



## Zasady projektowania systemów stropów zespolonych z niezabezpieczonymi ogniocronnie drugorzędnymi belkami stalowymi

14 czerwca 2011 r.

# Zachowanie stropów stalowych i zespolonych w warunkach pożarowych

## *Podstawy uproszczonej metody projektowania*

Olivier VASSART - Bin ZHAO

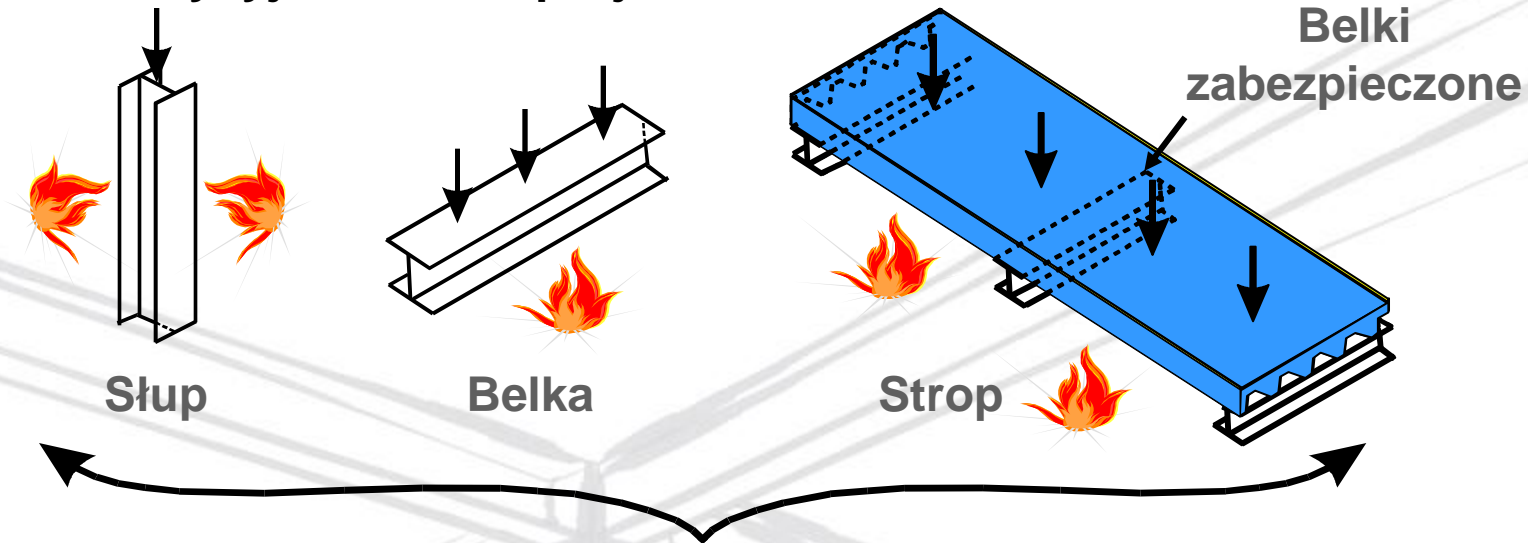
- **Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych w warunkach pożarowych**
- **Uproszczona metoda projektowania zbrojonych płyt betonowych w temperaturze 20 °C**
  - Model płyty stropowej
  - Mechanizmy zniszczenia
- **Uproszczona metoda projektowania stropów zespolonych w podwyższonej temperaturze**
  - Nośność płyt betonowych z plastycznymi liniami załamów
  - Efekt membranowy w podwyższonej temperaturze
  - Wzmocnienie w obecności stalowych belek podpierających

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

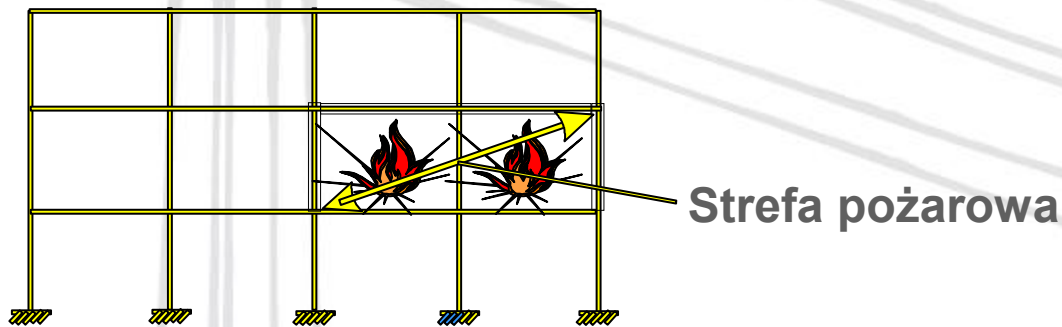
Uproszczona metoda projektowania zbrojonych płyt betonowych w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania zbrojonych płyt betonowych w temperaturze podwyższonej

- Tradycyjna metoda projektowania



Istniejące metody projektowania zakładają, że elementy izolowane będą zachowywać się w podobny sposób w rzeczywistych budynkach



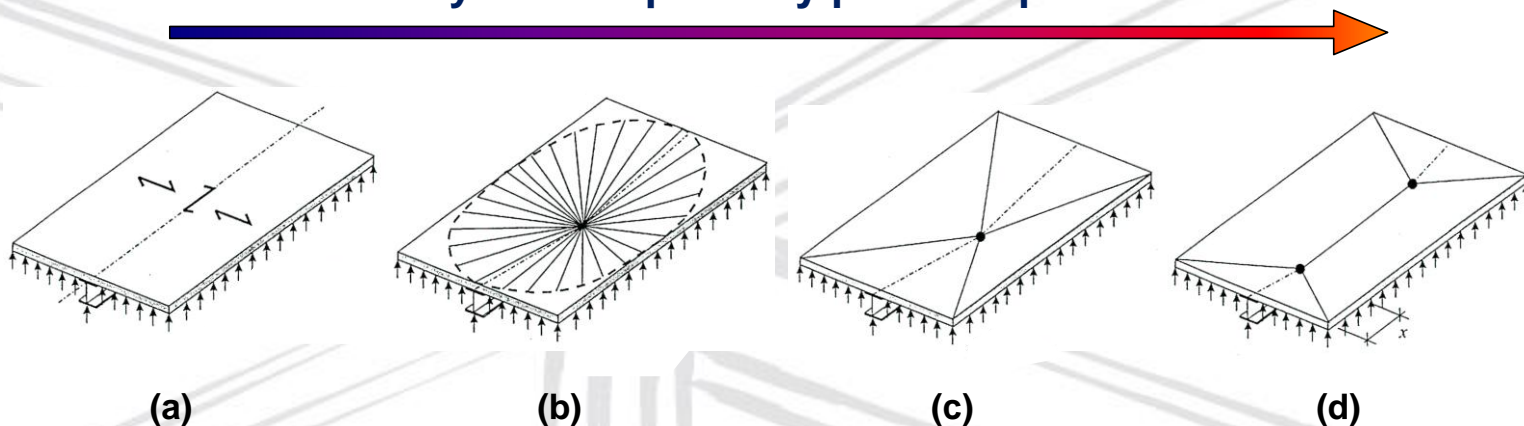
- Rzeczywiste zachowanie stropów zespolonych z mocną stalową siatką zbrojeniową w płycie betonowej

