DIFISEK

Część 3
Odpowiedź mechaniczna

Prezentowane tematy

Część 1: Oddziaływanie termiczne i mechaniczne

Część 2: Odpowiedź termiczna

Część 3: Odpowiedź mechaniczna

Część 4: Oprogramowanie inżynierii pożarowej

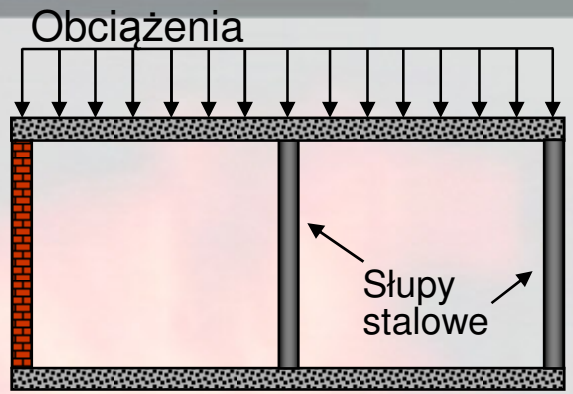
Część 5a: Przykłady

Część 5b: Istniejące obiekty

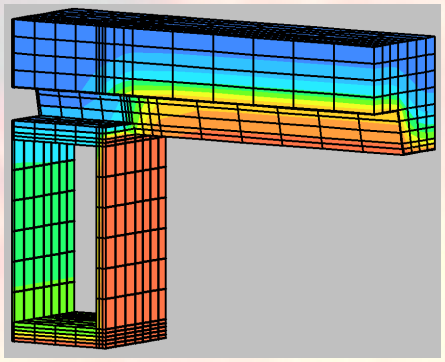
Powstanie pożaru – łańcuch zdarzeń

1: Zapalenie

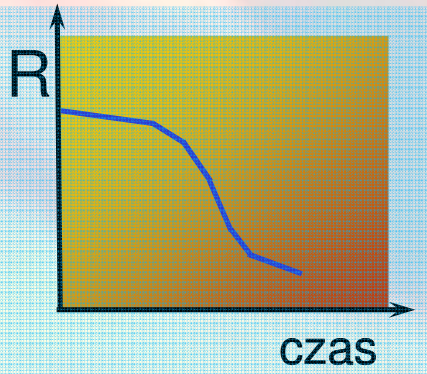
2: Oddziaływanie termiczne



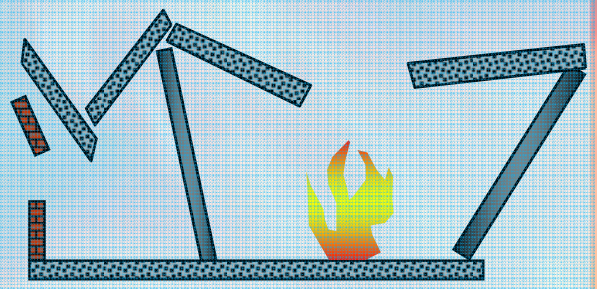
3: Oddziaływanie mechaniczne



4: Odpowiedź termiczna



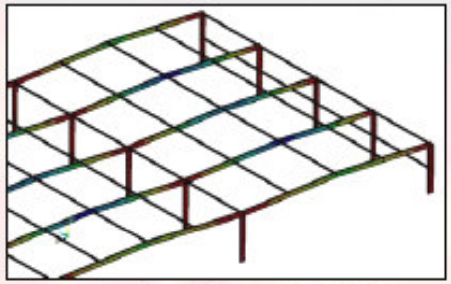
5: Odpowiedź mechaniczna



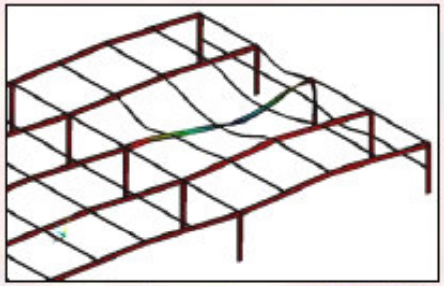
6: Możliwe zawalenie

Jak konstrukcja reaguje na ogień

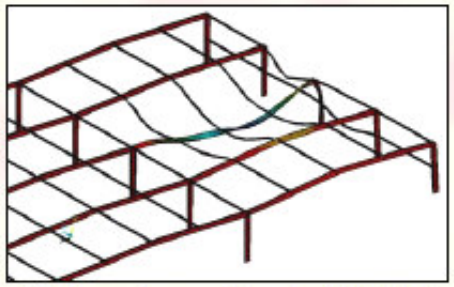
Wzrost temperatury ⇒ Ekspansja termiczna + spadek zarówno sztywności i wytrzymałości ⇒ Dodatkowe deformacje ⇒ ewentualne zniszczenie



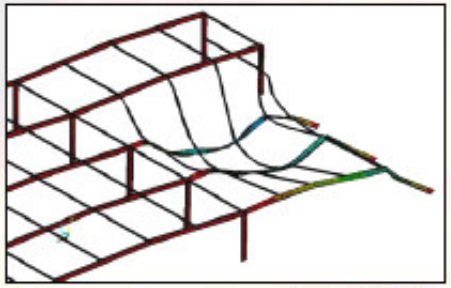
t = 0 θ = 20°C



16 min θ = 620°C



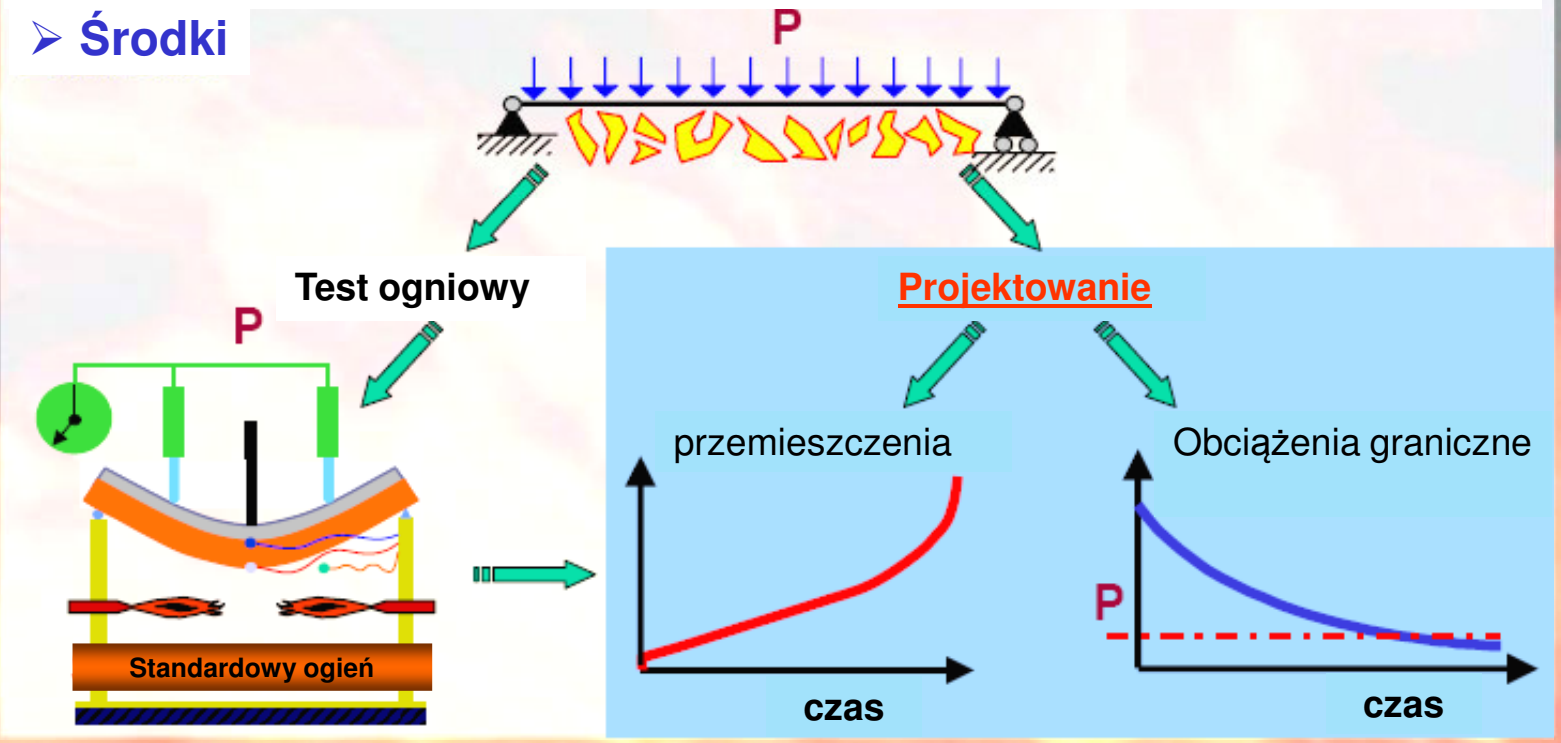
22 min θ = 720°C



31 min θ = 820°C

Oszacowanie odpowiedzi mechanicznej konstrukcji na pożar

- **Cel**
  - Opis zachowania konstrukcji w różnych warunkach pożarowych
- **Środki**



Podstawowe parametry służące do oszacowania odpowiedzi mechanicznej konstrukcji stalowych w sytuacji pożaru

- Obciążenie mechaniczne w sytuacji pożarowej
  - określone kombinacje obciążeń
- Właściwości mechaniczne materiałów związane ze wzrostem temperatury
  - sztywność i wytrzymałość zmienia się wraz z temperaturą
- Przybliżone metody analizy konstrukcji w pożarze
  - różne podejścia
  - obszary zastosowanie
- Specyficzne warunki projektowania pożarowego konstrukcji stalowych i zespolonych
  - łączniki, węzły, połączenia, itp.

Mechaniczne obciążenia – kombinacja zgodna z Eurokodami (EN 1990 i EN 1991-1-2)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ or } \Psi_{2,1})\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

$G_{k,j}$: **wartości charakterystyczne obciążeń stałych**

$Q_{k,1}$: **wartości charakterystyczne wiodących obciążeń zmiennych**

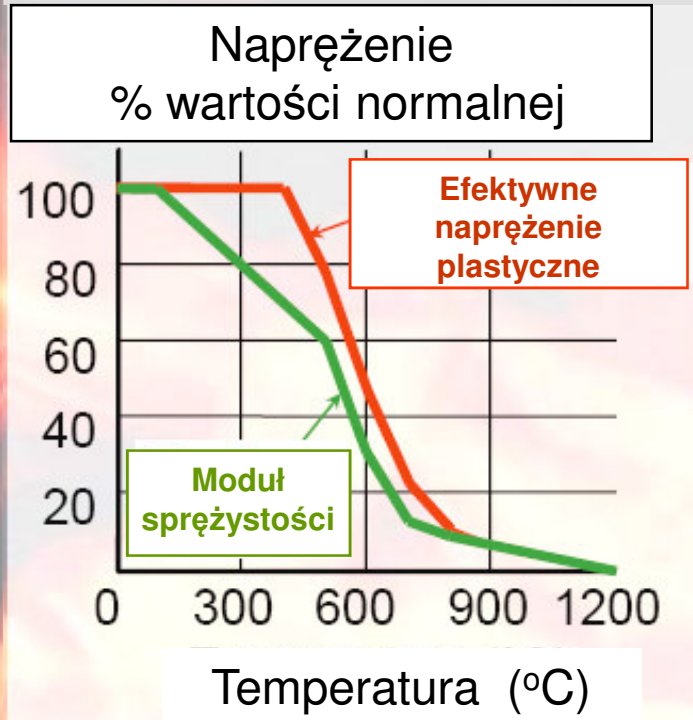
$Q_{k,i}$: **wartości charakterystyczne pozostałych obciążeń obciążeń zmiennych (towarzyszących)**

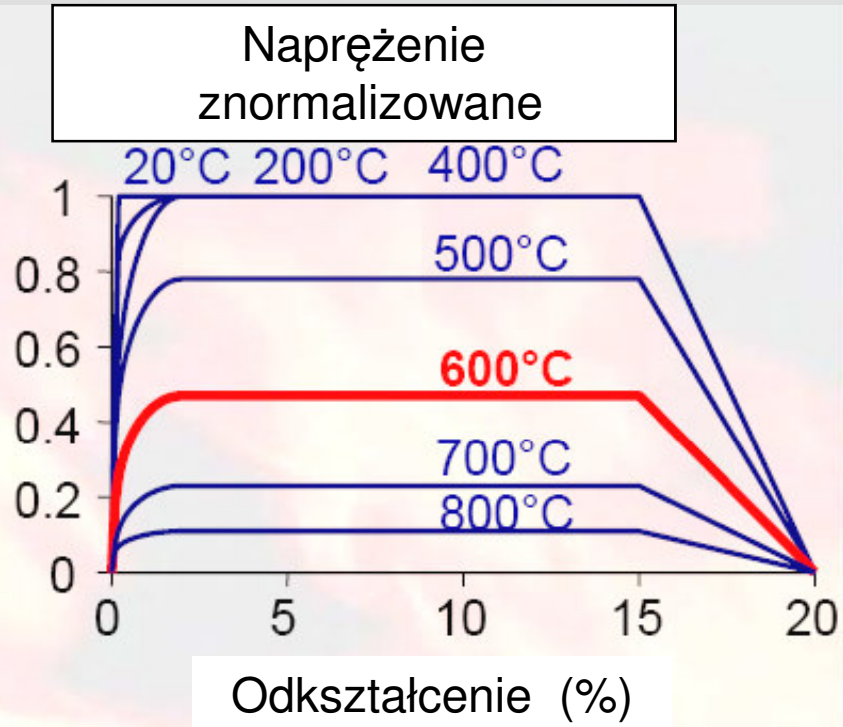
$\Psi_{1,1}$: **współczynnik kombinacji dla wartości częstszej obciążenia zmiennego**

