


|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
| <b>ARKUSZ OBLICZENIOWY</b><br> | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <i>1 z 9</i>         |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

## Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem

*Przykład pokazuje, jak projektować słup zespolony ściskany osiowo, w postaci rury kwadratowej wypełnionej betonem, w warunkach pożaru, według prostej metody obliczeniowej podanej w Załączniku H PN-EN1994-1-2.*

### Zakres:

Wyznaczyć nośność słupa ściskanego osiowo, o odporności ogniowej R90.

### Dane podstawowe:

Słup zespolony, zbrojony, w postaci rury kwadratowej wypełnionej betonem.

- Długość słupa: 3,8 m
- Rura kwadratowa: SHS 300 x 10
- Gatunek stali: S355,  $f_{ay} = 355 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_a = 210000 \text{ N/mm}^2$
- Zbrojenie: 8  $\phi$  20, B500B,  $f_{sy} = 500 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$
- Beton: C30/37,  $f_c = 29 \text{ N/mm}^2$

### Sprawdzenie możliwości stosowania Załącznika H:

Długość wybocheniowa,  $l_{\theta} = 3,8 \text{ m}$   $3,8 \text{ m} \leq 4,5 \text{ m} \checkmark$

Szerokość przekroju  $b = 300 \text{ mm}$   $140 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} \leq 400 \text{ mm} \checkmark$

Klasa betonu C30/37  $C20/25 \leq C30/37 \leq C40/50 \checkmark$


Procent zbrojenia,

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{8 \frac{\pi \cdot 20^2}{4}}{(300 - 2 \cdot 10)^2} \cdot 100 = 3,2\% \quad 3,2\% \leq 5\% \quad \checkmark$$

Standardowa odporność ogniowa, 90 minut  $90 \text{ minut} \leq 120 \text{ minut} \checkmark$

Załącznik H może być stosowany.

PN-EN  
1994-1-2  
[§H.5](#)

|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
| <b>ARKUSZ OBLICZENIOWY</b><br> | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <b>2 z 9</b>         |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

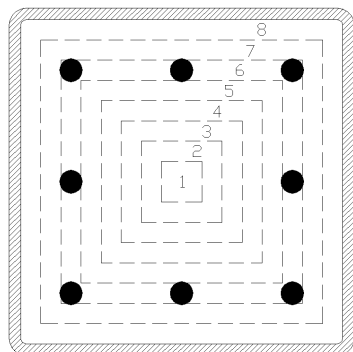
### **Odpowiedź termiczna**

Temperatury w tym przykładzie zostały wyznaczone za pomocą obliczeń wykonanych metodą elementów skończonych. Istnieje szereg pakietów MES dostępnych na rynku umożliwiających analizę przepływu ciepła. Dostępna jest też literatura przedstawiająca wyznaczanie obliczeniowych temperatur w wypadku różnych przekrojów poprzecznych, np. *Model Code on Fire Engineering*, ECCS, 2001.


Przekrój poprzeczny podzielony jest na szereg warstw. W każdej z nich założono stałą wartość temperatury i działanie standardowego pożaru według ISO 834. Aby uprościć obliczenia, w przykładzie warstwy mają kształt zbliżony do kwadratu. W rzeczywistości w narożach materiał jest nagrzewany z dwu stron i ogrzewa się szybciej. Założenie poczynione w tym przykładzie daje wówczas nieznaczną różnicę w stosunku do modelu bardziej dokładnego.

Wyniki analizy MES są następujące:

| Warstwa | Długość boku zewnętrznego, $d_o$<br>(mm) | Długość boku wewnętrznego, $d_i$<br>(mm) | Temperatura |
|---------|--|--|-------------|
| 1       | 35                                       | 0  | 124°C       |
| 2       | 70                                       | 35                                       | 134°C       |
| 3       | 105                                      | 70                                       | 164°C       |
| 4       | 140                                      | 105                                      | 221°C       |
| 5       | 175                                      | 140                                      | 303°C       |
| 6       | 210                                      | 175                                      | 415°C       |
| 7       | 245                                      | 210                                      | 577°C       |
| 8       | 280                                      | 245                                      | 814°C       |
| Stal    |  |  | 953°C       |



Numeracja warstw.

|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
|  | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <b>3</b> z <b>9</b>  |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

