Research Fund for Coal & Steel

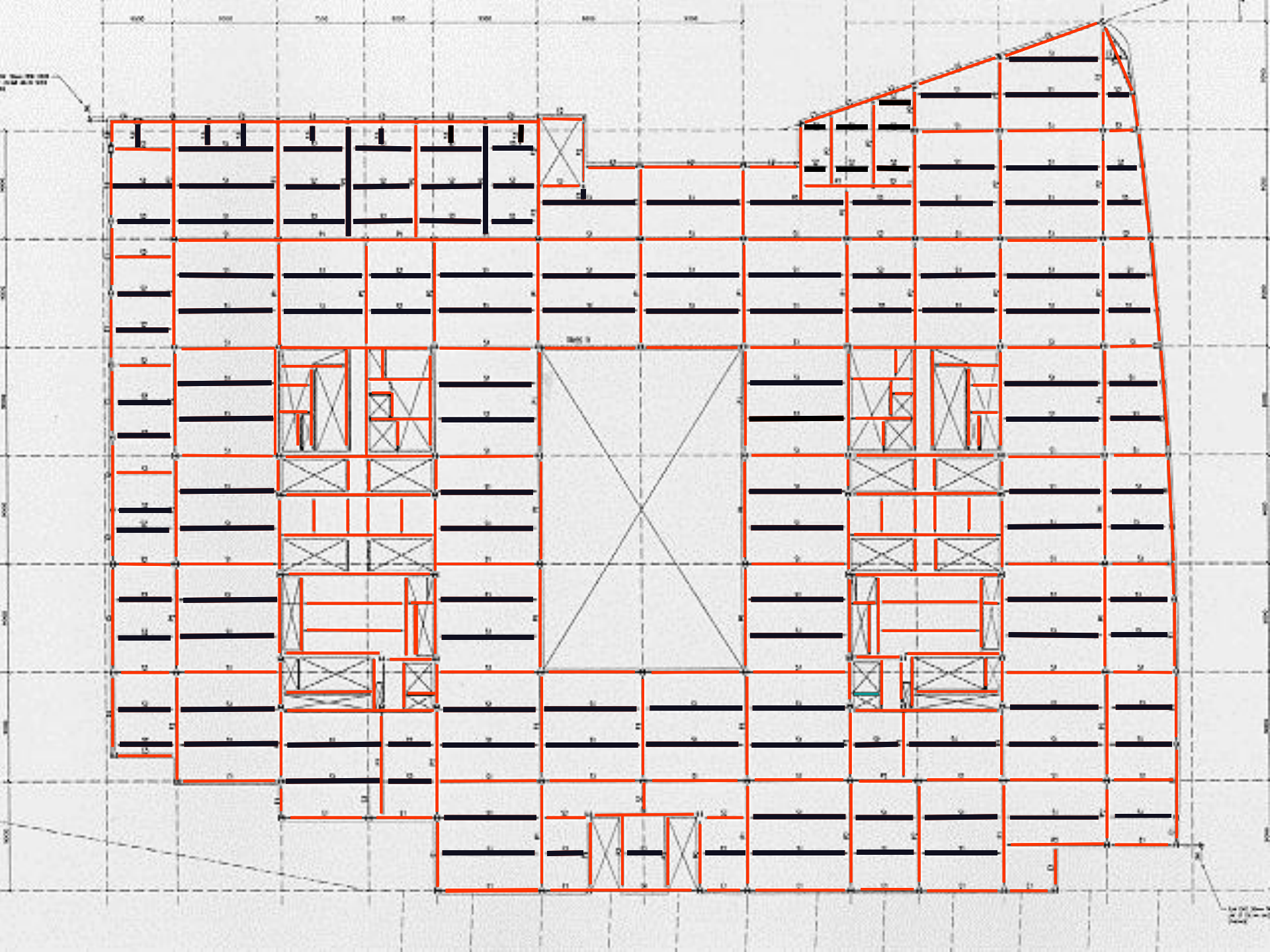
Instytut Techniki Budowlanej

# Oddziaływanie membranowe w projektowaniu na warunki pożarowe płyt zespolonych z pełnymi i ażurowymi belkami stalowymi – Waloryzacja

## *Uproszczona metoda projektowania*

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w roku 2012 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego

# Cel metody projektowania



# Plan prezentacji

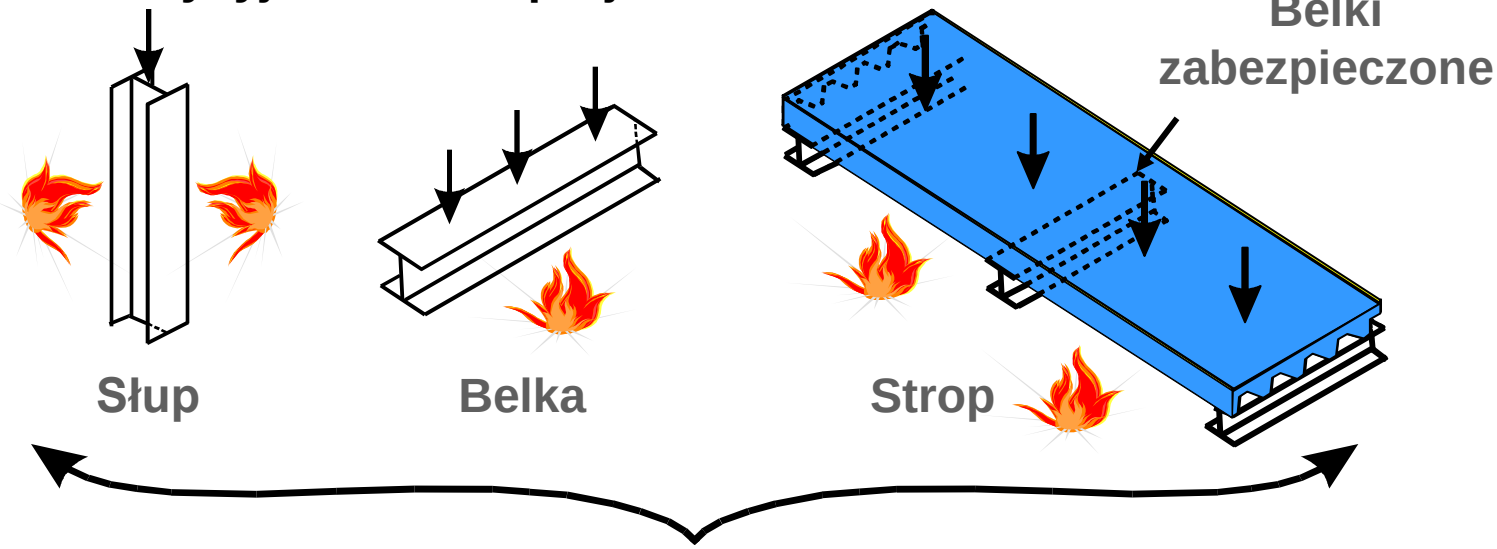
- **Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych w warunkach pożarowych**
- **Uproszczona metoda projektowania zbrojonych płyt betonowych w temperaturze 20 °C**
  - **Model płyty stropowej**
  - **Mechanizmy zniszczenia**
- **Uproszczona metoda projektowania stropów zespolonych w podwyższonej temperaturze**
  - **Rozszerzenie na warunki pożarowe**
  - **Efekt membranowy w podwyższonej temperaturze**
  - **Wpływ belek nieobciążonych**
  - **Projektowanie belek zabezpieczonych**

**Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych**

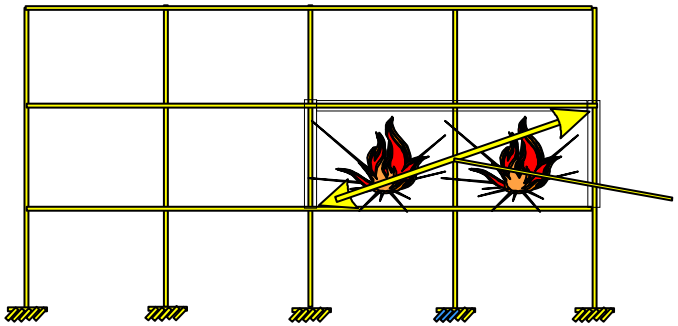
Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Tradycyjna metoda projektowania**




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



# Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych



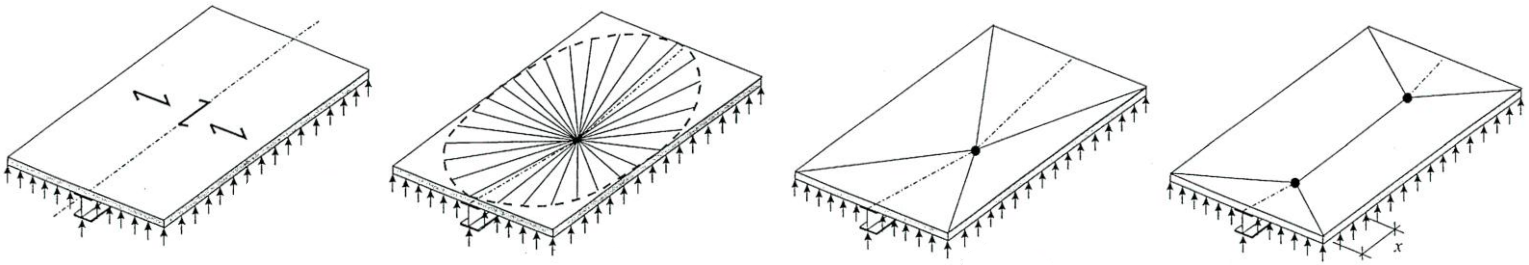
**Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych**

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Rzeczywiste zachowanie stropów zespolonych ze stalową siatką zbrojeniową w płycie betonowej**

**Przyrost temperatury podczas pożaru**



**(a)** **(b)** **(c)** **(d)**

**Proste zginanie** → **Działanie efektu membranowego**

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

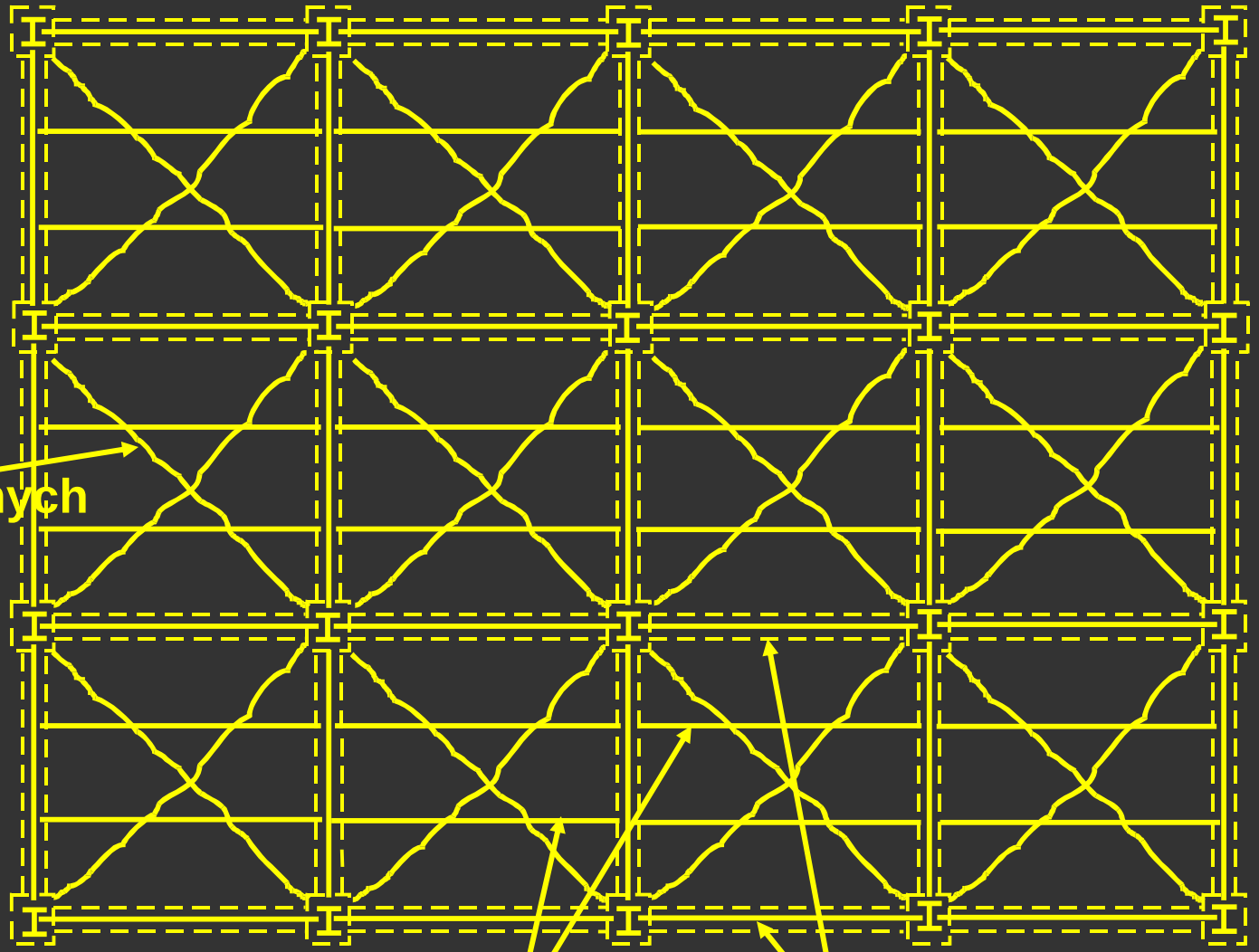
Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Metodę rozwinął profesor Colin Bailey (University of Manchester)**