$\Psi_{2,i}$: **współczynnik kombinacji dla wartości prawie stałej obciążenia zmiennego**

→ **poziom obciążenia** $\eta_{fi,t}$ ***(patrz prezentacja Część 1)***

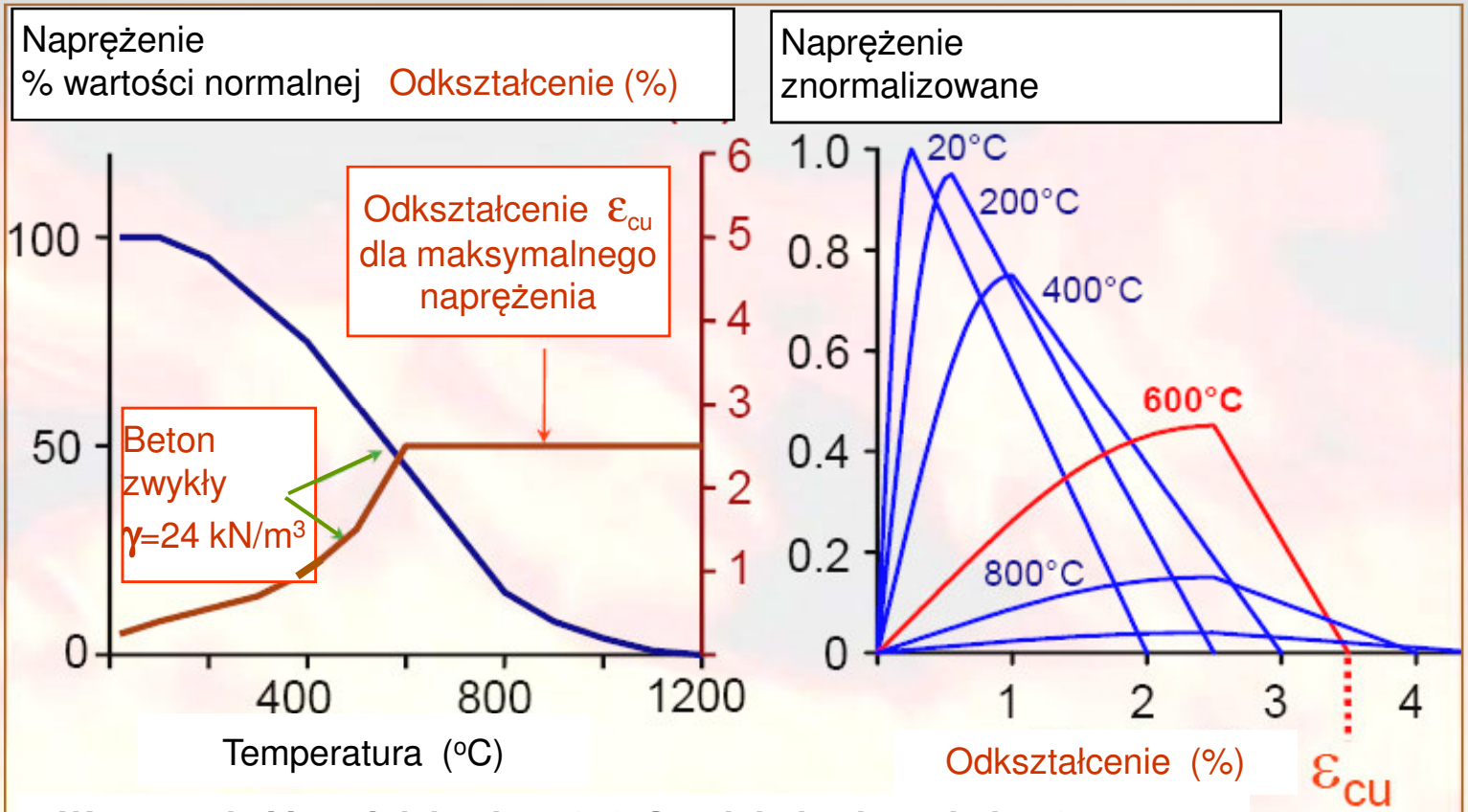
Właściwości mechaniczne stali konstrukcyjnej w podwyższonych temperaturach (EN 1993-1-2)





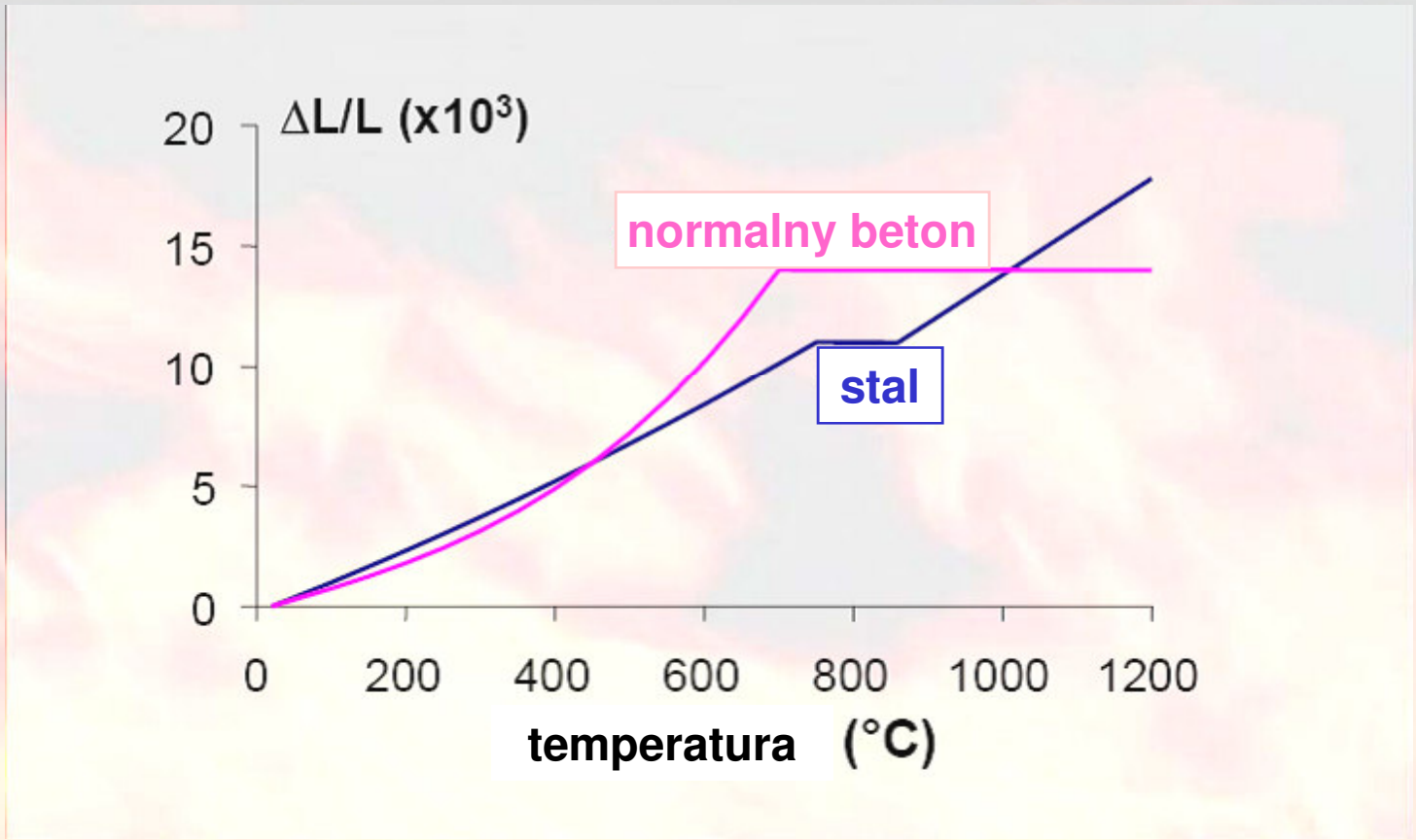
- **Moduł sprężystości w 600°C redukuje się o około 70 %**
- **Naprężenie plastyczne w 600°C redukuje się o ponad 50 %**

Właściwości mechaniczne betonu w podwyższonych temperaturach (EN 1994-1-2)



- **Wytrzymałość na ściskanie w 600°C redukuje się o około 50 %**

Rozszerzalność termiczna stali i betonu (EN 1993-1-2 i EN 1994-1-2)



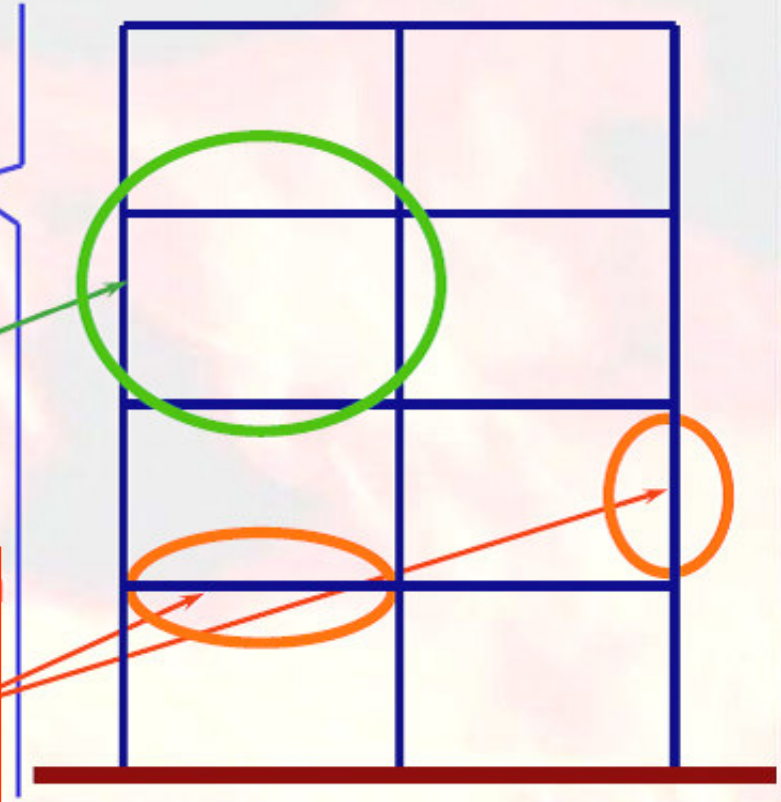
Różne podejścia przy analizie mechanicznej odpowiedzi konstrukcji w sytuacji pożaru

- Trzy różne podejścia zgodne z Eurokodami

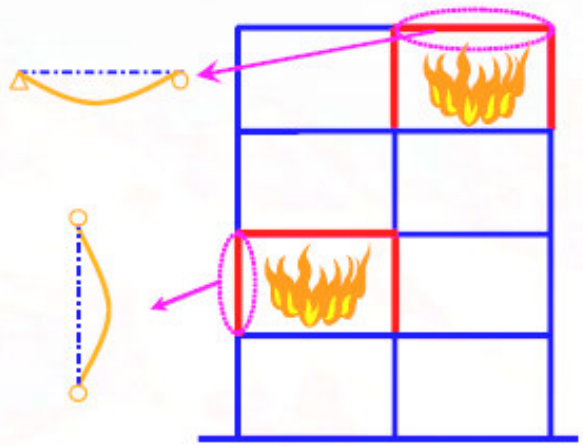
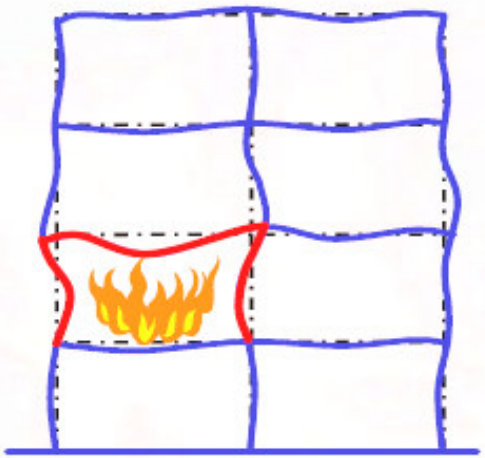
globalna analiza konstrukcji

analiza wydzielonej części konstrukcji

analiza elementu (głównie gdy wymagane jest sprawdzenie standardowej odporności pożarowej)