### **Obliczeniowa nośność przy wyboczeniu w podwyższonej temperaturze**

$$N_{fi,Rd} = N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd}$$

gdzie:

$$N_{fi,cr} = \frac{\pi^2 (E_{a,\theta,\sigma} I_a + E_{c,\theta,\sigma} I_c + E_{s,\theta,\sigma} I_s)}{l_\theta^2} \quad \text{oraz}$$

$$N_{fi,pl,Rd} = A_a \sigma_{a,\theta} / \gamma_{M,fi,a} + A_s \sigma_{s,\theta} / \gamma_{M,fi,s} + A_c \sigma_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c}$$

We wzorach:

$N_{fi,cr}$  jest siłą krytyczną wyboczenia w warunkach pożaru

$N_{fi,pl,Rd}$  jest obliczeniową nośnością plastyczną przy ściskaniu całego przekroju w sytuacji pożarowej

$l_\theta$  jest długością wyboczeniową słupa w warunkach pożaru

$E_{i,\theta,\sigma}$  jest styczną wartością modułu sprężystości wynikającą z zależności naprężenie-odkształcenie dla materiału  $i$  w temperaturze  $\theta$  i dla wartości naprężeń  $\sigma$

$I_i$  jest momentem bezwładności przekroju materiału  $i$  odniesiona do osi przekroju  $y$  lub  $z$  przekroju zespolonego

$A_i$  jest polem przekroju poprzecznego materiału  $i$

$\sigma_{i,\theta}$  jest naprężeniem w materiale  $i$ -tym przekroju w temperaturze  $\theta$

$\gamma_{M,fi,i}$  jest częściowym współczynnikiem bezpieczeństwa materiału  $i$  ( $=1,0$ )

Wyznaczenie pola przekroju poprzecznego i momentu bezwładności przekroju wszystkich warstw.

Obliczenia dla warstwy 6, przy temperaturze  $T=415^\circ\text{C}$  są pokazane poniżej

$$A_{s,\theta} = 8 \frac{\pi}{4} \cdot \phi^2 = 8 \frac{\pi}{4} \cdot 20^2 = 2513 \text{ mm}^2$$


$$I_{s,\theta} = \sum I_{0,i} + A_i a_i^2 = 8 \cdot \frac{\pi \cdot 20^4}{64} + 6 \cdot \frac{\pi \cdot 20^2}{4} \left( \frac{(210+175)/2}{2} \right)^2 = 17,53 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_{c,\theta} = d_o^2 - d_i^2 - A_{s,\theta} = 210^2 - 175^2 - 2513 = 10962 \text{ mm}^2$$

$$I_{c,\theta} = \frac{210^4 - 175^4}{12} - 17,53 \cdot 10^6 = 66,38 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

PN-EN  
1994-1-2


[Załącznik H](#)


|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
| <b>ARKUSZ OBLICZENIOWY</b><br><br> | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <i>4 z 9</i>         |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

Wyniki obliczeń dla wszystkich warstw są przedstawione w Tabelicy poniżej.

| Warstwa               | Pole powierzchni (mm <sup>2</sup> ) | $I_i$ (mm <sup>4</sup> ) |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Stal                  | 11500                               | $160,26 \cdot 10^6$      |
| Beton – 8             | 18375                               | $211,96 \cdot 10^6$      |
| Beton – 7             | 15925                               | $138,18 \cdot 10^6$      |
| Beton – 6             | 10962 <sup>1)</sup>                 | $66,38 \cdot 10^6$       |
| Beton – 5             | 11025                               | $46,14 \cdot 10^6$       |
| Beton – 4             | 8575                                | $21,88 \cdot 10^6$       |
| Beton – 3             | 6125                                | $8,13 \cdot 10^6$        |
| Beton – 2             | 3675                                | $1,88 \cdot 10^6$        |
| Beton – 1             | 1225                                | $0,13 \cdot 10^6$        |
| Zbrojenie (warstwa 6) | 2513                                | $17,53 \cdot 10^6$       |

