

# Požarna odpornost armirano-betonskih (AB) konstrukcij – določitev mehanske odpornosti



Tomaž Hozjan

e-mail: [tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si](mailto:tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si)

soba: 503

# POŽARNI VPLIV NA AB KONSTRUKCIJE

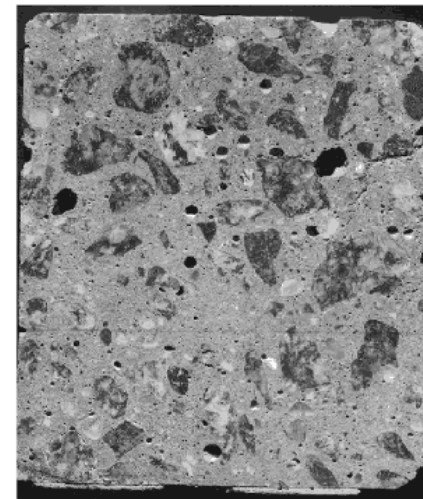
## POŽAR:

- intenziven in kompleksen kemični proces



## BETON:

- heterogen kompozit sestavljen iz agregata, cementnega kamna ter por zapolnjenih s prosto in vezano vodo ter zmesjo zraka in vodne pare



- značilni kemijski in fizikalni procesi v betonu med požarom:
  - prenos toplote s kondukcijo in konvekcijo zaradi temperaturnega in tlačnega gradienta
  - tok proste vode, vodne pare in zraka v porah betona kot posledica tlačnega, vlažnostnega in temperaturnega gradienta
  - utekočinjanje vodne pare in izparevanje vode
  - izločanje kemijsko vezane vode
  - razkroj cementnega kamna in zrn agregata
- posledica fizikalnih in kemijskih procesov zaradi povišane temperature **so zmanjšanje nosilnosti in povečanje deformabilnosti konstrukcije → MANJŠA VARNOST KONSTRUKCIJE**
- značilen pojav: **LUŠČENJE BETONA**

# LUŠČENJE BETONA

- progresivno in eksplozijsko
- različna območja luščenja  
(vogali konstrukcijskih elementov, površinsko luščenje v plasteh s konstrukcijskih elementov, luščenje agregata)
- temperaturno območje eksplozijskega luščenja: 190 do 280 °C
- najbolj izpostavljene so konstrukcije iz visokotrdnih betonov in betonov z visoko vsebnostjo vlage



▣ VZROKI eksplozijskega luščenja betona:

- povišani porni tlaki
- ovirane temperaturne deformacije



▣ POSLEDICE eksplozijskega luščenja betona:

- trenutna porušitev oziroma odpadanje dela konstrukcije
- izpostavljenost armature visoki temperaturi (viskozno lezenje jekla)
- manjša togost in nosilnost → manjša varnost



# Kriterij R - nosilnost

Skladno s standardom SIST EN 1992-1-2 je kriteriju R zadoščeno, če med trajanjem požara ***t* velja:**

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

Kjer sta:

$R_{fi,d,t}$  – pripadajoča nosilnost konstrukcije v požarnem projektne stanju,

$E_{fi,d,t}$  – projektna vrednost notranjih sil pri požarnem projektne stanju.

# Določitev $E_{fi,d,t}$ - obremenitev

**Poenostavljen pristop** skladno s SIST EN 1991-1-2 in 1995-1-2

- Pri metodah požarnega projektiranja po Evrokodih, se pogosto pojavlja pomembna količina, imenovana **faktor redukcije nivoja obremenitve za požarno projektno stanje**  $\eta_{fi}$  :

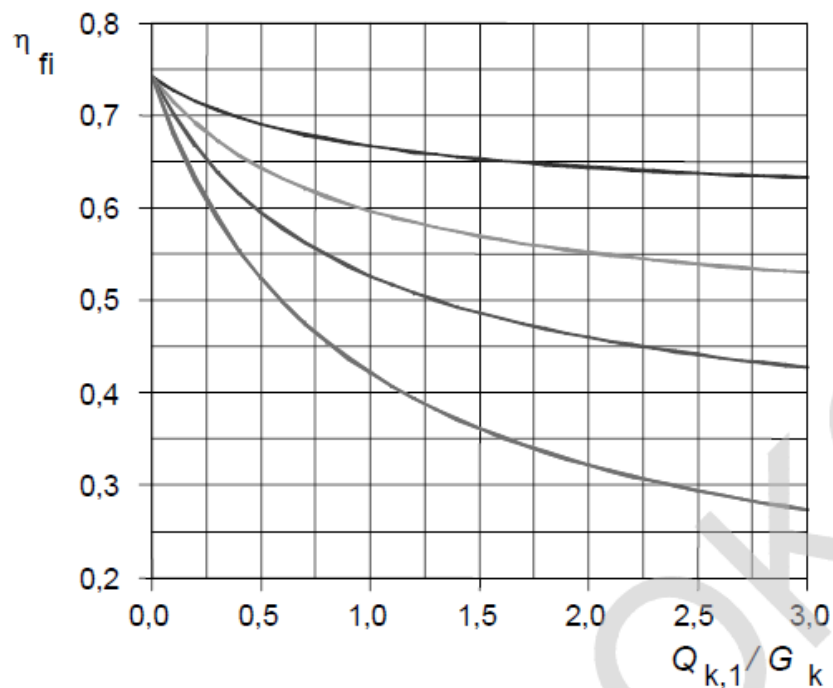
$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d$$