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

Przyrost temperatury podczas pożaru



Proste zginanie

Działanie efektu membranowego

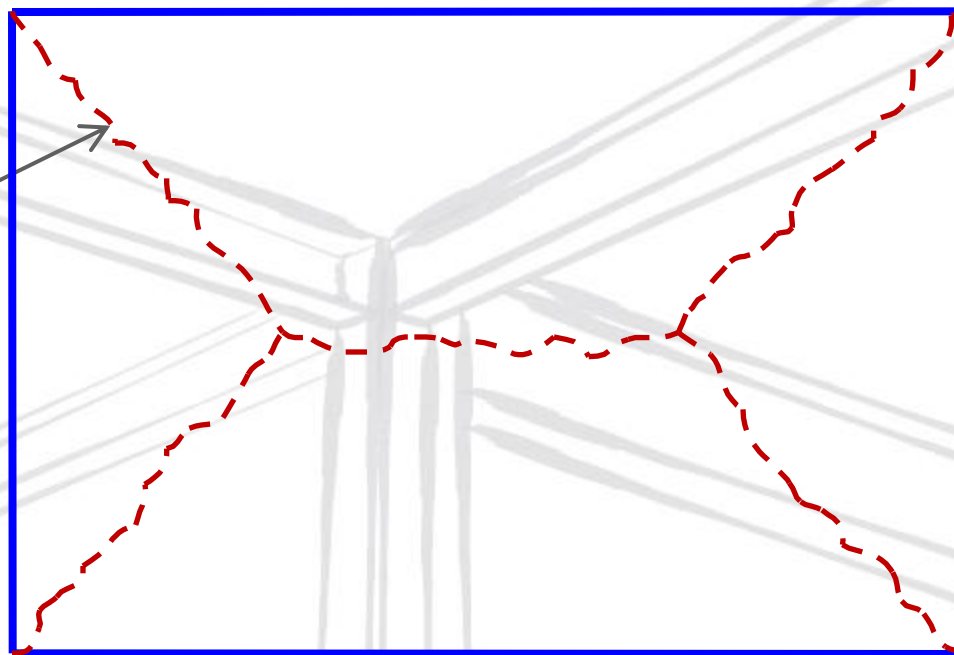
Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Płyta stropowa z 4 bokami bez możliwości pionowego przesuwu (Plastyczne linie załomów)**

Plastyczne  
linie  
załomów



Swobodne  
podparcie na  
4 krawędziach



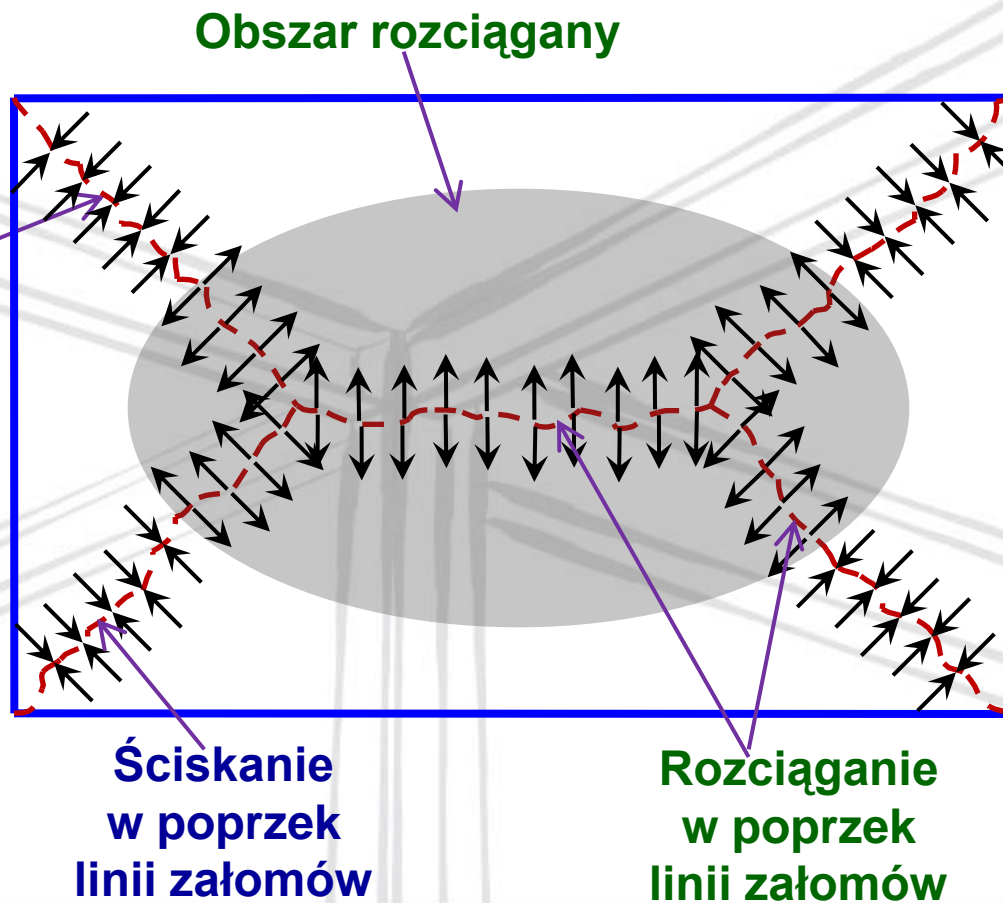
- **Model płyty stropowej**
  - **Efekt membranowy powoduje podwyższenie nośności w liniach załomów**