Różne podejścia przy analizie mechanicznej odpowiedzi konstrukcji w sytuacji pożaru

Analiza elementu	Globalna analiza konstrukcji
	
➢ niezależna od konstrukcji analiza elementu ➢ proste zastosowanie ➢ generalnie dla warunków pożaru nominalnego	➢ interakcja efektów między różnymi częściami konstrukcji ➢ funkcja obserwacji segmentu ➢ stateczność globalna

Trzy metody projektowania w ocenie odpowiedzi mechanicznej konstrukcji w sytuacji pożaru

- **Dane tabelaryczne**
  - elementy konstrukcji zespolonych
- **Prosty model obliczeniowy**
  - temperatura krytyczna
  - elementy konstrukcji stalowych i zespolonych

→ **Klasyczne i tradycyjne aplikacje**

- **Zaawansowany model obliczeniowy**
  - **wszystkie typy konstrukcji**
  - **modele numeryczne bazujące na:**
    - **metoda elementów skończonych**
    - **metoda różnic skończonych**

→ **Zaawansowane i specyficzne projektowanie pożarowe**

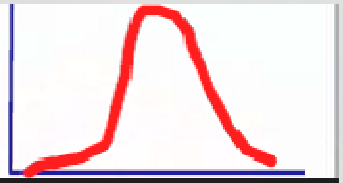
Obszar zastosowania różnych metod projektowania konstrukcji w sytuacji pożaru

❑ **Oddziaływanie termiczne definiowane przez pożar nominalny**

Typ analizy	Dane tabelaryczne	Proste modele obliczeniowe	Zaawansow. modele obliczeniowe
Analiza elementu	Tak Krzywa ISO-834	Tak	Tak
Analiza części konstrukcji	Nie	Tak (jeżeli są dostępne)	Tak
Globalna analiza konstrukcji	Nie	Nie	Tak

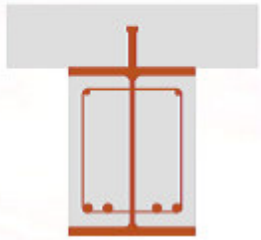
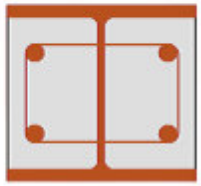
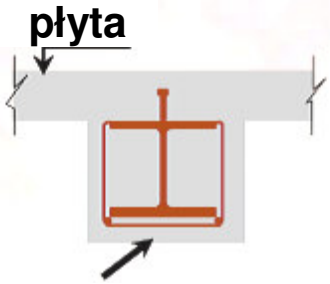
Obszar zastosowania różnych metod projektowania konstrukcji w sytuacji pożaru

❑ **Oddziaływanie termiczne definiowane przez pożar naturalny**

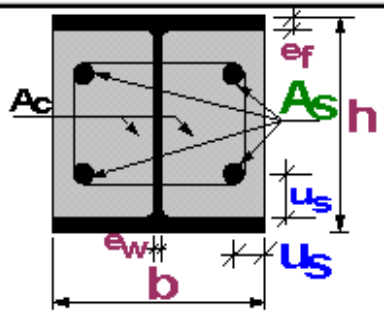


Typ analizy	Dane tabelaryczne	Proste modele obliczeniowe	Zaawansowane modele obliczeniowe
Analiza elementu	Nie	Tak (jeżeli są dostępne)	Tak
Analiza części konstrukcji	Nie	Nie	Tak
Globalna analiza konstrukcji	Nie	Nie	Tak

Dane tabelaryczne (elementy stalowe i zespolone stalowo-betonowe)

Belki zespolone	Słupy zespolone	
		
 Beton dla izolacji		

Dane tabelaryczne i istotne parametry (słupy zespolone – ENV 1994-1-2)



		Normowa odporność ogniowa			
		R30	R60	R90	R120
	Minimalny stosunek gr. półki do gr. środnika e_w/e_f	0,5			
1	Minimalne wymiary przekroju dla poziomu obciążenia	$\eta_{fi,t} \leq 0{,}28$			
1.1	minimalny wymiar h i b [mm]	160	200	300	400
1.2	minimalny wymiar u_s [mm]	-	50	50	70
1.3	minimalny stosunek $A_s/(A_c+A_s)$ [%]	-	4	3	4
2	Minimalne wymiary przekroju dla poziomu obciążenia	$\eta_{fi,t} \leq 0{,}47$			
2.1	minimalny wymiar h i b [mm]	160	300	400	-
2.2	minimalny wymiar u_s [mm]	-	50	70	-
2.3	minimalny stosunek $A_s/(A_c+A_s)$ [%]	-	4	4	-
3	Minimalne wymiary przekroju dla poziomu obciążenia	$\eta_{fi,t} \leq 0{,}66$			
3.1	minimalny wymiar h i b [mm]	160	400	-	-
3.2	minimalny wymiar u_s [mm]	40	70	-	-
3.3	minimalny stosunek $A_s/(A_c+A_s)$ [%]	1	4	-	-

normowa klasyfikacja pożarowa

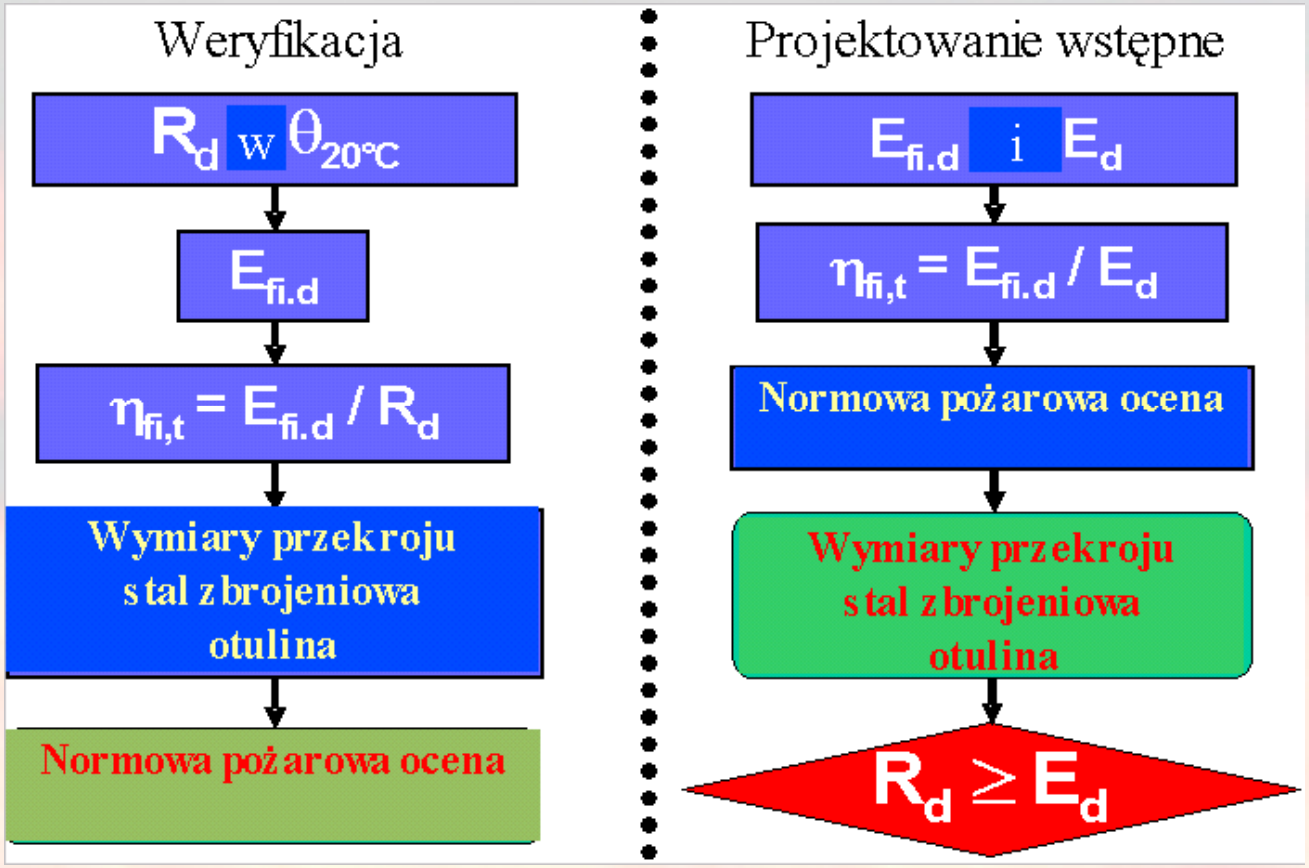
poziom obciążenia

wymiary przekroju

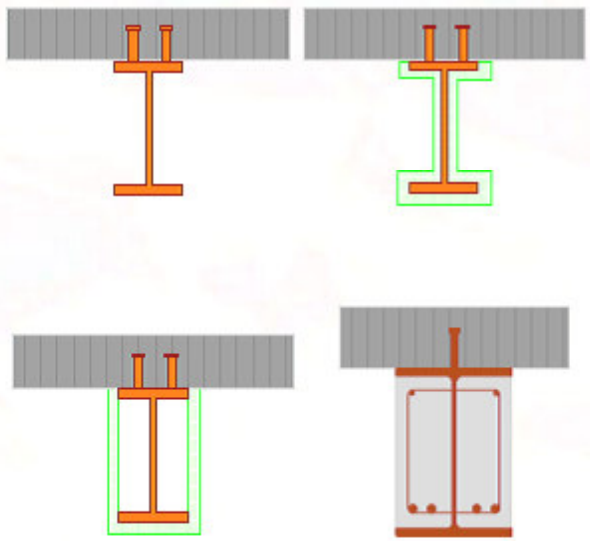
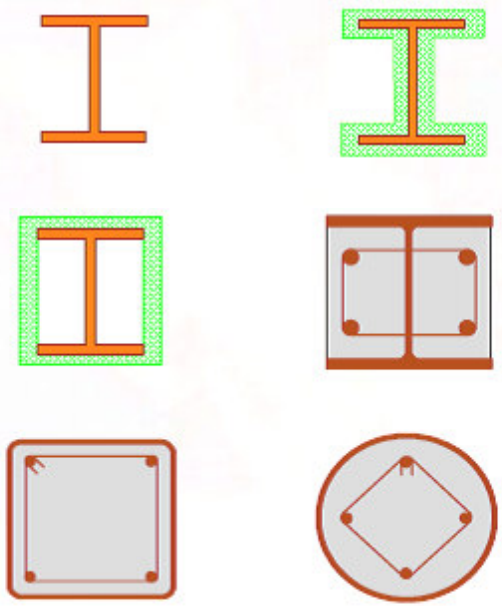
stal zbrojeniowa

otulina betonowa

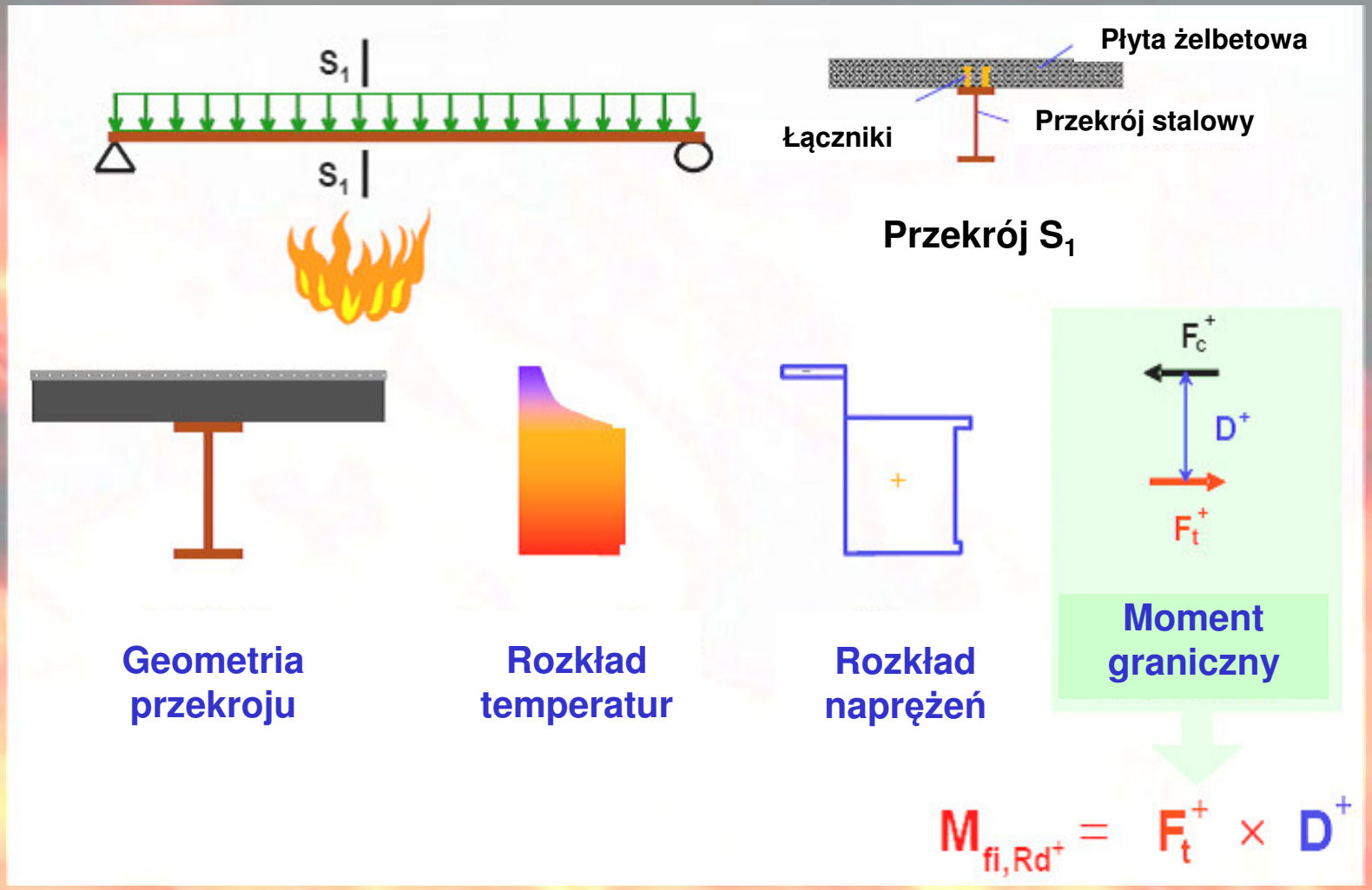
Jak stosować dane tabelaryczne w projektowaniu pożarowym (dwie różne sytuacje)