  wcześniej związany z

  **Building Research Establishment (BRE)**

# *Projektowanie z uwzględnieniem oddziaływania membranowego w warunkach pożaru*



# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C

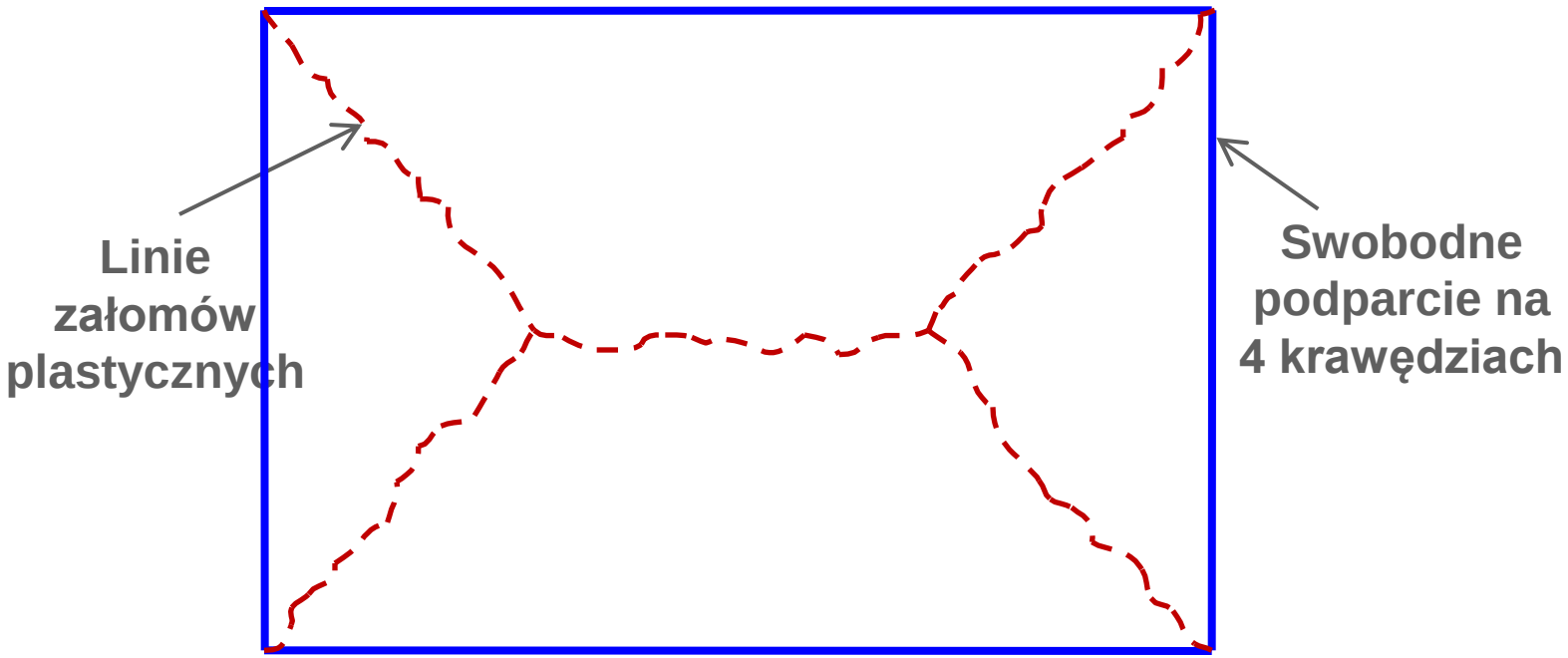


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Płyta stropowa z 4 krawędziami bez możliwości pionowego przesuwu** (Linie załomów plastycznych) – z możliwością przesuwu w poziomie – bardzo ostrożne założenie



# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C

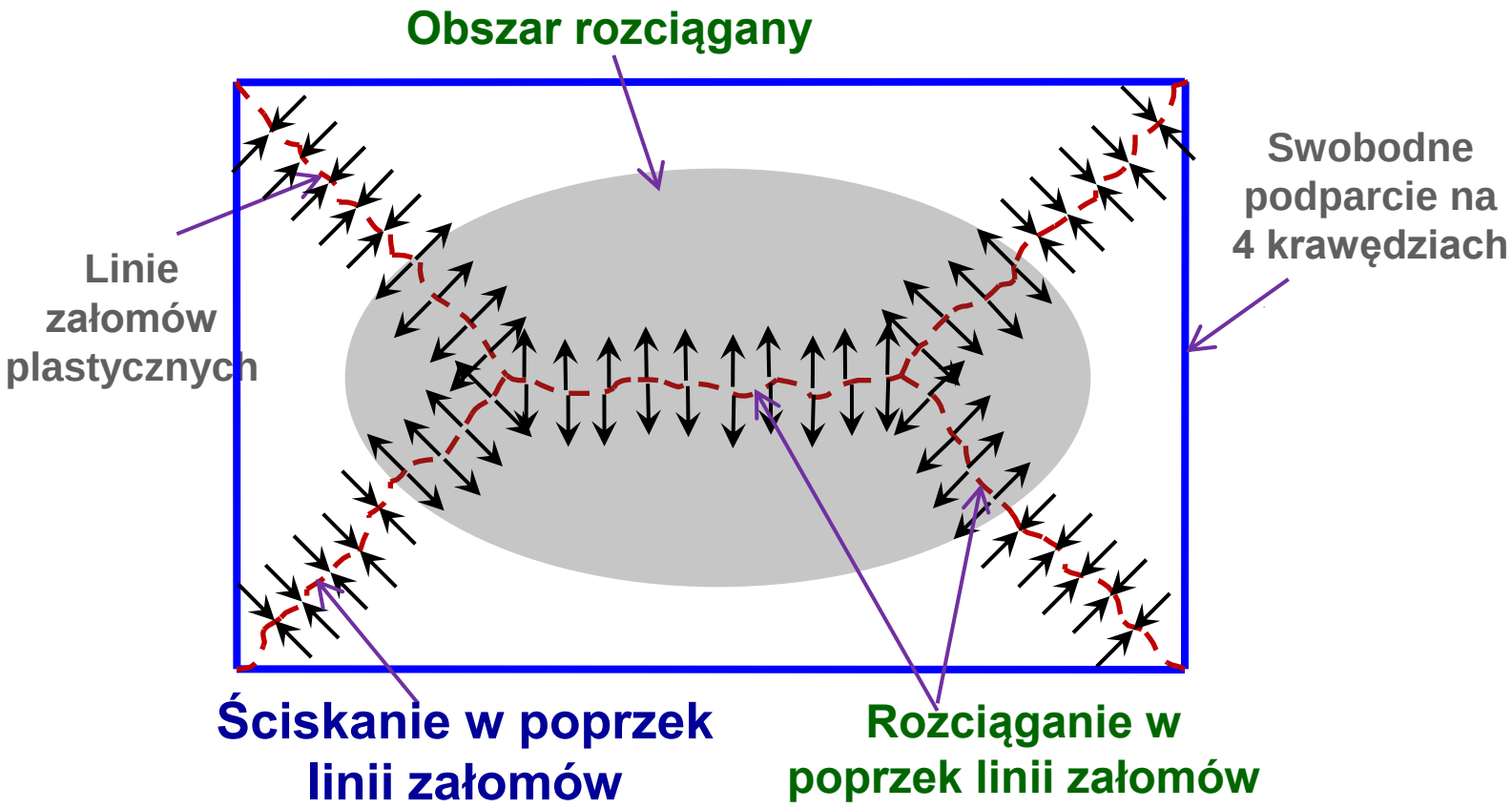


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

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

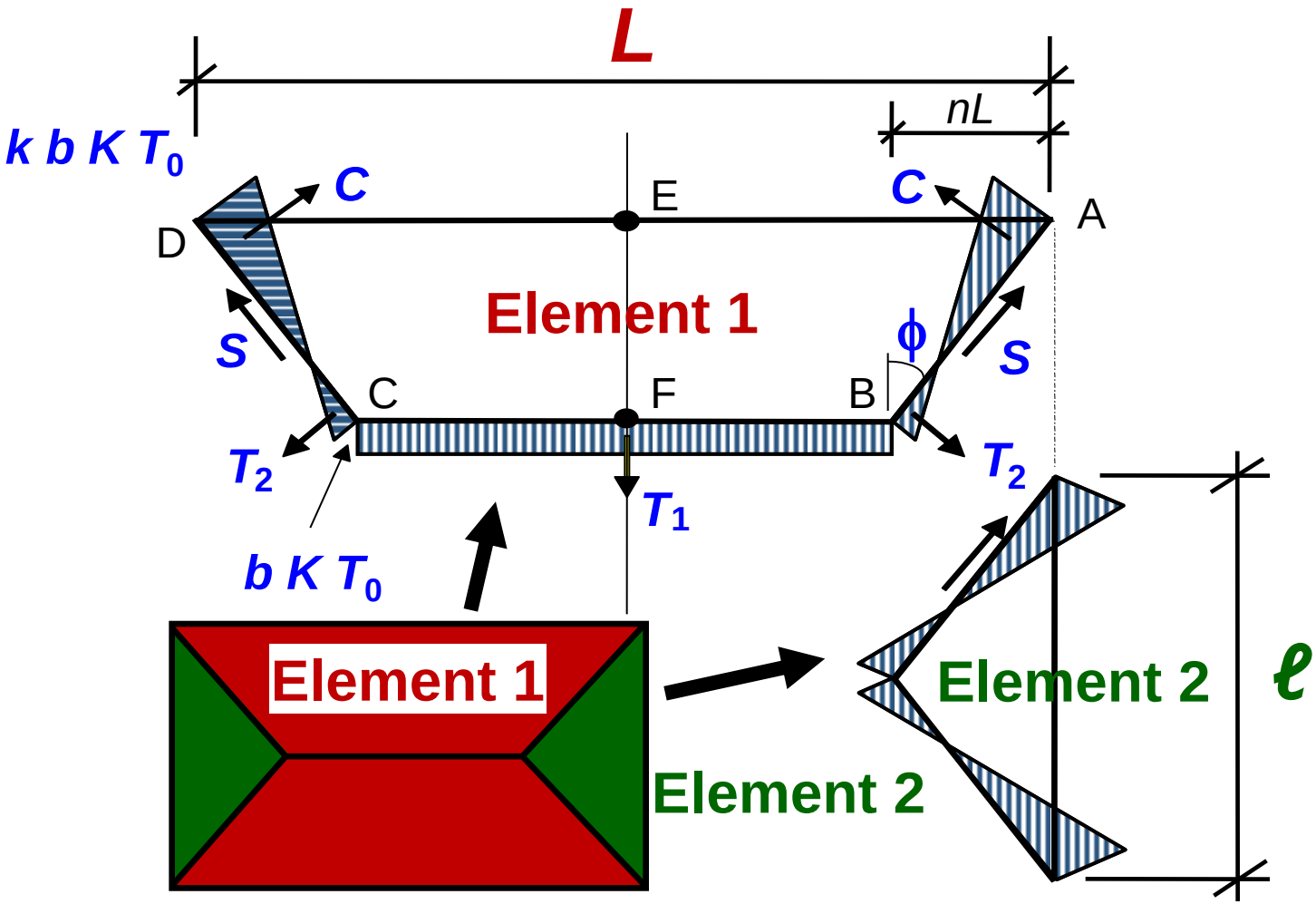


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Siły membranowe wzdłuż plastycznych linii załomów (1)**



# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

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

| | |
|---|---|
| $k$, $b$ | parametry definiujące wielkość sił membranowych, |
| $n$ | współczynnik pochodzący z teorii plastycznych linii załomów, |
| $K$ | stosunek zbrojenia krótszego przęsła do zbrojenia dłuższego przęsła, |
| $T_0$ | zbrojenie na jednostkę szerokości w dłuższym przęśle, |
| $T_1$, $T_2$, $C$, $S$ | wynikowe siły membranowe wzdłuż plastycznych linii załomów. |

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C

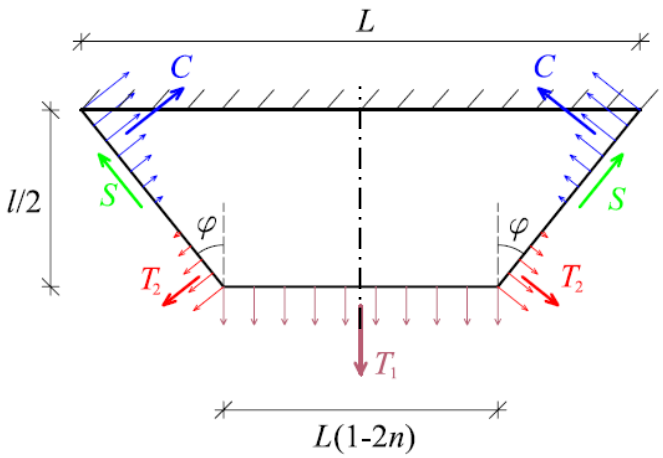


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

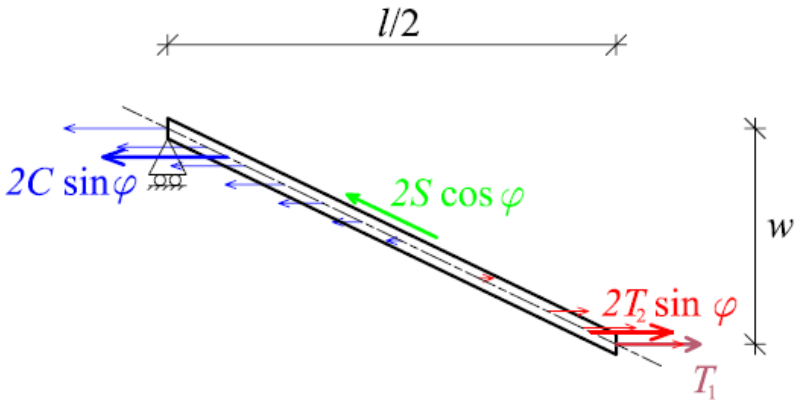
**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C**

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

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




**Widok w płaszczyźnie na wynikowe siły membranowe**




**Widok z boku na wynikowe siły membranowe przy ugięciu równym *w***

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C

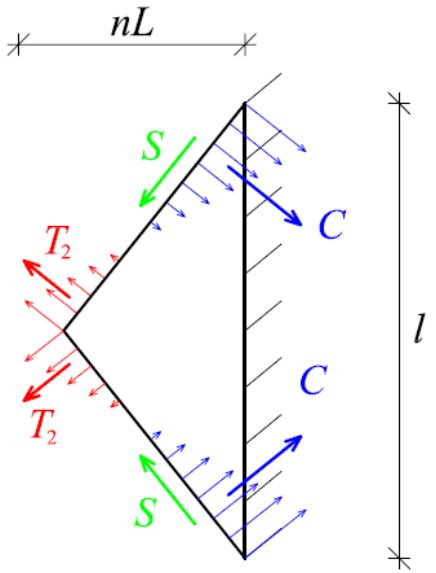


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

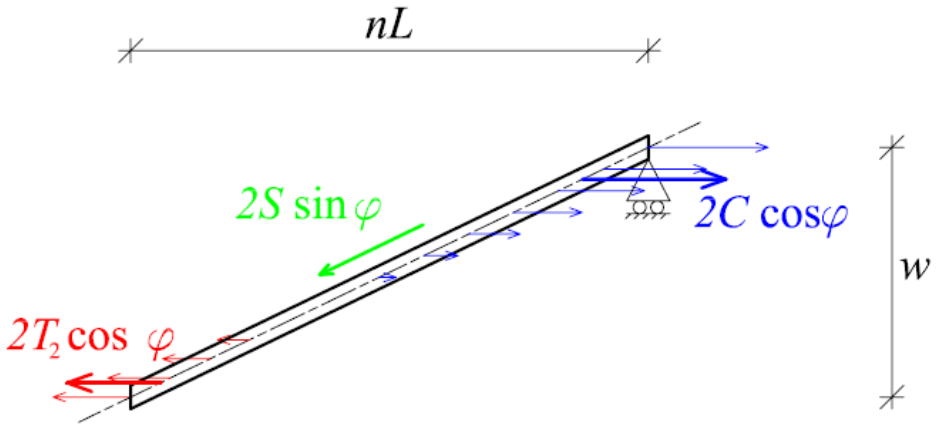
**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C**