Redukcijski faktor

Projektna vrednost notranje sile določena pri sobni temperaturi za trajno projektno stanje ob upoštevanju osnovne kombinacije vplivov (EN 1990).

# Določitev redukcijskega faktorja $\eta_{fi}$ skladno s SIST EN 1995-1-2

Primer: Vrednost redukcijskega faktorja  $\eta_{fi}$  glede na razmerje  $Q_{k,1}/G_k$ , za različne vrednosti kombinacijskega faktorja  $\psi_{1,1}$  pri upoštevanju  $\gamma_G = 1,35$  in  $\gamma_{Q,1} = 1,5$



DODATNA  
POENOSTAVITEV  
(SIST EN 1992-1-2)  
 **$\eta_{fi} = 0,70$**



# Določitev $R_{fi,d,t}$

Skladno s standardom SIST EN 1992-1-2 požarno odpornost  $R_{fi,d,t}$  AB elementov lahko določimo na naslednje načine:

- ❖ Tabelarični podatki (detajliranje, večinoma za stebre)
- ❖ **Poenostavljeni postopki** (obravnavamo tukaj)
- ❖ Napredne računske metode

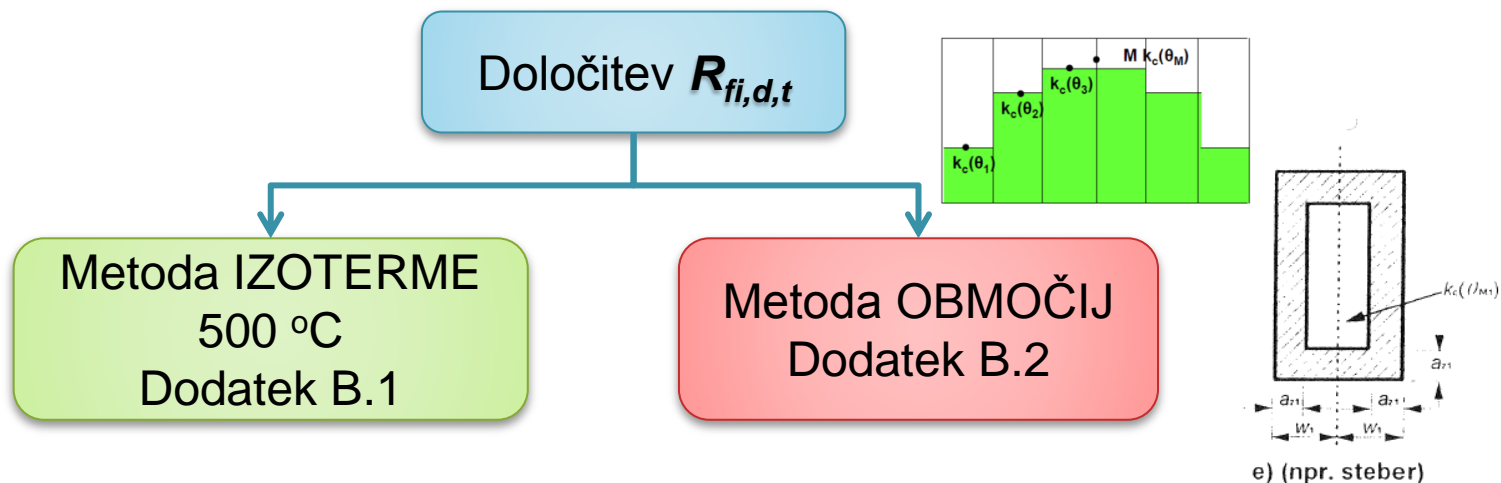
# Tabelarični podatki,

Primer uporabe tabel, večinoma za določitev nosilnosti stebrov (vpliv teorije drugega reda (uklona), ??)