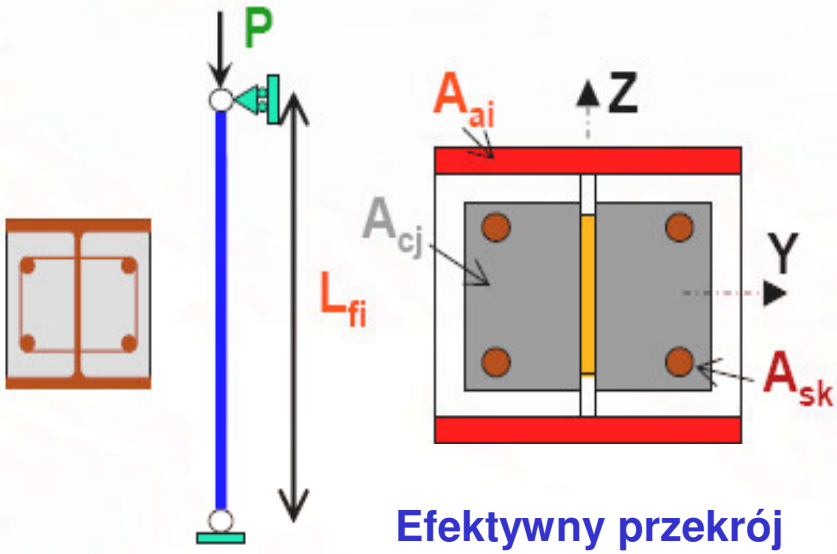
Proste modele obliczeniowe (elementy stalowe i zespolone)

Belki (stalowe i zespolone)	Słupy (stalowe i zespolone)
	

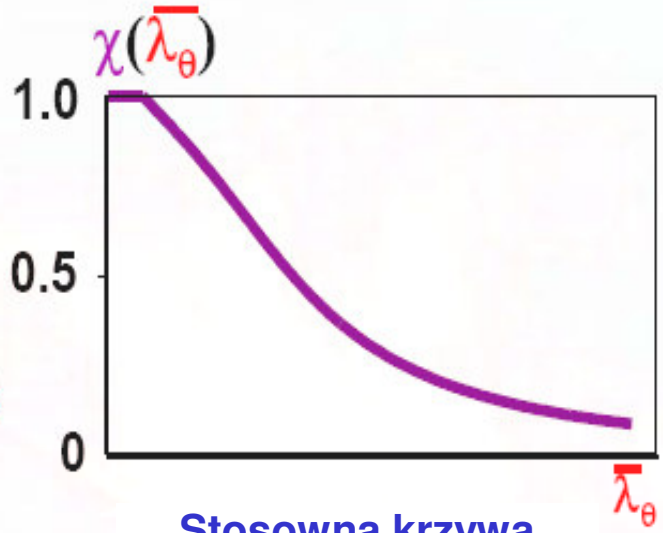
Prosty model obliczeniowy (belki zespolone) - teoria nośności plastycznej



Prosty model obliczeniowy (słupy zespolone) - krzywa wyboczeniowa



Efektywny przekrój

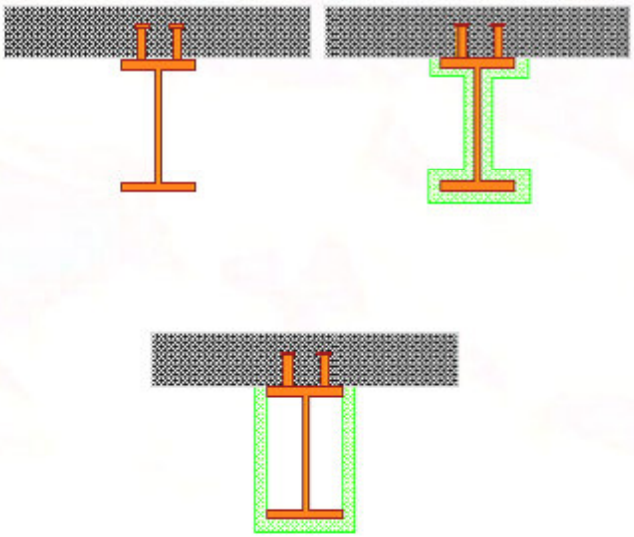
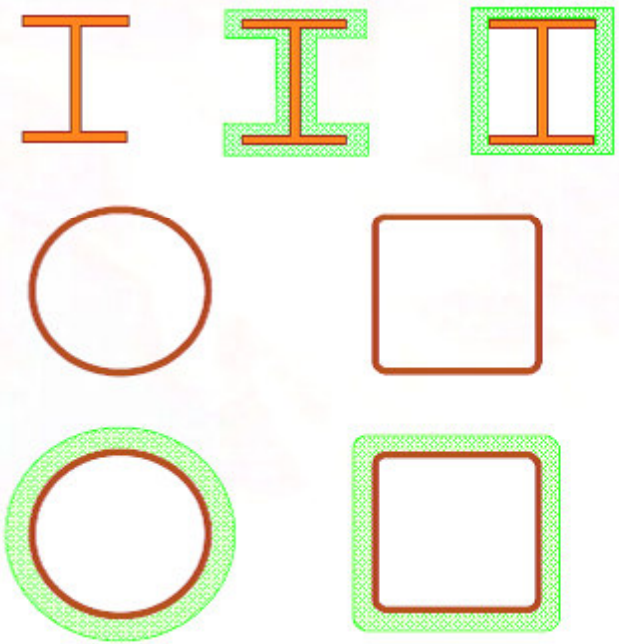


Stosowna krzywa wyboczeniowa

Nośność: $N_{fi.Rd} = \chi(\bar{\lambda}_\theta) N_{fi.pl.Rd}$

$\chi(\bar{\lambda}_\theta) \Leftarrow$ **Wytrzymałość** i **sztywność** efektywnego przekroju + długość wyboczeniowa słupa L_{fi}

Metoda temperatury krytycznej
(tylko elementy stalowe i pewne belki zespolone)

Belki (stalowe i zespolone)	Słupy (stalowe i zespolone)
	

Metoda temperatury krytycznej

- Zgodnie z prostymi modelami obliczeniowymi, dla równomiernie ogrzanych stalowych elementów: $R_{fi,d,t} = k_{y,\theta} R_{fi,d,0}$,
- Odporność ogniowa powinna spełniać:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d} = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} R_{fi,d,0} = \mu_0 R_{fi,d,0} \Rightarrow k_{y,\theta} \geq \mu_0$$

- W szczególności, kiedy $k_{y,\theta} = \mu_0$ odpowiednia temp. jest zdefiniowana jak temp. krytyczna θ_{cr}
- W EN1993-1-2 podana jest prosta formuła określająca temperaturę krytyczną θ_{cr}

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln\left[\frac{1}{0.9674\mu_0^{3.833}} - 1\right] + 482$$

Jak stosować metodę temperatury krytycznej

Odporność na ogień

Efekty oddziaływań w sytuacji pożaru $E_{fi,d}$

↓

Obl. nośność elementu w temp. 20°C: R_d

Obl. efekty oddziaływań w temp. 20°C: E_d

↓

Poziom obciążenia w trakcie pożaru:

$\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / R_d$

↓

Poziom wykorzystania: $\mu_0 = \eta_{fi,t} \gamma_{M,fi} / \gamma_M$

↓

Temperatura krytyczna: θ_{cr}

- metody bezpośrednie
- metody iteracyjne

ponieważ $R_d = f(\ldots, \gamma_M)$ i

$R_{fi,d,0} = f(\ldots, \gamma_{M,fi})$

więc: $R_{fi,d,0} = R_d \dfrac{\gamma_M}{\gamma_{M,fi}}$

i $\mu_0 = \eta_{fi,t} \dfrac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M}$

Materiał	Pożar $\gamma_{M,fi}$	20°C γ_M
Stal	1.0	1.0
Stal zbrojeniowa	1.0	1.15
Beton	1.0	1.5
Łączniki	1.0	1.25

Po co metoda bezpośrednia i iteracyjna obliczania temperatury krytycznej (przypadek słupa stalowego)

- Krótkie krępe słupy →

$$N_{b,fi,t,Rd} = A\, k_{y,\theta max}\, f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}}$$

Współczynnik redukujący wytrzymałość $k_{y,\theta max}$ przy $\theta_{a,max}$

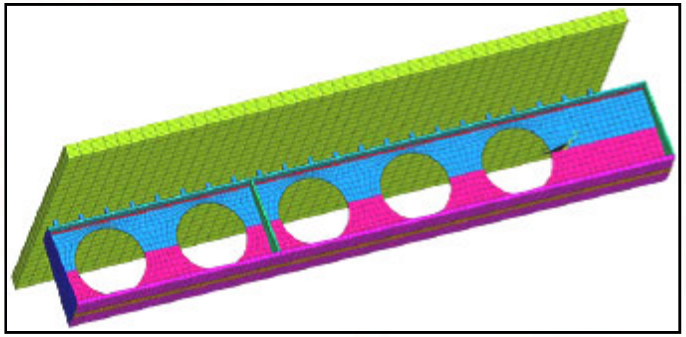
- Słupy podatne na wyboczenie →

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi(\lambda_\theta) A\, k_{y,\theta max}\, f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}}$$

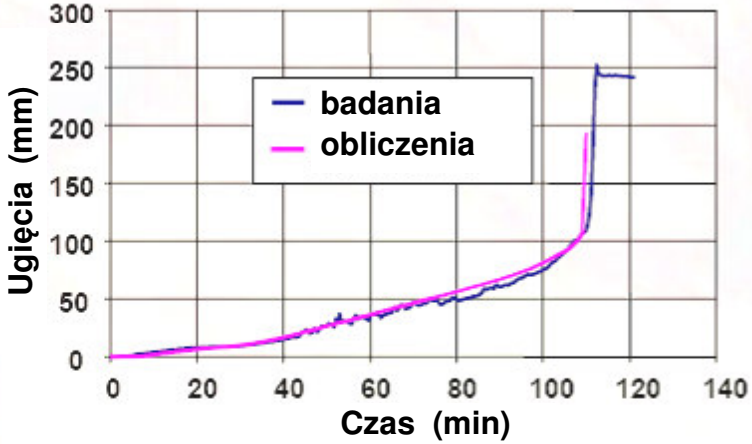
Współczynnik redukujący ze względu na wyboczenie $\chi(\lambda_\theta)$ zależy od:
- wytrzymałości
- sztywności

Stosując prostą procedurę iteracyjną należy określić odpowiednią wartość $\theta_{a,max}$ w przypadku problemów niestabilności

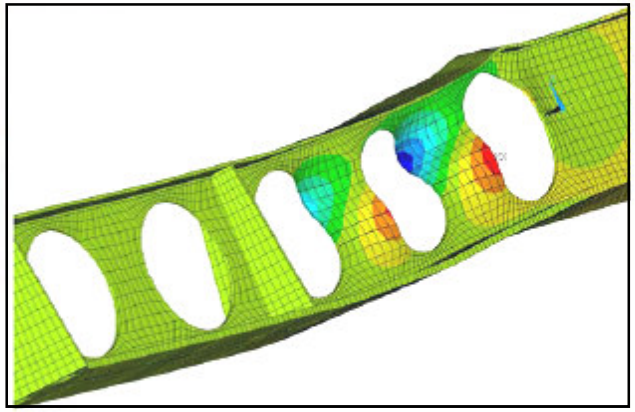
Zaawansowany model obliczeniowy dla dowolnego przypadku (stalowe i zespolone belki ażurowe)



