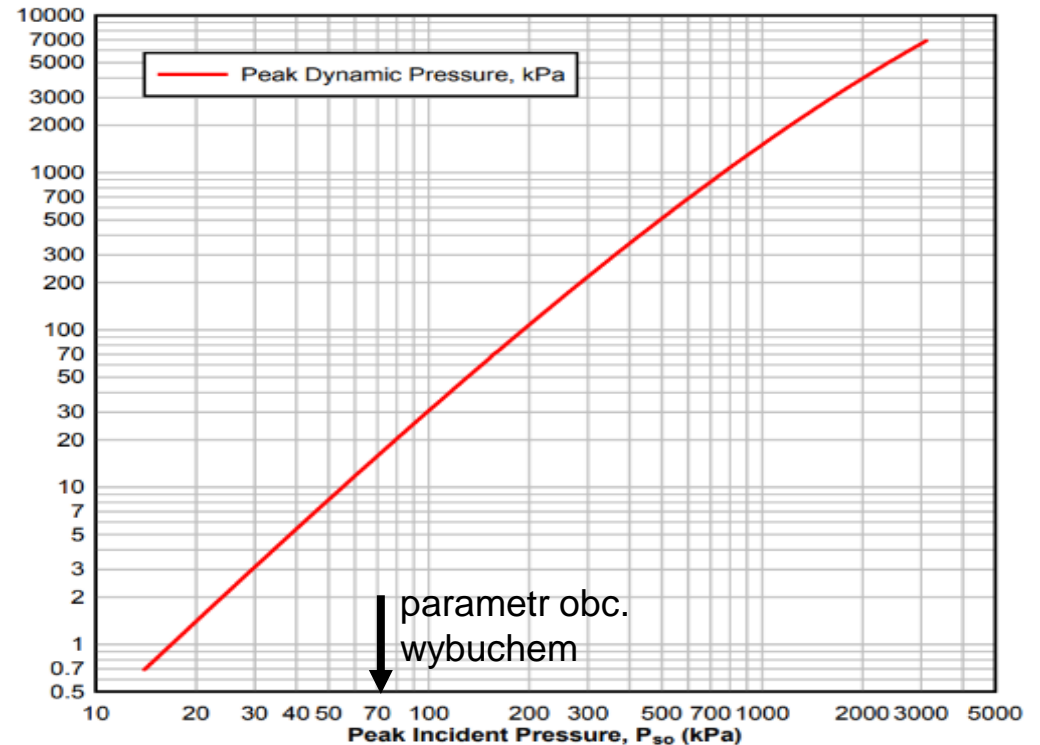
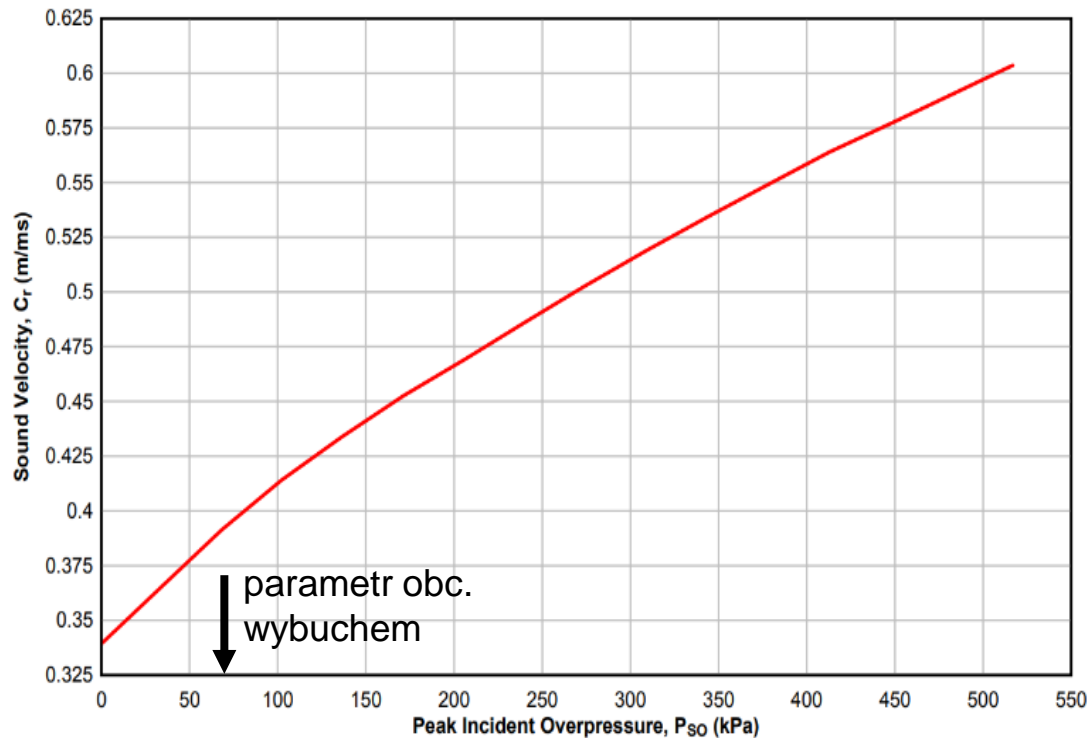
Korzystając ze strony internetowej UN SaferGuard, wartości są już przeskalowane przez $(W^{1/3})$. Jedynie długość fali wymaga przeskalowania.



EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Parametry obciążenia wybuchem

Biorąc pod uwagę wyznaczoną wartość szczytową ciśnienia eksplozji (P_{so}), wyznacza się: prędkość dźwięku w obszarze nadciśnienia (C_r) i szczytowe ciśnienie dynamiczne (q):



EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Parametry obciążenia wybuchem

Następnie obliczane są fikcyjne skrócone przedziały czasowe:

- umowny czas trwania fazy dodatniej
- umowny czas trwania odbitej fali
- czas rozchodzenia
- wartość szczytowa ciśnienia działającego na ścianę

$$t_{0f} = 2 \frac{I_s}{P_{s0}}, ms$$

$$t_{rf} = 2 \frac{I_r}{P_r}, ms$$

$$t_c = \frac{4s_d}{(1 + r_{s.l})C_r}, ms$$

$$P = P_{s0} + q \cdot C_D =, kPa$$

Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

Wymagane jest spełnienie warunku:

$$\frac{\mu_1}{\mu_{\max}} \leq 1,00$$

μ_{\max} - współczynnik z tablicy 5 (podręcznik) zależny od granicznej wartości uszkodzeń B1 do B4

- B1 uszkodzenia powierzchniowe
- B2 uszkodzenie umiarkowane
- B3 ciężkie uszkodzenie
- B4 uszkodzenie niebezpieczne

Typ elementu		B1		B2		B3		B4	
		μ_{\max}	θ_{\max}	μ_{\max}	θ_{\max}	μ_{\max}	θ_{\max}	μ_{\max}	θ_{\max}
Zginanie	Belka krępa†	1	-	3	3°	12	10°	25	20°
	Belka smukła†,‡	0,7	-	0,85	3°	1	-	1,2	-
	Płyta zginana wokół słabej osi	4	1°	8	2°	20	6°	40	12°
Ściskanie	Belka-słup o przekroju krępy†,§	1	-	3	3°	3	3°	3	3°
	Belka-słup o przekroju smukłym†,§	0,7	-	0,85	3°	0,8 5	3°	0,8 5	3°
	Słup (ściskanie osiowe)**	0,9	-	1,3	-	2	-	3	-

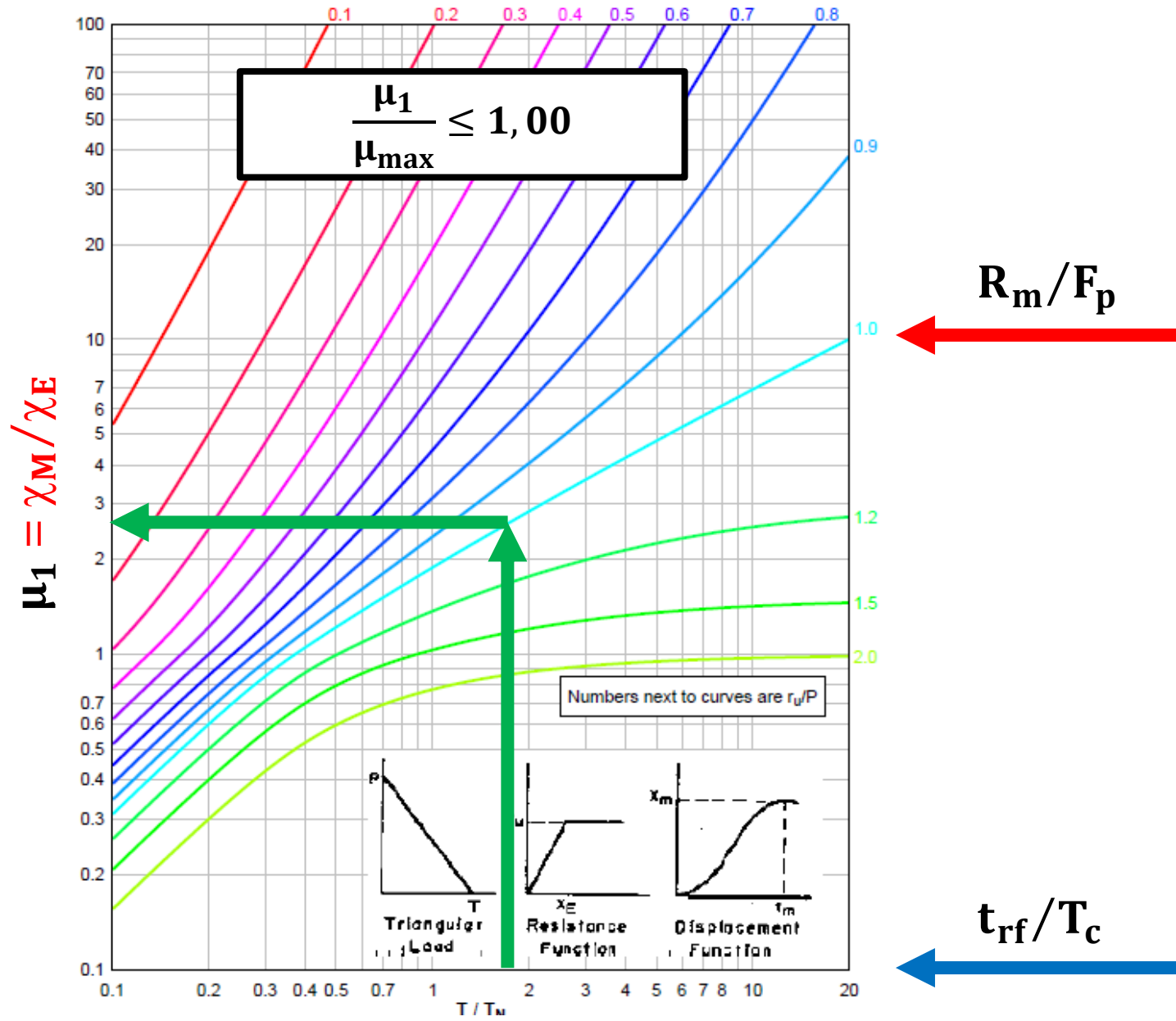
t_{rf} umowny czas trwania odbitej fali

T_c okres drgań własnych

R_m nośność

F_p obciążenie skupione na słupie od eksplozji

μ jest ilorazem maksymalnego przemieszczenia pod wpływem rozpatrywanego obciążenia eksplozją i przemieszczenia sprężystego



Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

$\mu_1 = \chi_M/\chi_E$ - współczynnik z wykresu – rysunek 148 (podręcznik) w zależności od

$$t_{rf}/T_c$$

oraz

$$R_m/F_p$$

t_{rf} - umowny czas trwania fali odbitej, ms

T_c - okres drgań własnych, s

$$t_{rf} = 2I_r/P_r, \text{ ms}$$
$$T_c = 2\pi\sqrt{M_e/K_e}, \text{ s}$$

I_r - wartość całkowita impulsu odbitego, kPa ms, wykres – rysunek 15 (podręcznik)

P_r - wartość szczytowa ciśnienia odbitego, kPa, wykres – rysunek 15 (podręcznik)

M_e - masa efektywna, kg

K_e - sztywność efektywna, kN/m

Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

$$M_e = G_c h_c K_M / g$$

$$K_e = K_c K_L$$

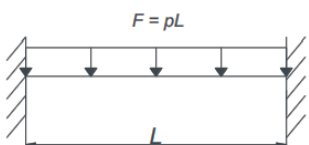
G_c - ciężar słupa, kN/m

h_c - wysokość słupa, m

K_M - współczynnik masy

K_c - stała sztywności, kN/m

K_L - współczynnik obciążenia

Schemat obciążenia	Zakres odkształceń	Współczynnik obciążenia K_L	Współczynnik masy K_M		Współczynnik obciążenie - masa K_{LM}		Nośność graniczna R_m	Stała sprężystości k	Efektywna stała sprężystości k_e	Reakcja dynamiczna V
			Masa skupiona *	Masa równo. rozłożona	Masa skupiona *	Masa równo. rozłożona				
	Sprężysty	0,53	...	0,41	...	0,77	$\frac{12M_{Ps}}{L}$	$\frac{384EI}{L^3}$...	$0,36R_m + 0,14F$
	Sprężysto - plastyczny	0,64	...	0,50	...	0,78	$\frac{8}{L}(M_{Ps} + M_{Pm})$	$\frac{384EI}{5L^3}$	$\frac{307EI}{L^3}$	$0,39R_m + 0,11F$
	Plastyczny	0,50	...	0,33	...	0,66	$\frac{8}{L}(M_{Ps} + M_{Pm})$	0	...	$0,38R_m + 0,12F$

$$K_c = 384 E I_c / 5h_c^3$$

Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

$\mu_1 = \chi_M / \chi_E$ - współczynnik z wykresu – rysunek 148 (podręcznik) w zależności od

$$\boxed{t_{rf}/T_c} \quad \text{oraz} \quad \boxed{R_m/F_p}$$

R_m - nośność słupa, kN, tablica 67 (podręcznik)

F_p - obciążenie skupione na słupie od eksplozji, kN

$$\boxed{\begin{aligned} R_m &= 8 \cdot (2M_{Rd}) / h_c \\ F_p &= F_d h_c \end{aligned}}$$

M_{Rd} - obliczeniowa nośność słupa przy zginaniu, kNm

F_d - obciążenie rozłożone na słupie od eksplozji, kN/m

Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

M_{Rd} - obliczeniowa nośność słupa przy zginaniu, kNm

F_d - obciążenie rozłożone na słupie od eksplozji, kN/m

$$M_{Rd} = W_{plc} f_y DIF$$
$$F_d = P_r w_p$$

W_{plc} - plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju, cm^2

f_y - granica plastyczności stali, MPa

DIF - materiałowy współczynnik dynamiczny, DIF = 1,20

P_r - wartość szczytowa ciśnienia odbitego, kPa, wykres – rysunek 15 (podręcznik)

w_p - szerokość panelu przed słupem, m

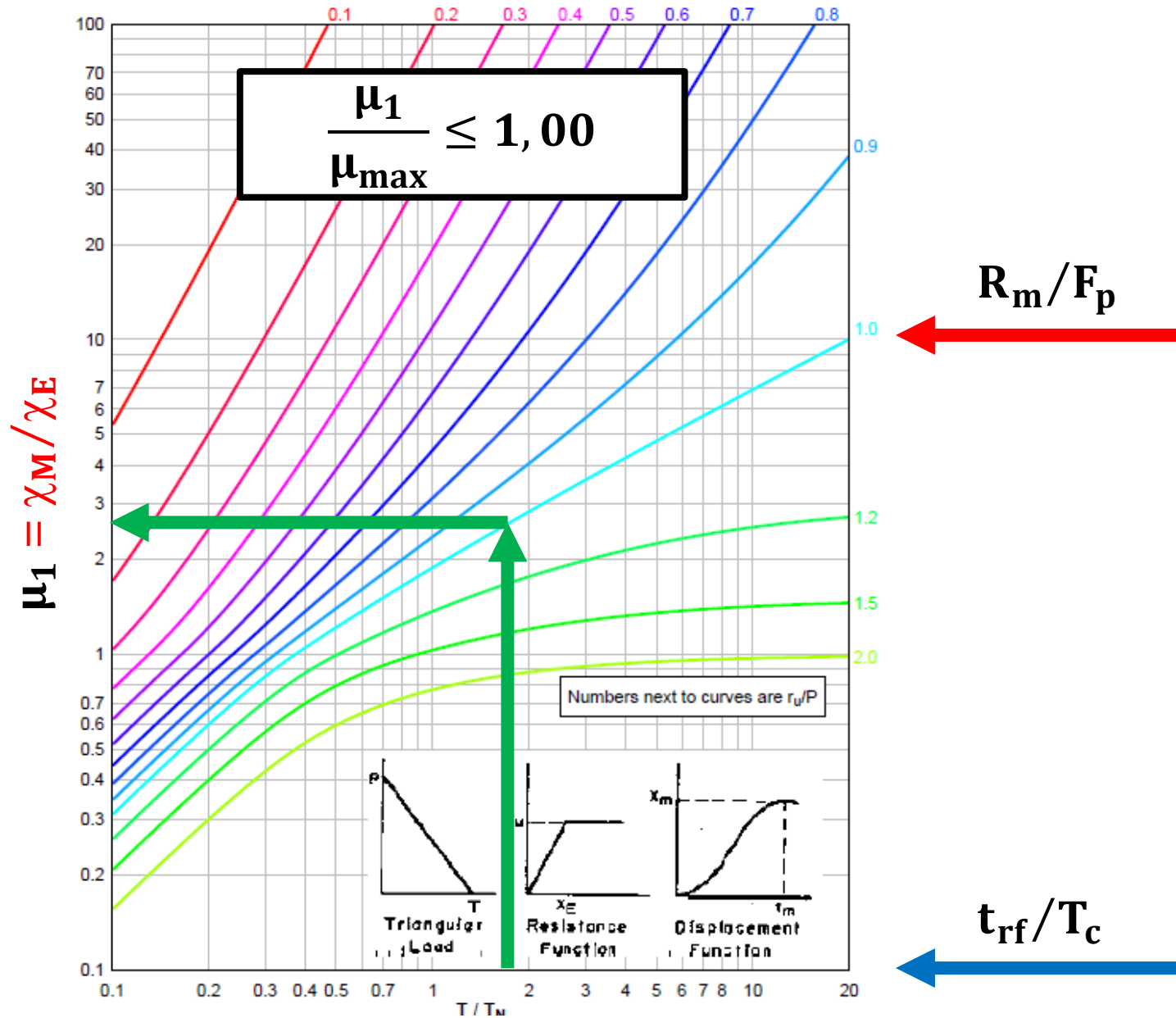
t_{rf} umowny czas trwania odbitej fali

T_c okres drgań własnych

R_m nośność

F_p obciążenie skupione na słupie od eksplozji

μ jest ilorazem maksymalnego przemieszczenia pod wpływem rozpatrywanego obciążenia eksplozją i przemieszczenia sprężystego



Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

$$\chi_e = R_m / K_e$$

$$\chi_M = \mu_1 \chi_e$$

χ_e przemieszczenie odpowiadające osiągnięciu nośności plastycznej, mm

χ_M maksymalne przemieszczenie, mm $\rightarrow \theta_{max}$

- B1 uszkodzenia powierzchniowe
- B2 uszkodzenie umiarkowane
- B3 ciężkie uszkodzenie
- B4 uszkodzenie niebezpieczne

Typ elementu		B1		B2		B3		B4	
		μ_{max}	θ_{max}	μ_{max}	θ_{max}	μ_{max}	θ_{max}	μ_{max}	θ_{max}
Zginanie	Belka krępa†	1	-	3	3°	12	10°	25	20°
	Belka smukła†,‡	0,7	-	0,85	3°	1	-	1,2	-
	Płyta zginana wokół słabej osi	4	1°	8	2°	20	6°	40	12°
Ściskanie	Belka-słup o przekroju krępy†,§	1	-	3	3°	3	3°	3	3°
	Belka-słup o przekroju smukłym†,§	0,7	-	0,85	3°	0,8 5	3°	0,8 5	3°
	Słup (ściskanie osiowe)**	0,9	-	1,3	-	2	-	3	-

WEWĘTRZNA EKSPLOZJA GAZU

Metoda zastępczego ciśnienia statycznego

wartość większa z

$$p_d = 3 + p_{stat}$$

$$p_d = 3 + \frac{p_{stat}}{2} + \frac{0.04}{(A_v/V)^2}$$

- p_d jest równoważnym ciśnieniem statycznym w [kN/m²];
 p_{stat} jest równomiernie rozłożonym ciśnieniem statycznym przy którym zawodzą elementy upustowe w [kN/m²];
 A_v jest powierzchnią elementów upustowych w [m²];
 V jest objętością obudowy prostopadłociennej w [m³].