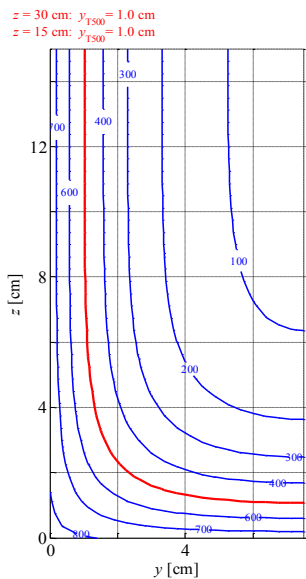
| Standardna požarna odpornost | Najmanjše dimenzije (mm)<br>Širina stebra $b_{min}$ /osna oddaljenost palic |                      |                      |                            |
|------------------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------------|
|                              | Steber, izpostavljen požaru na več straneh                                  |                      |                      | Izpostavljen na eni strani |
|                              | $\mu_{fi} = 0,2$  | $\mu_{fi} = 0,5$     | $\mu_{fi} = 0,7$     | $\mu_{fi} = 0,7$           |
| 1                            | 2   | 3                    | 4                    | 5                          |
| R 30                         | 200/25  | 200/25               | 200/32<br>300/27     | 155/25                     |
| R 60                         | 200/25  | 200/36<br>300/31     | 250/46<br>350/40     | 155/25                     |
| R 90                         | 200/31<br>300/25  | 300/45<br>400/38     | 350/53<br>450/40**   | 155/25                     |
| R 120                        | 250/40<br>350/35  | 350/45**<br>450/40** | 350/57**<br>450/51** | 175/35                     |
| R 180                        | 350/45**  | 350/63**             | 450/70**             | 230/55                     |
| R 240                        | 350/61**  | 450/75**             | -                    | 295/70                     |

\*\* Najmanj 8 palic.  
Pri prednapetih stebrih se upošteva povečanje osne oddaljenosti v skladu s 4.2.2 (4)

# Poenostavljeni postopki



- Beton **nad** 500 °C ne prispeva k nosilnosti elementa
- Beton z temperaturo manjšo od 500 °C ohrani polno nosilnost
- Prispevek armature skladno s temperaturno odvisnimi redukcijskimi faktorji



- Prerez oz. element razdelimo na več območij.
- Za vsako območje potrebno določiti srednjo temperaturo
- potem srednjo tlačno trdnost betona posameznega območja
- Seštejemo prispevek vseh območij
- Natančnejša od metode Izoterma 500 °C.
- Velja samo za standardne požare

# Metoda IZOTERME 500 °C

- Metodo lahko uporabljamo v povezavi s **standardnimi in parametričnimi požari** (s faktorjem odprtin  $O \geq 0.14 \text{ m}^{1/2}$ ).
- Primerna je za armirane in prednapete betonske prereze pri **osni, upogibni in kombinirani osno upogibni obremenitvi**, z nizko vsebnostjo vlage ter za običajno stopnjo armiranja.
- Temelji na predpostavki, da se del betona s temperaturo **višjo od 500°C (poškodovani beton) pri računu nosilnosti zanemari**, medtem ko beton s temperaturo pod 500°C ohrani polno trdnost.
- Prispevke armaturnih palic k požarni odpornosti prečnega prereza nosilca pa moramo upoštevati skladno s **temperaturno odvisnimi redukcijskimi faktorji**
- **POTREBUJEMO TEMPERATURNE PROFILE (IZOLINIJO 500 °C)**

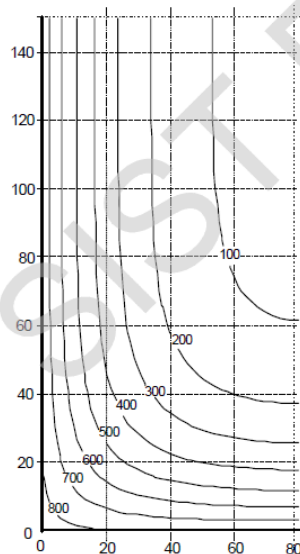
# Določitev Temperaturnih profilov (Toplotna analiza)

- V splošnem moramo za določitev časovnega spreminjanja temperatur nosilcev med požarom upoštevati vse tri načine prenosa toplote:
  - i) sevanje oziroma radiacijo, pri katerem se energija prenaša z elektromagnetnim valovanjem,
  - ii) konvekcijo, pri kateri se energija prenaša z gibanjem snovi z različnimi temperaturami in
  - iii) prevajanje ali kondukcijo, pri katerem potuje energija v obliki toplote skozi snov z mest z višjo temperaturo na mesta z nižjo.
- Rešujemo numerično, metoda MKE

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

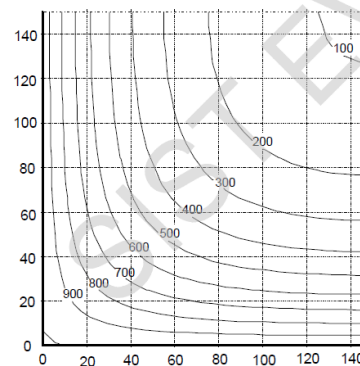
# Določitev Temperaturnih profilov (Toplotna analiza)