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

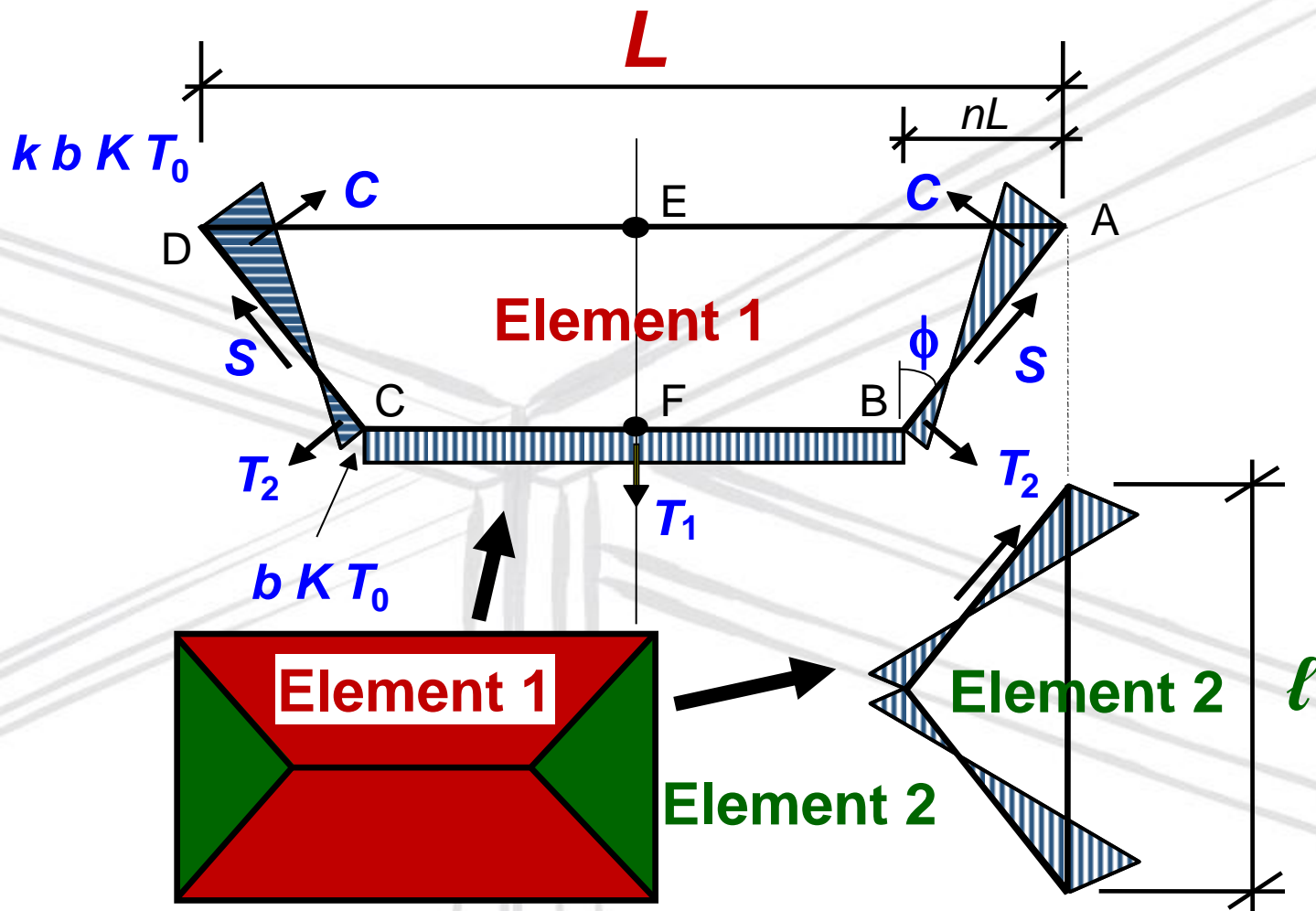
Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

Plastyczne linie załomów



- Siły membranowe wzdłuż plastycznych linii załomów (1)



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



- **Siły membranowe wzdłuż plastycznych linii załomów (2)**

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

**$k, b$**

parametry definiujące wielkość sił membranowych,

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

**$n$**

współczynnik wzięty z teorii plastycznych linii załomów,

**$K$**

stosunek zbrojenia krótszego przęsła do zbrojenia dłuższego przęsła,

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

**$T_0$**

zbrojenie na jednostkę szerokości w dłuższym przęsle,

**$T_1, T_2, C, S$**

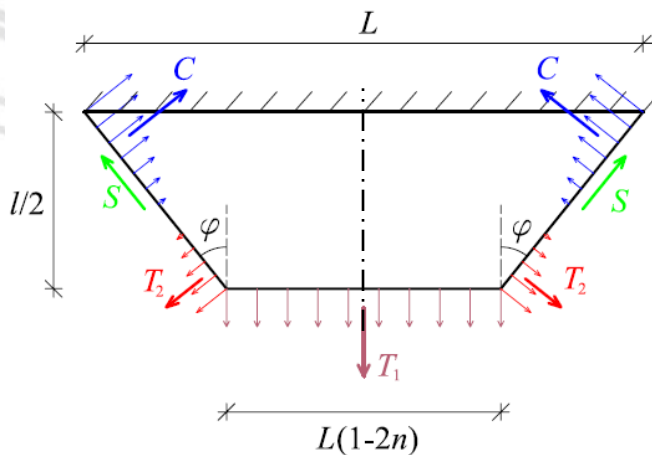
wynikowe siły membranowe wzdłuż plastycznych linii załomów.