Stosunek powierzchni elementów upustowych do objętości powinien być zgodny z następującym wzorem:

$$0,05 \text{ m}^{-1} < A_v / V < 0,15 \text{ m}^{-1}$$

WEWĘTRZNA EKSPLOZJA GAZU

Metoda równoważnika trotylowego TNT

- ❑ metoda ekwiwalencji TNT może być użyteczna jako metoda przybliżona, jeśli zastosuje się współczynnik efektywności 20%
- ❑ masa gazu (lub chmury oparów) jest przeliczana na ładunek równoważny TNT
- ❑ równoważny ładunek trotylu szacuje się na podstawie równości energii eksplodującej chmury gazu (metanu)

Równoważną masę trotylu wyznacza się według następującej zależności

$$W_{TNT} = \eta \frac{W_g \times E_c}{E_{TNT}}$$
$$W_{TNT} = 0,16 V [kg]$$

η	jest współczynnikiem sprawności materiału wybuchowego
W_g	jest masą mieszaniny powietrza i gazu palnego
E_c	jest ciepłem spalania materiału palnego (wybuchowego)
E_{TNT}	jest energią detonacji trotylu (TNT)
$V [m^3]$	mniejsza z objętości obszaru przeciążenia lub objętości chmury gazu

EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

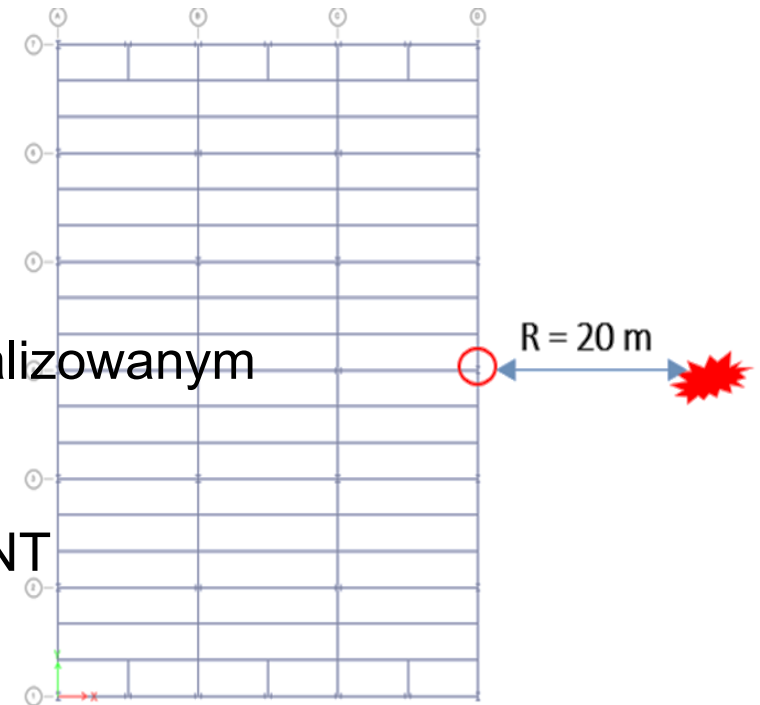
Przykład obliczeniowy - wybuch zewnętrzny

ODDZIAŁYWANIA W WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

- ❑ oddziaływanie spowodowane wybuchem

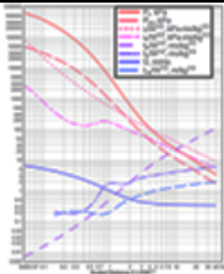
OKREŚLENIE SCENARIUSZA WYBUCHU

- ❑ słup obciążony wybuchem jest słupem obwodowym zlokalizowanym na poziomie parteru w połowie dłuższej elewacji
- ❑ odległość $R = 20 \text{ m}$
- ❑ równoważna masa ładunku wybuchowego $W = 100 \text{ kg TNT}$
- ❑ przeskalowana odległość $Z = 4,309 \frac{\text{m}}{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}$




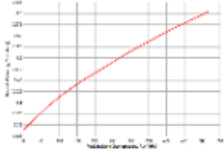
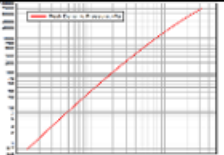
EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Przykład obliczeniowy – parametry obciążenie wybuchem

Wartość szczytowa ciśnienia eksplozji	$P_{so} = 56,44 \text{ kPa}$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>TNT Weight for Pressure (kg):</td> <td>100.00</td> <td>TNT Weight for Impulse (kg):</td> <td>100.00</td> </tr> <tr> <td>Incident Pressure (kPa):</td> <td>56.44</td> <td>Incident Impulse (kPa-ms):</td> <td>313.71</td> </tr> <tr> <td>Reflected Pressure (kPa):</td> <td>137.37</td> <td>Reflected Impulse (kPa-ms):</td> <td>688.09</td> </tr> <tr> <td>Time of Arrival (ms):</td> <td>30.29</td> <td>Positive Phase Duration (ms):</td> <td>16.49</td> </tr> <tr> <td>Shock Front Velocity (m/s):</td> <td>413.93</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00	Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71	Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09	Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49	Shock Front Velocity (m/s):	413.93		
TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00																			
Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71																			
Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09																			
Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49																			
Shock Front Velocity (m/s):	413.93																					
Wartość impulsu	$I_s = 313,71 \text{ kPa} * \text{ms}$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>TNT Weight for Pressure (kg):</td> <td>100.00</td> <td>TNT Weight for Impulse (kg):</td> <td>100.00</td> </tr> <tr> <td>Incident Pressure (kPa):</td> <td>56.44</td> <td>Incident Impulse (kPa-ms):</td> <td>313.71</td> </tr> <tr> <td>Reflected Pressure (kPa):</td> <td>137.37</td> <td>Reflected Impulse (kPa-ms):</td> <td>688.09</td> </tr> <tr> <td>Time of Arrival (ms):</td> <td>30.29</td> <td>Positive Phase Duration (ms):</td> <td>16.49</td> </tr> <tr> <td>Shock Front Velocity (m/s):</td> <td>413.93</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00	Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71	Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09	Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49	Shock Front Velocity (m/s):	413.93		
TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00																			
Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71																			
Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09																			
Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49																			
Shock Front Velocity (m/s):	413.93																					
Wartość szczytowa ciśnienia odbitego	$P_r = 137,37 \text{ kPa}$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>TNT Weight for Pressure (kg):</td> <td>100.00</td> <td>TNT Weight for Impulse (kg):</td> <td>100.00</td> </tr> <tr> <td>Incident Pressure (kPa):</td> <td>56.44</td> <td>Incident Impulse (kPa-ms):</td> <td>313.71</td> </tr> <tr> <td>Reflected Pressure (kPa):</td> <td>137.37</td> <td>Reflected Impulse (kPa-ms):</td> <td>688.09</td> </tr> <tr> <td>Time of Arrival (ms):</td> <td>30.29</td> <td>Positive Phase Duration (ms):</td> <td>16.49</td> </tr> <tr> <td>Shock Front Velocity (m/s):</td> <td>413.93</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00	Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71	Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09	Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49	Shock Front Velocity (m/s):	413.93		
TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00																			
Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71																			
Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09																			
Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49																			
Shock Front Velocity (m/s):	413.93																					
Wartość całkowita impulsu odbitego	$I_r = 688,09 \text{ kPa} * \text{ms}$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>TNT Weight for Pressure (kg):</td> <td>100.00</td> <td>TNT Weight for Impulse (kg):</td> <td>100.00</td> </tr> <tr> <td>Incident Pressure (kPa):</td> <td>56.44</td> <td>Incident Impulse (kPa-ms):</td> <td>313.71</td> </tr> <tr> <td>Reflected Pressure (kPa):</td> <td>137.37</td> <td>Reflected Impulse (kPa-ms):</td> <td>688.09</td> </tr> <tr> <td>Time of Arrival (ms):</td> <td>30.29</td> <td>Positive Phase Duration (ms):</td> <td>16.49</td> </tr> <tr> <td>Shock Front Velocity (m/s):</td> <td>413.93</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00	Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71	Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09	Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49	Shock Front Velocity (m/s):	413.93		
TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00																			
Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71																			
Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09																			
Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49																			
Shock Front Velocity (m/s):	413.93																					
Czas nadejścia	$t_a = 30,29 \text{ ms}$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>TNT Weight for Pressure (kg):</td> <td>100.00</td> <td>TNT Weight for Impulse (kg):</td> <td>100.00</td> </tr> <tr> <td>Incident Pressure (kPa):</td> <td>56.44</td> <td>Incident Impulse (kPa-ms):</td> <td>313.71</td> </tr> <tr> <td>Reflected Pressure (kPa):</td> <td>137.37</td> <td>Reflected Impulse (kPa-ms):</td> <td>688.09</td> </tr> <tr> <td>Time of Arrival (ms):</td> <td>30.29</td> <td>Positive Phase Duration (ms):</td> <td>16.49</td> </tr> <tr> <td>Shock Front Velocity (m/s):</td> <td>413.93</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00	Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71	Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09	Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49	Shock Front Velocity (m/s):	413.93		
TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00																			
Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71																			
Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09																			
Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49																			
Shock Front Velocity (m/s):	413.93																					
Czas trwania fazy dodatniej	$t_0 = 16,49 \text{ ms}$	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>TNT Weight for Pressure (kg):</td> <td>100.00</td> <td>TNT Weight for Impulse (kg):</td> <td>100.00</td> </tr> <tr> <td>Incident Pressure (kPa):</td> <td>56.44</td> <td>Incident Impulse (kPa-ms):</td> <td>313.71</td> </tr> <tr> <td>Reflected Pressure (kPa):</td> <td>137.37</td> <td>Reflected Impulse (kPa-ms):</td> <td>688.09</td> </tr> <tr> <td>Time of Arrival (ms):</td> <td>30.29</td> <td>Positive Phase Duration (ms):</td> <td>16.49</td> </tr> <tr> <td>Shock Front Velocity (m/s):</td> <td>413.93</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00	Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71	Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09	Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49	Shock Front Velocity (m/s):	413.93		
TNT Weight for Pressure (kg):	100.00	TNT Weight for Impulse (kg):	100.00																			
Incident Pressure (kPa):	56.44	Incident Impulse (kPa-ms):	313.71																			
Reflected Pressure (kPa):	137.37	Reflected Impulse (kPa-ms):	688.09																			
Time of Arrival (ms):	30.29	Positive Phase Duration (ms):	16.49																			
Shock Front Velocity (m/s):	413.93																					
Długość fali uderzeniowej	$L_w = 4,64 \text{ m}$	 <p>rysunek 15</p>																				

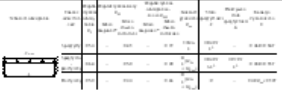
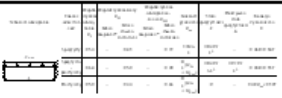
EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Przykład obliczeniowy – parametry obciążenie wybuchem

Prędkość propagacji fali uderzeniowej	$U = 413,93 \frac{m}{s}$	
Prędkość dźwięku w obszarze nadciśnienia	$C_r = 0,38 \frac{m}{ms}$	 <p>rysunek 17</p>
Szczytowe ciśnienie dynamiczne	$q = 8,50 \text{ kPa}$	 <p>rysunek 16</p>
Umowny czas trwania fazy dodatniej	$t_{of} = 2 \frac{I_s}{P_{s0}} = 11,20 \text{ ms}$	wzór (5)
Umowny czas trwania fali odbitej	$t_{rf} = 2 \frac{I_r}{P_r} = 10,02 \text{ ms}$	wzór (6)
Czas rozchodzenia	$t_c = \frac{4s_d}{(1 + r_{s,l})C_r} = 14,04 \text{ ms}$	wzór (4)
Szczytowe ciśnienie działające na ścianę	$P = P_{s0} + qC_D = 64,94 \text{ kPa}$	


EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Przykład obliczeniowy – Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

Wysokość słupa	$h_c = 4 \text{ m}$	
Szerokość panelu przed słupem	$w_p = 5 \text{ m}$	
Ciężar własny słupa	$G_c = 1,834 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Współczynnik obciążenia	$K_L = 0,64$	 tablica 67
Współczynnik masy	$K_M = 0,50$	 tablica 67
Moduł sprężystości stali	$E = 210 \text{ GPa}$	

EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Przykład obliczeniowy – Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

Moment bezwładności	$I_c = 51890 \text{ cm}^4$	
Sztywność słupa	$K_c = \frac{384E \cdot I_c}{5h_c^3} = 130762,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	 tablica 67
Masa efektywna słupa	$M_e = \frac{G_c \cdot h_c \cdot K_M}{g} = 374,03 \text{ kg}$	
Sztywność efektywna słupa	$K_e = K_c K_L = 83688,19 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
Okres drgań własnych	$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{M_e}{K_e}} = 0,01328 \text{ s}$	
Proporcja	$\frac{t_{rf}}{T_c} = 0,75$	

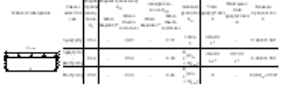





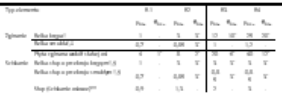
EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Przykład obliczeniowy – Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

Obciążenie rozłożone na słupie od eksplozji	$F_d = P_r w_p = 686,85 \frac{kN}{m}$	
Obciążenie skupione na słupie od eksplozji	$F_p = F_d h_c = 2747,4 kN$	
Plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju	$W_{pl} = 3162 cm^3$	
Materiałowy współczynnik dynamiczny	$DIF = 1,20$	
Granica plastyczności stali	$f_y = 355 \frac{N}{mm^2}$	
Obliczeniowa nośność przy zginaniu słupa	$M_{Rd} = W_{pl.c} f_y DIF$ $= 1347,01 kNm$	

EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Przykład obliczeniowy – Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

Nośność słupa	$R_m = \frac{8(2M_{Rd})}{h_c} = 5388,05 \text{ kN}$	 tablica 67
Proporcja	$\frac{R_m}{F_p} = 1,96$	
Współczynnik 	$\mu_1 = 0,80$ 	 rysunek 148
Przemieszczenia odpowiadające osiągnięciu nośności plastycznej	$\chi_e = \frac{R_m}{K_e} = 64,38 \text{ mm}$	
Maksymalne przemieszczenie	$\chi_M = \mu_1 \times \chi_e = 51,51 \text{ mm}$	
Sprawdzenie 	$\frac{\mu_1}{\mu_{max}} = 0,80$ 	 tablica 5

EKSPLOZJA ZEWNĘTRZNA

Przykład obliczeniowy – Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

Typ elementu		B1		B2		B3		B4	
		μ_{\max}	θ_{\max}	μ_{\max}	θ_{\max}	μ_{\max}	θ_{\max}	μ_{\max}	θ_{\max}
Zginanie	Belka krępa†	1	-	3	3°	12	10°	25	20°
	Belka smukła†,‡	0,7	-	0,85	3°	1	-	1,2	-
	Płyta zginana wokół słabej osi	4	1°	8	2°	20	6°	40	12°
Ściskanie	Belka-słup o przekroju krępy†,§	1	-	3	3°	3	3°	3	3°
	Belka-słup o przekroju smukłym†,§	0,7	-	0,85	3°	0,8 5	3°	0,8 5	3°
	Słup (ściskanie osiowe)**	0,9	-	1,3	-	2	-	3	-

B1 uszkodzenia powierzchniowe; B2 uszkodzenie umiarkowane;
B4 uszkodzenie niebezpieczne; poza B4 awaria

B3 ciężkie uszkodzenie;

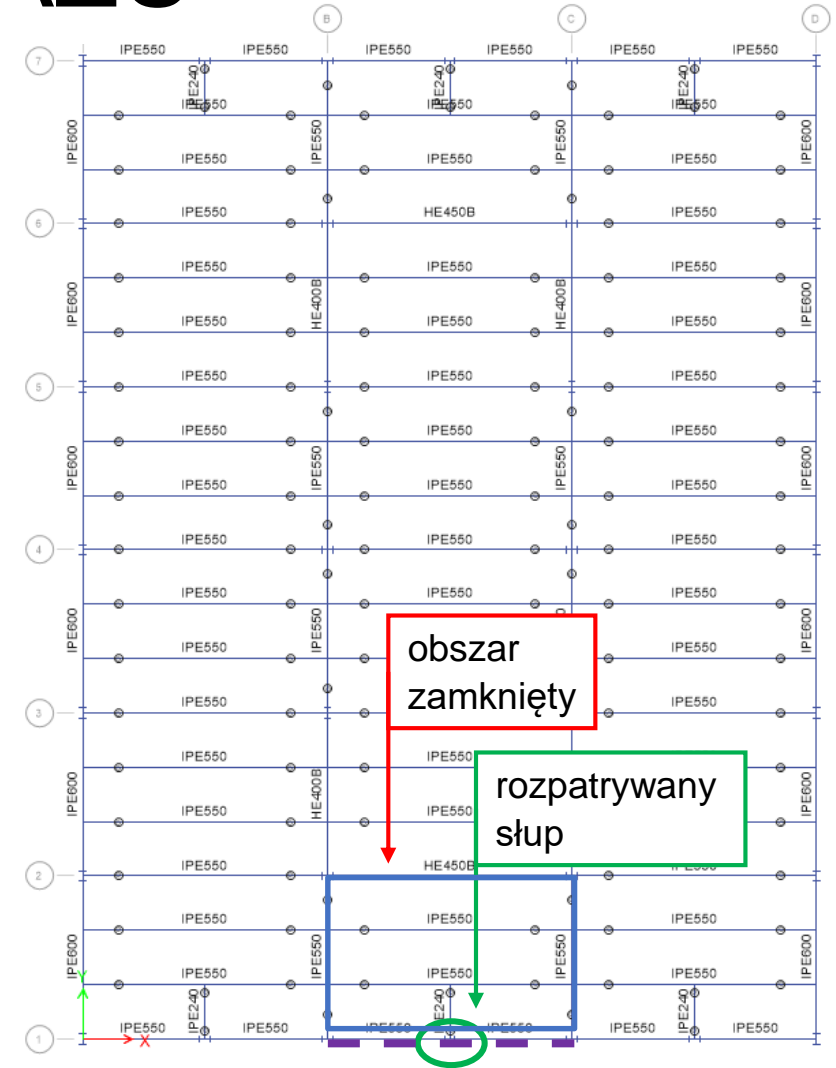
WEWĘTRZNA EKSPLOZJA GAZU

Przykład obliczeniowy

- ❑ oddziaływanie wyjątkowe spowodowane eksplozją gazu
- ❑ powierzchnię upustową stanowi ściana zewnętrzna wykonana z okien szklanych, podczas gdy pozostałe trzy ściany wewnętrzne są wykonane z mocniejszych materiałów (bez wentylacji)
- ❑ parametry strefy eksplozji

L	12	m	długość
B	8	m	szerokość
H	4	m	wysokość
A_v	48	m^2	powierzchnia upustowa
V	384	m^3	objętość strefy

- ❑ ciśnienie, przy którym następuje awaria elementów upustowych, $p_{stat} = 3 \text{ kN/m}^2$



WEWĘTRZNA EKSPLOZJA GAZU

Przykład obliczeniowy - równoważne podejście statyczne

- ❑ równoważne ciśnienie statyczne dla wewnętrznej eksplozji gazu przyjęto jako wartość maksymalną z obliczonych poniżej

$$p_d = 3 + p_{stat} = 3 + 3 = 6 \text{ kN/m}^2$$

$$p_d = 3 + \frac{p_{stat}}{2} + \frac{0.04}{(A_v/V)^2} = 3 + \frac{3}{2} + \frac{0.04}{(48/384)^2} = 7,6 \text{ kN/m}^2$$

- ❑ ciśnienie to zostało przyłożone jako oddziaływanie liniowe, równomiernie rozłożone, działające na wysokości słupa, rozpatrując szerokość zbierania obciążenia wynoszącą 6 m
- ❑ liniowa analiza sprężysta została przeprowadzana na pełnym modelu 3D z zastosowaniem oprogramowania wykorzystującego MES
- ❑ kryteria akceptacji podano w kategorii współczynników wyężenia (UF) kombinacja wyjątkowa

Kształtownik	Oś	Podpora dolna	N (kN)	M (kNm)	UF (-)
HEB500	słaba	Utwierdzenie	612	72	0,279

WEWĘTRZNA EKSPLOZJA GAZU

Przykład obliczeniowy - podejście dynamiczne (metoda równoważnika trotylowego)

- ❑ objętość mieszanki gaz-powietrze jest zastępowana w obliczeniach równoważnym ładunkiem trotylu - zastosowano procedurę jak w przypadku eksplozji zewnętrznej
- ❑ definicja scenariusza eksplozji gazu
- ❑ założono objętość pomieszczenia $V = 384 \text{ m}^3$,
- ❑ przyjęto stężenie metanu 6% ,
- ❑ ciężar objętościowy metanu $\gamma = 0,668 \text{ kg/m}^3$
- ❑ masa metanu $W_g = V \cdot \gamma \cdot 6\% = 15,4 \text{ kg}$
- ❑ równoważna masa trotylu $W_{TNT} = \eta \frac{W_g \times E_c}{E_{TNT}} = 40,3 \text{ kg}$
- ❑ współczynnik sprawności $n = 0,2$
- ❑ ciepło spalania metanu $E_c = 55 \text{ MJ/kg}$
- ❑ energia detonacji TNT $E_{TNT} = 4,2 \text{ MJ/kg}$
- ❑ Analiza zastępczego modelu o pojedynczym stopniu swobody SDOF

Dziękuję za uwagę

Rzeszów 19.05.2022

OKREŚLONE ZAGROŻENIA

Pożar jako zdarzenie wyjątkowe

Zdzisław Pisarek

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

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

- * Pożar jest niekontrolowanym w czasie i przestrzeni procesem spalania materiałów w atmosferze.
- * Wyjątkowe zdarzenie pożarowe to zdarzenie wykraczające poza przypadki uwzględnione w Eurokodach.
- * Konstrukcje powinny być zaprojektowane tak, aby spełniały *minimalną wymaganą odporność ogniową*, która jest zwykle oparta na koncepcji *minimalnego wymaganego czasu działania ognia*. Koncepcja ta ogranicza do akceptowalnego poziomu prawdopodobieństwo utraty życia ludzkiego i/lub rozległych uszkodzeń konstrukcji.
- * Części 1-2 EC 3 i EC4 przedstawiają zasady projektowania w warunkach pożaru dla konstrukcji stalowych i zespolonych.