- Standard SIST EN 1992-1-2 v Dodatku A podaja nekatere temperaturne profile v primeru če je element izpostavljen standardnemu požaru ISO 834, z treh (nosilci) ali štirih (stebri) strani.



a) R30

Figure A.11: Temperature profiles (°C) for a column,  $h \times b = 300 \times 300$  - R30

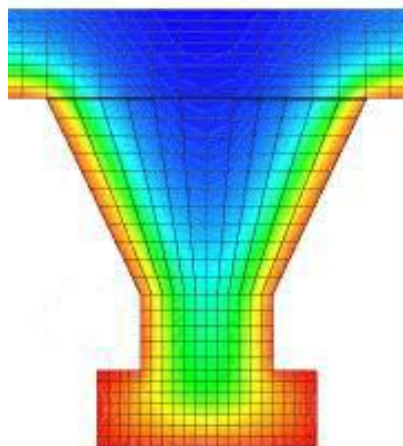
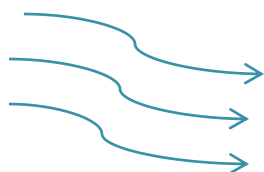


- Lahko pa temperaturne profile poračunamo sami (tudi za druge požarne krivulje)

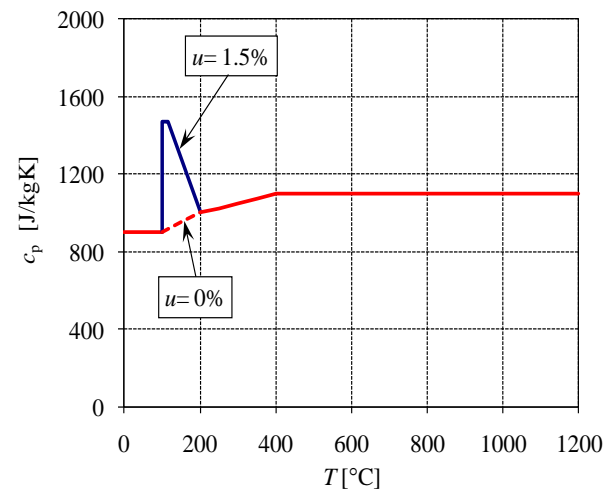
# Toplotne lastnosti betona v odvisnosti od temperature