<sup>1)</sup> Od powierzchni warstwy odjęte jest pole powierzchni zbrojenia

|   | Dokument Ref:   | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <i>5 z 9</i>         |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
|--|---|--|--------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------|---|---------------------------------------|----------------|---|---|--|---|-----------------|---|--|
|  | Tytuł   | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i>   |        |                      |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
|  | Dot. Eurokodu   | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
|  | Wykonał   | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
|  | Sprawdził   | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
| <p>Wyznaczenie modułu stycznego i poziomu naprężeń według PN-EN 1994-1-2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Zakres odkształceń</th> <th>Naprężenie <math>\sigma</math></th> <th>Moduł stycznzy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I / sprężysty<br/><math>\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}</math></td> <td><math>E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}</math></td> <td><math>E_{a,\theta}</math></td> </tr> <tr> <td>II / przejściowy eliptyczny<br/><math>\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon</math><br/><math>\varepsilon \leq \varepsilon_{ay,\theta}</math></td> <td> <math display="block">\left(f_{ap,\theta} - c\right) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}</math> <math display="block">a^2 = \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c / E_{a,\theta}\right)</math> <math display="block">b^2 = E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) c + c^2</math> <math display="block">c = \frac{\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)^2}{E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) - 2\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)}</math> </td> <td> <math display="block">\frac{b \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)}{a \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}}</math> </td> </tr> <tr> <td>III /plastyczny<br/><math>\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon</math><br/><math>\varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}</math></td> <td><math>f_{ay,\theta}</math></td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p>gdzie:</p> <p><math>f_{ap,\theta} = k_{p,\theta} \cdot f_{ay}</math> jest granica proporcjonalności</p> <p><math>f_{ay,\theta} = k_{y,\theta} \cdot f_{ay}</math> jest wytrzymałością stali w temperaturze pożaru</p> <p><math>E_{a,\theta} = k_{E,\theta} E_a</math> jest nachyleniem liniowej części zależności naprężenie-odkształcenie stali konstrukcyjnej w podwyższonej temperaturze</p> <p><math>k_{i,\theta}</math> jest współczynnikiem redukcyjnym zależności naprężenie-odkształcenie w podwyższonej temperaturze</p> <p>W przypadku wartości pośrednich temperatury, w celu wyznaczenia współczynników redukcyjnych można stosować interpolację liniową.</p> <p><math>\varepsilon_{ap,\theta} = f_{ap,\theta} / E_{a,\theta}</math> jest odkształceniem dla granicy proporcjonalności</p> <p><math>\varepsilon_{ay,\theta} = 0,02</math> jest odkształceniem plastycznym w sytuacji pożarowej</p> <p><math>\varepsilon_{au,\theta} = 0,15</math> jest granicznym odkształceniem</p> <p>Obliczenie granicy proporcjonalności, wytrzymałości i nachylenia liniowej części zależności <math>\sigma - \varepsilon</math>, zarówno dla stali rury, jak i prętów zbrojenia.</p> <p>W przypadku zbrojenia walcowanego na gorąco można zastosować Tablicę 3.2, zaś w przypadku zbrojenia ze stali obrabianej na zimno Tablicę 3.4.</p> |   |  |        |                      | Zakres odkształceń | Naprężenie $\sigma$ | Moduł stycznzy | I / sprężysty<br>$\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$ | $E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}$ | $E_{a,\theta}$ | II / przejściowy eliptyczny<br>$\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon$<br>$\varepsilon \leq \varepsilon_{ay,\theta}$ | $\left(f_{ap,\theta} - c\right) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}$ $a^2 = \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c / E_{a,\theta}\right)$ $b^2 = E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) c + c^2$ $c = \frac{\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)^2}{E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) - 2\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)}$ | $\frac{b \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)}{a \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}}$ | III /plastyczny<br>$\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon$<br>$\varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$ | $f_{ay,\theta}$ | 0 | <p>PN-EN 1994-1-2 § 3, <a href="#">Tablica 3.1</a></p> |
| Zakres odkształceń   | Naprężenie $\sigma$   | Moduł stycznzy   |        |                      |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
| I / sprężysty<br>$\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$  | $E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}$   | $E_{a,\theta}$   |        |                      |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
| II / przejściowy eliptyczny<br>$\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon$<br>$\varepsilon \leq \varepsilon_{ay,\theta}$  | $\left(f_{ap,\theta} - c\right) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}$ $a^2 = \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c / E_{a,\theta}\right)$ $b^2 = E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) c + c^2$ $c = \frac{\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)^2}{E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) - 2\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)}$ | $\frac{b \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)}{a \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}}$ |        |                      |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |
| III /plastyczny<br>$\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon$<br>$\varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$  | $f_{ay,\theta}$   | 0  |        |                      |                    |                     |                |   |                                       |                |   |   |  |   |                 |   |  |

|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
|  | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <b>6</b> z <b>9</b>  |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