Zbadana postać zniszczenia



Porównanie badania - obliczenia



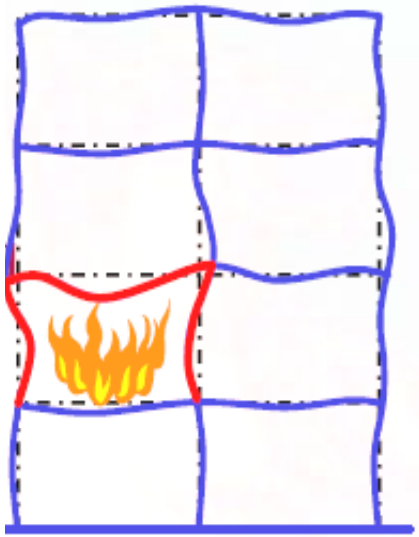
Obliczona postać zniszczenia

Projektowanie pożarowe w globalnej analizie konstrukcji

- **Ogólne zasady**
  - Konieczne zastosowanie zaawansowanego modelu obliczeniowego

  - Wybór właściwego modelu konstrukcji
  - Uwaga na istniejące warunki brzegowe
  - Uwzględnienie różnych przypadków obciążeń
  - Właściwy model obliczeniowy
  - Warunki przejścia w relacji z niemodelowaną częścią konstrukcji

  - Analiza wyników i kontrola kryteriów zniszczenia
  - Ocena nieuwzględnionych właściwości w bezpośredniej analizie (zgodność między modelem numerycznym a konstrukcyjnymi detalami)



Projektowanie pożarowe w globalnej analizie konstrukcji

Zastosowane kryteria w zaawansowanym modelu obliczeniowym

wymagane cechy obliczeniowych modeli fizycznych:

- skład odkształceń
- kinematyczny model materiału
- wytrzymałość podczas fazy ogrzewania

iteracyjne procedury rozwiązań numerycznych „krok po kroku”

kontrola możliwych postaci zniszczenia nie poddanych bezpośredniej analizie:

- zerwanie wskutek nadmiernego wydłużenia stali
- zarysowanie, pękanie i zgniatanie betonu

Właściwości modelu materiału fizycznego

Odkształcenia

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + (\varepsilon_\sigma + \varepsilon_c) + \varepsilon_r$$

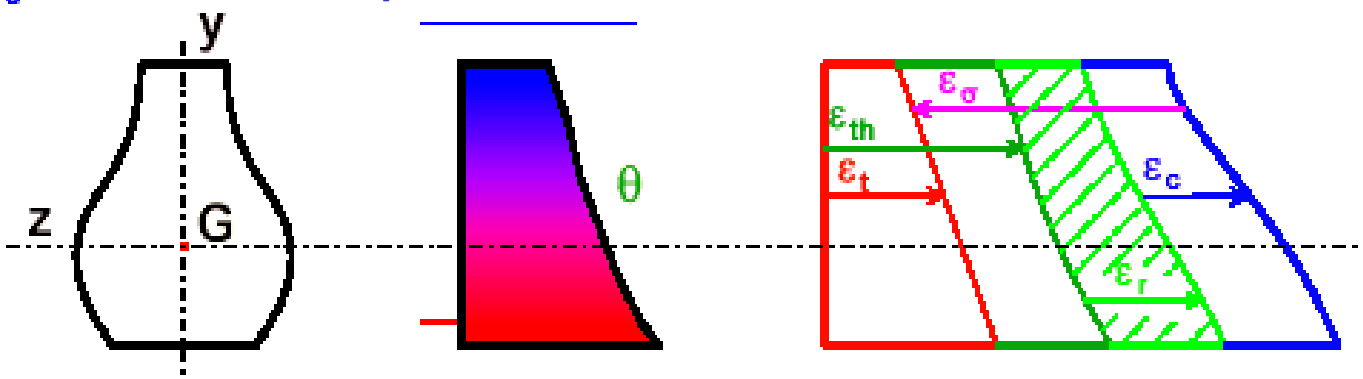
ε_t : całkowite odkształcenia

ε_{th} : odkształcenia termicznego wydłużenia

ε_σ : odkształcenia tensora naprężeń

ε_r : odkształcenia naprężeń rezydualnych (jeżeli istnieją)

ε_c : odkształcenia pełzania



Przekrój | Rozkład temperatury z = const | jednolite odkształcenia

Właściwości modelu materiału fizycznego

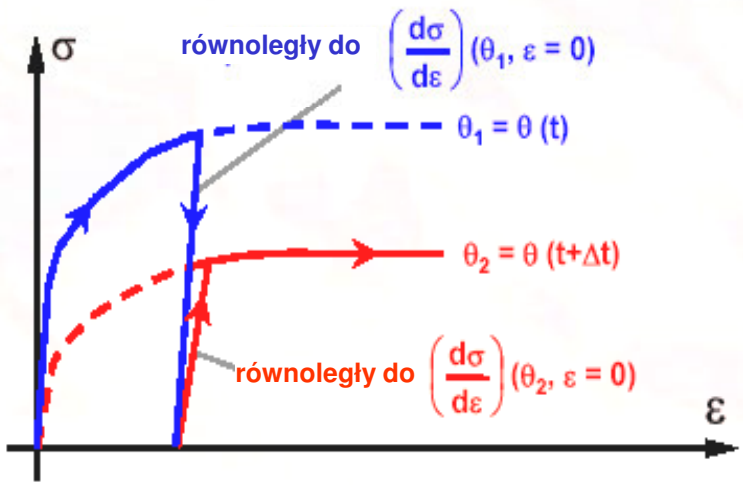
Kinematyczny model fizyczny materiału

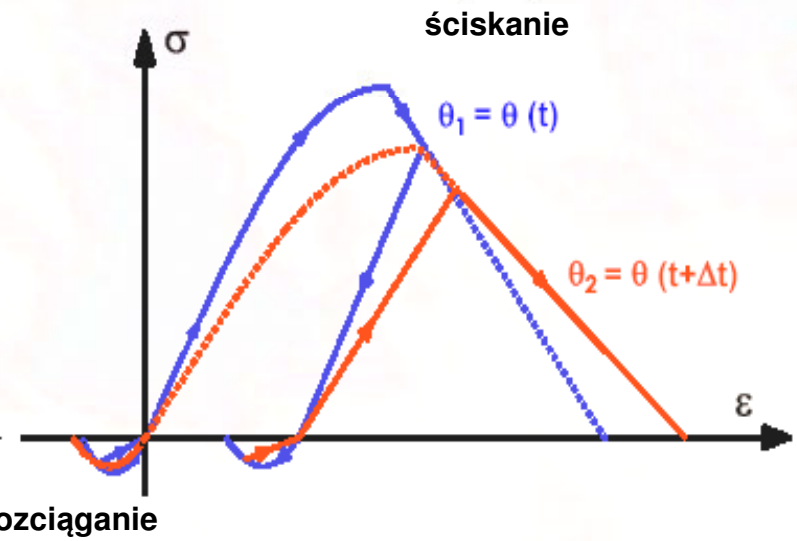
Stal

(materiał izotropowy)

Beton

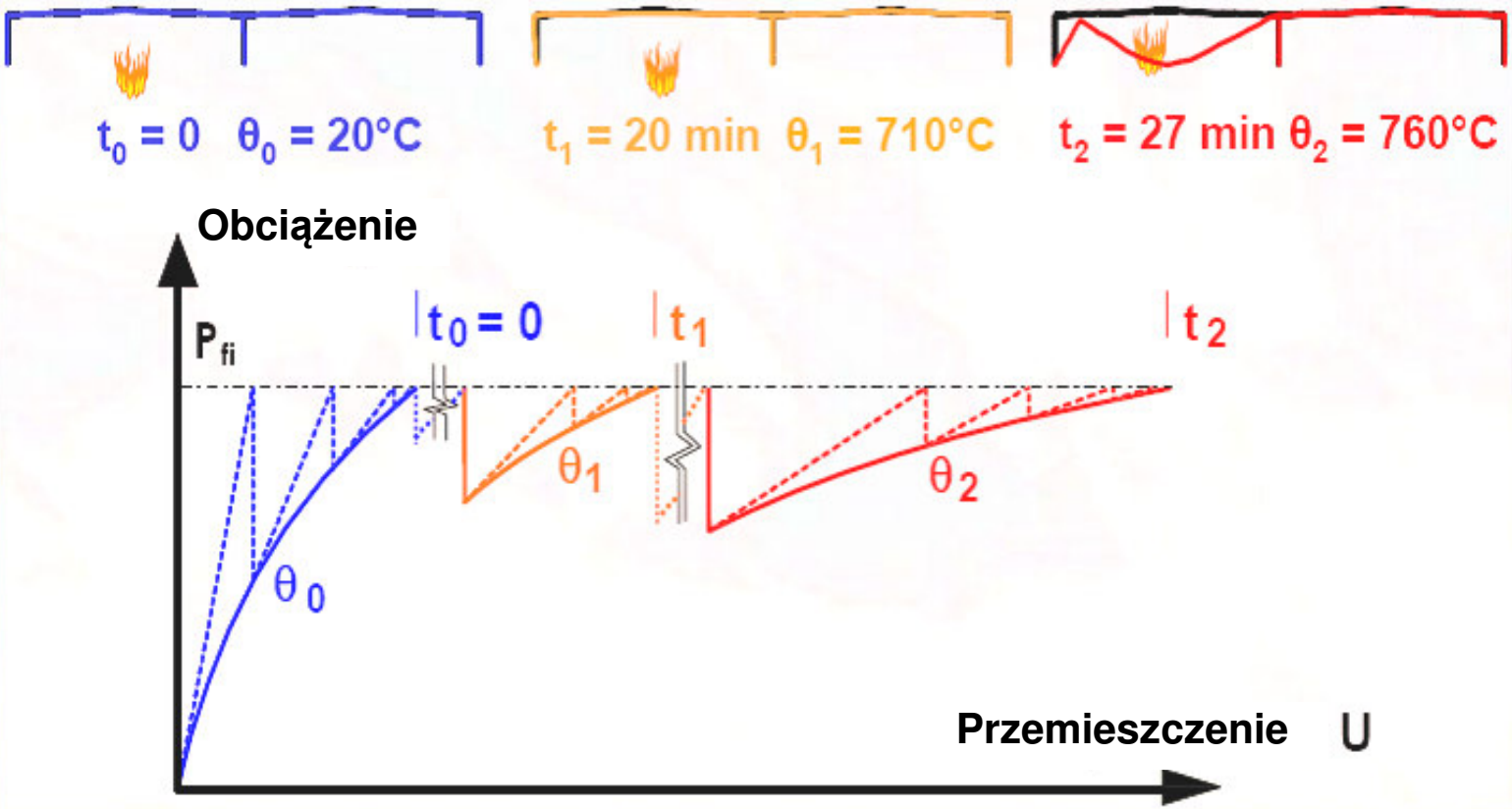
(materiał anizotropowy dla ściskania i rozciągania)





Iteracyjne procedury obliczeniowe „krok po kroku”

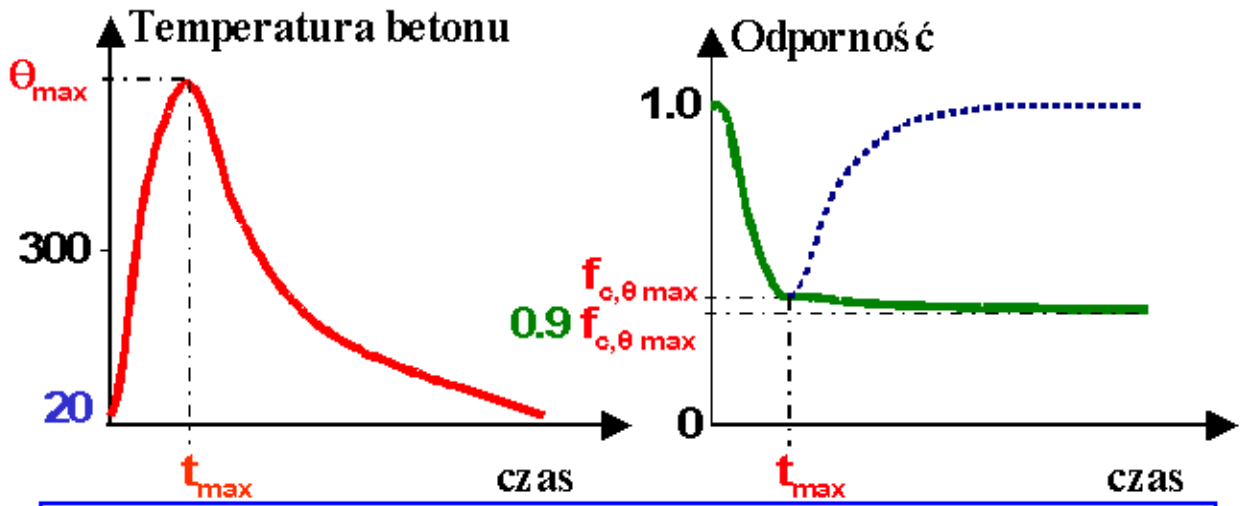
- Procedury obliczeniowe muszą brać pod uwagę zależność sztywności i wytrzymałości konstrukcji od temperatury