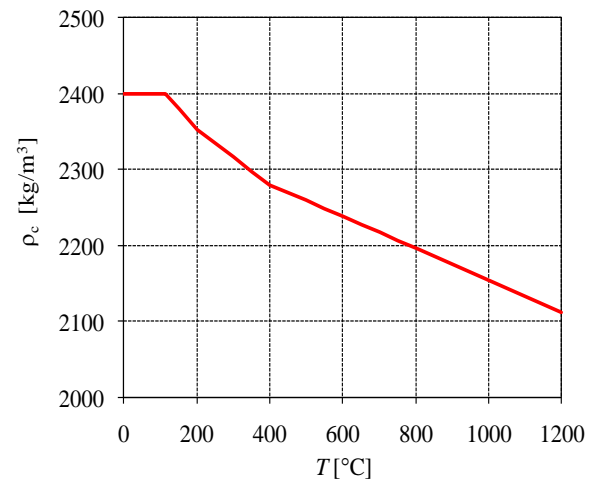
Radiacija +  
konvekcija



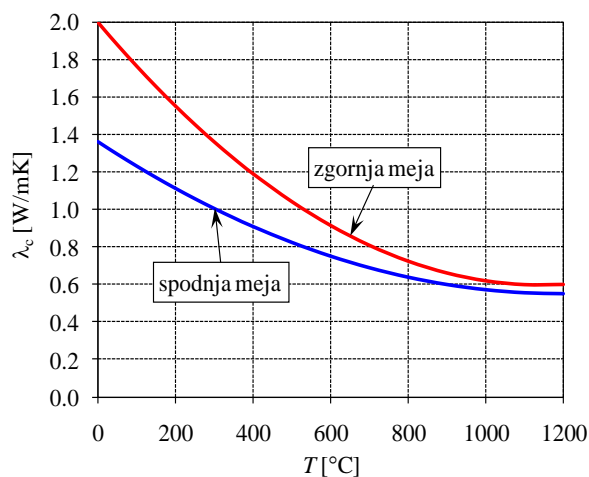
## Specifična toplota



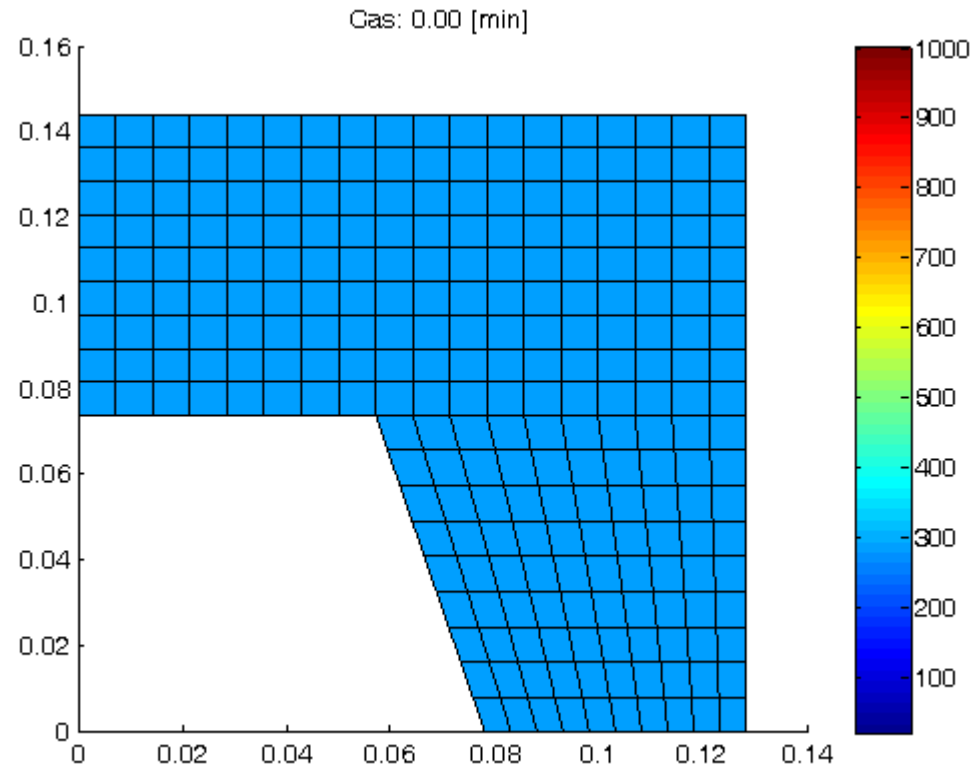
## Gostota



## Toplotna prevodnost



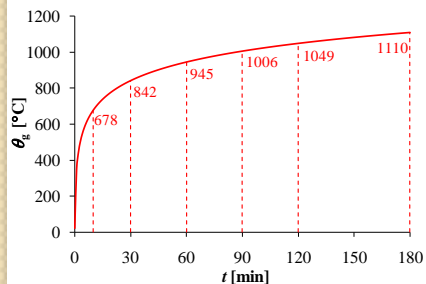
# Rezultat toplotne analize



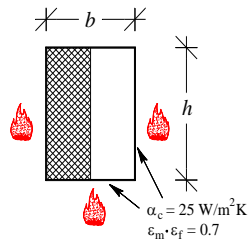


# Temperatuni profili

## ISO 834

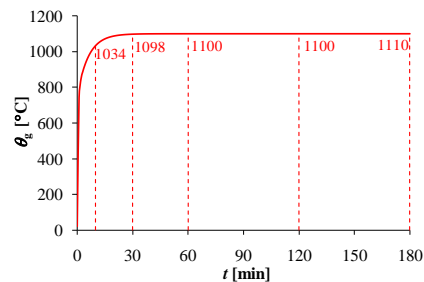


**R30**

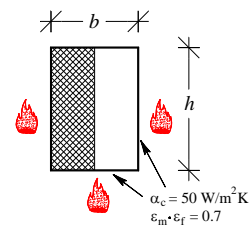


**R90**

## HC – ogljikovodikova krivulja

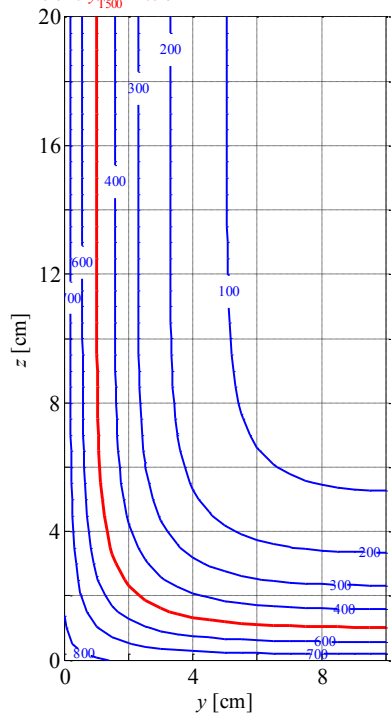