Obliczenia w przypadku rury kwadratowej są następujące:

$$f_{ap,\theta} = k_{p,\theta} \cdot f_{ay} = (0,0375 - (0,0375 - 0,0250) \cdot \frac{53}{100}) \cdot 355 = 11,0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ay,\theta} = k_{ay,\theta} \cdot f_{ay} = (0,06 - (0,06 - 0,04) \cdot \frac{53}{100}) \cdot 355 = 17,5 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{a,\theta} = k_{E,\theta} E_a = (0,0675 - (0,0675 - 0,0450) \cdot \frac{64}{100}) \cdot 210000 = 11671 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{ap,\theta} = f_{ap,\theta} / E_{a,\theta} = 11,0 / 11671 = 0,94 \cdot 10^{-3}$$

Wyniki obliczeń dla rury kwadratowej i prętów zbrojenia są przedstawione w Tabelcy poniżej.

| Warstwa   | $f_{ap,\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{ay,\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $E_{a,\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_{ap,\theta}$ |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Stal      | 11,0                                 | 17,5                                 | 11671                               | 0,00094                   |
| Zbrojenie | 301                                  | 449                                  | 107200                              | 0,00281                   |

Obliczenie współczynników  $a$ ,  $b$  oraz  $c$  dają wartości:

| Layer     | $a$ (-) | $b$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $c$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|---------|--------------------------|--------------------------|
| Stal      | 0,0191  | 6,7830                   | 0,2066                   |
| Zbrojenie | 0,0173  | 163,37                   | 14,367                   |

Zależność naprężenie-odkształcenie betonu jest następująca:


$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \left[ 3 \left( \frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right) / \left\{ 2 + \left( \frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right)^3 \right\} \right]$$

gdzie:

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_c$$

$k_{c,\theta}$  oraz  $\varepsilon_{cu,\theta}$  są dobrane zgodnie z PN-EN 1994-1-2 § 3.2.2 Tablica 3.3

PN-EN  
1994-1-2  
[§3.2.2](#)

|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
| <b>ARKUSZ OBLICZENIOWY</b><br> | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <i>7 z 9</i>         |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

Wyniki obliczeń wszystkich warstw są pokazane poniżej:

| Layer     | $f_{c,\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $\epsilon_{cu,\theta}$ |
|-----------|-------------------------------------|------------------------|
| Beton – 8 | 4,07                                | 0,0250                 |
| Beton – 7 | 14,1                                | 0,0227                 |
| Beton – 6 | 21,1                                | 0,0108                 |
| Beton – 5 | 24,6                                | 0,0071                 |
| Beton – 4 | 26,9                                | 0,0058                 |
| Beton – 3 | 28,1                                | 0,0050                 |
| Beton – 2 | 28,5                                | 0,0045                 |
| Beton – 1 | 28,7                                | 0,0044                 |

W celu wyznaczenia wartości  $N_{fi,cr}$  oraz  $N_{fi,pl,Rd}$  należy najpierw obliczyć moduł styczny. Ponieważ w obu przypadkach są one funkcją odkształceń, obliczenia wykonano za pomocą arkusza kalkulacyjnego.


Rozpoczęto obliczenia od małej wartości odkształceń i powiększono ją w niewielkich przyrostach, dopóki  $N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd}$ .

$$\epsilon_a = \epsilon_c = \epsilon = 0,005$$

Wyznaczenie naprężeń w betonie przy danej wartości odkształcenia.

Obliczenia dla warstwy 4 pokazano poniżej:

$$\begin{aligned} \sigma_{c,\theta} &= f_{c,\theta} \left[ 3 \left( \frac{\epsilon_{c,\theta}}{\epsilon_{cu,\theta}} \right) / \left\{ 2 + \left( \frac{\epsilon_{c,\theta}}{\epsilon_{cu,\theta}} \right)^3 \right\} \right] = \\ &= 26,9 \left[ 3 \left( \frac{0,0005}{0,0058} \right) / \left\{ 2 + \left( \frac{0,0005}{0,0058} \right)^3 \right\} \right] = 3,48 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
| <b>ARKUSZ OBLICZENIOWY</b><br> | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <b>8</b> z <b>9</b>  |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

Wyznaczenie modułu styczego betonu, który jest pochodną zależności naprężenie-odkształcenie (i który jest podany w Komentarzu SC002).

$$E_{c,\theta} = \frac{6f_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}}\right)^3}{\left\{2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}}\right)^3\right\}^2}$$

[SC002](#)


Obliczenia dla warstwy 4 pokazane są poniżej:

$$E_{c,\theta} = \frac{6 \times 26,9}{0,0058} \cdot \frac{1 - \left(\frac{0,0005}{0,0058}\right)^3}{\left\{2 + \left(\frac{0,0005}{0,0058}\right)^3\right\}^2} = 6948 \text{ N/mm}^2$$