Wytrzymałość materiału podczas fazy ogrzewania

Właściwości stali w trakcie fazy chłodzenia wracają do pierwotnych wartości

Beton w trakcie fazy chłodzenia

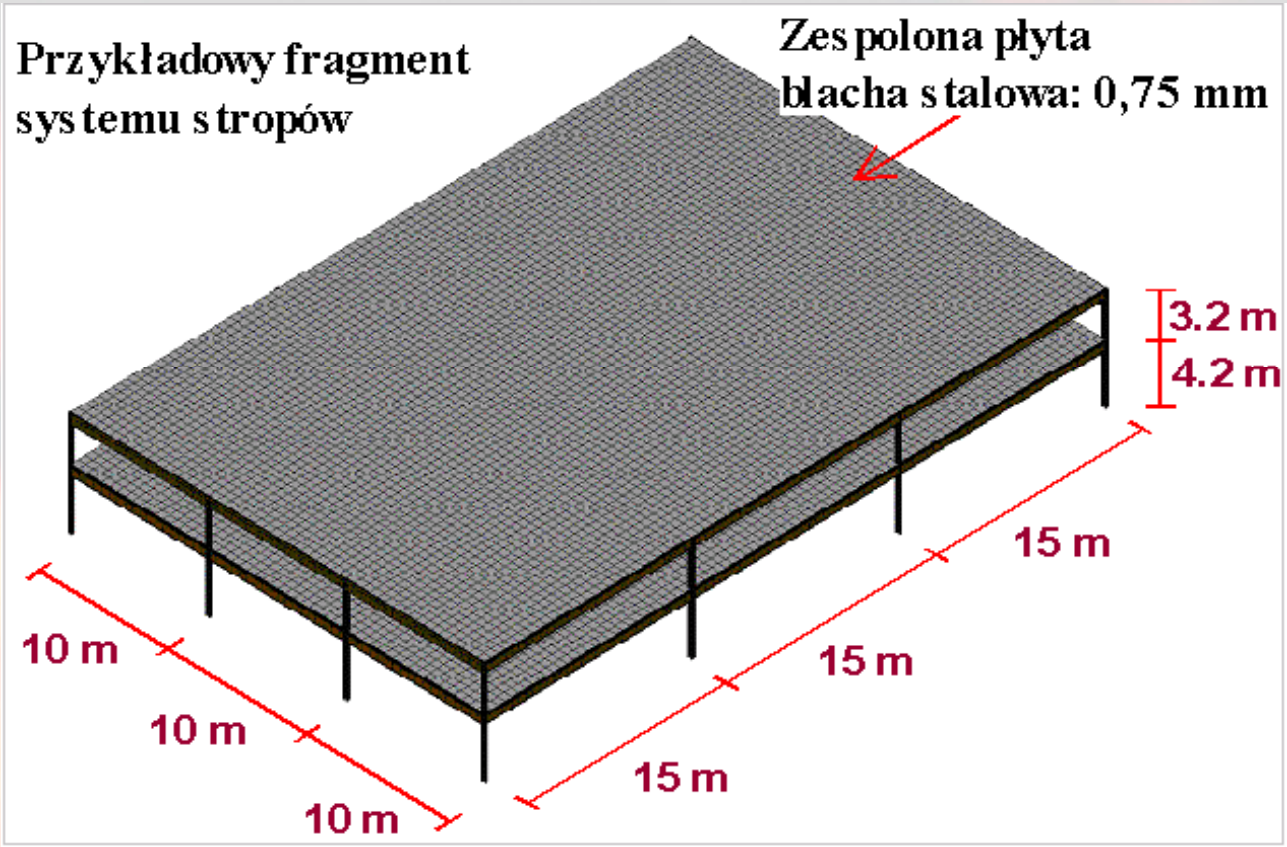


Na przykład jeżeli $\theta_{max} \geq 300\,°C$

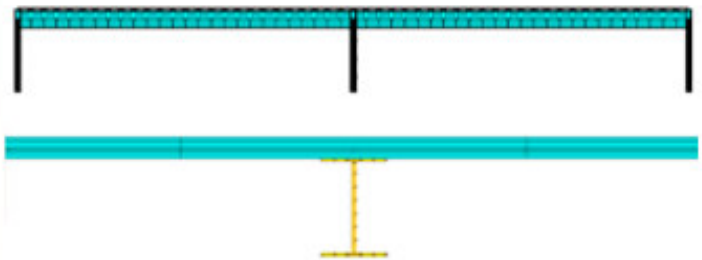
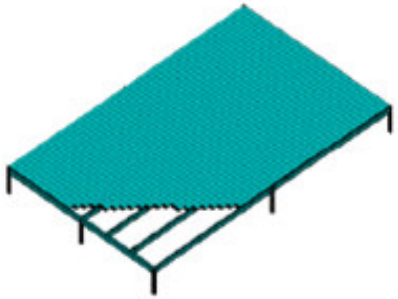
$f_{c,\theta,20°C} = 0.9\, f_{c,\theta\,max}$

Liniowa interpolacja dotyczy $f_{c\,\theta}$ dla θ w przedziale θ_{max} i 20°C

Globalna analiza konstrukcji zespolonego stropu w sytuacji pożaru lokalnego



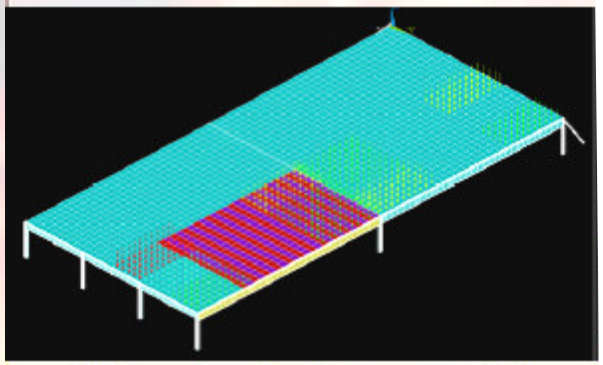
Wybór modelu konstrukcji - schematu

2D model ramy zespolonej	3D model stropu zespolonego (szkielet)
	
➢ Ograniczony efekt membrany (do 1D) ➢ Ograniczona redystrybucja obciążeń między sąsiednimi belkami ➢ Proste obliczenia szybsze w realizacji (w modelowaniu numerycznym) i bardziej skuteczne (duża liczba przeliczeń różnych wariantów)	➢ Model membrany (powłoki) zastosowany dla całej płyty stropowej ➢ Redystrybucja obciążeń między sąsiednimi belkami dzięki zastosowaniu elementów powłokowych ➢ Lepsza ocena nośności (wielkości obciążeń granicznych)

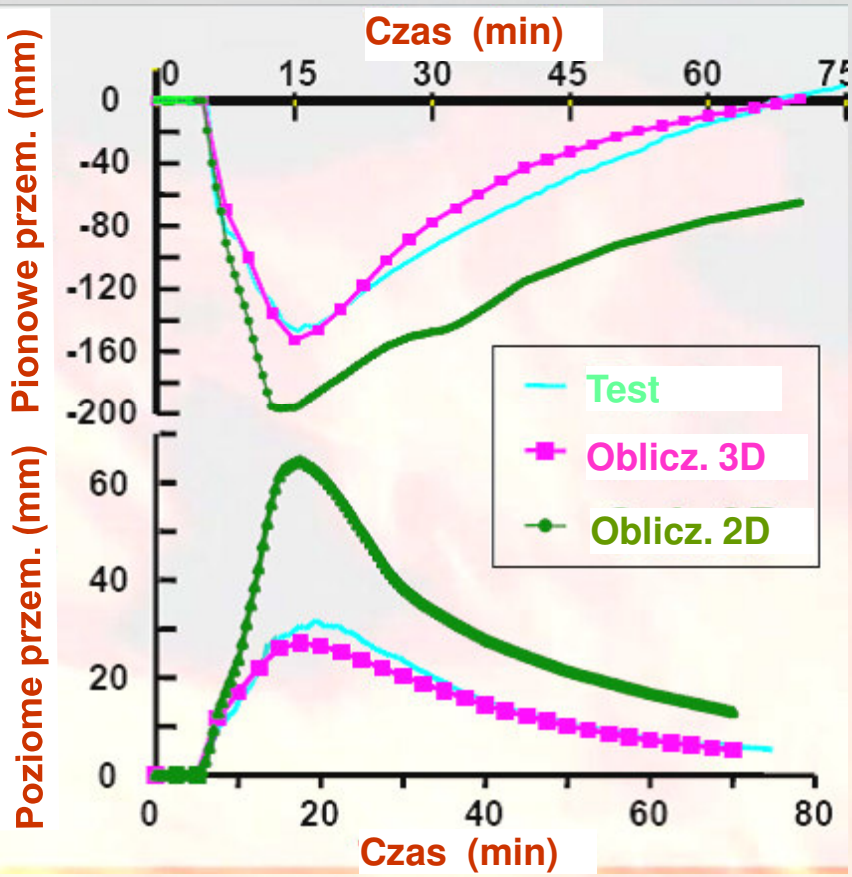
❑ **Bardziej realistyczny w aplikacjach 3D przestrzenny model stropu zespolonego**