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

ZAPOBIEGANIE/ELIMINOWANIE ZAGROŻENIA

- * **Należy rozważyć środki mające na celu zapobieżenie i/lub ograniczenie akcji pożarowej i/lub uniknięcie rozprzestrzeniania się pożaru**

- * **Aspekty regulowane przez prawo:**
 - * Zakaz składowania towarów w pobliżu słupów,
 - * Kontrola materiałów wykorzystywanych na elewacje,
 - * Odległość między budynkami w celu zmniejszenia ryzyka rozprzestrzeniania się ognia.

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

ZAPOBIEGANIE/ELIMINOWANIE ZAGROŻENIA

* **Systemy zapobiegające rozprzestrzenianiu się pożaru:**

* Gaśnice - uruchamiane ręcznie, w momencie pojawienia się ognia



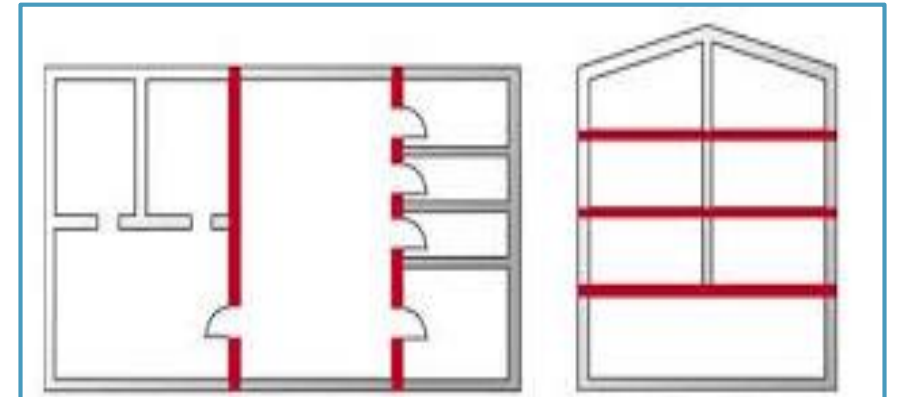
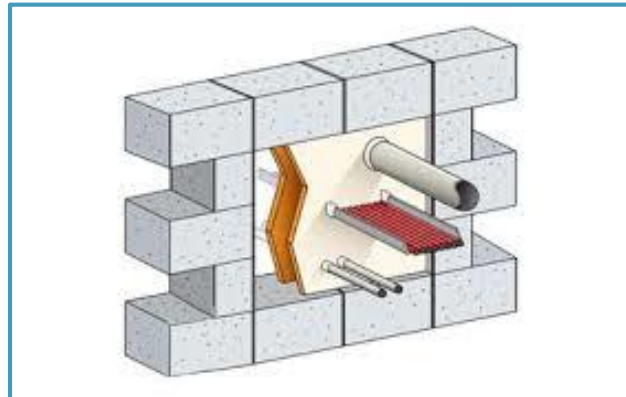
* Tryskacze - systemy automatyczne uruchamiane w momencie pojawienia się dymu lub wysokiej temperatury



POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

ZAPOBIEGANIE/ELIMINOWANIE ZAGROŻENIA (ciąg dalszy)

- * **Systemy zapobiegające rozprzestrzenianiu się pożaru:**
 - * Ściany przeciwpożarowe - izolacja pionowa zapobiegająca rozprzestrzenianiu się ognia.
 - * Izolacje otworów wentylacyjnych - izolacja wszelkich otworów pomiędzy pomieszczeniami.
 - * Podział na strefy - podzielenie budynku na strefy, pomiędzy którymi pożar nie może się rozprzestrzeniać



POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

ZAPOBIEGANIE/ELIMINOWANIE ZAGROŻENIA (ciąg dalszy)

- * **Systemy szybkiego wykrywania i wczesnego ostrzegania:**
 - * Czujniki dymy
 - * Czujniki temperatury
 - * Systemy alarmowe
 - * Oznaczenia dróg ewakuacyjnych



POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

* Przykładem pożaru jako zdarzenia wyjątkowego jest lokalny pożar wokół słupa, który w normalnej sytuacji pożarowej nie powinien mieć miejsca

Scenariusz	Średnica podstawy ognia	Gęstość wydzielania ciepła	Gęstość obciążenia ogniowego	Wskaźnik wzrostu pożaru
A	2 m	250 kW/m ² (budynek biurowy)	511 MJ/m ² (budynek biurowy)	300 sec (budynek biurowy)
B	1 m	500 kW/m ² (budynek biurowy)	511 MJ/m ² (budynek biurowy)	300 sec (budynek biurowy)
C	2 m	250 kW/m ² (powierzchnia handlowa)	730 MJ/m ² (powierzchnia handlowa)	150 sec (powierzchnia handlowa)
D	1 m	500 kW/m ² (powierzchnia handlowa)	730 MJ/m ² (powierzchnia handlowa)	150 sec (powierzchnia handlowa)

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

- * Analiza pożaru lokalnego może być uwzględniona w oparciu o Załącznik C do normy EN 1991-1-2.
- * Wystąpienie zjawiska rozgorzenia jest mało prawdopodobne
- * W zależności od wielkości strefy i pożaru, **może ale nie musi**, oddziaływać na sufit strefy pożarowej

* Długość płomienia

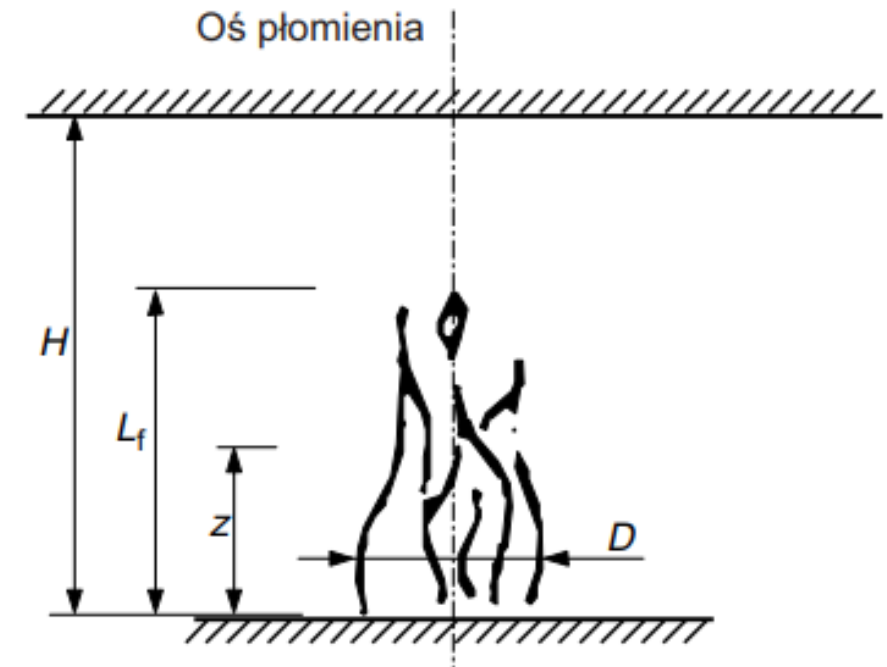
$$L_f = 0.0148Q^{0.4} - 1.02D$$

gdy $L_f \geq H$ - ogień uderza w strop

H – wysokość pomieszczenia

Q – szybkość wydzielania ciepła

D – średnica pożaru



POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

* Analiza pożaru lokalnego może być uwzględniona w oparciu o Załącznik C do normy EN 1991-1-2.

* Temperatura płomienia

(gdy $L_f < H$)

$$\theta_{(z)} = 20 + 0.25Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \leq 900$$

gdzie Q_c część konwekcyjna szybkości wydzielania ciepła (= 0,8Q)
 Z wysokość płomienia wzdłuż jego osi
 Z_0 wirtualny początek pożaru

$$Z_0 = -1.02D + 0.00524Q^{2/5}$$

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

* Analiza pożaru lokalnego może być uwzględniona w oparciu o Załącznik C do normy EN 1991-1-2.

* Strumień ciepła netto na poziomie sufitu

(gdy $L_f \geq H$)

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c (\theta_m - 20) + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_m + 273)^4 - (20 + 273)^4]$$

gdzie \dot{h} strumień ciepła odbierany przez narażony na działanie ognia element na jednostkę powierzchni na poziomie stropu
 α_c współczynnik przenikania ciepła przez konwekcję
 θ_m temperatura na powierzchni elementu
 Φ współczynnik konfiguracji
 ε_m emisyjność powierzchni elementu
 ε_f emisyjność ognia
 σ stała Stephana Boltzmanna ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

- * **Alternatywnie można zastosować zaawansowane modele pożarowe:**
 - * **Modele strefowe** - patrz Załącznik D normy EN 1991-1-2 zawierające podstawowe równania zachowania masy i energii.
Przykłady oprogramowania, które można wykorzystać to CFAST z NIST lub OZONE opracowany na Uniwersytecie w Liege
 - * **Model CFD (obliczeniowy model dynamiki płynów)** – zobacz załącznik D do normy EN 1991-1-2.
Przykładem oprogramowania, które może być użyte do analizy CFD jest FDS z NIST.

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

NASTĘPUJĄCE PO SOBIE ZDARZENIA WYJĄTKOWE

- * Inną sytuacją, w której pożar jest uznawany za obciążenie wyjątkowe, są przypadki, w których pożar pojawia się po pierwszym zdarzeniu wyjątkowym, np.:
- * Pożar po trzęsieniu ziemi



Kobe, 1995 – Pożar po trzęsieniu ziemi

POŻAR JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

NASTĘPUJĄCE PO SOBIE ZDARZENIA WYJĄTKOWE

* Pożar po uderzeniu/wybuchu

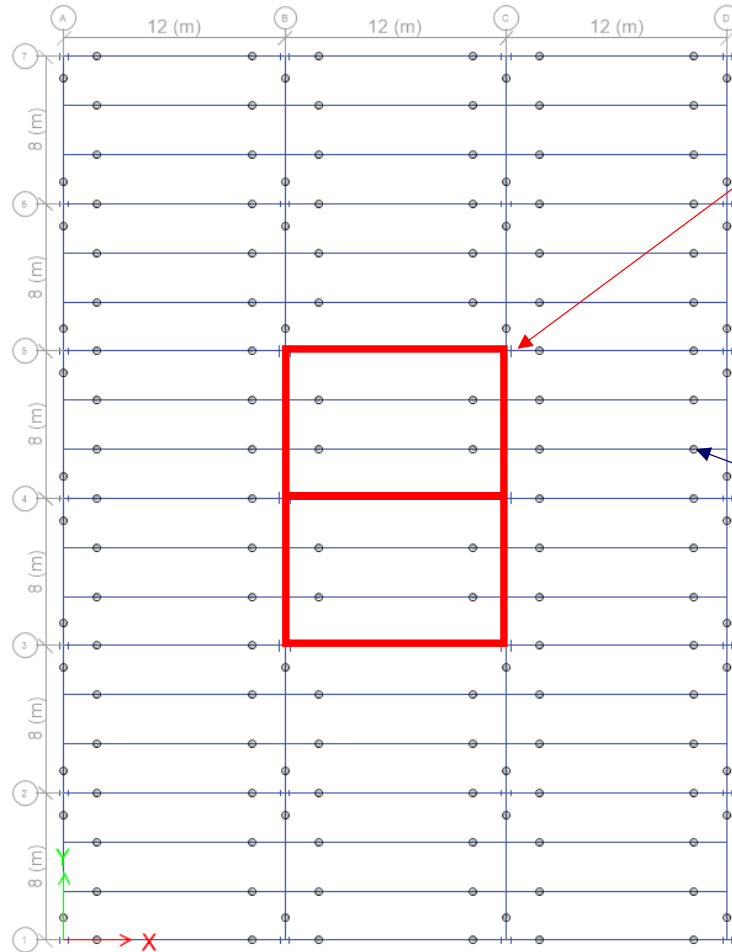
Twin Towers, 2001
Pożar po uderzeniu/wybuchu



W takich sytuacjach konstrukcja jest już uszkodzona w wyniku pierwszego zdarzenia, zatem standardowe projektowanie przeciwpożarowe nie jest już wystarczające.

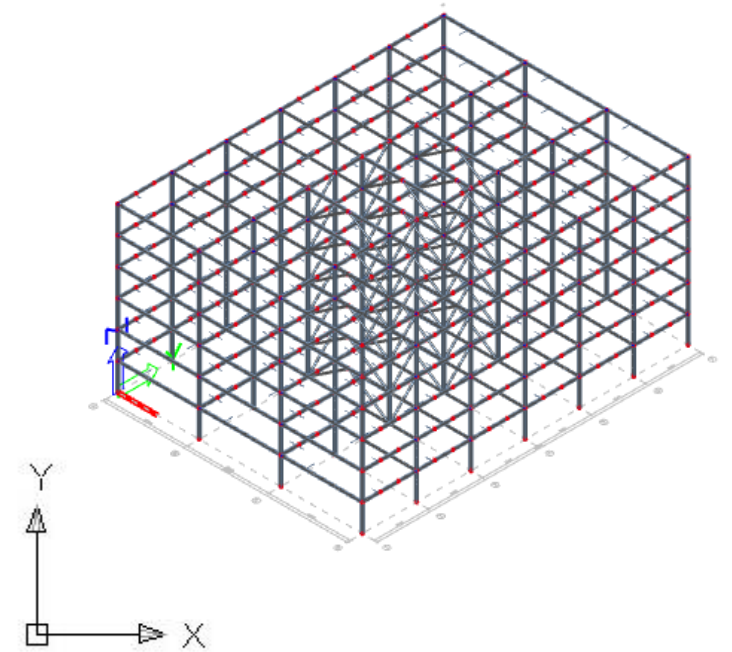
PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

KONSTRUKCJA ZESPOLONA W STREFIE ASEJSMICZNEJ



Inner Braced Core
Rigid frame

Pinned elements



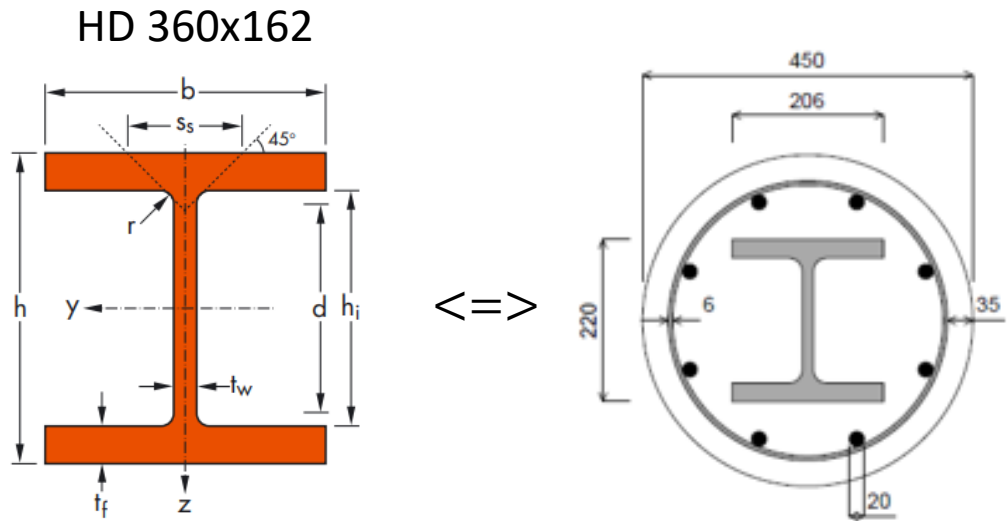
KSZTAŁTOWNIKI

Element	Typ	Kształtownik	Wykorzystanie		Decydujące kryterium nośności (ULS / SLS)
			ULS	SLS	
Belki	Belki obwodowe	IPE 450	0.93	0.80	- Etap końcowy – zmiążdżenie ściskanego pasa betonowego
		IPE 500	0.96	0.86	- Etap końcowy - ugięcie
	Belki wewnętrzne	IPE 360	0.95	0.98	- Etap końcowy - zginanie
					- Etap końcowy - ugięcie
Stupy*	Stupy obwodowe	HD 360x162	0.61	-	- Etap końcowy - zginanie i ściskanie osiowe
	Stupy wewnętrzne	HD 400x216	0.78	-	- Etap końcowy - zginanie i ściskanie osiowe
Układ stężeń	Kształtowniki zamknięte okrągłe	CHS 219.1x5.0	0.71	-	- Etap końcowy - zginanie i ściskanie osiowe

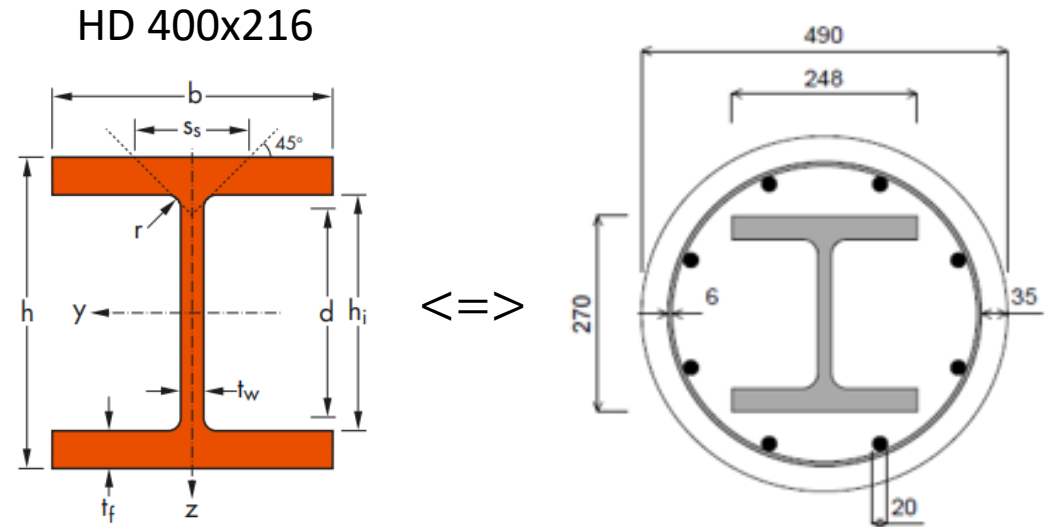
* Rozważano również stupy zespolone o równoważnych właściwościach

SŁUPY ZESPOŁONE O RÓWNOWAŻNYCH WŁAŚCIWOŚCIACH

Słupy obwodowe



Słupy wewnętrzne



POŁĄCZENIA

Położenie	Rodzaj połączenia	Nośność na ścinanie (kN)	Nośność na zginanie (kNm)	Decydujące kryterium nośności	UF
obwodowe	Z blachą głowicową	289.38	-	Nośność na ścinanie grupy śrub	0.73
	Z przykładką środника	297.96	-	Nośność na ścinanie grupy śrub	0.71
wewnętrzne	Z blachą głowicową	289.38	-	Nośność na ścinanie grupy śrub	0.64
	Z przykładką środnika	265.89	-	Docisk śrub do podpieranego środnika belki	0.70

"Zastosowano kotki sworzniowe Nelson $d=19\text{mm}$, $h=100\text{ mm}$ w jednym rzędzie oraz zbrojenie płyty podłużne i poprzeczne $\phi 12//100$

OKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE

* Pożar lokalny

Modele pożarów lokalnych

ODDZIAŁYWANIA W WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

- * Obciążenia stałe DL
- * Obciążenia zmienne LL
- * Oddziaływanie pożaru A_{Ed}

KOMBINACJA ODDZIAŁYWAŃ W PRZYPADKU WYJĄTKOWEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

$$DL + 0.5 \times LL + A_{Ed}$$

OKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE

* Pożar lokalny

Modele pożarów lokalnych

DEFINICJA LOKALNYCH SCENARIUSZY POŻAROWYCH

- * Zdefiniowano cztery scenariusze, począwszy od scenariusza podstawowego uwzględniającego **standardowe wartości jak dla budynku biurowego**.
- * W trzech pozostałe scenariuszach rozpatrzono wartości „przeszacowane”: przyjęto podwójną wartość szybkości wydzielania ciepła (500 kW/m^2), lub przyjęto gęstość obciążenia ogniowego i szybkości rozwoju pożaru o wartościach bardziej surowych, niż dla budynków biurowych (przyjęto je jak dla budynku posiadającego powierzchnię użytkową określoną jako „powierzchnia handlowa”).