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

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




**Widok w płaszczyźnie na wynikowe siły membranowe**




**Widok z boku na wynikowe siły membranowe przy ugięciu równym *w***

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Wpływ oddziaływania membranowego (3)**
  - **Współczynnik wzmocnienia dla każdego elementu**

$$e_{i,\ i=1,2} = \begin{cases} e_{im}: \text{wzmocnienie wywołane siłami membranowymi w elemencie i} \\ + \\ e_{ib}: \text{wzmocnienie spowodowane wpływem sił w płaszczyźnie na nośność przy zginaniu} \end{cases}$$

  - **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 = $L/\ell$

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C

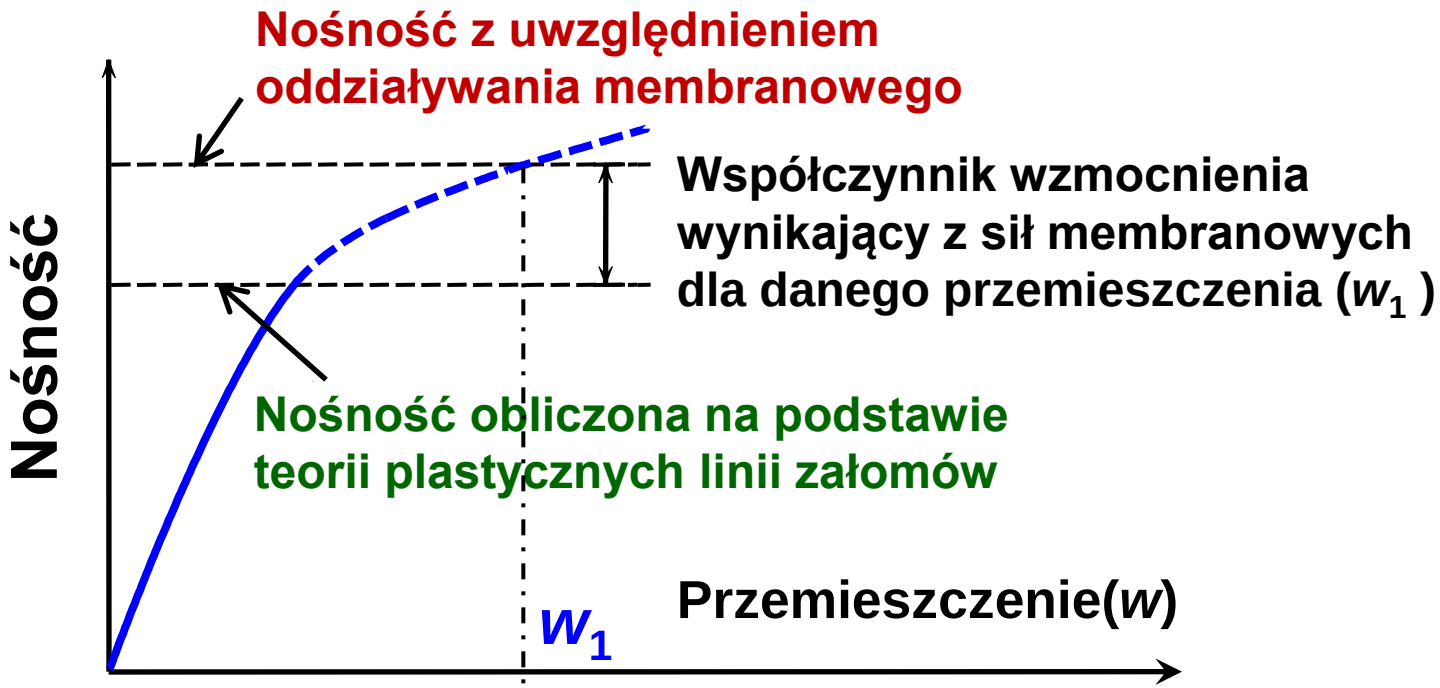


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Wpływ oddziaływania membranowego (4)**



# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C

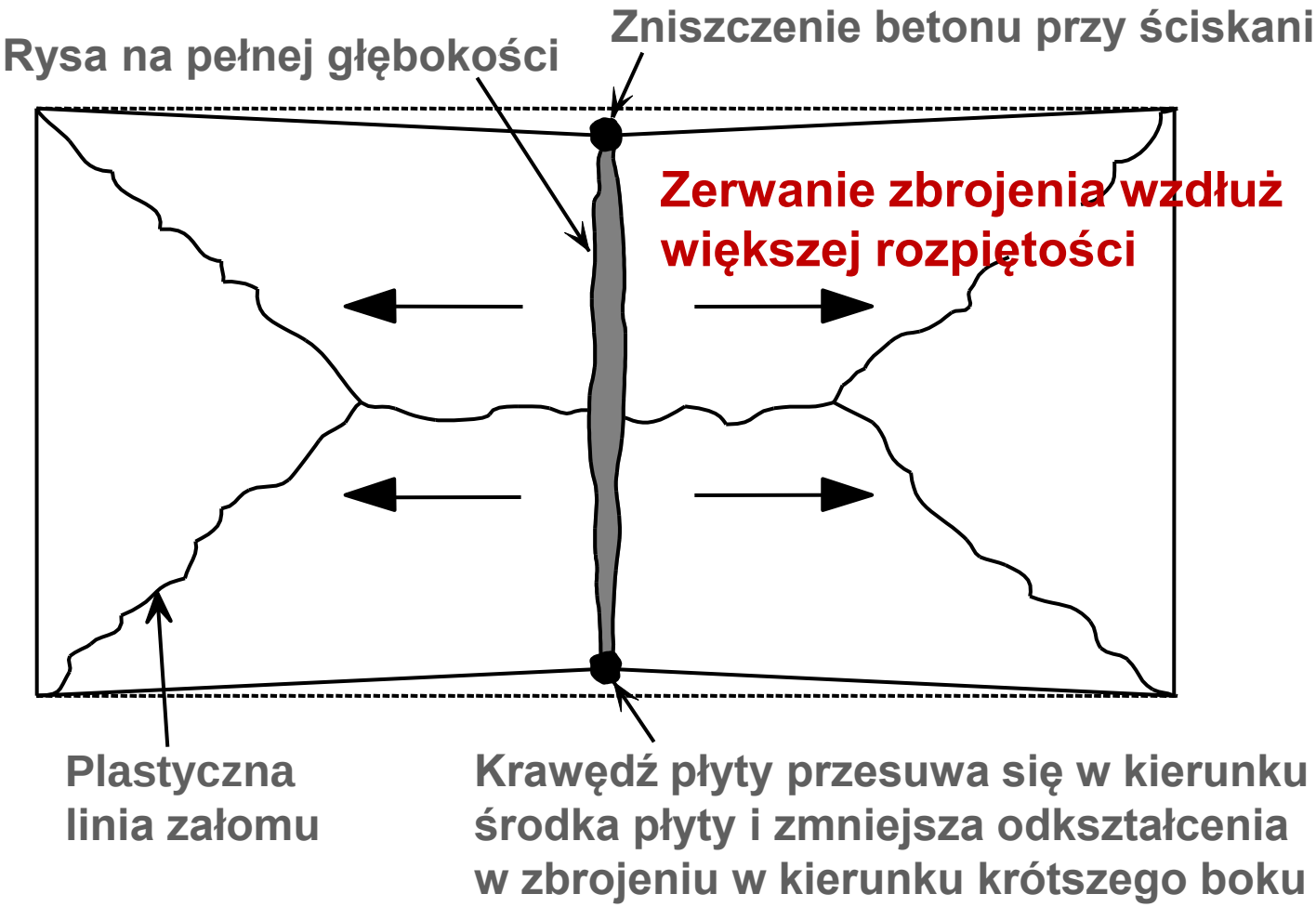


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

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



# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C

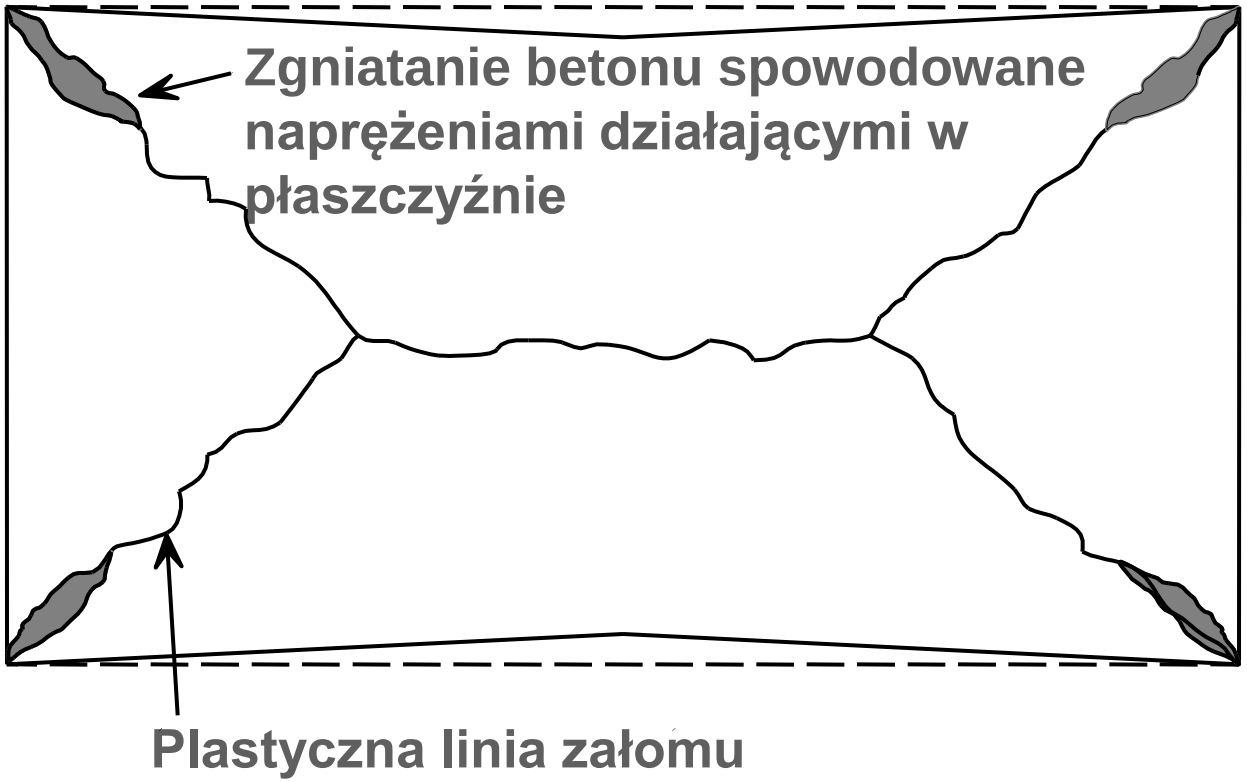


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

**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**



# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20 °C



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

- **Mechanizmy zniszczenia** (wyniki doświadczalne)

**Zniszczenia przy rozciąganiu zbrojenia**

**Zniszczenie przy ściskaniu betonu**

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**

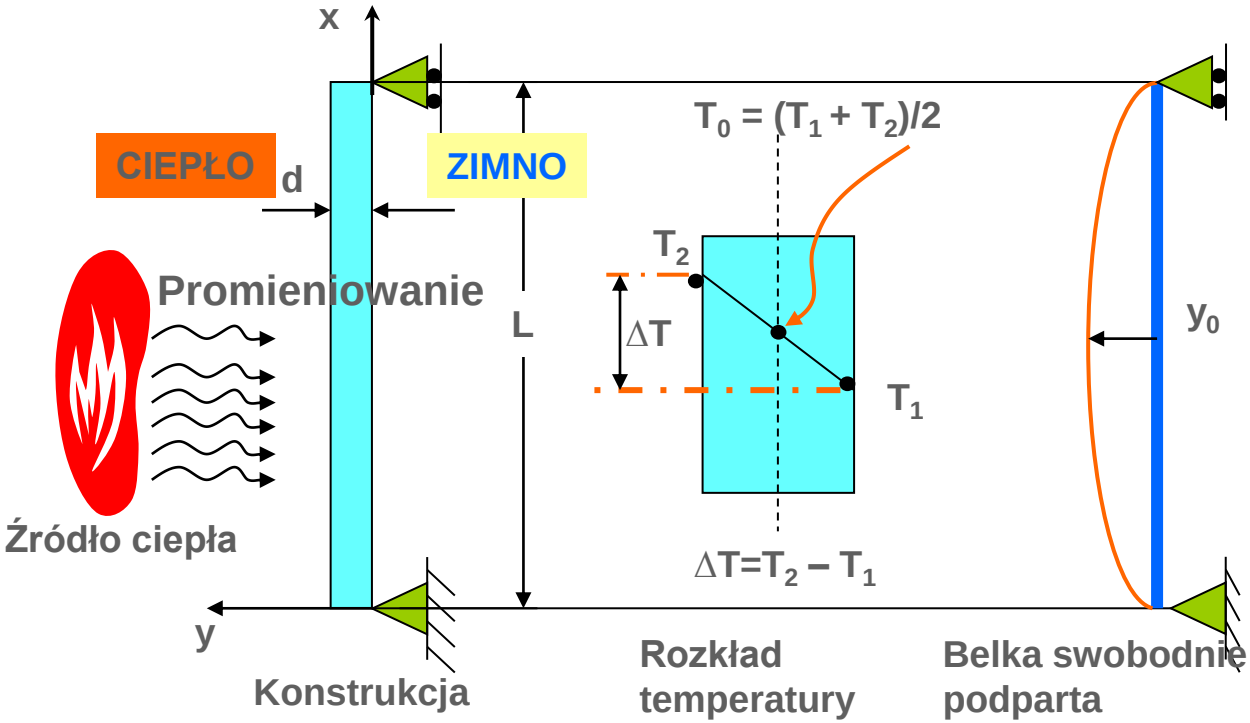
- **Model płyty stropowej w podwyższonej temperaturze (1)**
  - **Oparty na tym samym modelu jak dla temperatury otoczenia**
  - **Uwzględnia wpływ temperatury na właściwości materiałowe**