Testowanie poprawności modelu 3D stropu zespolonego

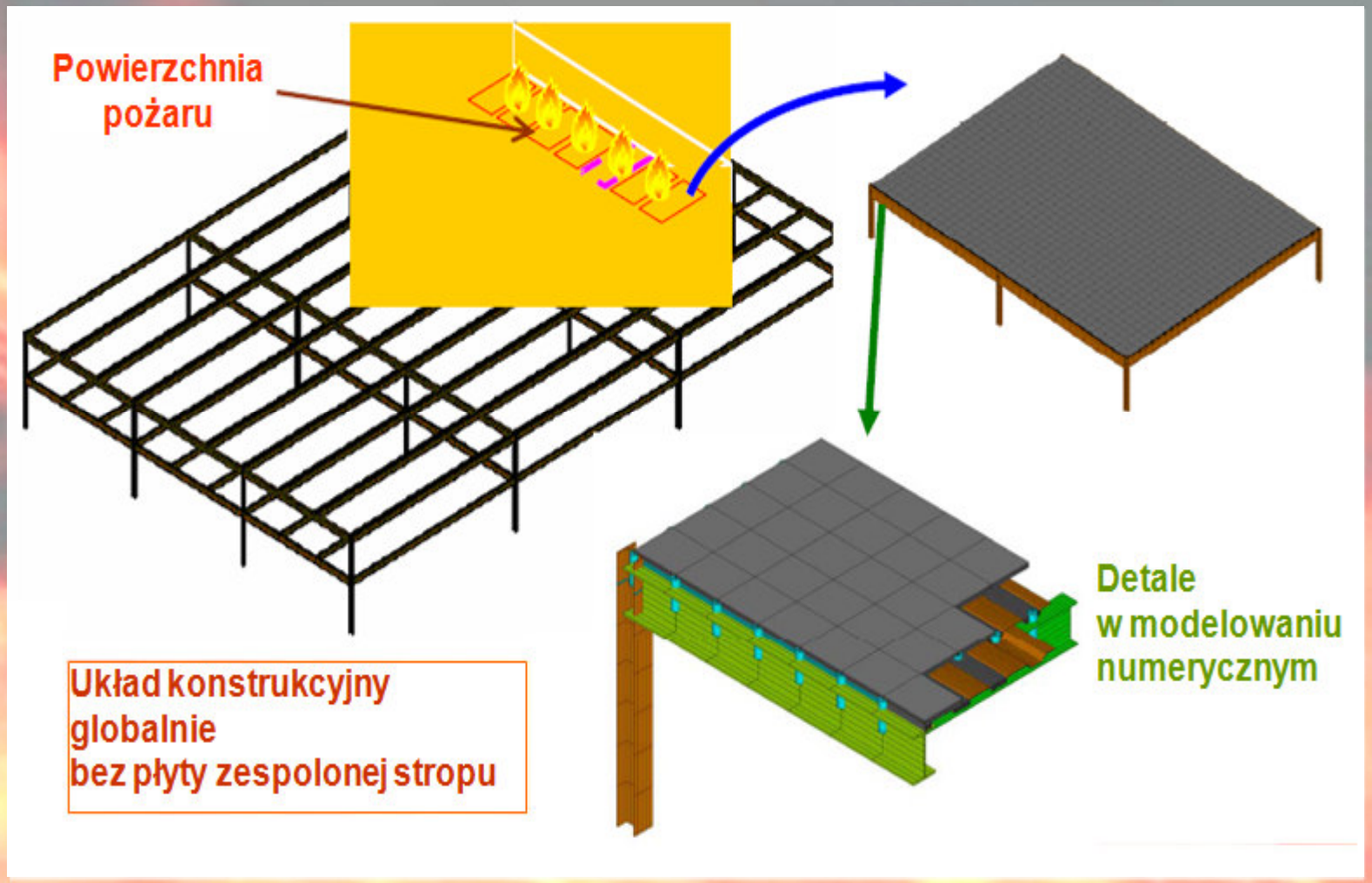
Test



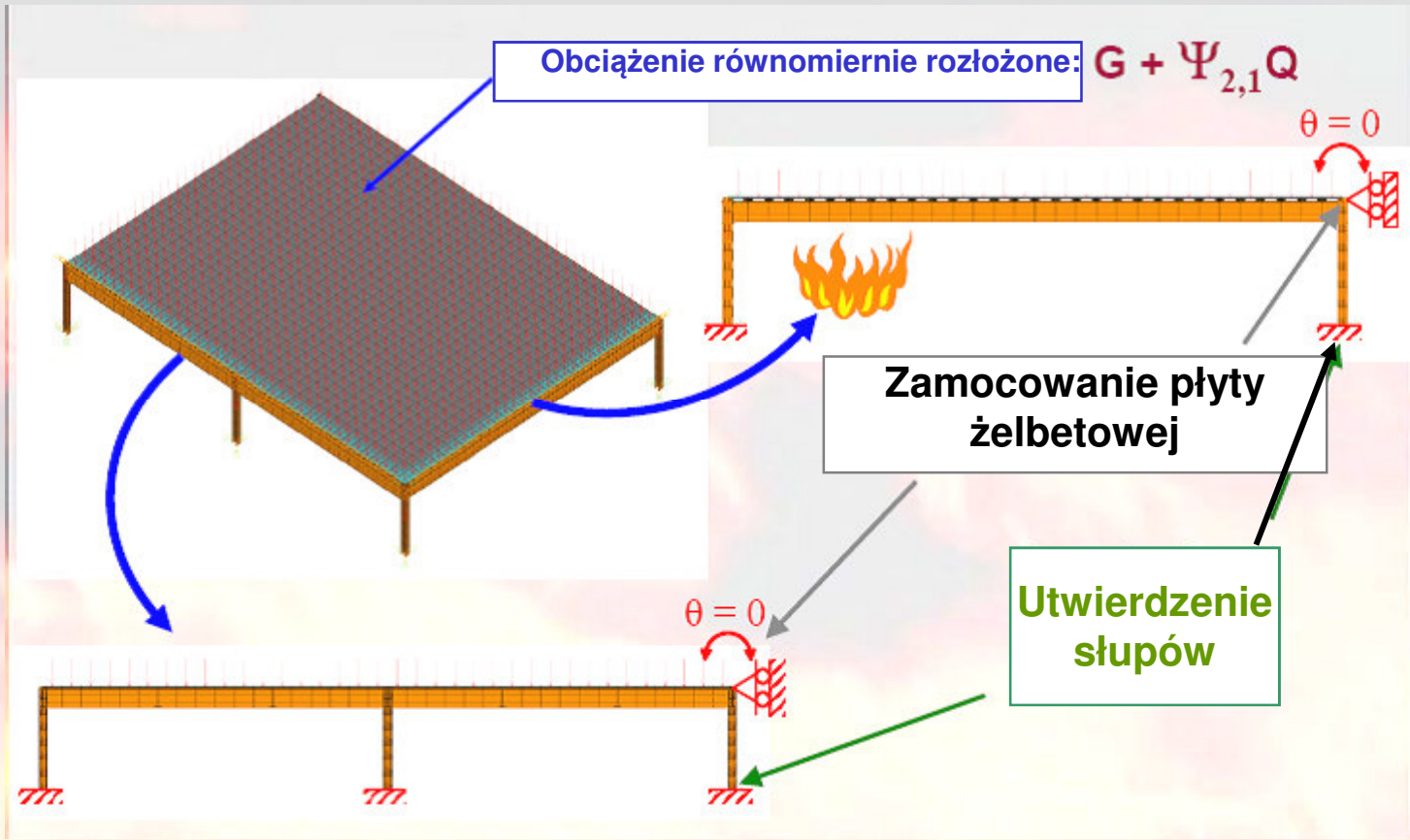
3D model obliczeniowy



Strategia modelowania 3D stropu zespolonego

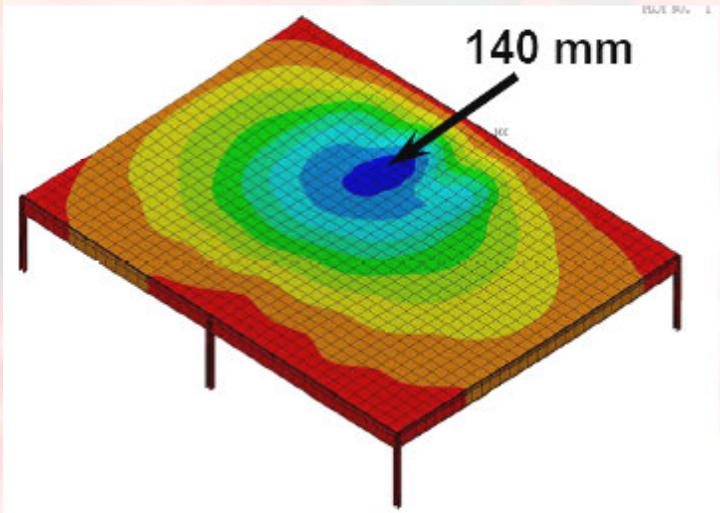


Obciążenie mechaniczne i warunki brzegowe

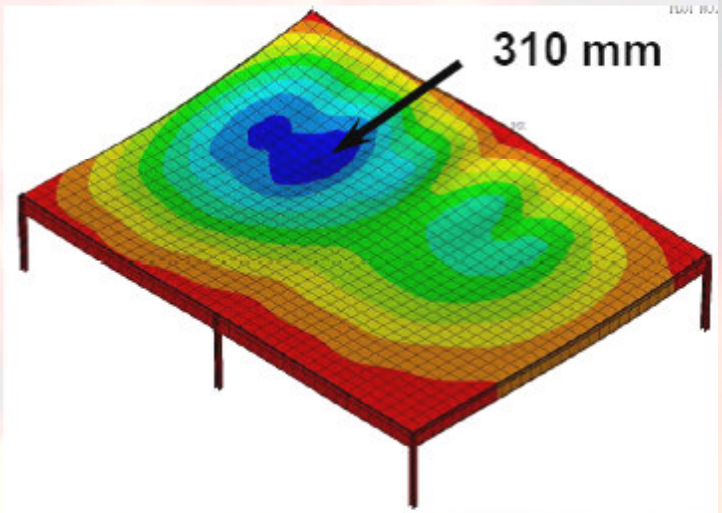


Odpowiedź mechaniczna konstrukcji

➢ **Ugięcie całkowite płyty stropu i kontrola odpowiedniego kryterium zniszczenia**



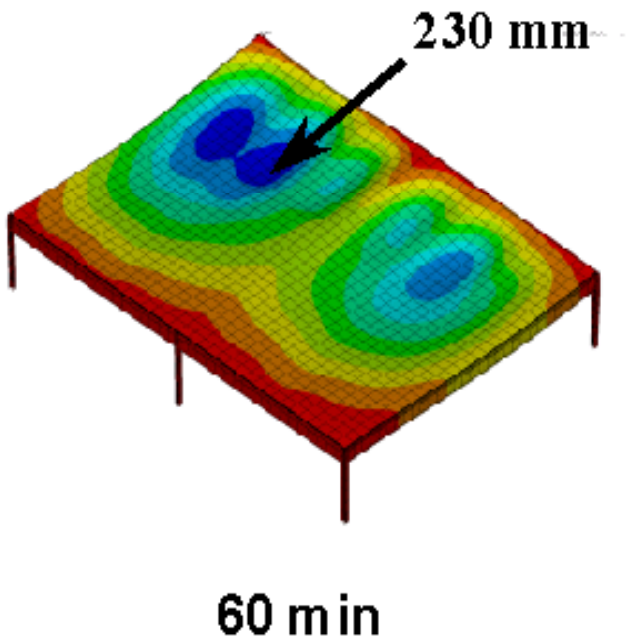
20 min

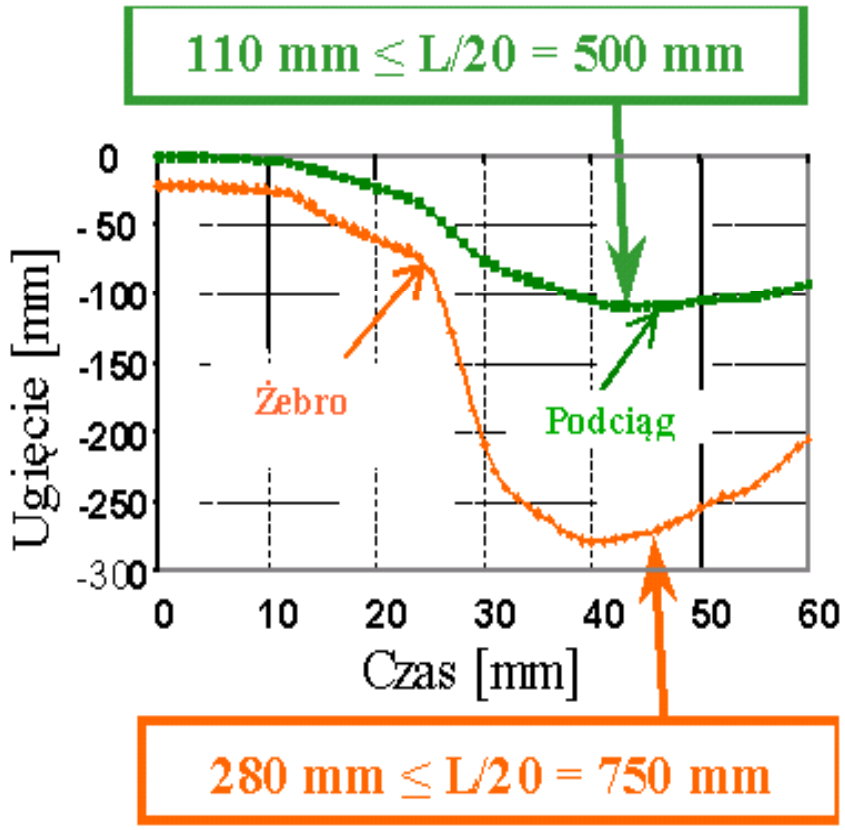


40 min

Odpowiedź mechaniczna konstrukcji

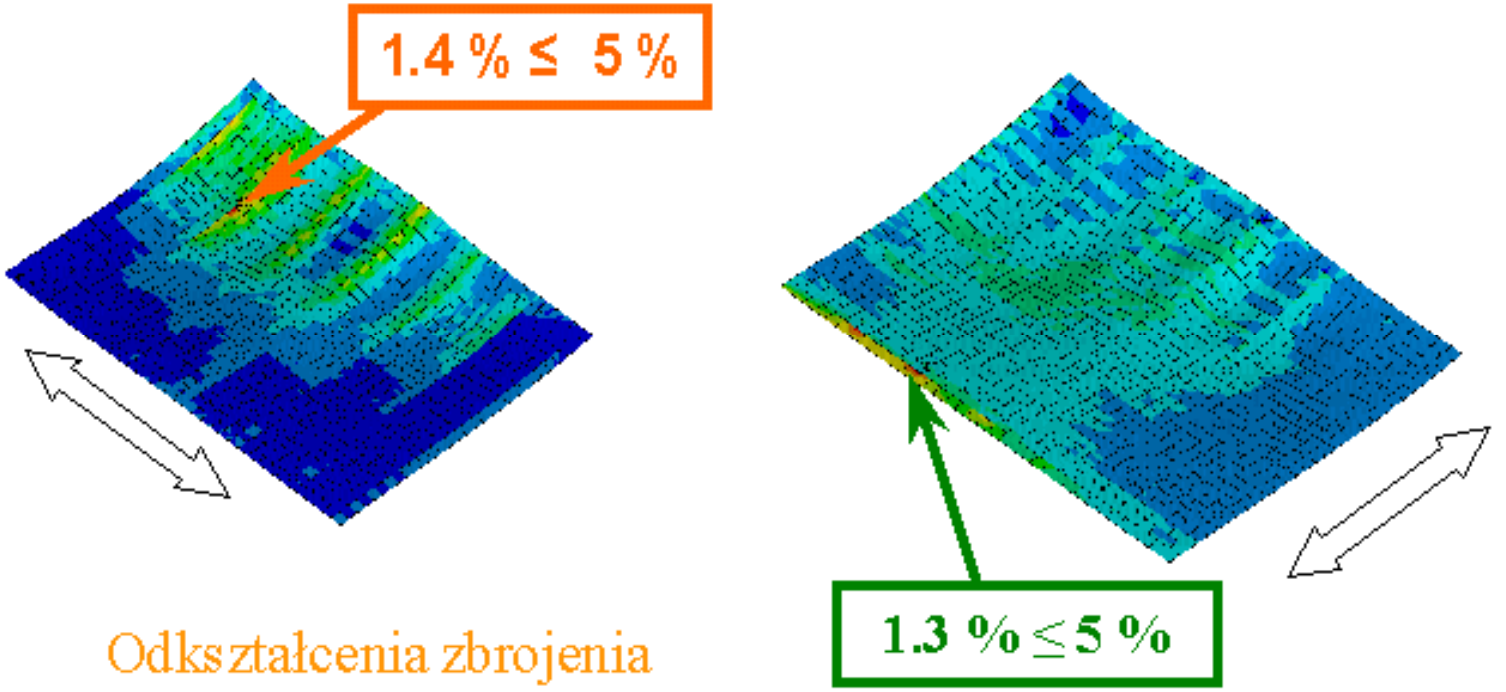
Całkowite ugięcie stropu i weryfikacja odpowiedniego kryterium zniszczenia