OKREŚLONE ODDZIAŁYWANIA WYJĄTKOWE

- * Dla wszystkich scenariuszy przyjęto założenie, że pożar zlokalizowany jest tuż przy słupie, tzn. odległość pomiędzy zewnętrzną częścią okrągłej podstawy pożaru a słupem jest zerowa.

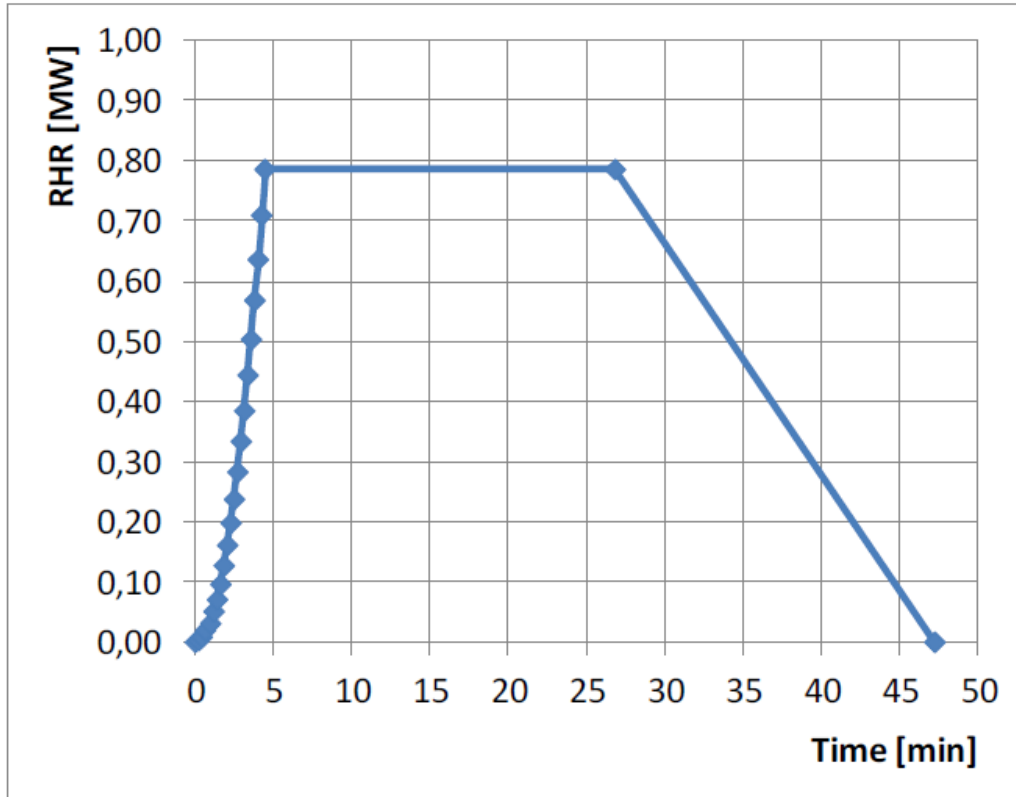
Scenario A		
	Diameter of the fire basis	2 m
	Rate of Heat Release density	250 kW/m ² (office building EN 1991-1-2)
	Fire load density	511 MJ/m ² (office building EN 1991-1-2)
	Fire growth rate	300 sec (office building EN 1991-1-2)
Scenario B		
	Diameter of the fire basis	1 m
	Rate of Heat Release density	500 kW/m ²
	Fire load density	511 MJ/m ² (office building EN 1991-1-2)
	Fire growth rate	300 sec (office building EN 1991-1-2)

Scenario C		
	Diameter of the fire basis	2 m
	Rate of Heat Release density	250 kW/m ² (commercial area EN 1991-1-2)
	Fire load density	730 MJ/m ² (commercial area EN 1991-1-2)
	Fire growth rate	150 sec (commercial area EN 1991-1-2)
Scenario D		
	Diameter of the fire basis	1 m
	Rate of Heat Release density	500 kW/m ²
	Fire load density	730 MJ/m ² (commercial area EN 1991-1-2)
	Fire growth rate	150 sec (commercial area EN 1991-1-2)

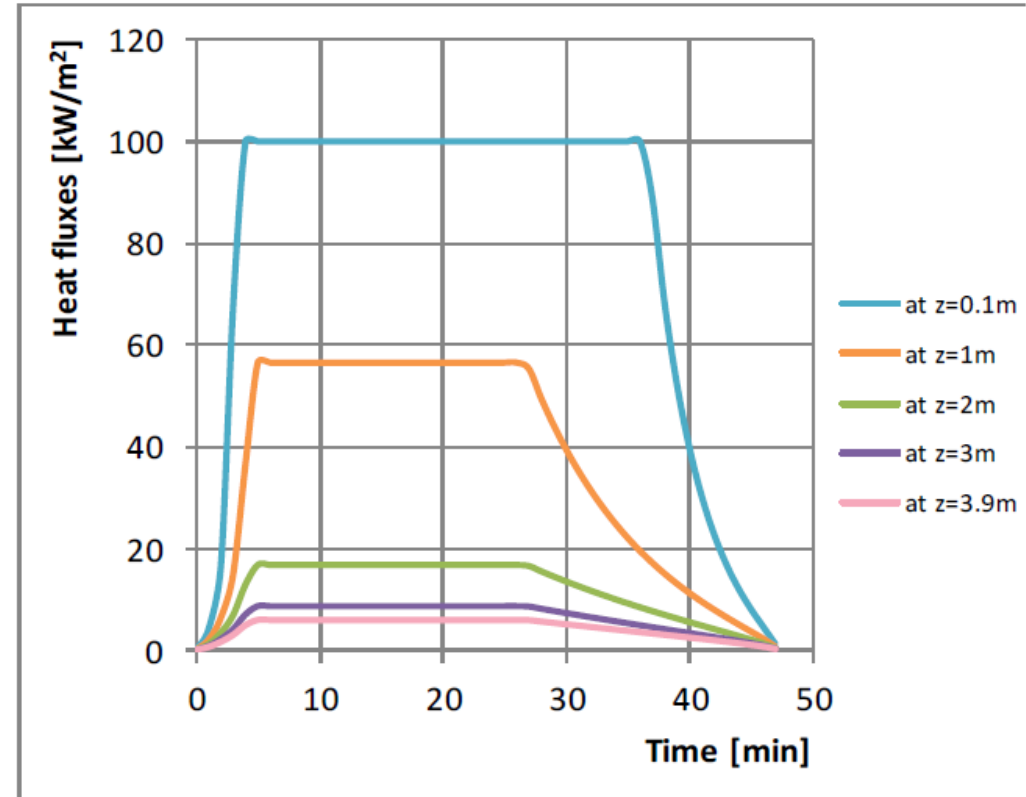
- * W przypadku każdego scenariusza zastosowano oprogramowanie OZone® (Cadorin, 2003), wykorzystujące model LOCAFI (Brasseur i in., 2018) oraz zależności z normy PN-EN 1991-1-2,

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 1



a)

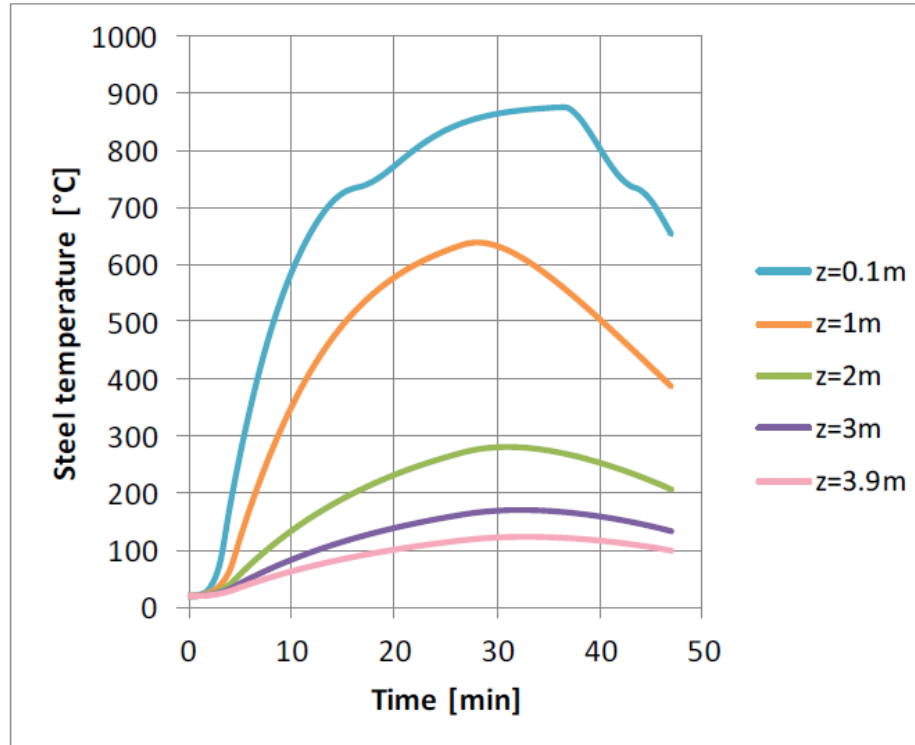


b)

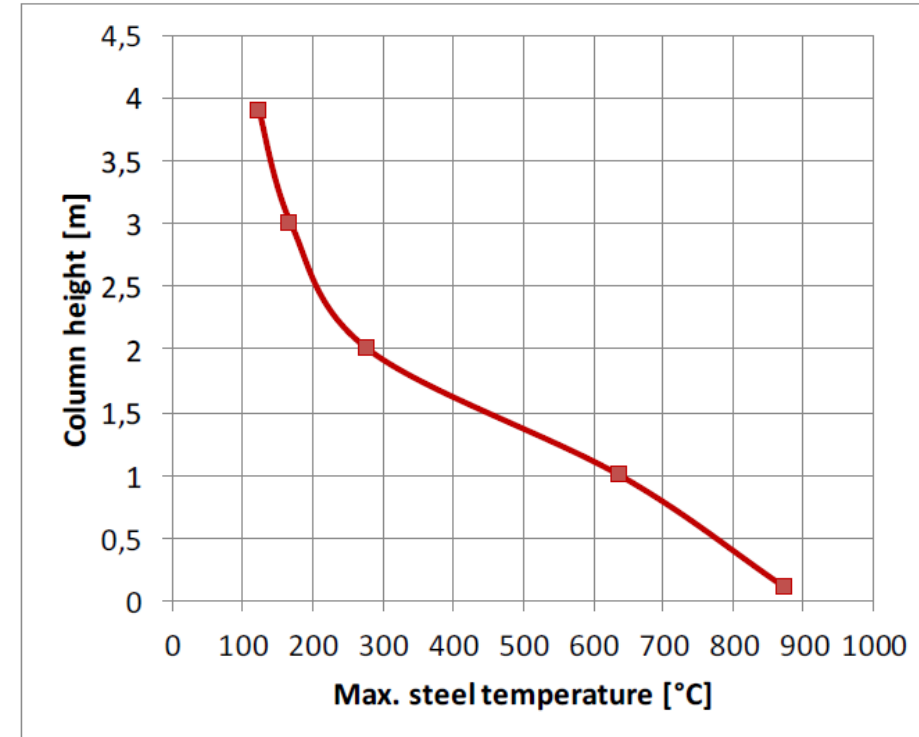
Zależność gęstości wydzielania ciepła (a) i strumienia ciepła (b) w funkcji czasu

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 1



a)



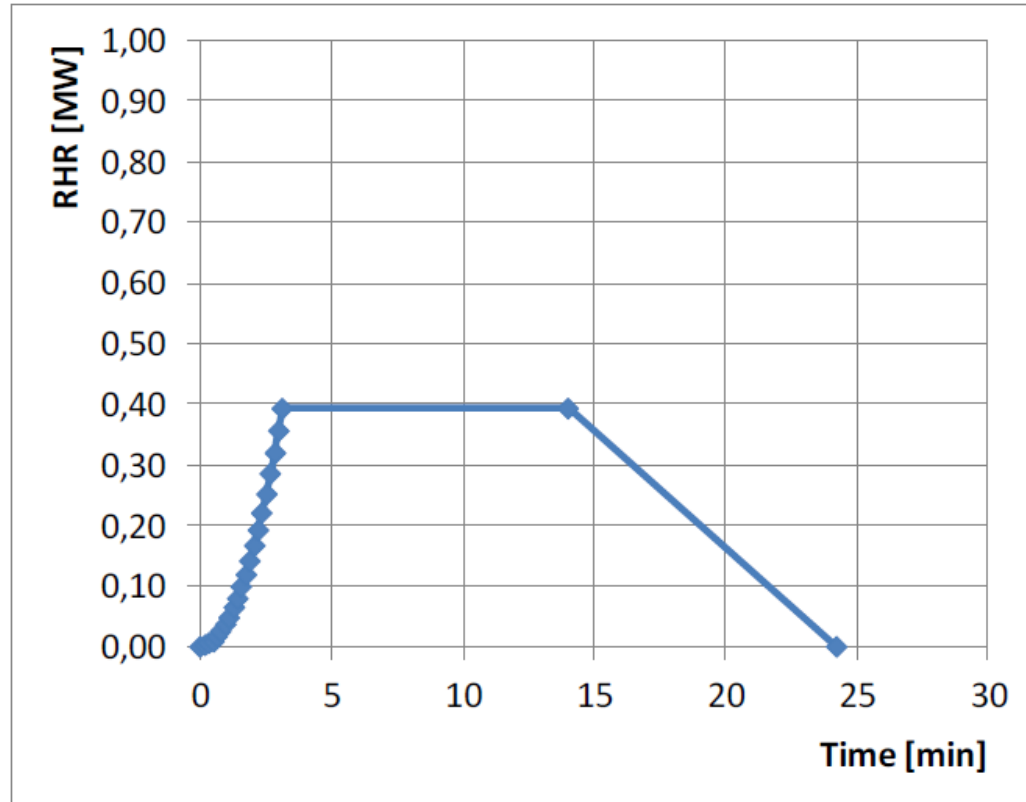
b)

Przyrost temperatury stali na wysokości słupa w funkcji czasu (a)

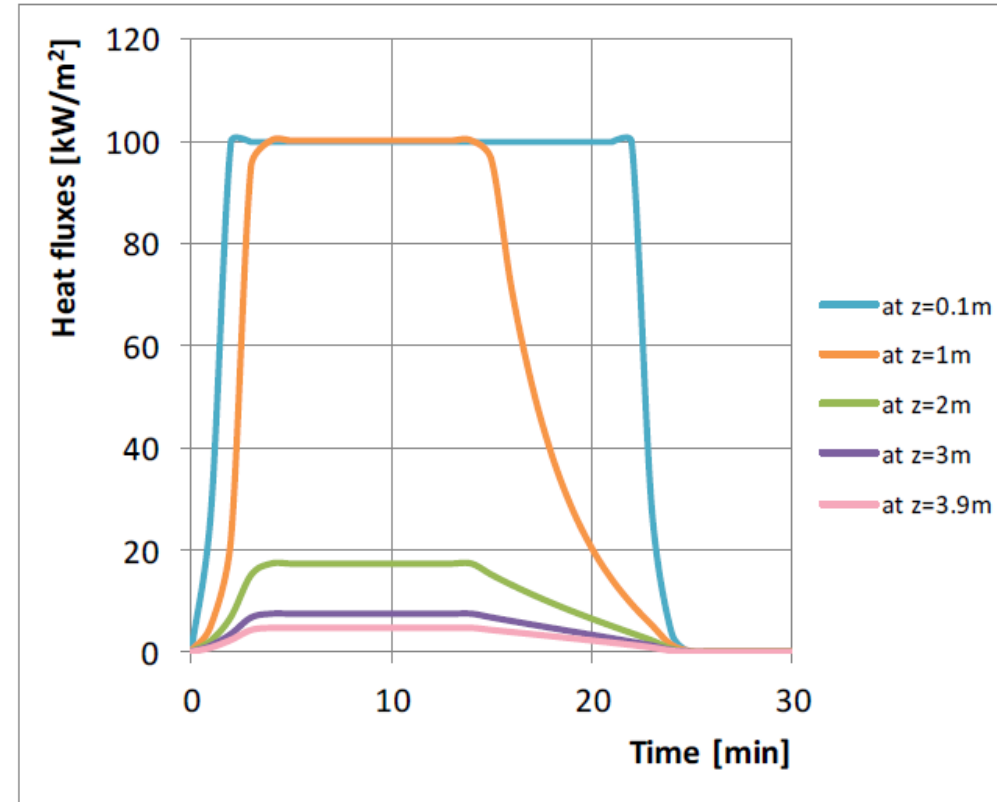
Maksymalna temperatura osiągnięta na wysokości słupa (b)

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 2



a)