**R30**

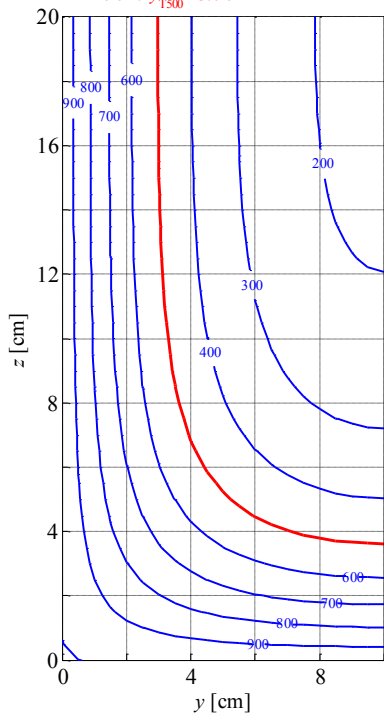


**R90**

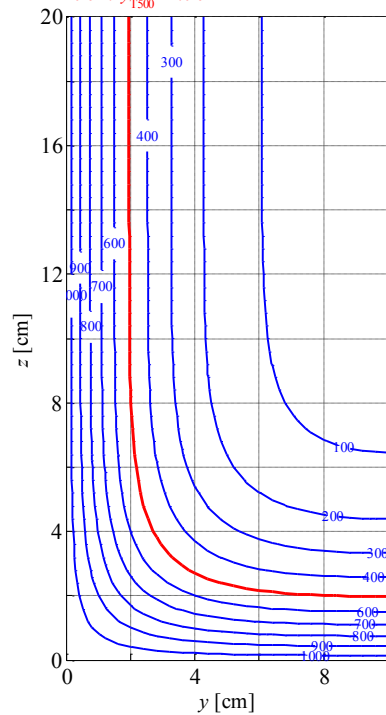
$z = 40 \text{ cm: } y_{T500} = 1.0 \text{ cm}$   
 $z = 20 \text{ cm: } y_{T500} = 1.0 \text{ cm}$



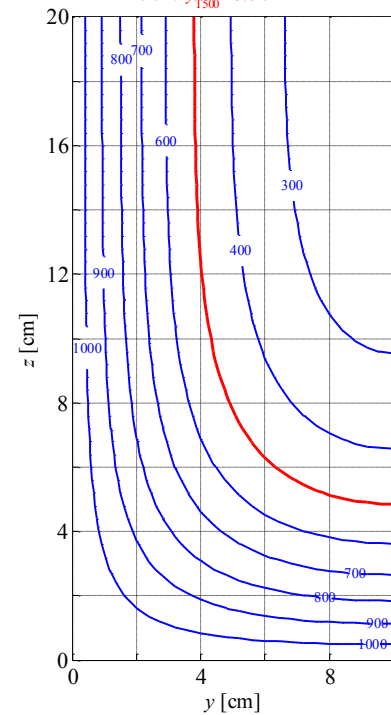
$z = 40 \text{ cm: } y_{T500} = 3.0 \text{ cm}$   
 $z = 20 \text{ cm: } y_{T500} = 3.0 \text{ cm}$



$z = 40 \text{ cm: } y_{T500} = 2.0 \text{ cm}$   
 $z = 20 \text{ cm: } y_{T500} = 2.0 \text{ cm}$



$z = 40 \text{ cm: } y_{T500} = 3.8 \text{ cm}$   
 $z = 20 \text{ cm: } y_{T500} = 3.8 \text{ cm}$