Wyniki obliczeń przeprowadzone dla wszystkich warstw betonu pokazano w poniższej Tabelicy.

| Warstwa   | $\sigma_{c,\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $E_{c,\theta,\sigma}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--|--|
| Beton – 8 | 0,12                                     | 243,9                                      |
| Beton – 7 | 0,46                                     | 928,4                                      |
| Beton – 6 | 1,47                                     | 2943                                       |
| Beton – 5 | 2,60                                     | 5193                                       |
| Beton – 4 | 3,48                                     | 6948                                       |
| Beton – 3 | 4,24                                     | 8472                                       |
| Beton – 2 | 4,74                                     | 9456                                       |
| Beton – 1 | 4,93                                     | 9828                                       |



|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
| <b>ARKUSZ OBLICZENIOWY</b><br> | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <b>9</b> z <b>9</b>  |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

Wyznaczenie naprężeń w stali dla określonego odkształcenia.

$$\varepsilon = 0,0005 < \varepsilon_{ap,0} = 0,00094 \text{ stąd}$$

$$\sigma_{a,0} = E_{a,0} \cdot \varepsilon_{a,0} = 11671 \cdot 0,0005 = 5,84 \text{ N/mm}^2$$

i moduł styczny

$$E_{a,0,\sigma} = E_{a,0} = 11671 = 11671 \text{ N/mm}^2$$

W poniższej Tabelicy przedstawiono wyniki obliczeń dla stali i prętów zbrojenia.

| Warstwa   | $\sigma_{a,0}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $E_{a,0,\sigma}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Stal      | 5,84                                | 11 671                                |
| Zbrojenie | 53,6                                | 107 200                               |

Obliczenie  $N_{fi,cr}$

$$N_{fi,cr} = \frac{\pi^2 (E_{a,0,\sigma} I_a + E_{c,0,\sigma} I_c + E_{s,0,\sigma} I_s)}{l_0^2} =$$

$$= \frac{\pi^2}{3,8^2} \left( \begin{array}{l} 11670 \cdot 160,3 + 9828 \cdot 0,130 + 9456 \cdot 1,880 + \\ + 8472 \cdot 8,130 + 6958 \cdot 21,88 + 5193 \cdot 46,14 + \\ + 2943 \cdot 66,38 + 928,4 \cdot 138,2 + \\ + 243,9 \cdot 212,0 + 107200 \cdot 17,53 \end{array} \right) = 3148 \text{ kN}$$

oraz  $N_{fi,pl,Rd}$

$$N_{fi,pl,Rd} = A_a \sigma_{a,0} / \gamma_{M,fi,a} + A_s \sigma_{s,0} / \gamma_{M,fi,s} + A_c \sigma_{c,0} / \gamma_{M,fi,c} =$$


$$= \frac{11500 \cdot 5,84}{1,0} + \frac{2513 \cdot 53,6}{1,0} +$$

$$+ \frac{1225 \cdot 4,93 + 3675 \cdot 4,74 + 6125 \cdot 4,24 + 8575 \cdot 3,48}{1,0} +$$

$$+ \frac{11025 \cdot 2,60 + 10962 \cdot 1,47 + 15925 \cdot 0,46 + 18375 \cdot 0,12}{1,0} = 335 \text{ kN}$$

Powiększono odkształcenia w niewielkich przyrostach, pomijając wpływ odkształceń od temperatury, dopóki  $N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd}$ .

Z przyrostem odkształceń, wartość  $N_{fi,cr}$  wzrasta, zaś wartość  $N_{fi,pl,Rd}$  maleje.

|   |               |  |        |                      |
|---|---------------|--|--------|----------------------|
| <b>ARKUSZ OBLICZENIOWY</b><br><br> | Dokument Ref: | <i>SX040a-PL-EU</i>  | Strona | <i>10 z 9</i>        |
|   | Tytuł         | <i>Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem</i> |        |                      |
|   | Dot. Eurokodu | <i>EN 1994-1-2 Annex H</i>   |        |                      |
|   | Wykonał       | <i>Björn Uppfeldt</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |
|   | Sprawdził     | <i>Emma Unosson</i>  | Data   | <i>kwiecień 2006</i> |

Rezultaty dla różnych wartości odkształceń pokazano w Tabelicy poniżej.