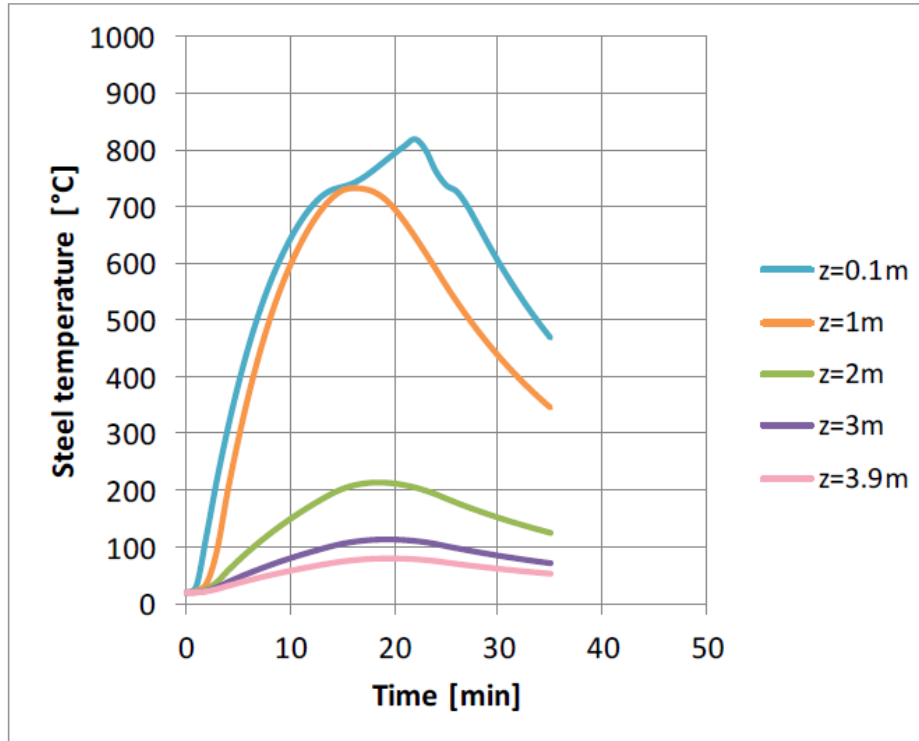


b)

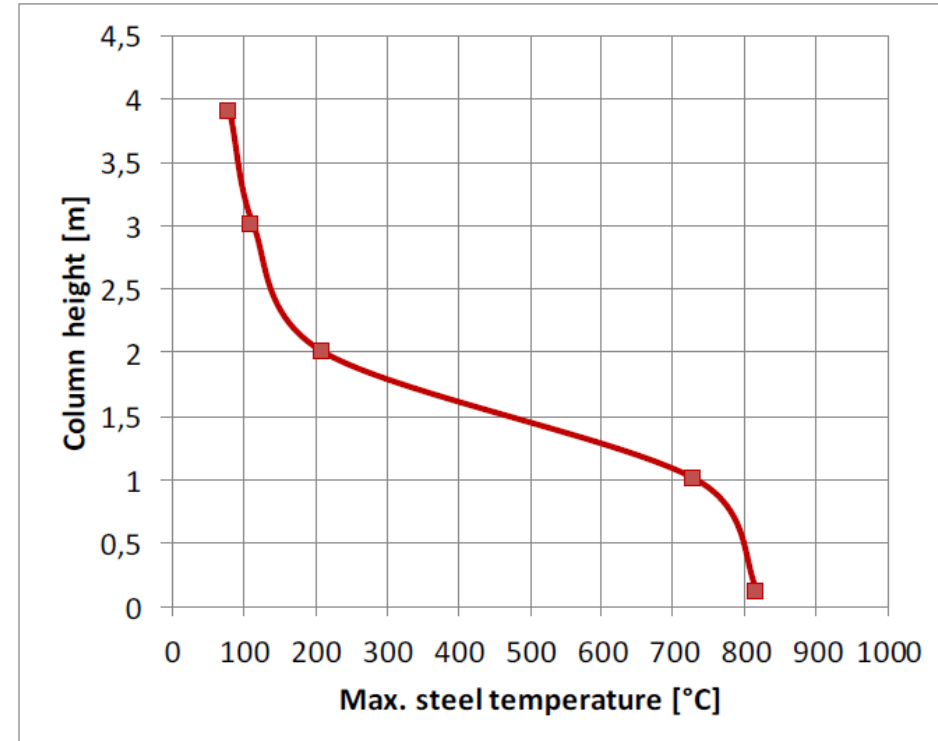
Zależność gęstości wydzielania ciepła (a) i strumienia ciepła (b) w funkcji czasu

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 2



a)



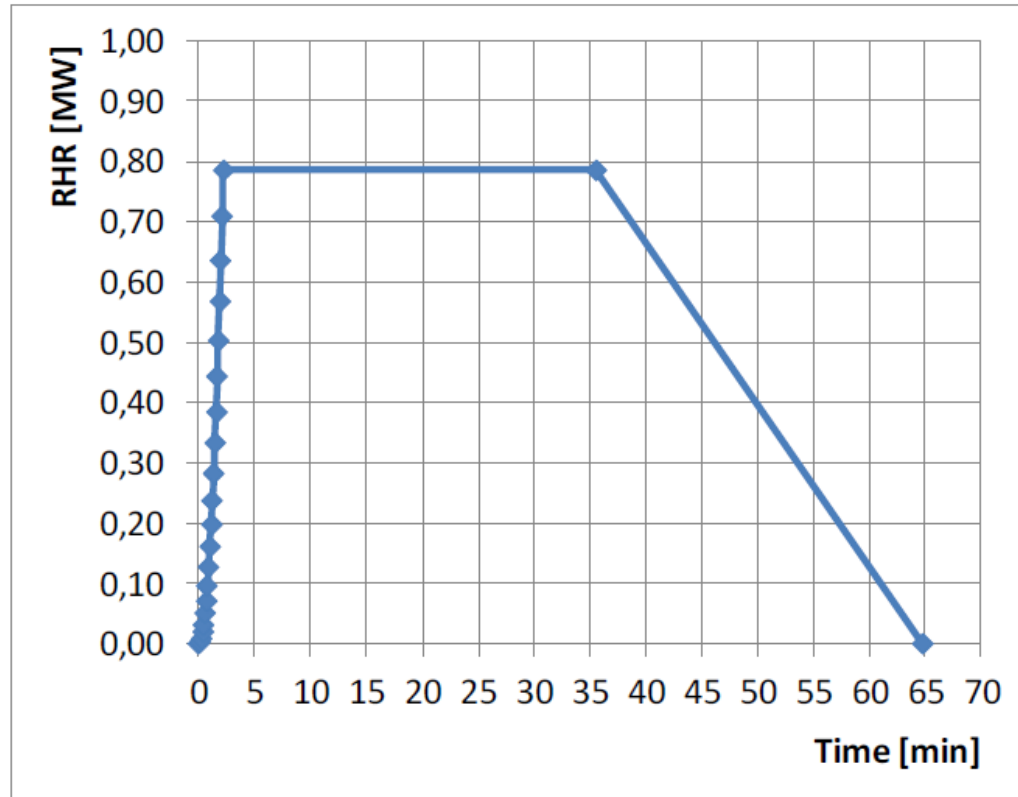
b)

Przyrost temperatury stali na wysokości słupa w funkcji czasu (a)

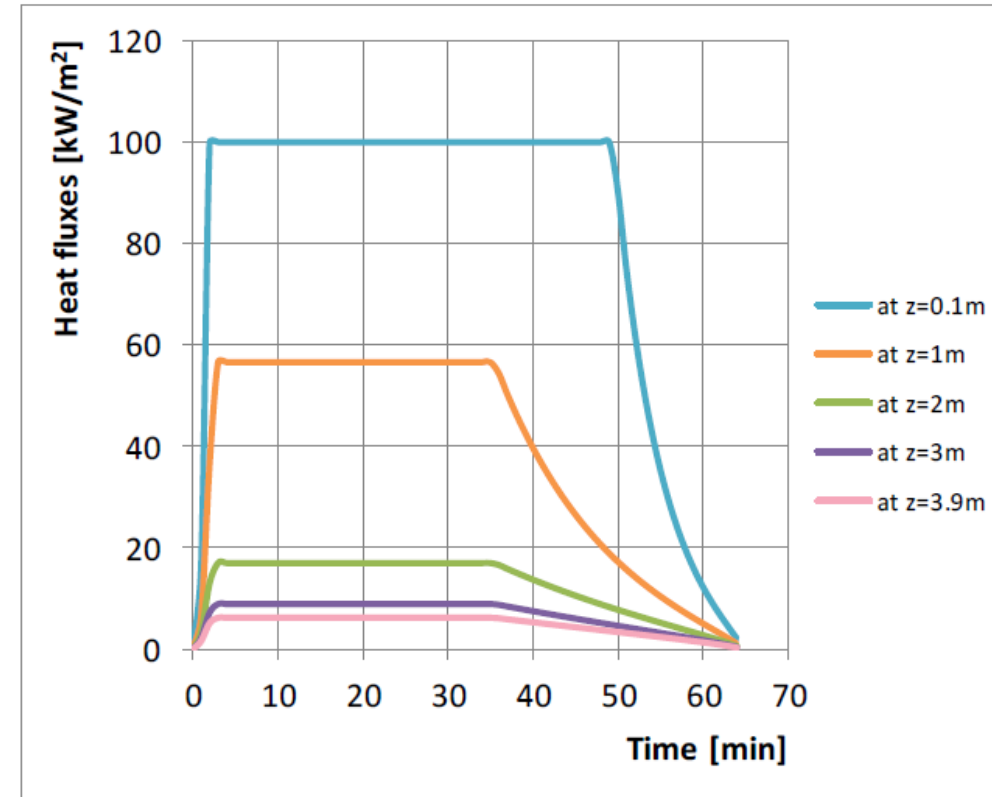
Maksymalna temperatura osiągnięta na wysokości słupa (b)

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 3



a)

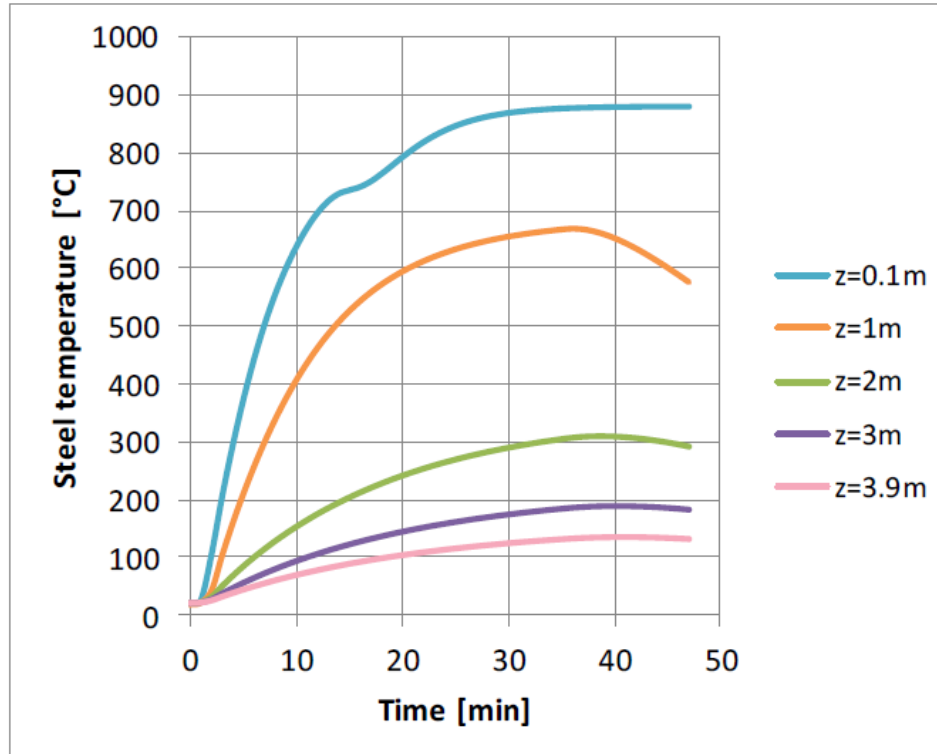


b)

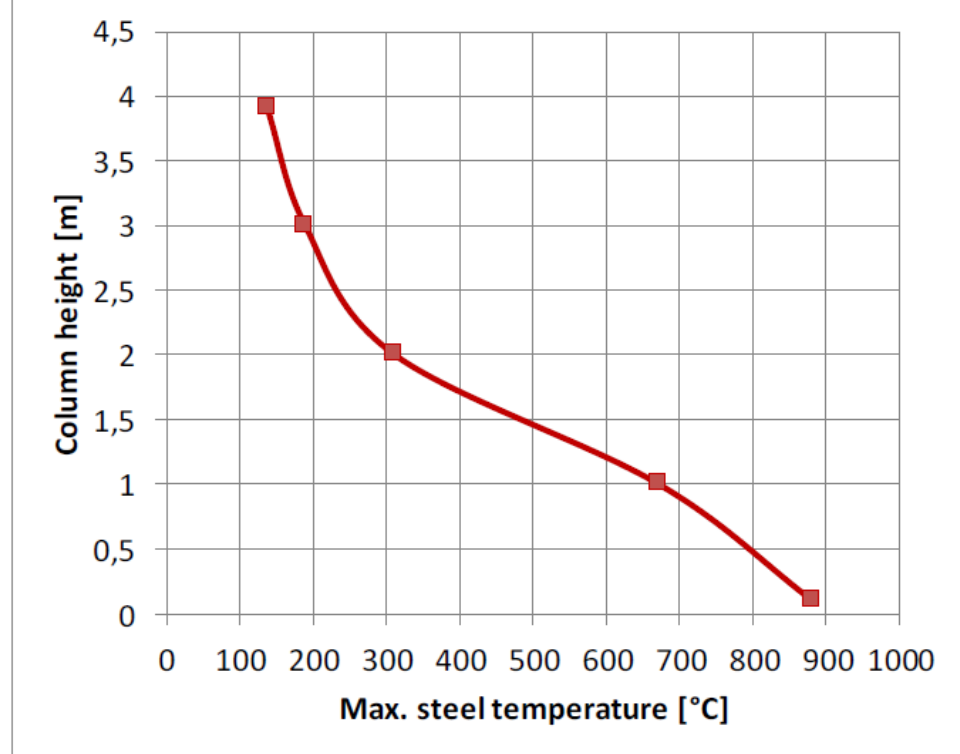
Zależność gęstości wydzielania ciepła (a) i strumienia ciepła (b) w funkcji czasu

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 3



a)



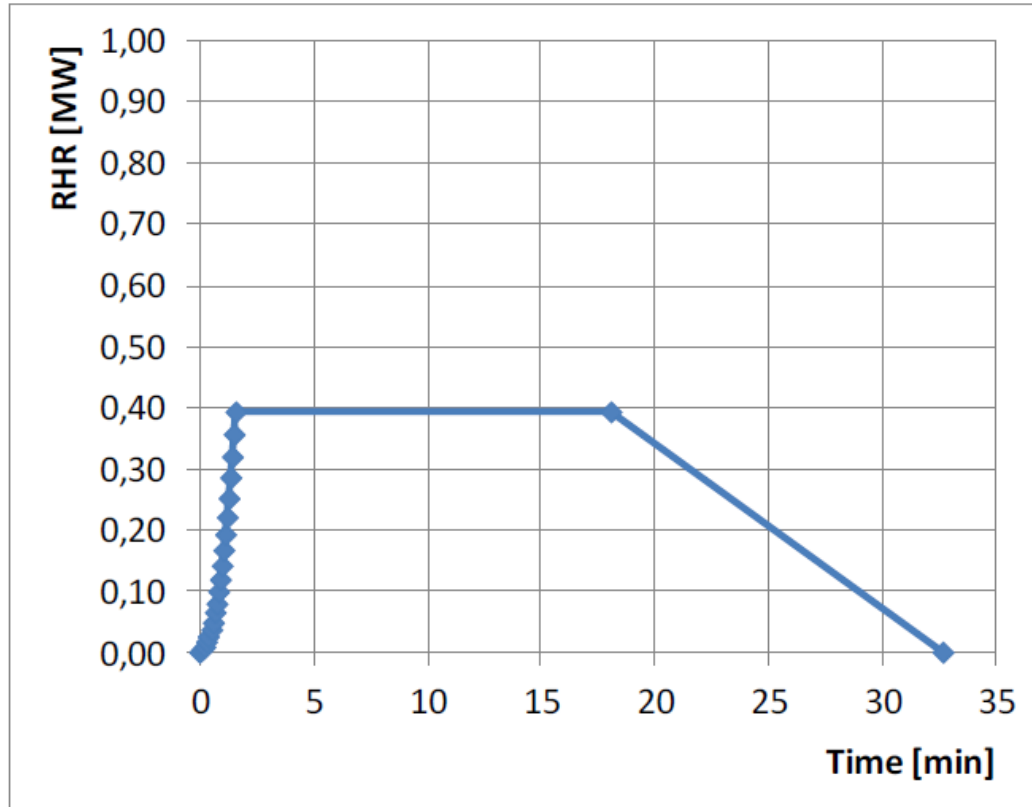
b)

Przyrost temperatury stali na wysokości słupa w funkcji czasu (a)

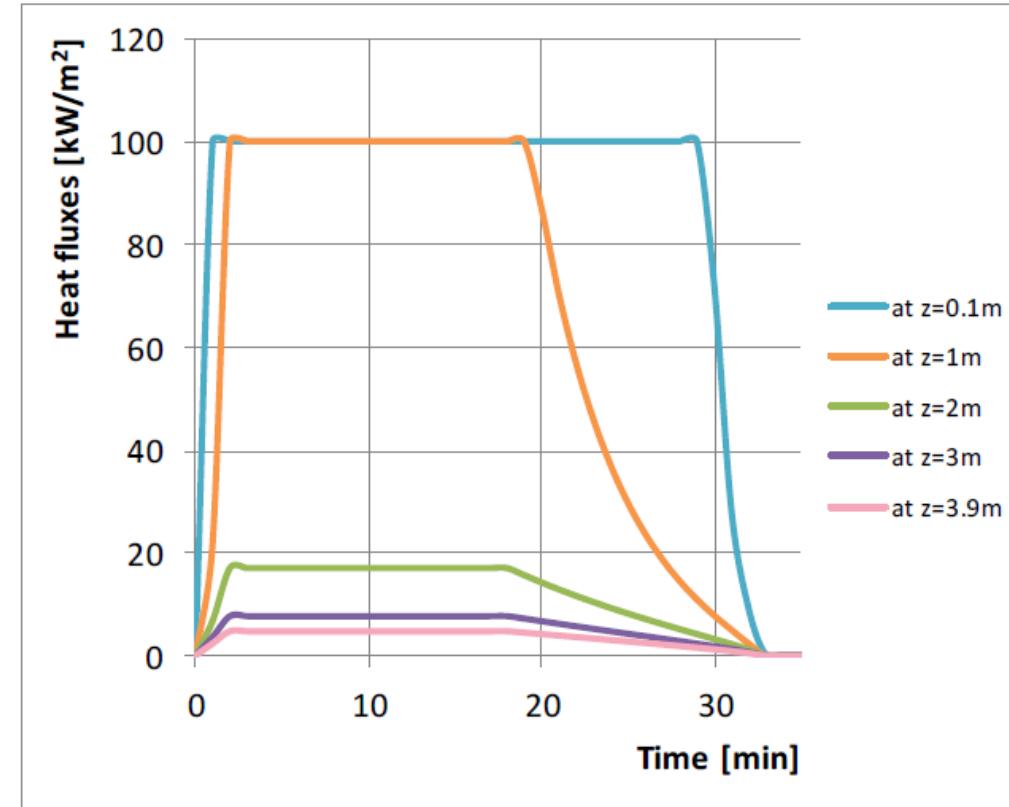
Maksymalna temperatura osiągnięta na wysokości słupa (b)

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 4



a)

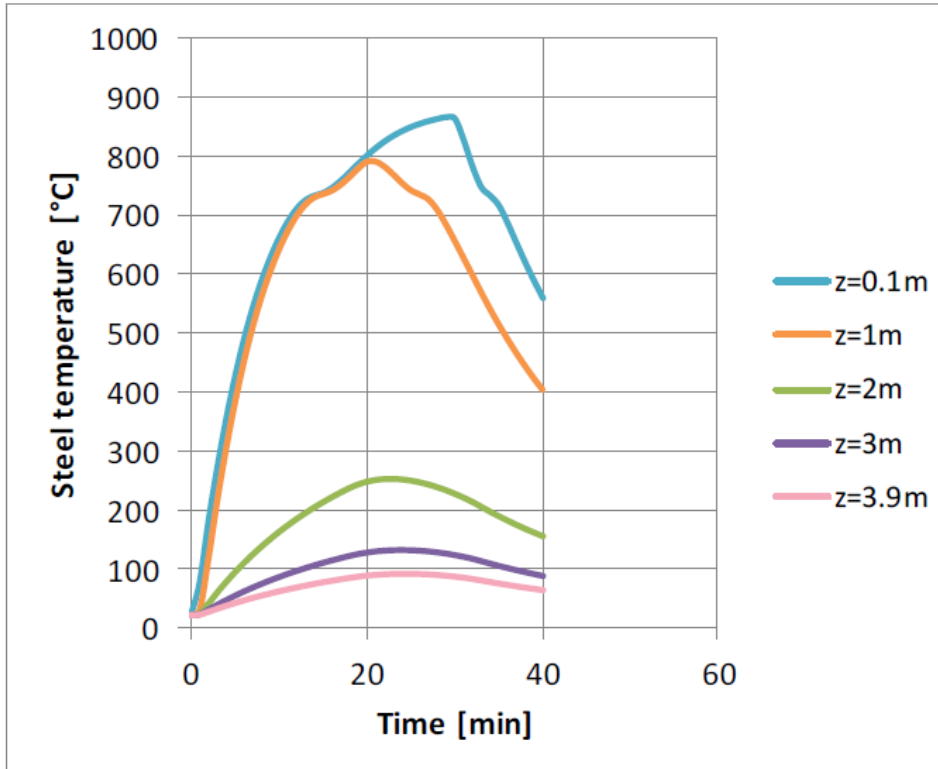


b)