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

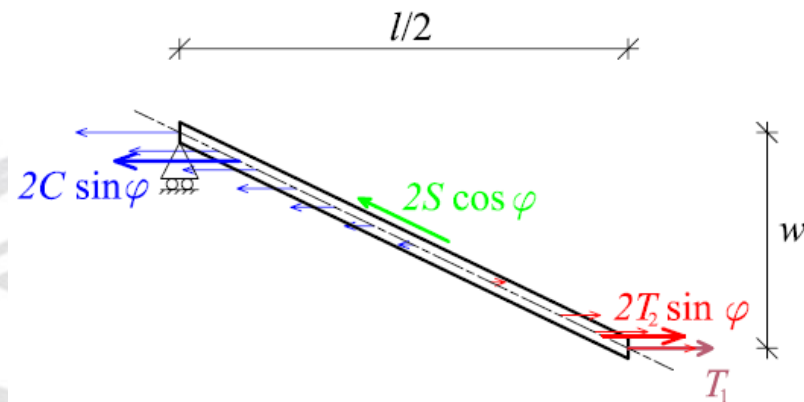
Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Wpływ działania membranowego (1)**
  - **Element 1**



Widok w płaszczyźnie na wynikowe siły membranowe



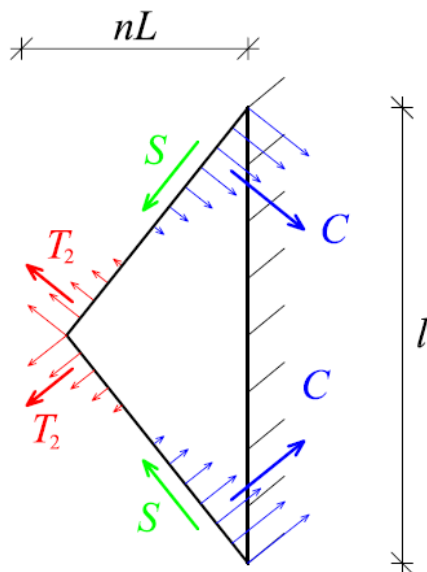
Widok z boku na wynikowe siły membranowe przy ugięciu równym w

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespólnych

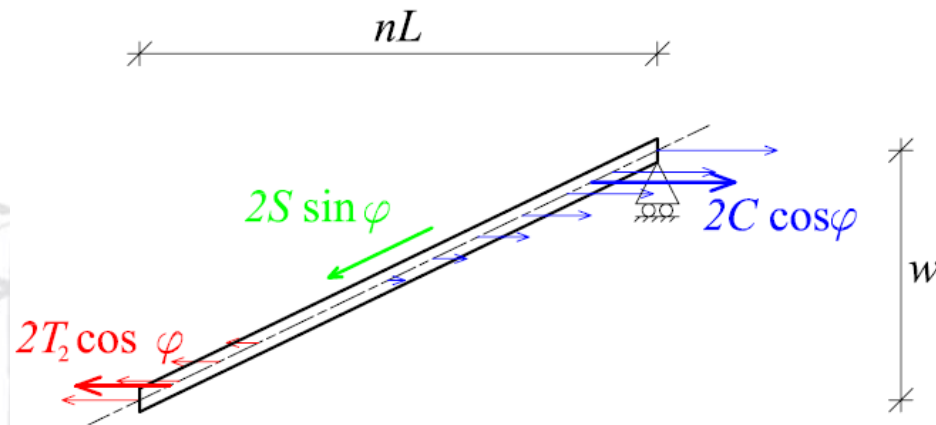
Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Wpływ działania membranowego (2)**
  - **Element 2**



Widok w płaszczyźnie na  
wynikowe siły membranowe



Widok z boku na wynikowe siły  
membranowe przy ugięciu  
równym w

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Wpływ działania membranowego (3)**

- **Współczynnik wzmocnienia dla każdego elementu**

$$e_{i, i=1,2} = \left[ \begin{array}{l} e_{im} : \text{nośność na zginanie nad podporą elementu } i \\ + \\ e_{ib} : \text{nośność na zginanie dla linii załomów elementu } i \end{array} \right.$$

- **Całkowite wzmocnienie**

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2}$$

gdzie:

**$\mu$**  jest współczynnikiem ortotropii zbrojenia

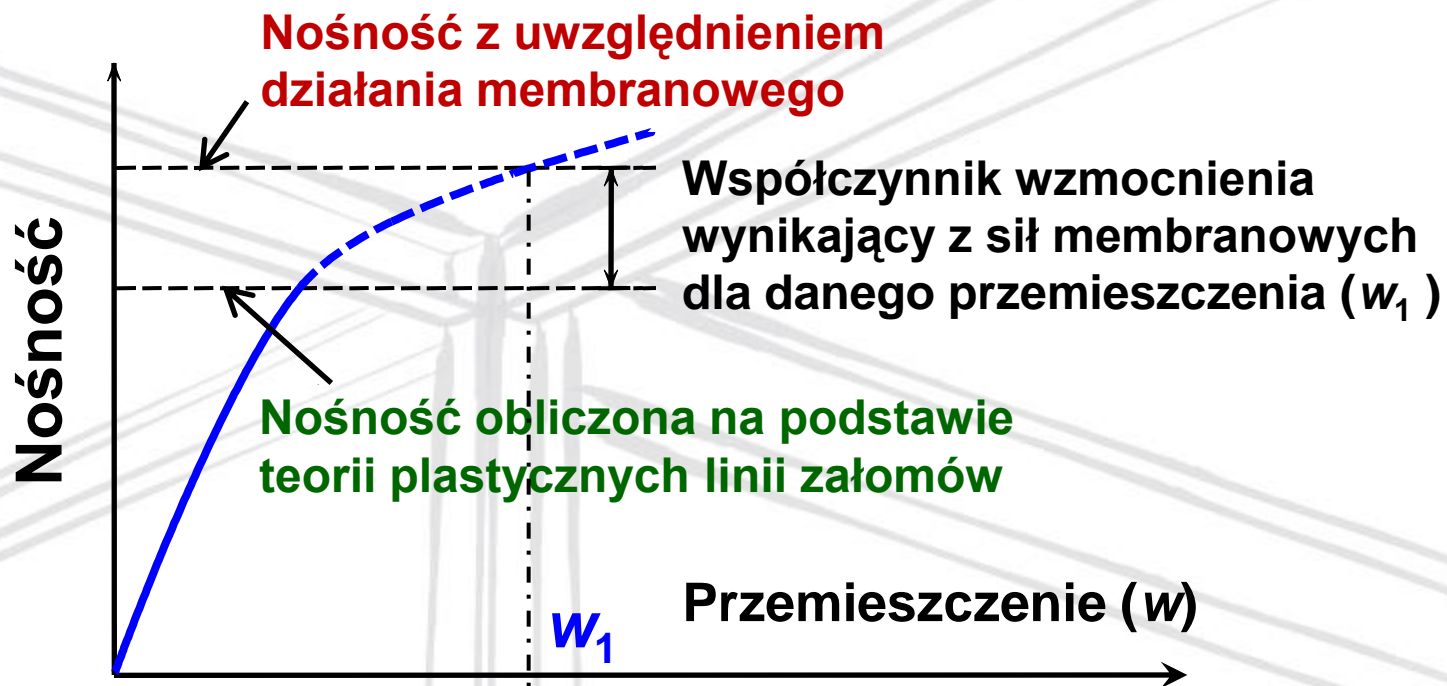
**$a$**  jest stosunkiem boków płyty =  $L/l$