| Odkształcenie | $N_{fi,cr}$ (kN) | $N_{fi,pl,Rd}$ (kN) |
|---------------|------------------|---------------------|
| 0,005         | 3148             | 335                 |
| 0,001         | 2327             | 670                 |
| 0,002         | 1957             | 1215                |
| 0,0025        | 1913             | 1474                |
| 0,0028        | 1887             | 1623                |
| 0,0029        | 1417             | 1703                |
| 0,002833      | 1679             | 1675                |

W ten sposób  $N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd}$  przy wartości 1675 kN

tj.  $N_{fi,Rd} = N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd} = 1675$  kN

Nośność słupa po 90 minutach pożaru wynosi 1675 kN

PN-EN  
1994-1-2  
[§H.3](#)

## Protokół jakości

|   |   |                   |             |
|---|---|-------------------|-------------|
| <b>TYTUŁ ZASOBU</b>                                       | Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem |                   |             |
| <b>Odniesienie</b>  |   |                   |             |
| <b>ORYGINAŁ DOKUMENTU</b>                                 |   |                   |             |
|   | <b>Imię i nazwisko</b>  | <b>Instytucja</b> | <b>Data</b> |
| <b>Stworzony przez</b>                                    | Björn Uppfeldt  | SBI               |             |
| <b>Zawartość techniczna sprawdzona przez</b>              | Emma Unosson  | SBI               |             |
| <b>Zawartość redakcyjna sprawdzona przez</b>              |   |                   |             |
| <b>Zawartość techniczna zaaprobowana przez:</b>           |   |                   |             |
| <b>1. Wielka Brytania</b>                                 | G W Owens   | SCI               | 9/6/06      |
| <b>2. Francja</b>   | A Bureau  | CTICM             | 9/6/06      |
| <b>3. Szwecja</b>   | B Uppfeldt  | SBI               | 9/6/06      |
| <b>4. Niemcy</b>  | C Müller  | RWTH              | 9/6/06      |
| <b>5. Hiszpania</b>                                       | J Chica   | Labein            | 9/6/06      |
| <b>Zasób zatwierdzony przez Koordynatora Technicznego</b> | M Haller  | PARE              | 9/6/06      |
| <b>Stworzony przez</b>                                    | G W Owens   | SCI               | 12/9/06     |

## Informacje ramowe

|                              |  |  |
|------------------------------|--|--|
| <b>Tytuł*</b>                | Przykład: Inżynieria pożarowa słupa zespolonego wykonanego z kwadratowej rury wypełnionej betonem  |  |
| <b>Seria</b>                 |  |  |
| <b>Opis*</b>                 | Przykład pokazuje, jak projektować słup zespolony ściskany osiowo, w postaci rury kwadratowej wypełnionej betonem, w warunkach pożaru, według prostej metody obliczeniowej podanej w Załączniku H PN-EN1994-1-2. |  |
| <b>Poziom dostępu*</b>       | Umiejętności specjalistyczne   | Specjalista                                      |
| <b>Identyfikator*</b>        | Nazwa pliku  | D:\ACCESS_STEEL_PL\SX\31-40\SX040a-PL-EU.doc     |
| <b>Format</b>                | Microsoft Office Word; 12 stron; 351kb;  |  |
| <b>Kategoria*</b>            | Typ zasobu   | Przykład obliczeniowy                            |
|                              | Punkt widzenia   | Inżynier   |
| <b>Temat*</b>                | Obszar stosowania  | Projektowanie z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe |
| <b>Daty</b>                  | Data utworzenia  | 20/05/2009                                       |
|                              | Data ostatniej modyfikacji   |  |
|                              | Data sprawdzenia   |  |
|                              | Ważny od   |  |
|                              | Ważny do   |  |
| <b>Język(i)*</b>             | Polski   |  |
| <b>Kontakt</b>               | Autor  | Björn Uppfeldt, SBI                              |
|                              | Sprawdził  | Emma Unosson, SBI                                |
|                              | Zatwierdził  |  |
|                              | Redaktor   |  |
|                              | Ostatnia modyfikacja   |  |
| <b>Słowa kluczowe*</b>       | Projektowanie z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe, odpowiedź termiczna, nośność pożarowa, słup zespolony  |  |
| <b>Zobacz też</b>            | Odniesienie do Eurokodu  |  |
|                              | Przykład(y) obliczeniowy   |  |
|                              | Komentarz  |  |
|                              | Dyskusja   |  |
|                              | Inne   |  |
| <b>Sprawozdanie</b>          | Przydatność krajowa  | EU   |
| <b>Instrukcje szczególne</b> |  |  |