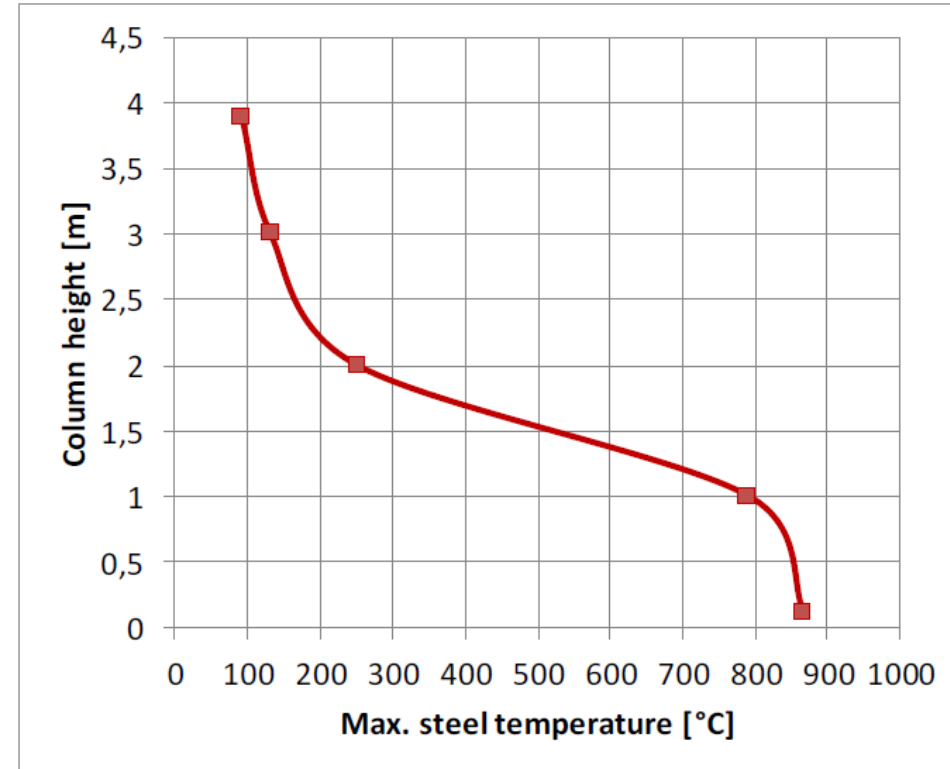
Zależność gęstości wydzielania ciepła (a) i strumienia ciepła (b) w funkcji czasu

* WYNIKI ANALIZY

Scenariusz 4



a)



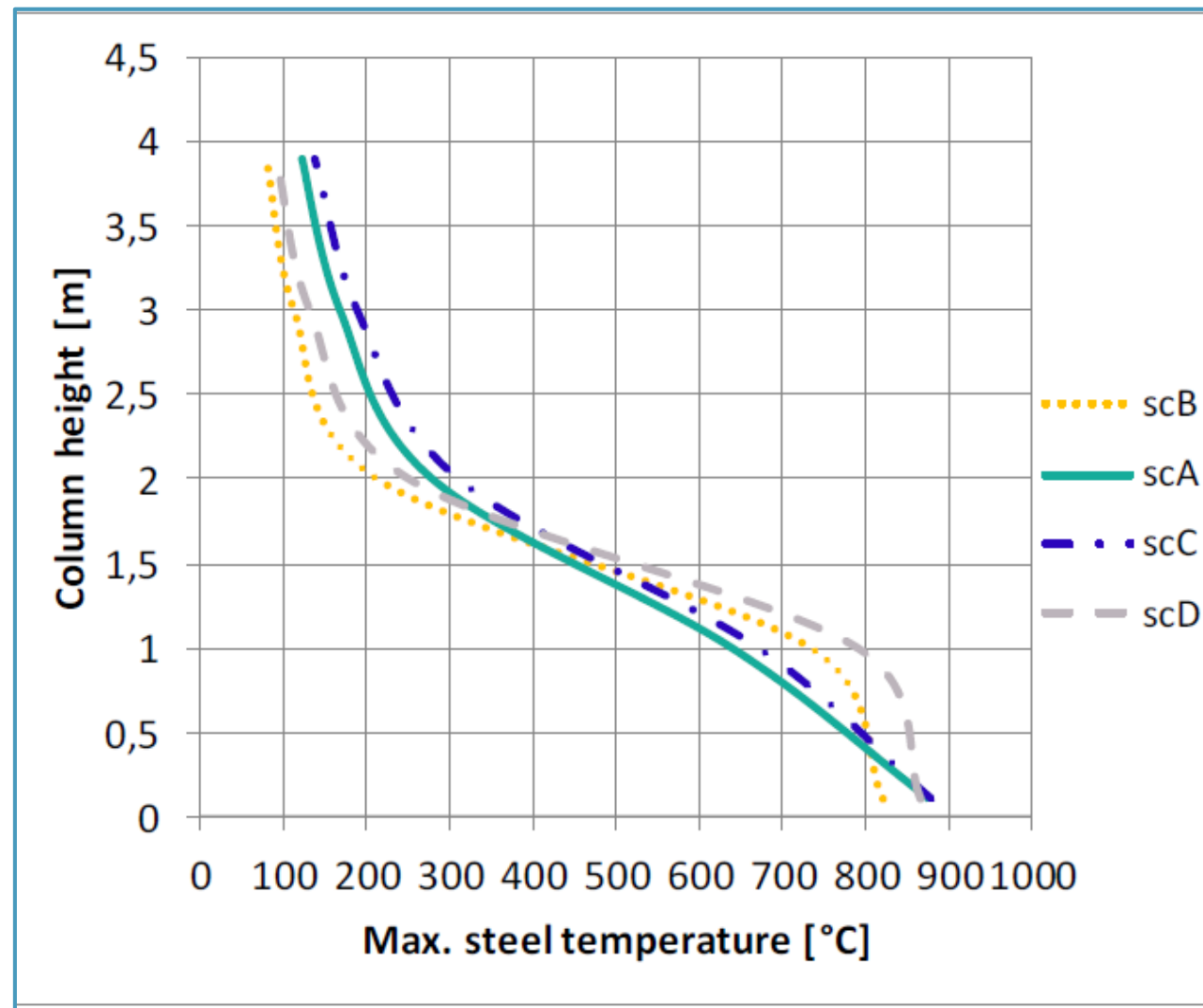
b)

Przyrost temperatury stali na wysokości słupa w funkcji czasu (a)

Maksymalna temperatura osiągnięta na wysokości słupa (b)

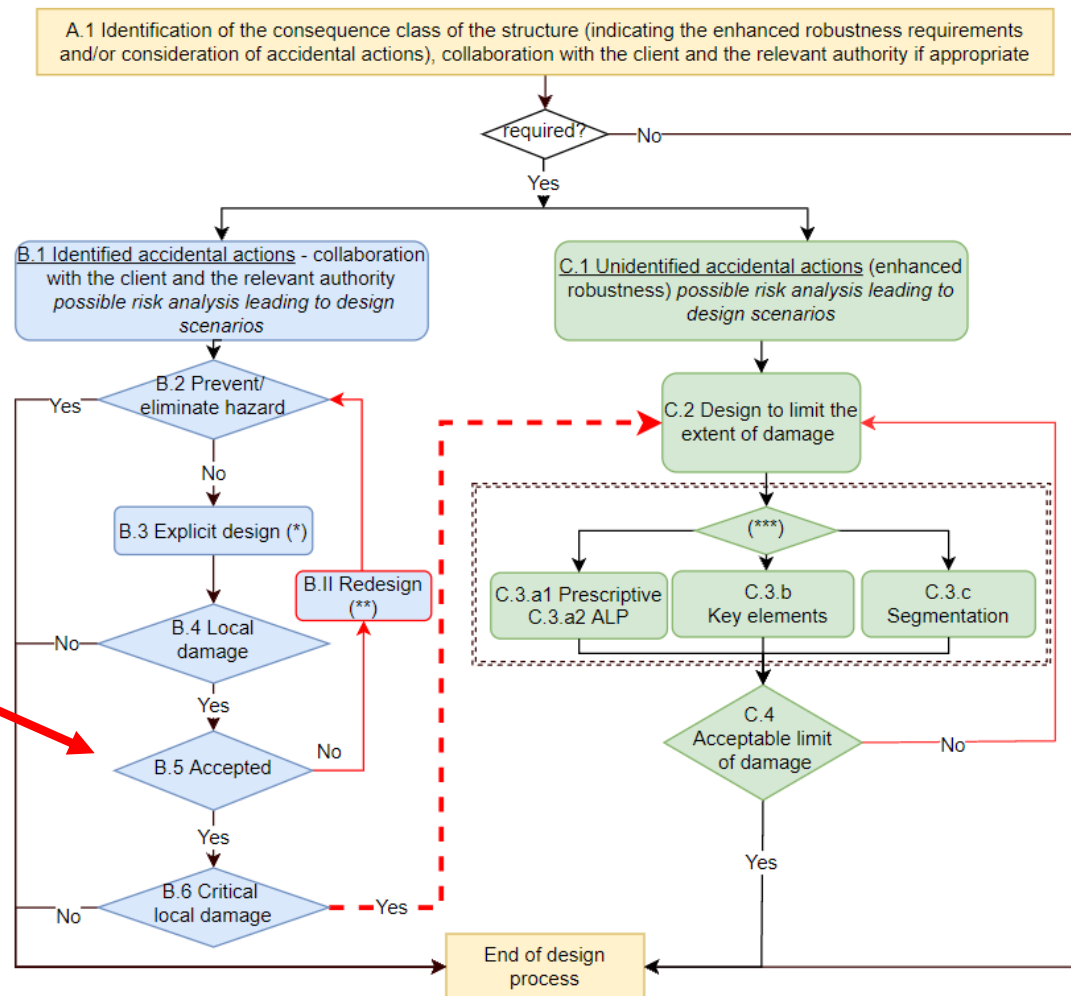
WYNIKI ANALIZY

- * W przypadku, gdy konstrukcja jest zaprojektowana na wypadek pożaru zgodnie z zasadami Eurokodu, jest mało prawdopodobne, że pożar doprowadzi do zawalenia się elementów nośnych i spowoduje utratę stateczności.



* WNIOSKI

- * Obliczono i porównano maksymalne temperatury stali wzdłuż wysokości słupa dla czterech scenariuszy, podkreślając, że pomimo przyjęcia różnych założeń w opisie pożaru lokalnego, uzyskuje się podobny rozkład i ten sam rząd wielkości.
- * Stalowy słup nagrzewa się do wysokiej temperatury w dolnej części co może spowodować jego wyboczenie lub lokalne zniszczenie plastyczne.
- * Należy pamiętać, że w celu uniknięcia szkód pożarowych można zastosować izolację ogniochronną zamiast projektować element konstrukcyjny na określoną odporność ogniową. Można również zwiększyć rozmiar kształtownika.



Rzeszów 19.05.2022

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

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

OKREŚLONE ZAGROŻENIA

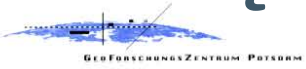
Trzęsienie ziemi
jako zdarzenie wyjątkowe

Damian Nykiel

FAILNOMORE

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

5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

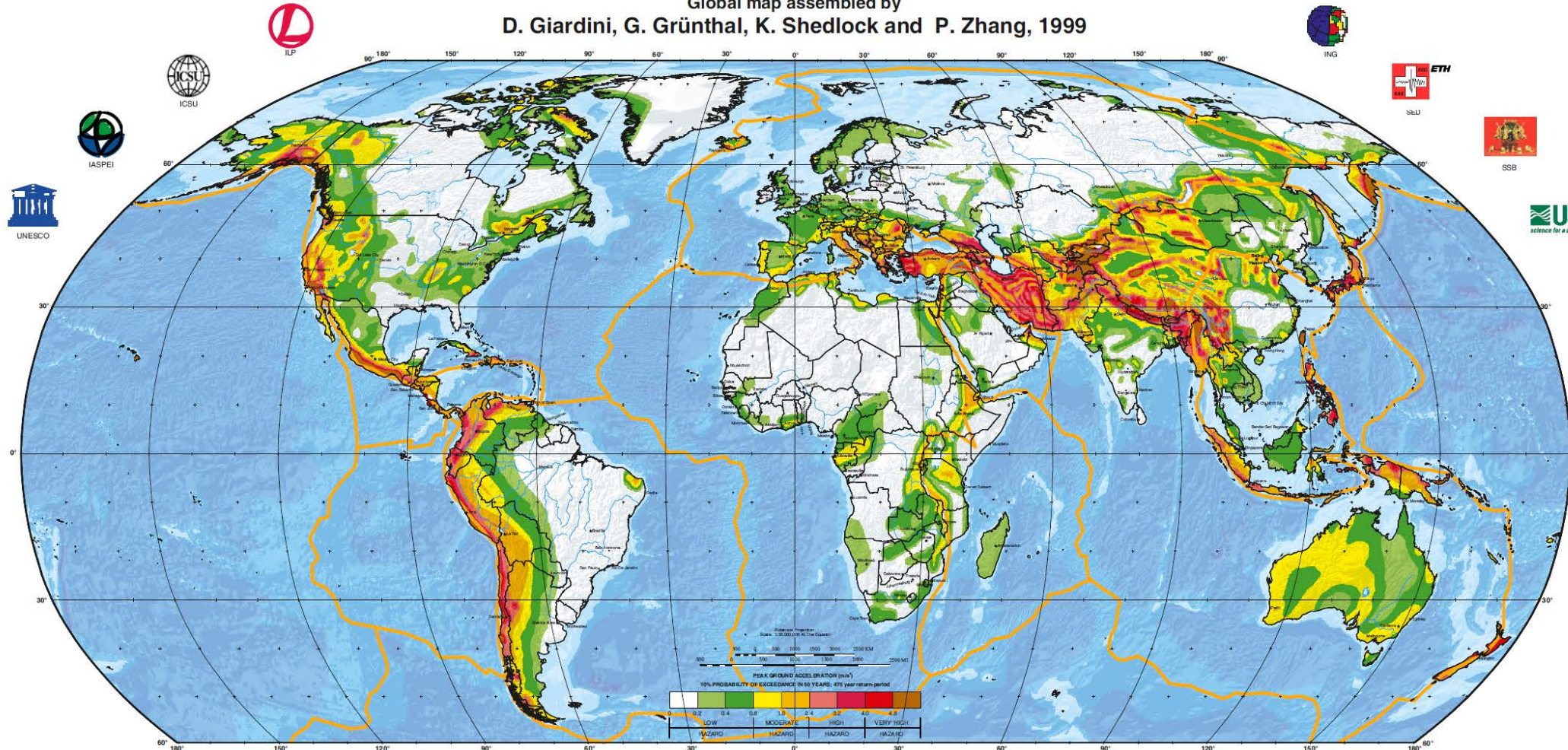


GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP

Produced by the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP),
a demonstration project of the UN/International Decade of Natural Disaster Reduction

Global map assembled by

D. Giardini, G. Grünthal, K. Shedlock and P. Zhang, 1999



SEU



SSB



5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE



5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

Trzęsienie ziemi to nagłe uwolnienie energii odkształcenia zgromadzonej w skorupie ziemskiej, spowodowane najczęściej pęknięciem uskoku geologicznego. Ze względu na jego charakter, praktycznie nie jest możliwe zapobieżenie lub wyeliminowanie zagrożenia sejsmicznego.

→ redukcja i zapobieganie skutkom są ściśle związane z konstrukcją budynku i zintegrowanymi systemami, które pomagają budynkowi odpowiednio reagować na oddziaływanie sejsmiczne

■ Trzęsienie ziemi można uznać za oddziaływanie wyjątkowe, gdy

- Konstrukcja nie jest zaprojektowana na obciążenia pochodzące od sił sejsmicznych lub jest zaprojektowana na niższe wymagania sejsmiczne: zagrożenie jest zatem wyjątkowe
- Konstrukcja jest podatna na oddziaływanie sejsmiczne (istniejące wcześniej uszkodzenia, system nie zaprojektowany zgodnie z wymaganiami aktualnych norm projektowych)

5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PODEJŚCIE NORMATYWNE

- Podejście normatywne jest szczególnie korzystne w przypadku budynków zlokalizowanych na obszarach asejsmicznych, gdzie z bardzo małym prawdopodobieństwem mogą wystąpić oddziaływania sejsmiczne.

Podejście normatywne zwraca uwagę projektanta na:

- Kształtowanie budynku
- Sztywność na skręcanie
- Kontrolę drgań
- Wytrzymałość i sztywność
- Ciągłość

5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PODEJŚCIE NORMATYWNE

■ Kształtowanie budynku

Budynki o regularnej strukturze zazwyczaj mają:

- mały stosunek wysokości do wymiarów podstawy,
- jednakowe wysokości kondygnacji,
- płaszczyzny symetrii,
- ujednolicone przekroje i elewacje,
- jak największą sztywność na skręcanie,
- małe rozpiętości przęseł i przesztynnienia,
- ściśle określoną lokalizację strumieni sił wewnętrznych,
- zaprojektowane elementy drugorzędne w celu uniknięcia gromadzenia się gruzu.

5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PODEJŚCIE NORMATYWNE

■ Sztywność na skręcanie

- powstają w rezultacie asymetrycznego rozmieszczenia mas wpływających na bezwładność i sztywności konstrukcji.

■ Wytrzymałość i sztywność

- wybór odpowiednich charakterystyk wytrzymałościowych i sztywnościowych powinien być dokonany z uwzględnieniem równowagi pomiędzy odkształcalnością a odpowiedzią na siły.