Odpowiedź mechaniczna konstrukcji

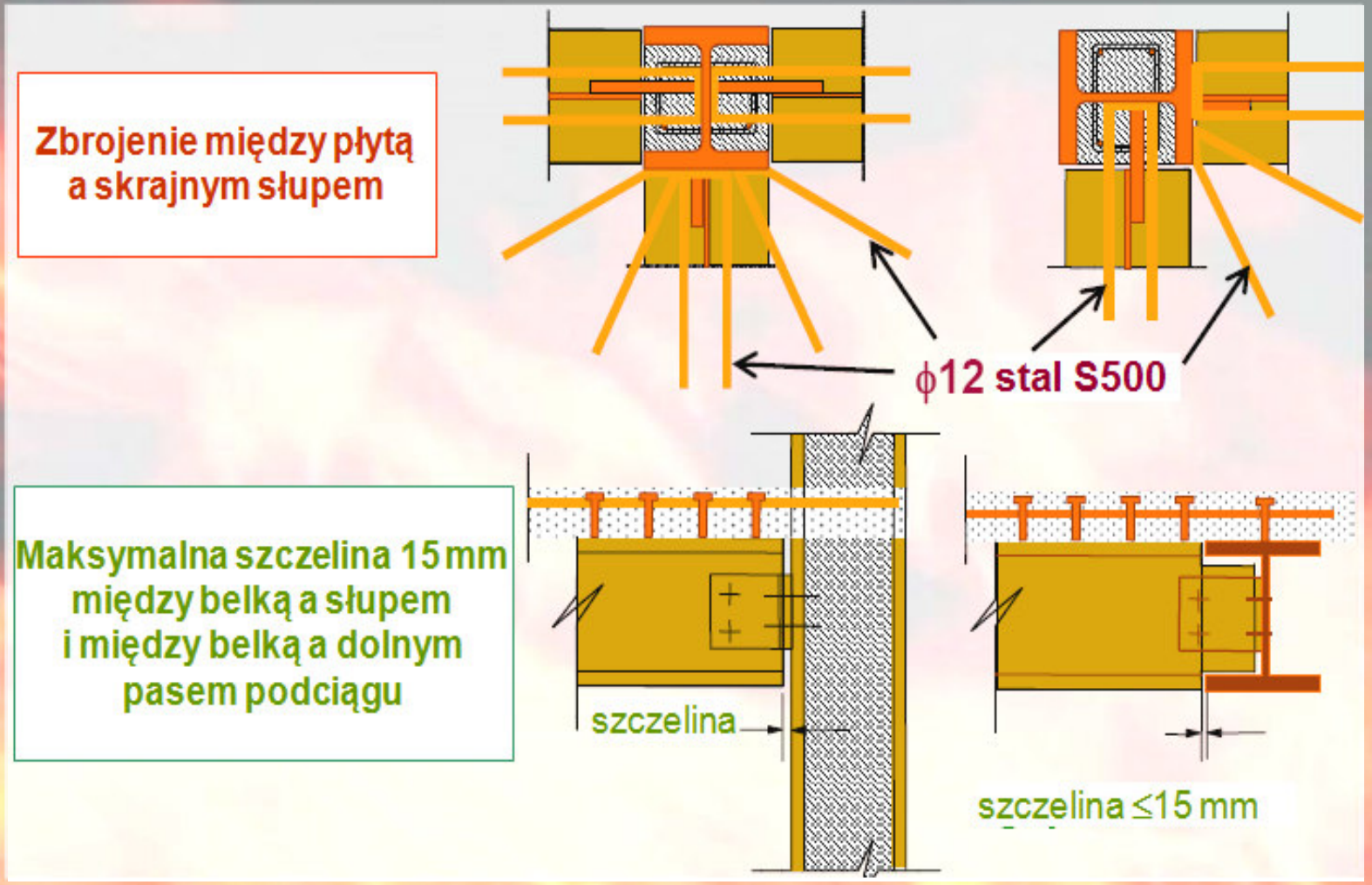
Sprawdzenie kryterium zniszczenia: wydłużenie stali zbrojeniowej



Odkształcenia zbrojenia równoległego do rozpiętości płyty

Odkształcenia zbrojenia prostopadłego do rozpiętości płyty

Uwzględnienie konstrukcyjnych detali zgodne z modelowaniem numerycznym



Obiekty budowlane z niezaizolowaną konstrukcją stalową – wskazana globalna analiza konstrukcji

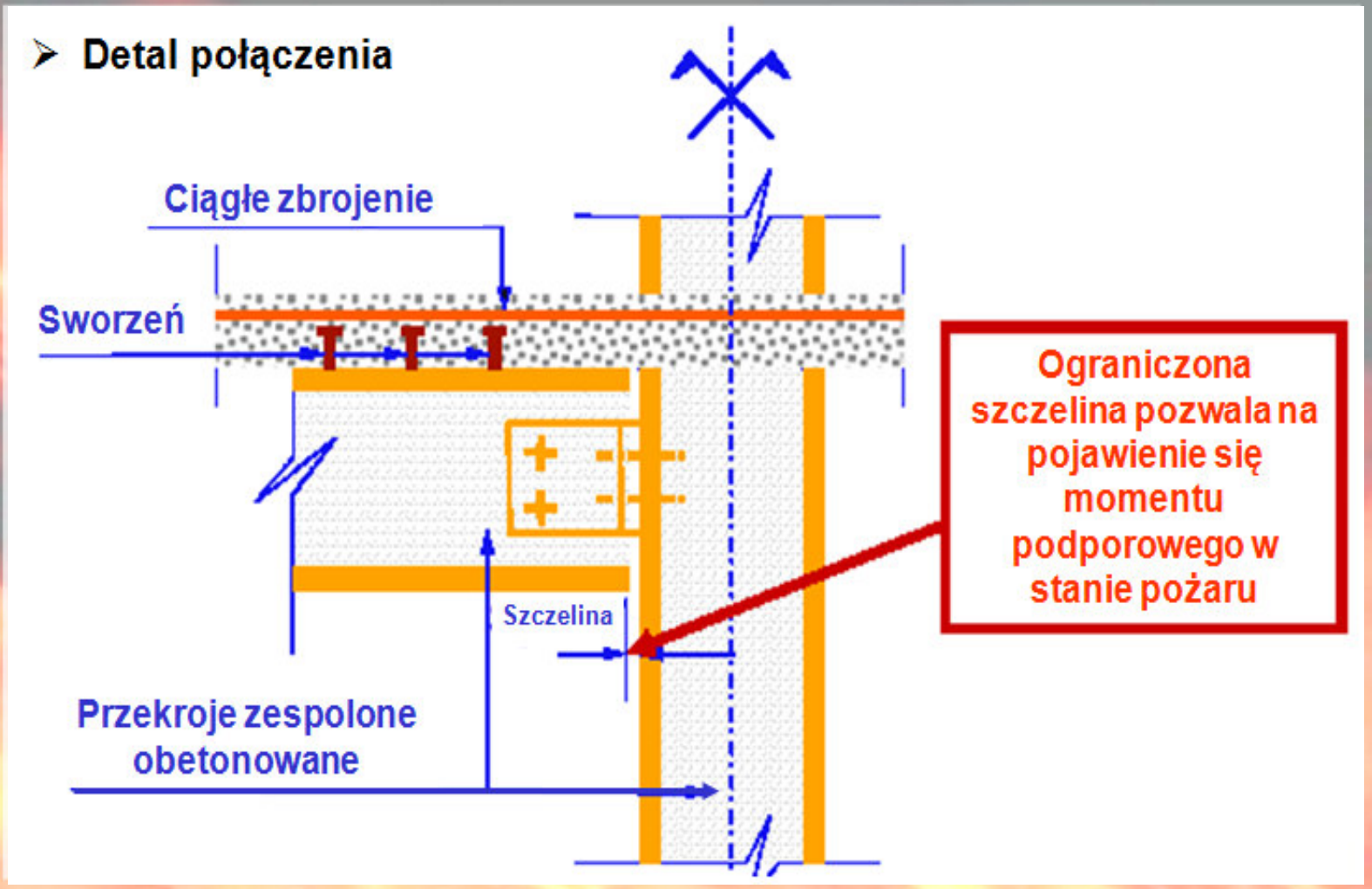
Gotowe

W trakcie budowy

Specyfika konstrukcji stalowych i zespolonych w sytuacji pożaru

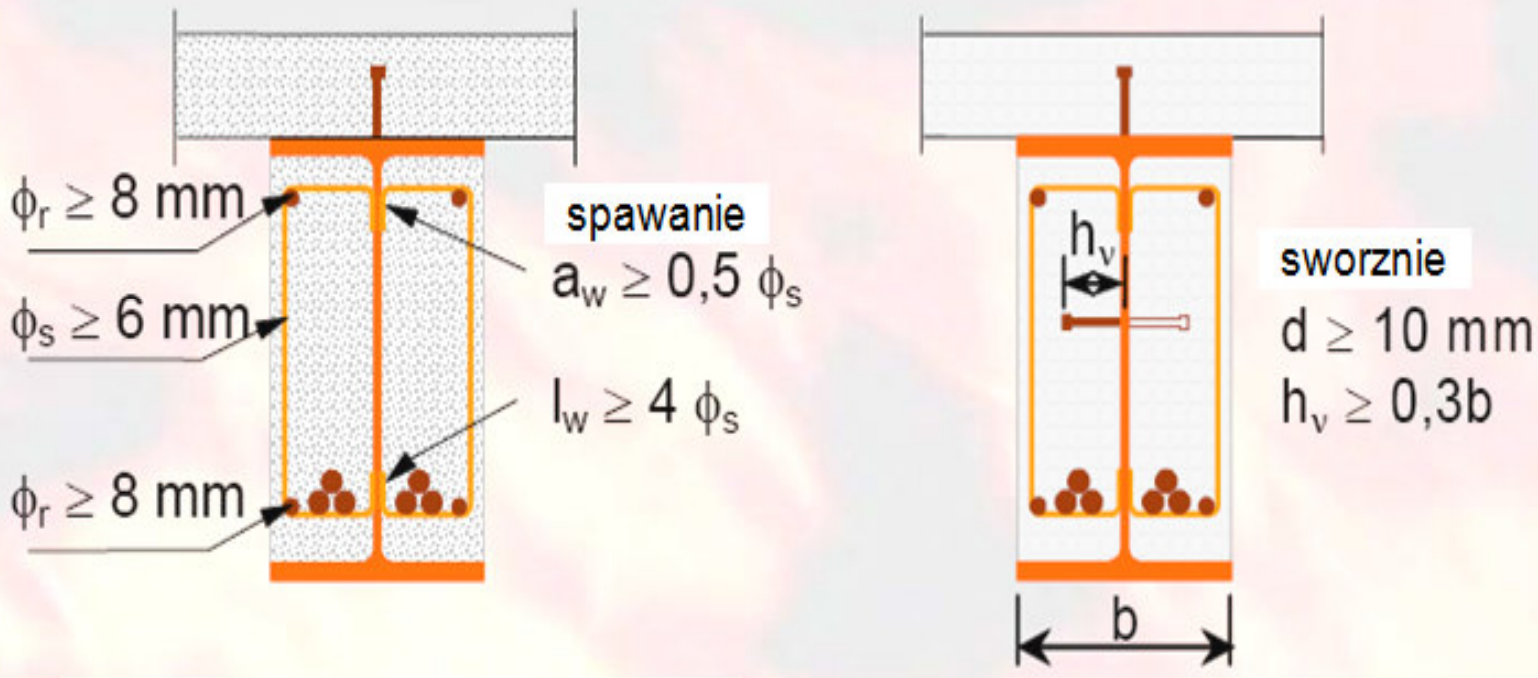
- Detale konstrukcyjne
  - Węzły konstrukcyjne – detale (stalowe i zespolone)
  - Połączenia między stalą a betonem
    - Łączniki – sworznie
    - Stal zbrojeniowa
- Zachowanie podczas fazy schładzania w pożarze naturalnym
  - Połączenia węzły

Detale konstrukcyjne - przeniesienie momentu podporowego w sytuacji pożaru (EN 1994-1-2)



Detale konstrukcyjne – zespolenie między betonem i stalą (EN 1994-1-2)

❑ Połączenie między stalowym profilem a betonem osłaniającym



Strzemiona spawane do środnika

Sworznie spawane do środnika

Dziękuję za uwagę

DIFISEK