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**

## Swobodne ugięcie płyty betonowej




Belka swobodnie podparta $$y = \frac{\alpha L^2}{8}\frac{(T_2 - T_1)}{d}$$

Wspornik $$y = \frac{\alpha L^2}{2}\frac{(T_2 - T_1)}{d}$$

Ugięcie spowodowane jest Różnicą Temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$ lub Gradientem $\Delta T/d$

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**

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

$\ell$ jest krótszą rozpiętością płyty

$\alpha$ jest współczynnikiem rozszerzalności termicznej betonu

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

$\alpha_{LWC} = 0{,}8 \times 10^{-5}\ °K^{-1}$

Dla betonu zwykłego przyjmuje się konserwatywną wartość

$\alpha_{NWC} = 1{,}2 \times 10^{-5}\ °K^{-1} < 1{,}8 \times 10^{-5}\ °K^{-1}$ (EN 1994-1-2)

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

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

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



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 granicy plastyczności w temperaturze otoczenia**
  - **Ugięcie płyty na podstawie parabolicznego kształtu ugiętej płyty wynikającego z poprzecznego obciążenia:**

$$w_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{0{,}5\, f_{sy}}{E_s}\right)\frac{3L^2}{8}} \le \frac{\ell}{30}$$

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

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



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:**

$$w < \frac{\alpha\left(T_2 - T_1\right)l^2}{19{,}2h} + l/30$$

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

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**

- **Konserwatywność modelu płyty stropowej w podwyższonej temperaturze**
  - **Zakłada się zrywanie zbrojenia nad podporami**
  - **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 wyboczonej płycie są pomijane**
  - **Pomijany jest wpływa stalowego deskowania**
  - **Wzrost ciągliwości siatki ze wzrostem temperatury jest pomijany**

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej



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 p. 4.3.4.2 EN 1994-1-2, z uwzględnieniem efektu cienia
    - Właściwości termiczne i mechaniczne zarówno stali jak i betonu według EN 1994-1-2

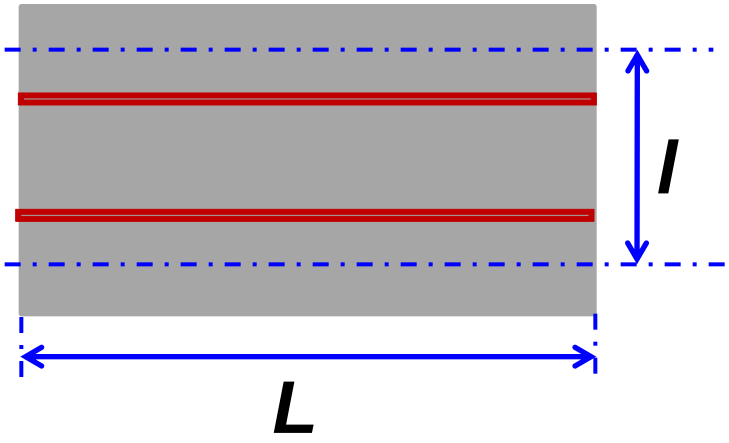
Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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:**

$$\frac{8M_{Rd,fi}}{L^2}\frac{1+n_{ub}}{\ell}$$




gdzie:

**$n_{ub}$** jest liczbą niezabezpieczonych belek

**$M_{Rd,fi}$** jest nośnością na zginanie każdej z niezabezpieczonych belek zespolonych

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

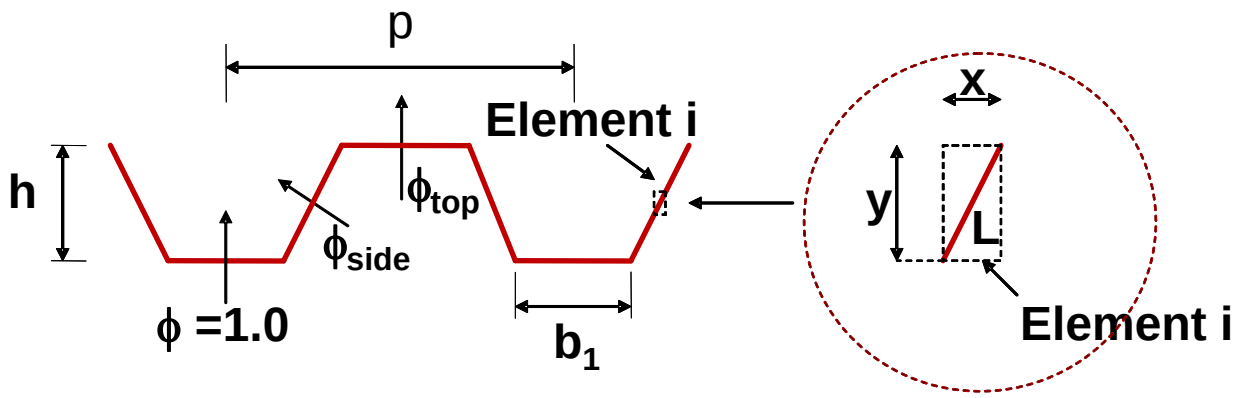


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

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



# 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**
  - **Plastyczne zachowanie się płyty na podstawie wytrzymałości belek**
  - **Obciążenie w warunkach pożaru**
    - Dodatkowe obciążenie belek zabezpieczonych
  - **Metoda uproszczona obliczenia temperatury krytycznej (EN 1994-1-2)**

# Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej

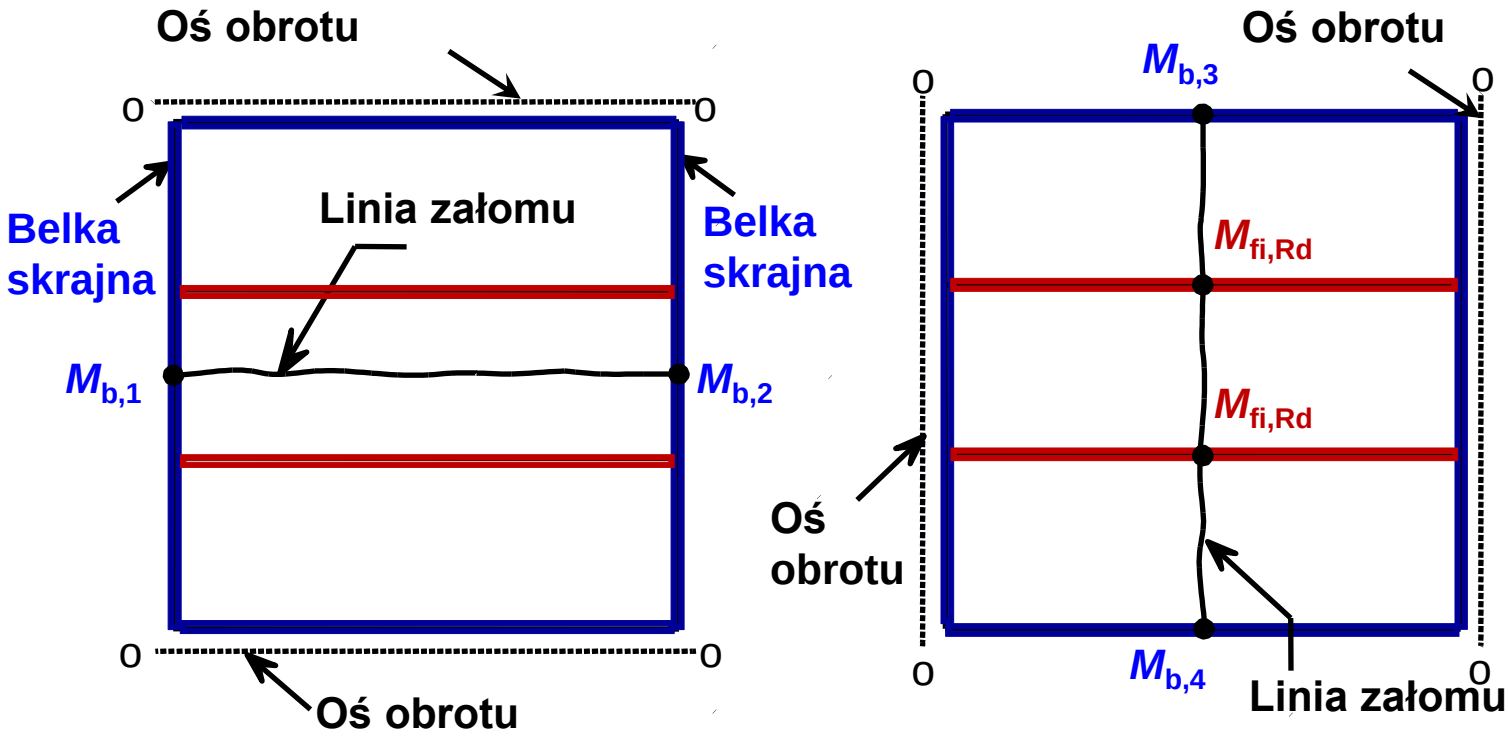


Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**

- **Nośność zabezpieczonych belek obwodowych na podstawie teorii plastyczności**



# Weryfikacja w badaniach



Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**

**7 badań w pełnej skali – Cardington**

**1 badanie w dużej skali – BRE (w warunkach normalnych lecz symulowane na warunki pożarowe)**

**10 badań w warunkach normalnych przeprowadzonych w latach 1960/1970**

**15 w małej skali przeprowadzone przez Sheffield University w 2004**

**44 badania w małej skali, w warunkach normalnych i w warunkach pożarowych przeprowadzone przez University of Manchester**

**Badania ogniowe FRACOF i COSSFIRE (wg krzywej ISO)**

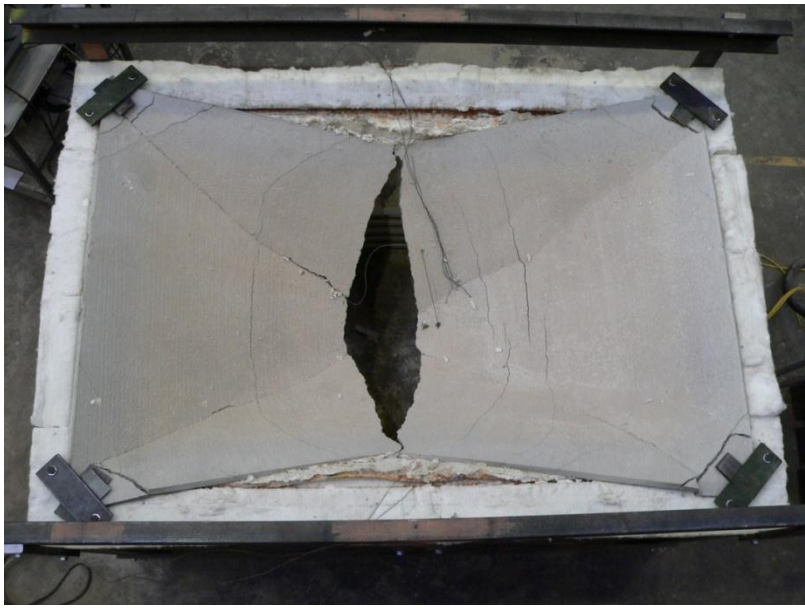
**Badania w pełnej skali przeprowadzone przez Ulster University w 2010**

# Projektowanie i zachowanie się betonowych płyt stropowych w badaniach w małej skali

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**



**22 badania w warunkach normalnych i 22 identyczne próby ogniowe (siatki zbrojeniowe zarówno ze stali węglowej (MS) jak i nierdzewnej (SS))**

# Korzyści z zastosowania metody

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

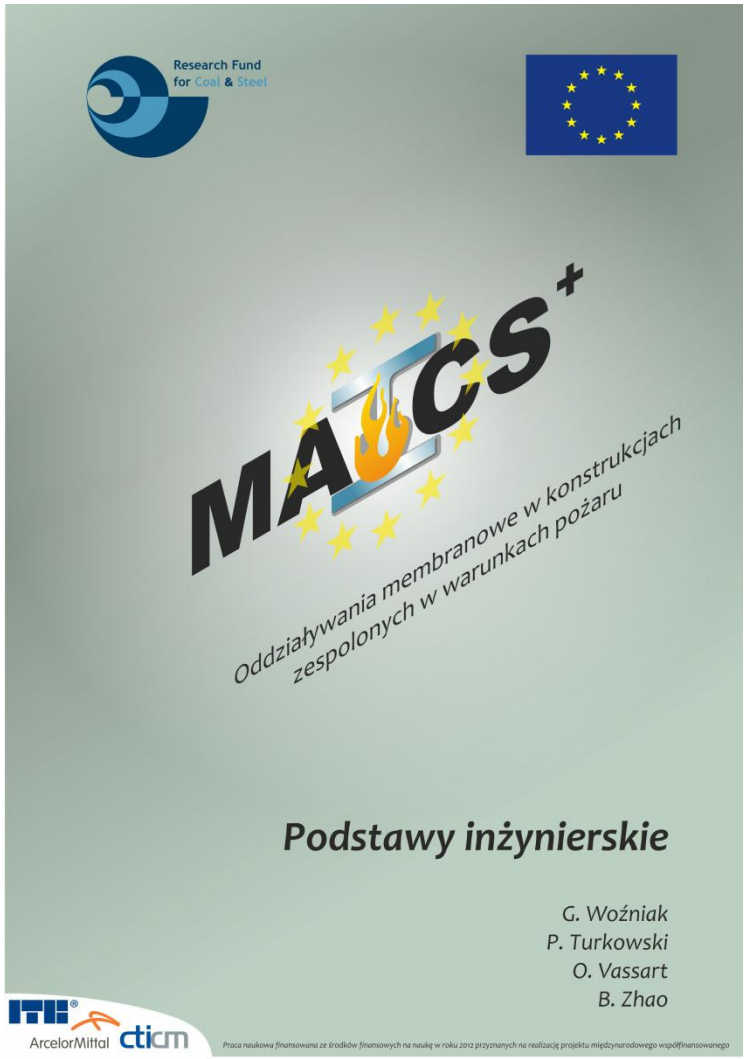
Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**

*40 do 55% belek może pozostać niezabezpieczonymi, umieszczając zabezpieczeni gdzie wymagane*

# Dostępne materiały

Zachowanie mechaniczne stropów zespolonych

Uproszczona metoda projektowania w temperaturze 20°C

**Uproszczona metoda projektowania w temperaturze podwyższonej**