■ Ciągłość

- elementu
- połączeń

5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PODEJŚCIE NORMATYWNE

- **Kontrola drgań:** budynki na ogół słabo wzmacniają wstrząsy dynamiczne i rozpraszają drgania poprzez ich pochłanianie i tłumienie

Aby poprawić dynamiczną odpowiedź konstrukcji można zastosować:

- Izolacje fundamentów
- Urządzenia TMD (Tuned Mass Damper):
 - Pasywne systemy tłumiące
 - Aktywne systemy tłumiące
 - Półaktywne systemy sterowania

5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PODEJŚCIE NORMATYWNE

■ Kontrola drgań: Izolacje fundamentów



5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PODEJŚCIE NORMATYWNE

■ Kontrola drgań: Urządzenia TMD

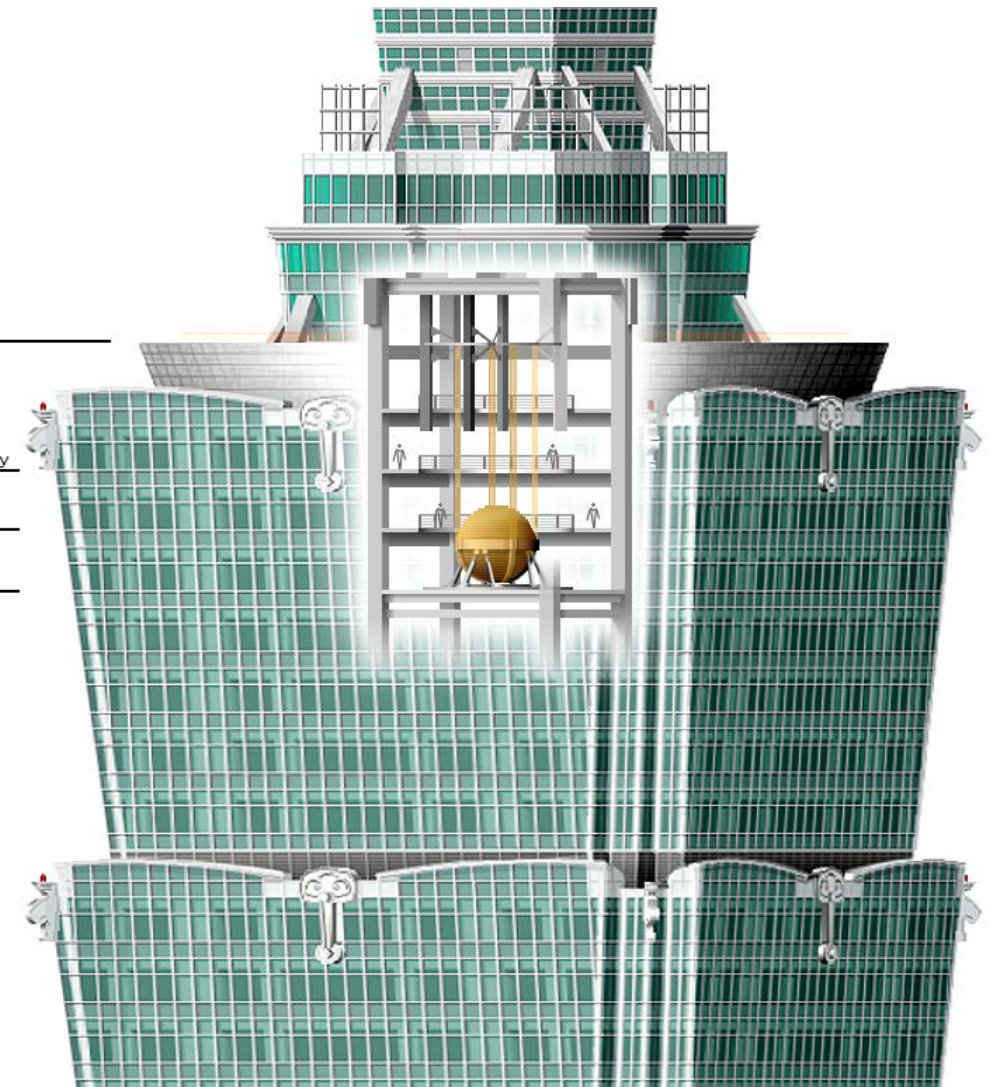


91. piętro (390,60 m)
Zewnętrzny taras widokowy

89. piętro (382,20 m)
Wewnętrzny poziom obserwacyjny

88. piętro

87. piętro



5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

ZAAWANSOWANA ANALIZA NUMERYCZNA

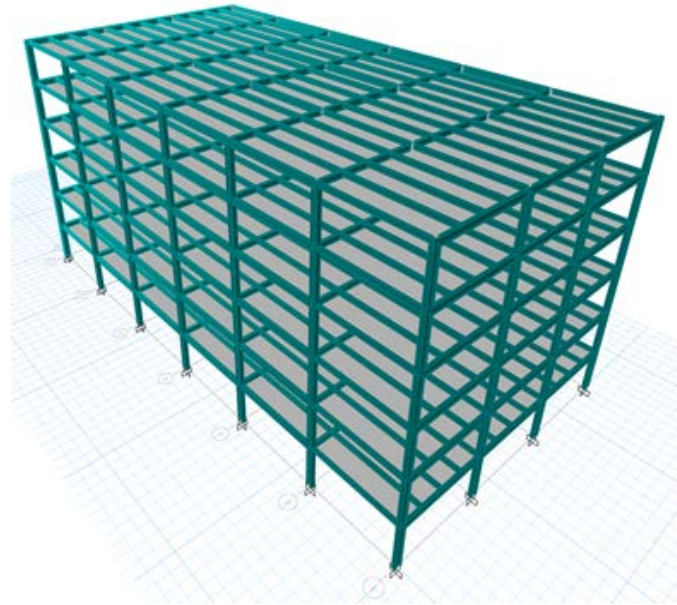
- W następstwie trzęsienia ziemi głównym problemem jest stan konstrukcji i to, czy zachowa ona stateczność pod wpływem obciążeń grawitacyjnych w przypadku wstrząsów wtórnych, czy innych zagrożeń (FEMA P-2090, 2021).

- Nośność resztkową po trzęsieniu ziemi można zdefiniować jako:
 - odporność na działanie sił poziomych - minimalna wartość przyspieszenie spektralnego, które odpowiada lokalnemu lub globalnemu zniszczeniu podczas wstrząsu wtórnego.
 - nośność na obciążenia grawitacyjne - minimalny poziom obciążeń grawitacyjnych, który odpowiada lokalnemu lub globalnemu zniszczeniu po niszczącym trzęsieniu ziemi.

5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PROCEDURA OCENY ODPORNOŚCI KONSTRUKCJI NA WSTRZĄSY SEJSMICZNE

- Krok 1: Projektowanie i ocena dla trwałych i sejsmicznych sytuacji obliczeniowych
 - Konstrukcja jest najpierw projektowana w celu spełnienia wymagań normowych. Odpowiedź sejsmiczną można obliczyć za pomocą nieliniowej analizy statycznej (metoda N2, EN 1998)

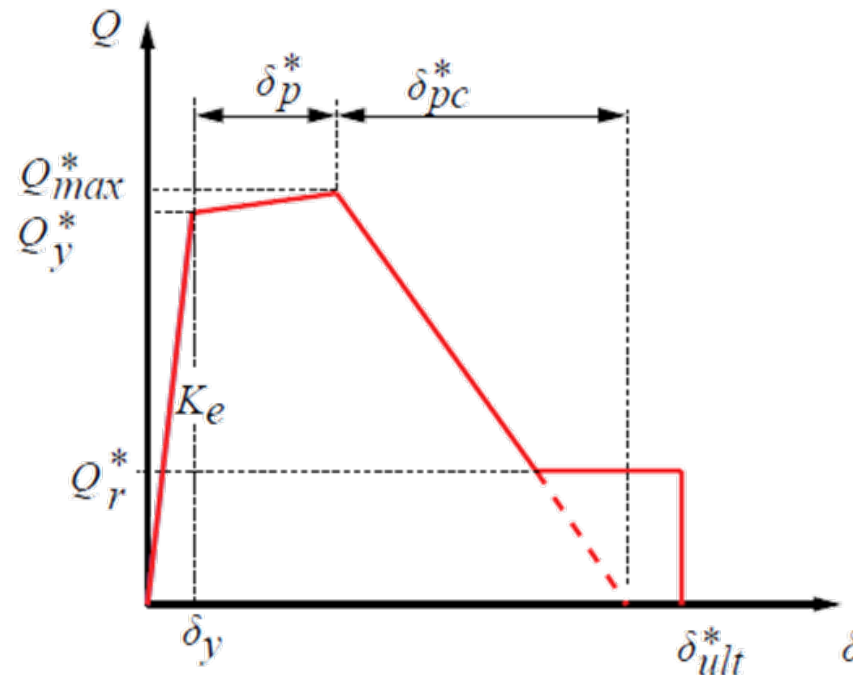


5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PROCEDURA OCENY ODPORNOŚCI KONSTRUKCJI NA WSTRZĄSY SEJSMICZNE

■ Krok 1: Projektowanie i ocena dla trwałych i sejsmicznych sytuacji obliczeniowych

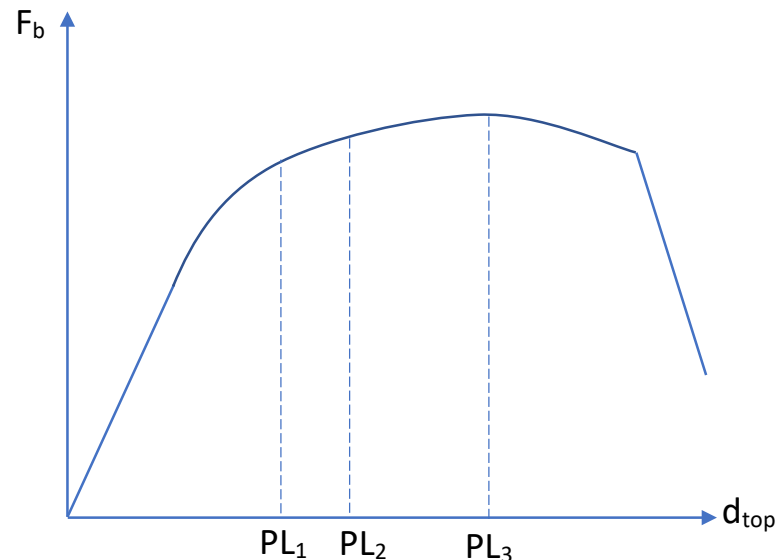
■ Ogólną zależność, między obciążeniem a deformacją elementu konstrukcyjnego, można określić przy użyciu normy prEN 1998-1-2:2019.3 Załącznik L. Model zachowania elementu konstrukcyjnego określa się wyznaczając:



5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PROCEDURA OCENY ODPORNOŚCI KONSTRUKCJI NA WSTRZĄSY SEJSMICZNE

- Krok 1: Projektowanie i ocena dla trwałych i sejsmicznych sytuacji obliczeniowych
 - Globalna odpowiedź sejsmiczna może być przedstawiona w formie krzywej: wypadkowa siła pozioma - przemieszczenia wierzchołka: $F_b - d_{top}$.
 - W zależności od poziomu zagrożenia można spodziewać się określonego poziomu uszkodzenia.

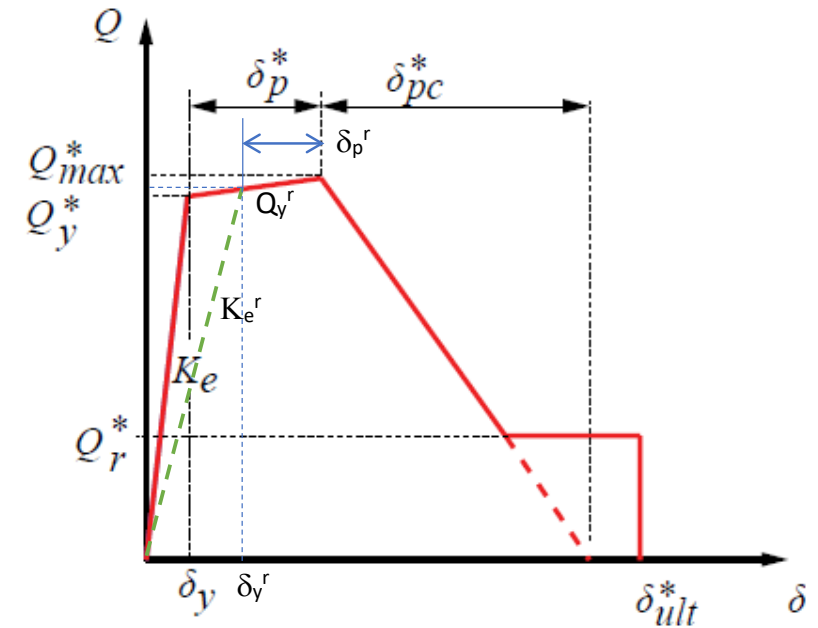


5. TRZĘSIENIE ZIEMI JAKO ZDARZENIE WYJĄTKOWE

PROCEDURA OCENY ODPORNOŚCI NA WSTRZĄSY SEJSMICZNE

■ Krok 2: Ocena nośności resztkowej po trzęsieniu ziemi

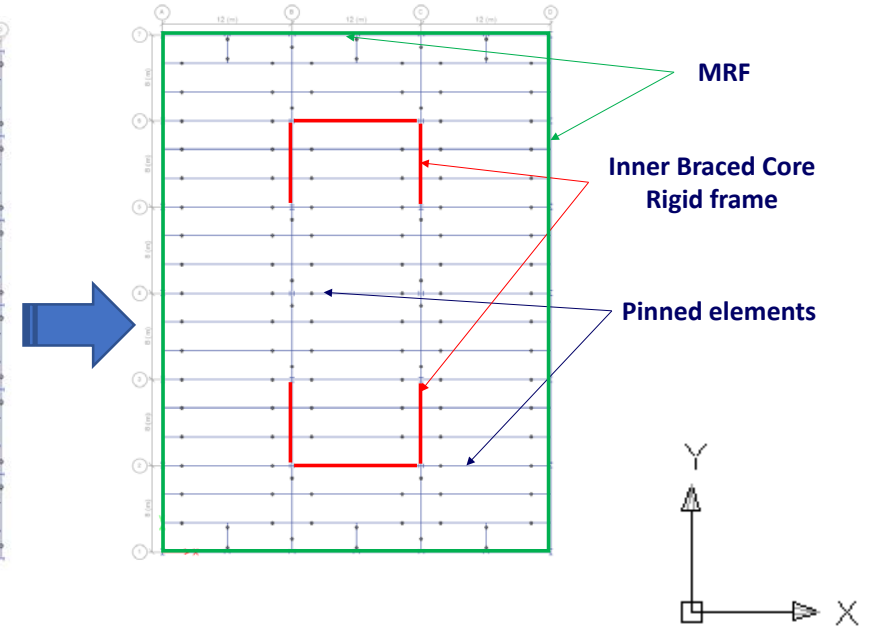
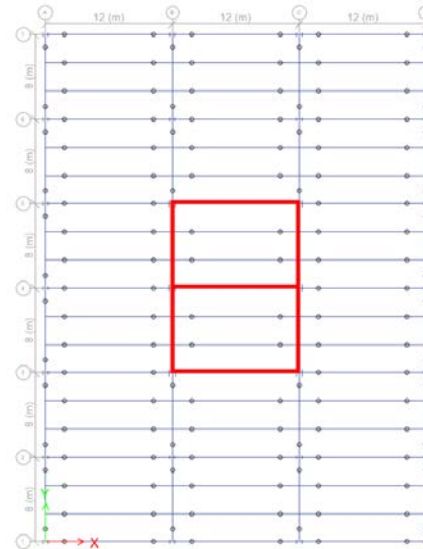
- Modyfikacja modelu
- Uwzględnienie efektów P- Δ
- Nośność konstrukcji szkieletowej na sejsmiczne wstrząsy wtórne można ocenić przy użyciu analizy nieliniowej (np. analizy pushover). Analiza przeprowadzana jest na uszkodzonym modelu.
- Nośność konstrukcji szkieletowej na postępujące zniszczenie pod wpływem obciążeń grawitacyjnych można ocenić za pomocą analizy przyrostowej (pushdown).



	Stiffness	Strength	Ductility
Initial (intact)	K_e	Q_y	δ_p
Damaged	K_e^r	Q_y^r	δ_p^r

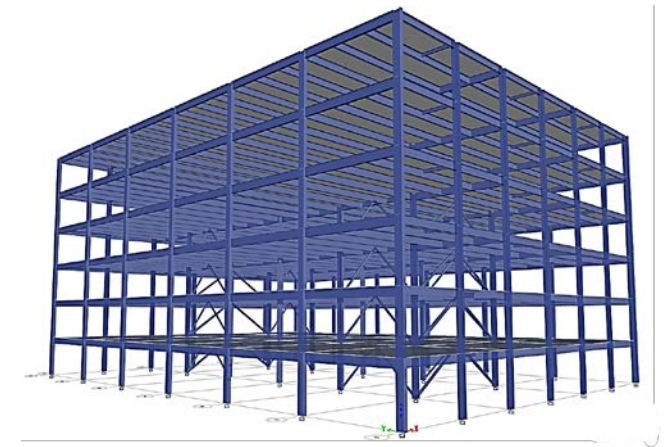
GEOMETRIA I PARAMETRY PROJEKTOWE

- 6 kondygnacji o wysokości 4m 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



■ DODATKOWE KROKI W PROJEKTOWANIU DLA KONSTRUKCJI ODPORNYCH SEJSMICZNIE:

- Stężone przęsła przeniesione na zewnątrz (patrz rysunek)
- Na obwodzie, z wszystkich stron dodano MRF (patrz rysunek)
- System odporny na wstrząsy sejsmiczne z układem podwójnym wymaga co najmniej 25% udziału MRF w całkowitej nośności.
Warunek ten doprowadził do następujących zmian:
 - Zwiększono przekroje belek i słupów w MRF, aby spełnić warunki dla ram podwójnych.
 - Na kierunku X obwodu wprowadzono słupy pośrednie.



■ TRWAŁA SYTUACJA OBLICZENIOWA

Obciążenie	Typ konstrukcji
	SS/S
	Lokalizacja
	Timisoara, RO
Obciążenie stałe	- Stropy: $g_k = 5 \text{ kN/m}^2$ - Elewacja (oparta na belkach obwodowych): $g_k = 4 \text{ kN/m}$
Obciążenie zmienne	- Obciążenie użytkowe dla budynków biurowych: $q_k = 3 \text{ kN/m}^2$ - Obciążenie wykonawcze $q_k = 1 \text{ kN/m}^2$ (stropy i dach).
WIATR	
Bazowa prędkość wiatru	$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$
Ciśnienie prędkości wiatru	$q_b = 0.4 \text{ kN/m}^2$
Kategoria terenu	III
Obciążenie śniegiem	$s_k = 1.5 \text{ kN/m}^2$

■ SEJSMICZNA SYTUACJA OBLICZENIOWA - (EUROKOD 8)

- Sprężyste spektrum odpowiedzi: Typ 1
- Rodzaj podłoża: B
- Projektowe przyspieszenie podłoża, $a_g = 0,25 \text{ g}$
- Współczynnik zachowania konstrukcji $q = 4.8$ (Układ podwójny CBF+MRF)

PRZEKROJE POPRZECZNE – WSKAŹNIKI WYKORZYSTANIA

Stupy	Kształtownik	Gatunek stali	Wskaźnik wykorzystania
Stupy narożne	HE550B	S355	0.49
Stupy obwodowe	HE500B	S355	0.71
Stupy trzonu stężającego	HD400X463	S355	0.95

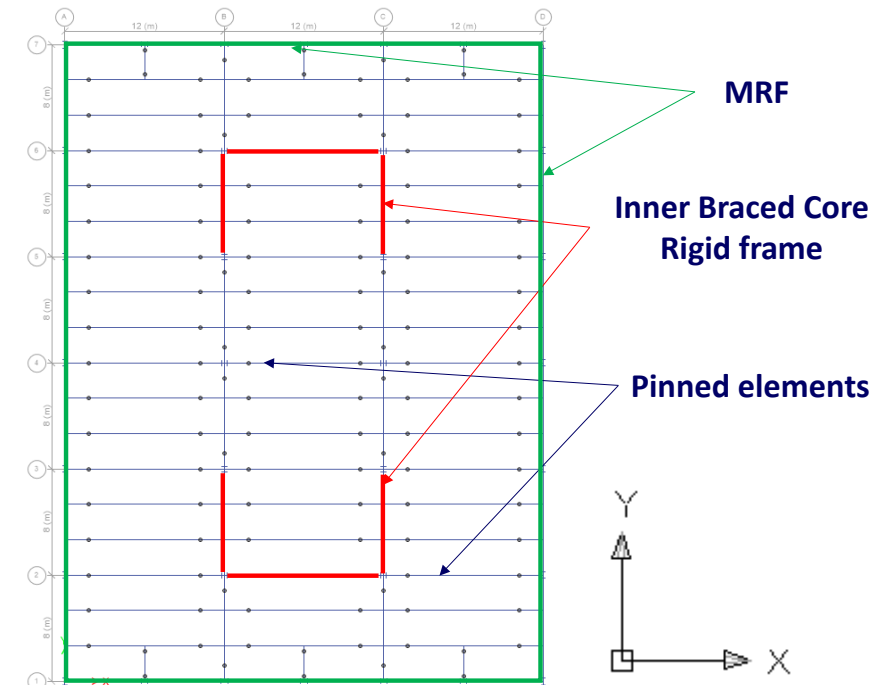
Stężenia	Kondygnacja	Kształtownik	Gatunek stali	Wskaźnik wykorzystania
Kierunek Y	1-3	HEA320	S355	0.41
	4	HEA260	S355	0.43
	5	HEA220	S355	0.46
	6	HEA200	S355	0.39
Kierunek X	1-3	HEB340	S355	0.41
	4-5	HEA320	S355	0.27
	6	HEA260	S355	0.26

Belki	Kierunek ¹	Kondygnacja	Kształtownik	Gatunek stali	Wskaźnik wykorzystania	
					Nośność	Ugięcie ²
Belki obwodowe	X	1-6	IPE550	S355	0.278	0.023
	Y	1-6	IPE600	S355	0.302	0.153
Belki wewnętrzne	X	1-6	IPE550	S355	0.546	0.85
	Y	1-6	IPE550	S355	0.909	0.928
⁴ Belki trzonu stężającego	X	1-3	³ H800	S460	0.936	-
		4-5	HEM800	S460	0.953	-
		6	HEM700	S460 </td <td>0.789</td> <td>-</td>	0.789	-
	Y	1-3	HEM500	S460	0.859	-
		4-6	HEB500	S460	0.878	-

¹Orientacja osi - patrz rysunek

²Kryteria sprawdzenia ugięcia: L/250 dla belek drugorzędnych, L/350 dla belek głównych

³H800 jest przekrojem złożonym, h=814 mm, b=380 mm, t_f=50 mm i t_w=30 mm.