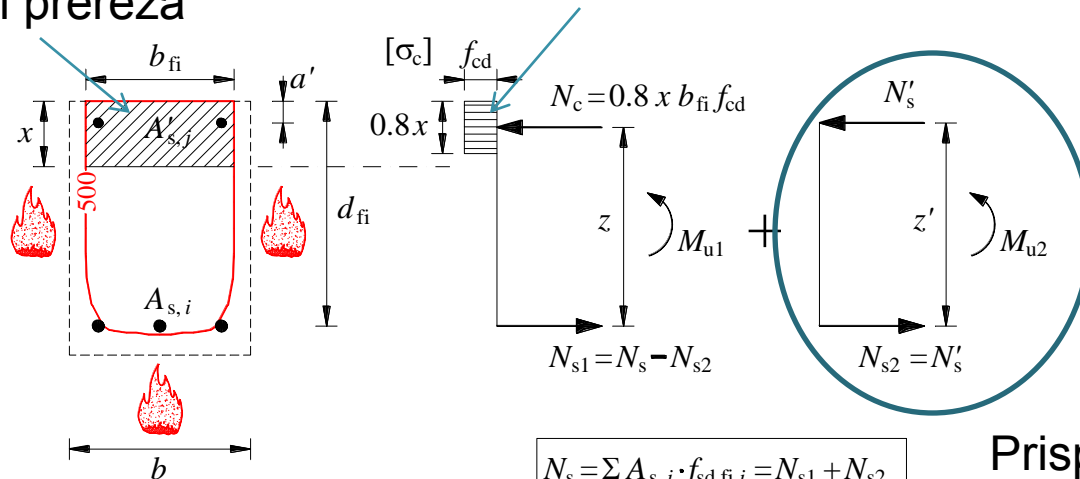


# Določitev projektne upogibne nosilnosti AB nosilca skladno z metodo IZOTERME 500 °C

Prerez AB nosilca je v splošnem obremenjen z osno silo  $N_{ED,fi}$  in upogibnim momentom  $M_{ED,t,fi}$

Linearen potek napetosti

Tlačen del prereza



$$N_s = \sum_i A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = N_{s1} + N_{s2}$$

$$N'_s = \sum_j A'_{s,j} \cdot f'_{sd,fi,j}$$

Prispevek tlačne armature k upogibni nosilnosti,  
 Običajno  
 ZANEMARIMO  
 $N_{s2} = 0$

# Postopek računa upogibne nosilnosti AB nosilca

1.) Najprej izračunamo lego nevtralne osi s pomočjo ravnotežja v prerezu:

$$N_s - N'_s - N_c - N_{Ed,t,fi} = 0$$

In lego nevtralne osi  $x$  izračunamo kot:

$$x = \frac{N_s - N'_s - N_{Ed,t,fi}}{0.8 b_{fi} f_{cd}}$$

kjer je

$$N_s = \sum_i A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} \longrightarrow$$

$$f_{sd,fi,i} = k_{s,T,i} \cdot \frac{f_{yk,i}}{\gamma_{s,fi}}$$

Redukcijski faktor trdnosti natezne armature

$$N'_s = \sum_j A'_{s,j} \cdot f_{sd,fi,j} \longrightarrow$$

$$f_{sd,fi,j} = k_{s,T,j} \cdot \frac{f_{yk,j}}{\gamma_{s,fi}}$$

Redukcijski faktor trdnosti tlačne armature

V enačba je  $b_{fi}$  reducirana širina prečnega prereza,  $f_{cd}$  je projektna tlačna trdnost betona pri sobni temperaturi,  $f_{sd,fi,i}$  in  $f_{sd,fi,j}$  sta od temperature odvisni projektni trdnosti  $i$ -te spodnje oziroma  $j$ -te zgornje vzdolžne armaturene palice med požarom

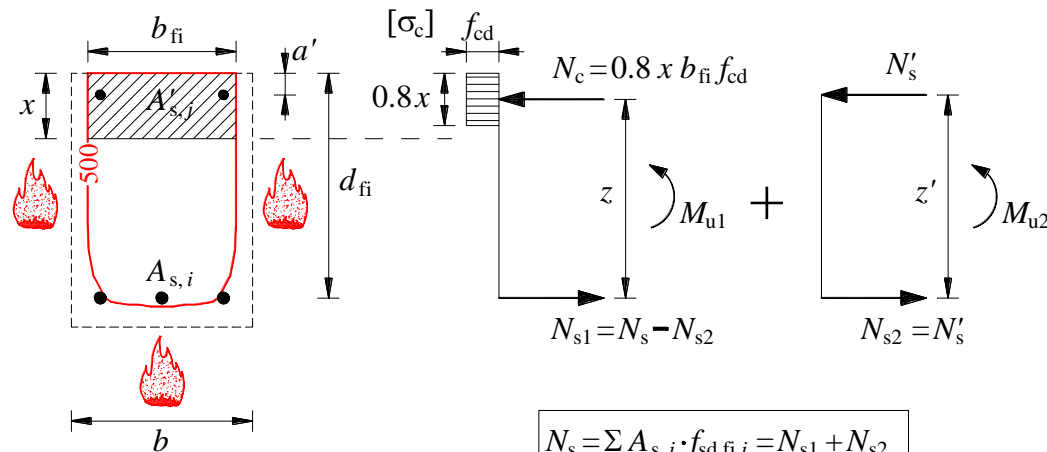
Natezna trdnost armature pri sobni temperaturi (S500 ->  $f_{yk} = 50 \text{ kN/cm}^2$ )

# Postopek računa upogibne nosilnosti AB nosilca

2.) Upogibno nosilnost, ki temelji na učinkovitem prerezu, izračunamo z enačbo:

$$M_{500} = M_{u1} + M_{u2} = N_c \cdot z + N'_s \cdot z' = N_c \cdot (d_{fi} - 0,4x) + N'_s \cdot (d_{fi} - a')$$

kjer je  $z$  ročica notranjih sil,  $z'$  je razdalja med težiščema spodnje in zgornje vzdolžne armature,  $d_{fi}$  je statična višina prečnega prereza v pogojih požara,  $a'$  pa je oddaljenost težišča zgornje (tlačne) armature od zgornjega roba (slika spodaj).