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

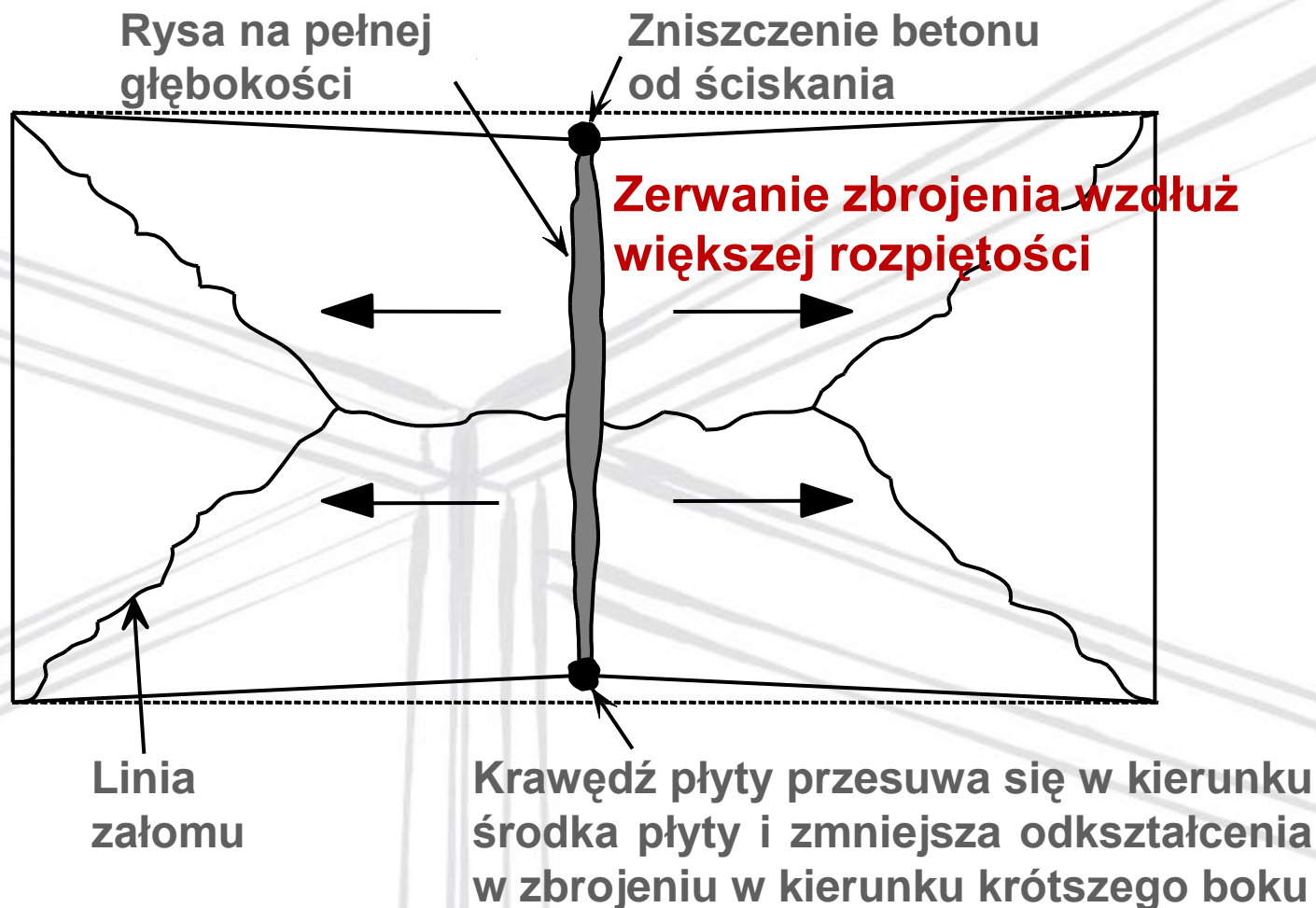
Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- Wpływ działania membranowego (4)



- **Mechanizmy zniszczenia** (zniszczenie przy rozciąganiu zbrojenia)



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



- **Mechanizmy zniszczenia** (zniszczenie przy ściskaniu betonu)
  - Bardziej prawdopodobny w przypadku mocnej siatki zbrojeniowej



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

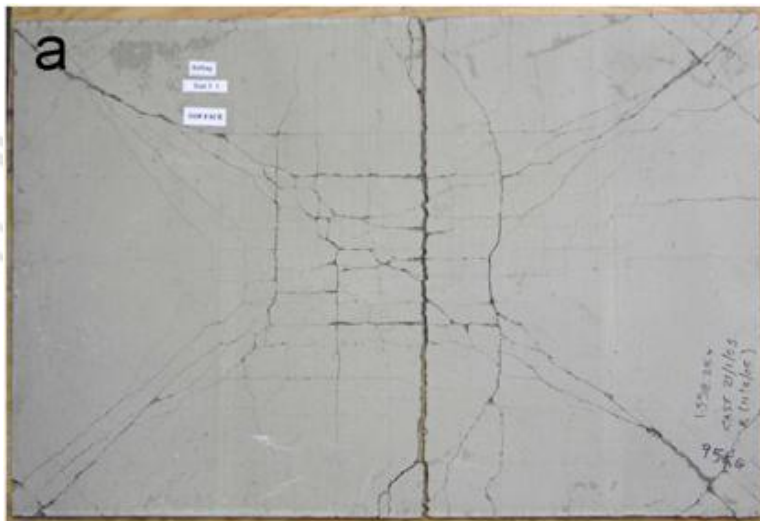
Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Mechanizmy zniszczenia** (wyniki doświadczalne)