Zaawansowana analiza numeryczna (Przykład)

■ ODDZIAŁYWANIA W SEJSMICZNEJ SYTUACJI OBLICZENIOWEJ

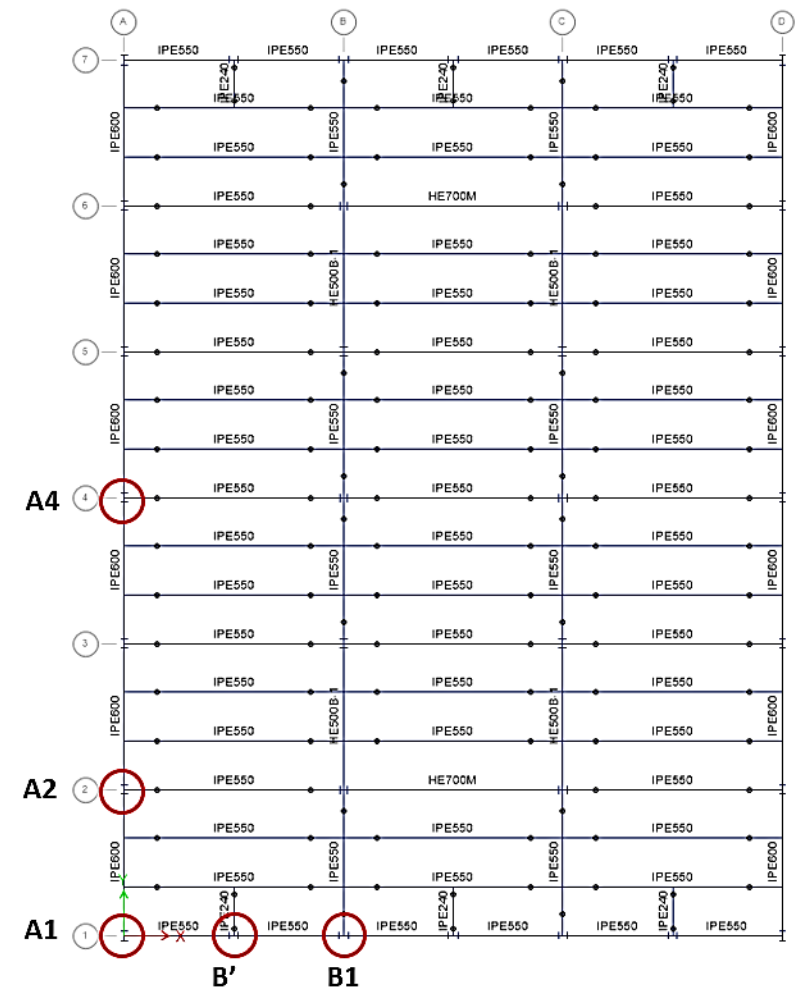
- Obciążenia stałe DL
- Obciążenia zmienne LL
- Oddziaływania sejsmiczne A_{ed} odpowiadające kryterium zniszczenia ULS

■ KOMBINACJE OBCIĄŻEŃ

$$DL + 0.3 \times LL + A_{Ed}$$

■ SCENARIUSZ ZAGROZEŃ

Po zadziałaniu na konstrukcję trzęsienia ziemi, słup może ulec zniszczeniu, co czyni ją podatną na dalsze zagrożenia.



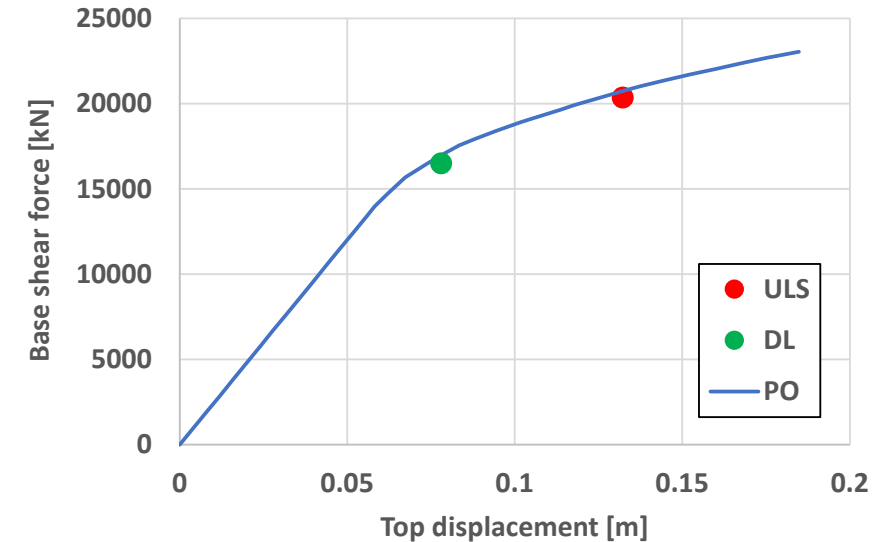
Krok 1: Analiza sejsmiczna - konstrukcja jest poddana trzęsieniu ziemi o wartości obliczeniowej.

Krok 2: Scenariusze utraty słupa: Usuwane słupy znajdują się w miejscach oznaczonych jako A1, A2, A4, B1, B' - rozpatruje się, że są one tracone pojedynczo.

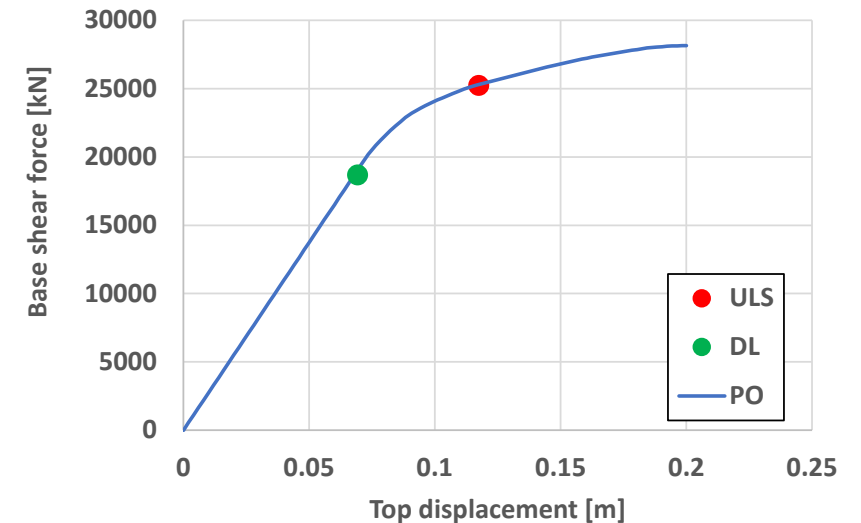
ANALIZA KONSTRUKCYJNA

- Analiza sejsmiczna jest wykonana metodą pushover.
- Ocena uszkodzeń jest wykonana metodą N2 (PN-EN 1998).
- Po przyłożeniu obciążeń grawitacyjnych, konstrukcja jest poddawana monotonicznie rosnącemu działaniu sił poziomych o rozkładzie reprezentującym siły bezwładności.
- Pod stopniowo narastającymi obciążeniami niektóre elementy konstrukcyjne mogą ulec uplastycznieniu.

PO analysis- target displacement - X direction



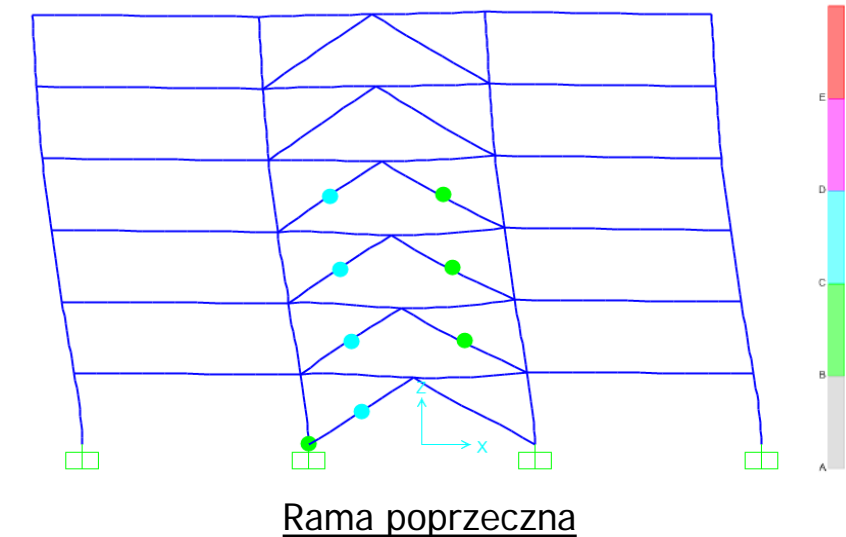
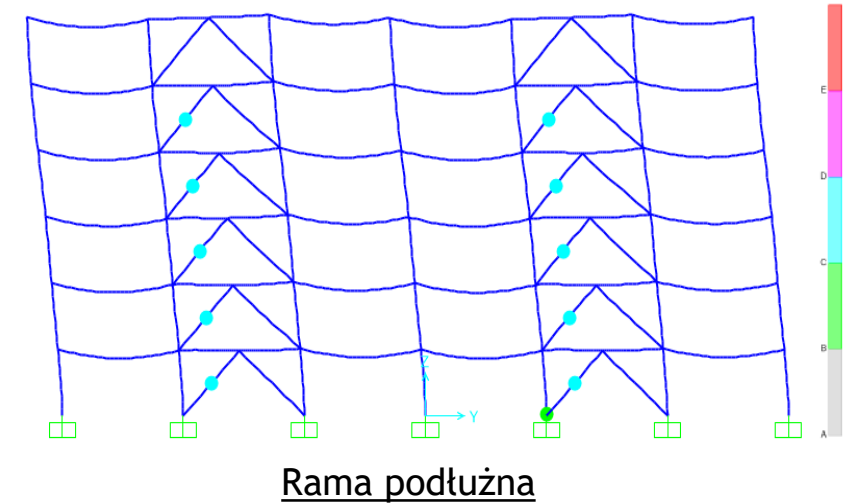
PO analysis - target displacement - Y direction



ANALIZA SEJSMICZNA

- Aby ocenić wymagania sejsmiczne dla stanu zniszczenia ULS, konstrukcja jest przechylana do docelowego przemieszczenia D_t
- Przeguby plastyczne w ULS nie powstają w obwodowych ramach stężających MRF, ani w przypadku kierunku X ani w kierunku Y, lecz tworzą się w układzie stężającym ram ze skratowaniem.

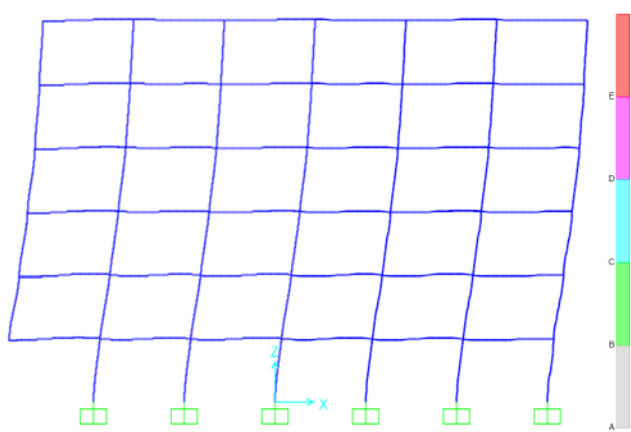
MECHANIZM PLASTYCZNY PRZY PRZECHYLE



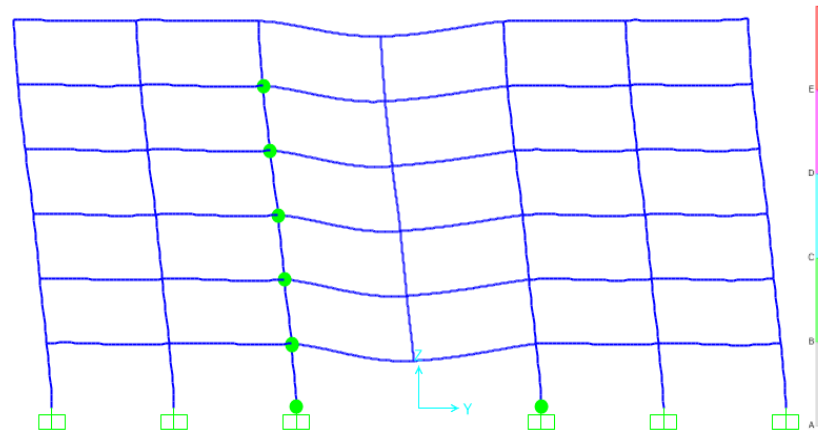
■ USUNIĘCIE SŁUPA W NASTĘPSTWIE TRZĘSIENIA ZIEMI

- Ocenę odporności na katastrofę postępującą dokonuje się przy użyciu metody alternatywnych ścieżek obciążenia (ALPM) i nieliniowej procedury dynamicznej (NDP), zgodnie z wytycznymi UFC 4-023-03.
- Obciążenia grawitacyjne przykładane są w pierwszym etapie; następnie w drugim etapie element jest usuwany niemal natychmiastowo (czas usuwania wynosi 0,005 sekundy).

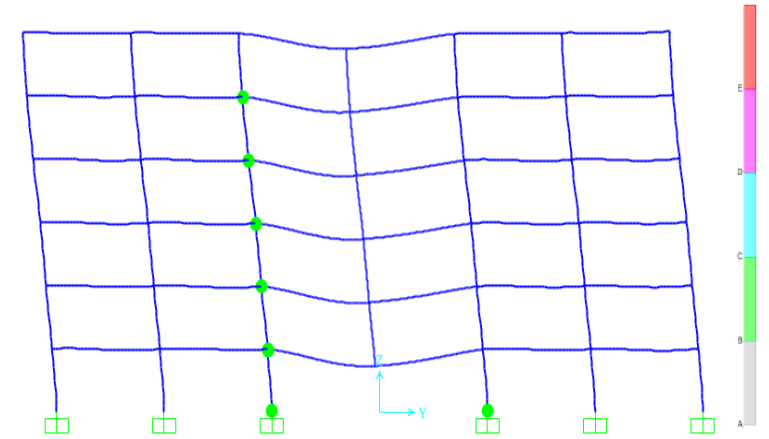
MECHANIZMY PLASTYCZNE PO USUNIĘCIU SŁUPA W ROZWAŻANYM SCENARIUSZU



Przypadek A1



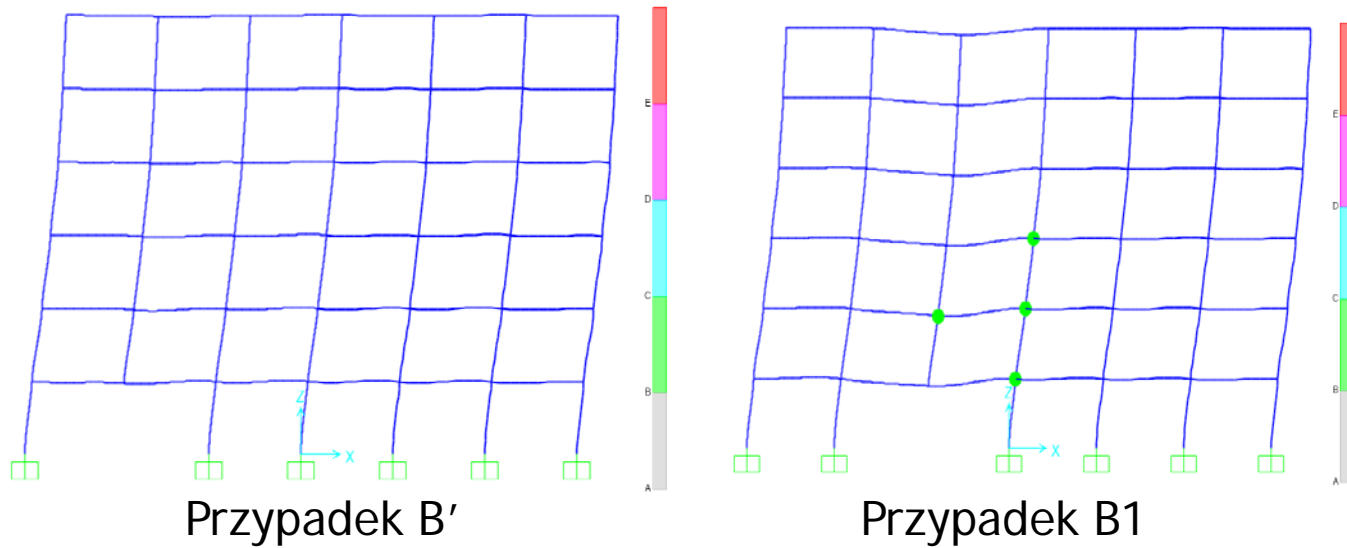
Przypadek A2



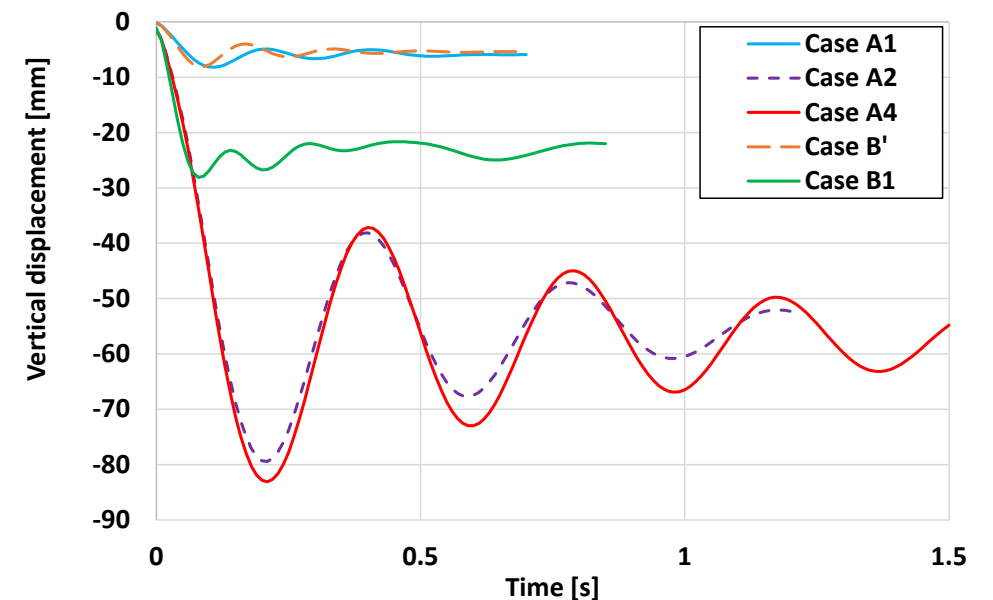
Przypadek A4

WYNIKI

MECHANIZMY PLASTYCZNE PO USUNIĘCIU SŁUPA W ROZWAŻANYM SCENARIUSZU



ODPOWIEŹ KONSTRUKCJI W FUNKCJI CZASU DLA SCENARIUSZY USUWANIA SŁUPA



■ WNIOSKI

- Można podsumować, że konstrukcja posiada nośność pozwalającą oprzeć się katastrofie postępującej, nawet w przypadku utraty słupa po trzęsieniu ziemi.
- Poziom uszkodzenia elementów (wyrażony wielkością odkształcenia plastycznego w przegubach plastycznych) jest niewielki.
- Do oceny zachowania konstrukcji można zastosować inne kryterium (np. zapobieganie zawaleniu).

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

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