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespólnych

**Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C**

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej



**Zniszczenia przy  
rozciąganiu  
zbrojenia**



**Zniszczenie przy  
ściskaniu betonu**

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Model płyty stropowej w podwyższonej temperaturze (1)**
  - Oparty na tym samym modelu jak dla temperatury otoczenia
  - Uwzględnia wygięcie termiczne wynikające z gradientu temperatury po grubości płyty, które jest równe:

$$w_{\theta} = \frac{\alpha(T_2 - T_1)\ell^2}{19.2 h}$$

gdzie:

**h** jest efektywną grubością płyty

**ℓ** jest krótszą rozpiętością płyty

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Model płyty stropowej w podwyższonej temperaturze (2)**

i:

$\alpha$  jest współczynnikiem rozszerzalności termicznej betonu

Dla betonu lekkiego, przyjmuje się wartość z EN 1994-1-2:

$$\alpha_{LWC} = 0.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

Dla betonu zwykłego, przyjmuje się konserwatywną wartość:

$$\alpha_{NWC} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} < 1.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \text{ (EN 1994-1-2)}$$

$T_2$  jest temperaturą dolnej powierzchni płyty (strona nagrzewana)

$T_1$  jest temperaturą górnej powierzchni płyty (strona nienagrzewana)

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Model płyty stropowej w podwyższonej temperaturze (3)**
  - Zakładając mechaniczne średnie odkształcenie przy naprężeniu równym połowie naprężenia plastycznego w temperaturze otoczenia
  - Ugięcie płyty na podstawie parabolicznego kształtu ugiętej płyty wynikającego z poprzecznego obciążenia:

$$w_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}} \leq \frac{l}{30}$$

gdzie:

- $E_s$  jest modułem sprężystości zbrojenia w temperaturze 20°C
- $f_{sy}$  jest granicą plastyczności zbrojenia w temperaturze 20°C
- $L$  jest dłuższą rozpiętością płyty



Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Model płyty stropowej w podwyższonej temperaturze (4)**
  - **Zatem, maksymalne ugięcie płyty stropowej jest równe:**

$$w = \frac{\alpha(T_2 - T_1)\ell^2}{19.2 h} + \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}}$$

- **Jednakże, maksymalne ugięcie płyty stropowej jest ograniczane do:**

$$w \leq \frac{L + \ell}{30}$$



Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Konserwatywność modelu płyty stropowej w podwyższonej temperaturze**
  - Oszacowane pionowe przemieszczenia powodowane krzywizną termiczną są niedoszacowane w porównaniu z wartościami teoretycznymi
  - Krzywizna termiczna jest obliczana na podstawie krótszej rozpiętości płyty
  - Wszelkie dodatkowe przemieszczenia pionowe wywołane ograniczoną rozszerzalnością termiczną w wyobczonej płycie są pomijane
  - Pomijany jest wpływ stalowego deskowania
  - Wzrost ciągliwości siatki ze wzrostem temperatury jest pomijany

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

**Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej**

- **Nośność płyty stropowej dla modelu wzmocnionego wskutek obecności niezabezpieczonych belek stalowych (1)**
  - Działanie łańcuchowe belek niezabezpieczonych jest pomijane
  - Nośność na zginanie niezabezpieczonych belek jest brana pod uwagę przy następujących założeniach:
    - Swobodne podparcie na obu końcach
    - Nagrzewanie przekroju stalowego obliczone zgodnie z EN1994-1-2 4.3.4.2, z uwzględnieniem efektu cienia
    - Właściwości termiczne i mechaniczne zarówno stali jak i betonu według EN 1994-1-2

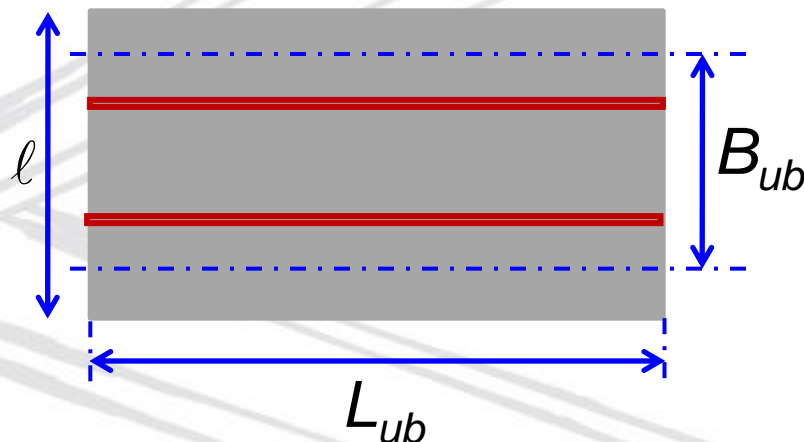
Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Nośność płyty stropowej dla modelu wzmocnionego wskutek obecności niezabezpieczonych belek stalowych (2)**
  - Zwiększenie nośności od niezabezpieczonych belek jest równe:

$$\frac{\delta M_{Rd,fi}}{L_{ub}^2} \frac{n_{ub}}{B_{ub}} = \frac{\delta M_{Rd,fi}}{L^2} \frac{1+n_{ub}}{\ell}$$



gdzie:

$n_{ub}$

jest liczbą niezabezpieczonych belek

$M_{Rd,fi}$

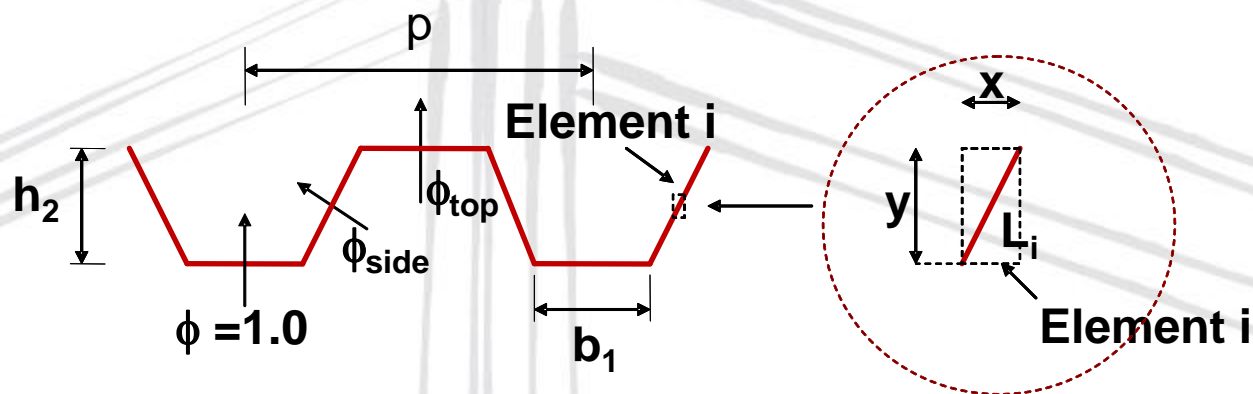
jest nośnością na zginanie każdej z niezabezpieczonych belek zespolonych

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Obliczenia temperatury płyty zespolonej**
  - **Na podstawie zaawansowanych modeli obliczeniowych**
    - 2D metoda różnic skończonych
    - Właściwości termiczne materiałów według EN 1994-1-2 zarówno dla stali jak i dla betonu
    - Efekt cienia w odniesieniu do płyty zespolonej jest brany pod uwagę



- **Nośność zabezpieczonych belek obwodowych**

- **Poziom obciążenia  $\eta_{fi,t}$**

- Dodatkowe obciążenie belek drugorzędnych

- **Metoda temperatury krytycznej**

- Belki zespolone (EN 1994-1-2)

- R 30

- Inne klasy odporności ogniowej

- Belki stalowe (EN 1993-1-2)

$$0.9 \eta_{fi,t} = \frac{f_{ay,\theta_{cr}}}{f_{ay}} = \frac{M_{Rd,fi,b,i}}{M_{Rd,b,i}} \Bigg|_{i=1,2}$$

$$\eta_{fi,t} = \frac{f_{ay,\theta_{cr}}}{f_{ay}} = \frac{M_{Rd,fi,b,i}}{M_{Rd,b,i}} \Bigg|_{i=1,2}$$

$$\eta_{fi,t} = \frac{f_{ay,\theta_{cr}}}{f_{ay}} = \frac{M_{Rd,fi,b,i}}{M_{Rd,b,i}} \Bigg|_{i=1,2}$$

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej



Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

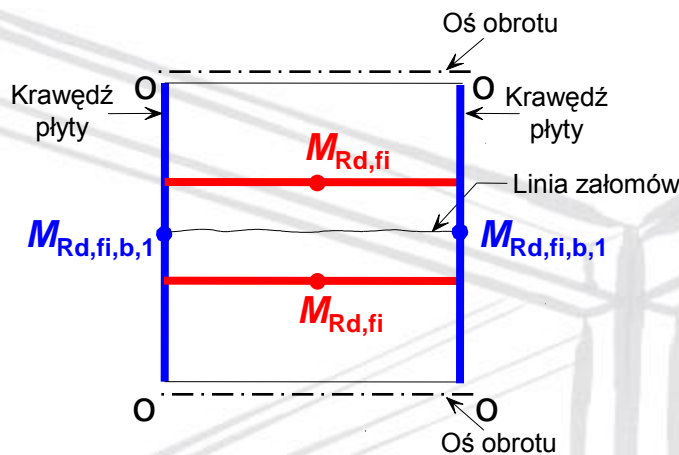
Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Nośność zabezpieczonych belek obwodowych na podstawie globalnego mechanizmu plastycznego**
  - **Belki główne i belki drugorzędne są projektowane oddzielne**
  - **Zarówno dla belek głównych jak i dla belek drugorzędnych**
    - Brana jest pod uwagę alternatywna jedna linia załamów łącząca przeguby plastyczne
    - Wymagana nośność na zginanie  $M_{Rd,fi,b}$  jest taka sama dla wszystkich równoległych belek obwodowych niezależnie od ich rzeczywistego przekroju poprzecznego
    - Analizuje się 2 przypadki
      - 2 belki skrajne
      - co najmniej 1 belka wewnętrzna
    - Stosuje się zasadę pracy wirtualnej

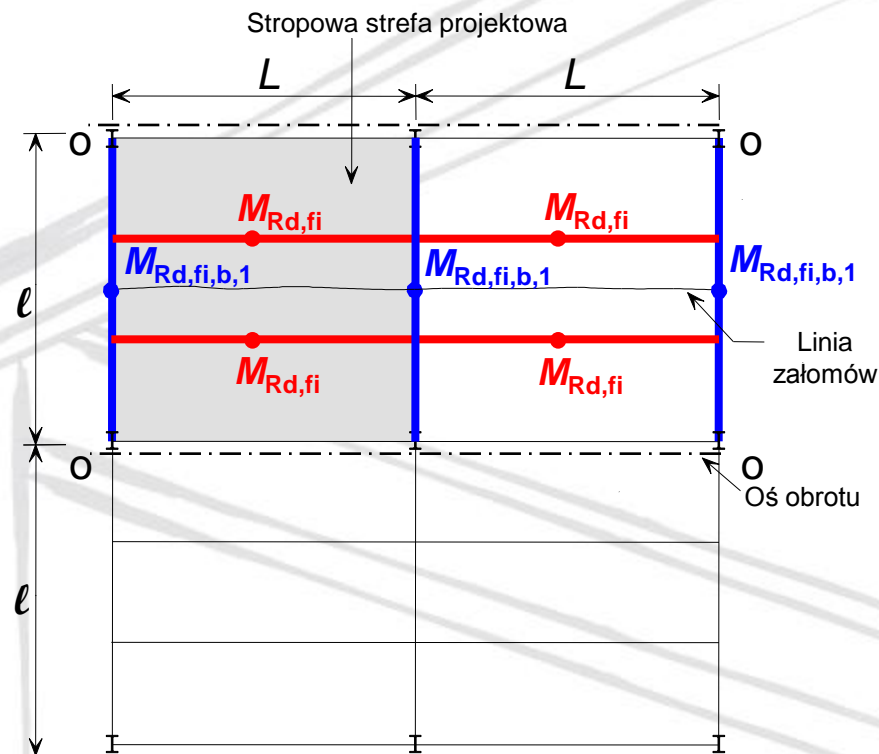


- Nośność belek głównych (1)

## 2 belki skrajne



## 1 belka wewnętrzna



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Nośność belek głównych (2)**

- 2 belki skrajne

$$M_{Rd,fi,b,1} = \frac{pL^2 \ell - 8\mu M_0 L_{eff}}{16}$$

- Co najmniej jedna belka wewnętrzna

$$M_{Rd,fi,b,1} = \frac{pL^2 \ell - 8\mu M_0 L_{eff}}{12}$$

gdzie:

$p$  jest maksymalnym przyłożonym obciążeniem  
i nośnością stropu

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespólnych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Nośność belek głównych (3)**

i:

$L_{eff}$  jest efektywną długością linii załomów

- 2 stalowe belki skrajne

$$L_{eff} = L$$

- tylko 1 belka zespolona

$$L_{eff} = L - \min\left(\frac{L}{2}; \frac{\ell}{8}\right)$$

- 2 belki zespolone

$$L_{eff} = L - 2 \times \min\left(\frac{L}{2}; \frac{\ell}{8}\right)$$

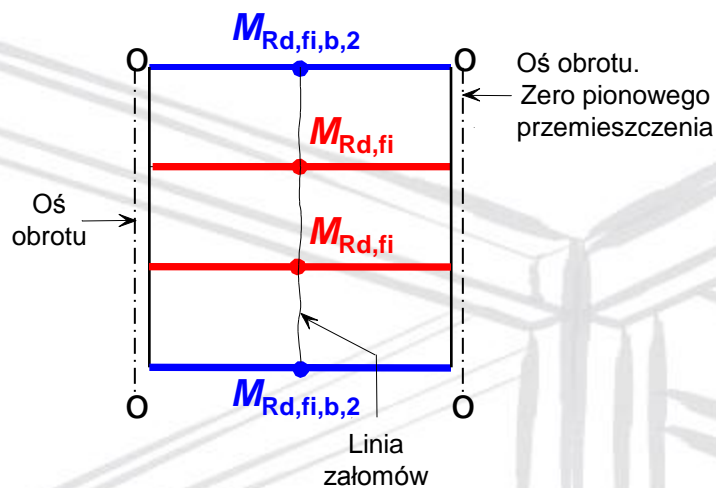
- Nośność zabezpieczonych belek drugorzędnych (1)

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

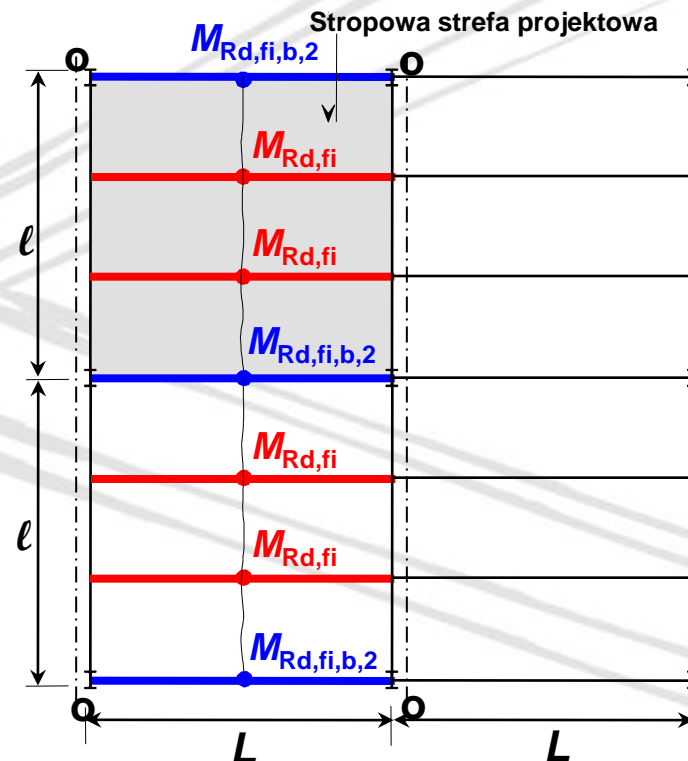
Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

## 2 belki skrajne



## 1 belka wewnętrzna



Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespolonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Nośność zabezpieczonych belek drugorzędnych (2)**

- **2 belki skrajne**

$$M_{Rd,fi,b,2} = \frac{pL\ell^2 - 8(M_0\ell_{eff} + n_{ub}M_{Rd,fi})}{16}$$

- **Co najmniej jedna belka wewnętrzna**

$$M_{Rd,fi,b,2} = \frac{pL\ell^2 - 8(M_0\ell_{eff} + n_{ub}M_{Rd,fi})}{12}$$

gdzie:

p jest maksymalnym przyłożonym obciążeniem i nośnością stropu

Zachowanie  
mechaniczne  
stropów  
zespólonych

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
20°C

Uproszczona  
metoda  
projektowania  
w temperaturze  
podwyższonej

- **Nośność zabezpieczonych belek drugorzędnych (3)**

i:

$l_{eff}$  jest efektywną długością linii załomów

- 2 stalowe belki skrajne

$$l_{eff} = l - n_{ub} \min \left( \frac{l}{1 + n_{ub}}; \frac{L}{4} \right)$$

- tylko 1 belka zespolona

$$l_{eff} = l - \left( n_{ub} + \frac{1}{2} \right) \min \left( \frac{l}{1 + n_{ub}}; \frac{L}{4} \right)$$

- 2 belki zespolone

$$l_{eff} = l - (n_{ub} + 1) \min \left( \frac{l}{1 + n_{ub}}; \frac{L}{4} \right)$$



- **Johansen, K.W. *Yield-line formulae for slabs*. Cement and Concrete Association. London: Taylor & Francis, 1972.**
- **Bailey, C.G. *Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire*. Engineering Structures, October 2004, Vol. 26, Issue 12, pp. 1691-1703.**
- **EN 1994-1-2 : *Eurocode 4 : Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2 : General rules – Structural fire design*, CEN.**
- ***Fire Resistance Assessment of partially protected COMposite Floors (FRACOF): Engineering background*. Technical Report, CTICM, SCI, 2009.**