$$N_s = \sum_i A_{s,i} \cdot f_{sd,fi,i} = N_{s1} + N_{s2}$$

$$N'_s = \sum_j A'_{s,j} \cdot f'_{sd,fi,j}$$

# Postopek računa upogibne nosilnosti AB nosilca

3.) Projektno odpornost armiranobetonskega prečnega prereza nosilca v požarnem projektnejem stanju (v tem primeru upogibno odpornost  $M_{Rd,t,fi}$ ) pa izračunamo z enačbo:

$$M_{Rd,t,fi} = M_{500} \cdot k_m$$

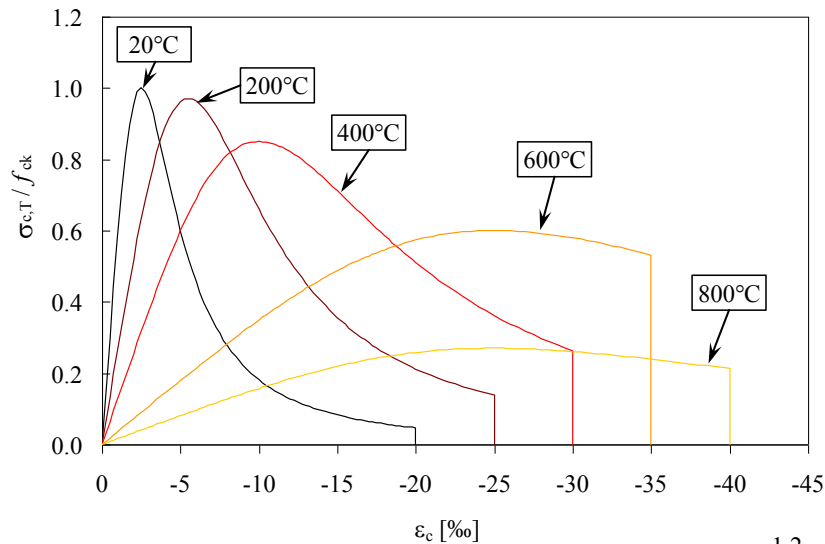
kjer je  $k_m$  redukcijski faktor, podan v preglednici

| Konstruktivski element | Razred 1 | Razred 2 |
|------------------------|----------|----------|
| Nosilci                | 0.98     | 0.95     |

Ker se nekatere količine, kot so **reducirana širina prečnega prereza**, **globina nevtralne osi**, **trdnostne lastnosti armaturnih palic**, med požarom spreminjajo, moramo požarno odpornost armiranobetonskega nosilca preveriti pri različnih časovnih intervalih (R30, 60, 90) med trajanjem požara. Pri tem moramo skladno z zahtevo (1) dokazati, da velja:

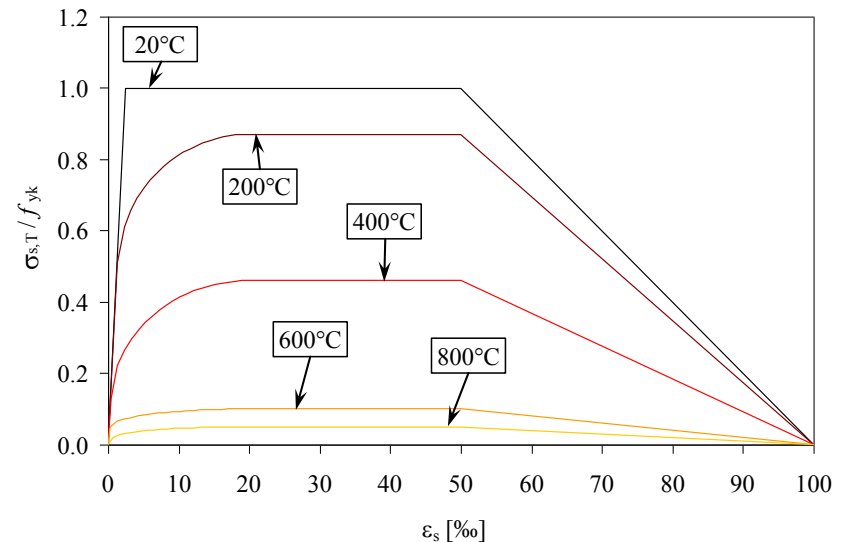
$$M_{Rd,t,fi} \geq M_{Ed,t,fi}$$

# Toplotne in mehanske lastnosti betona in jekla za armiranje pri povišanih temperaturah

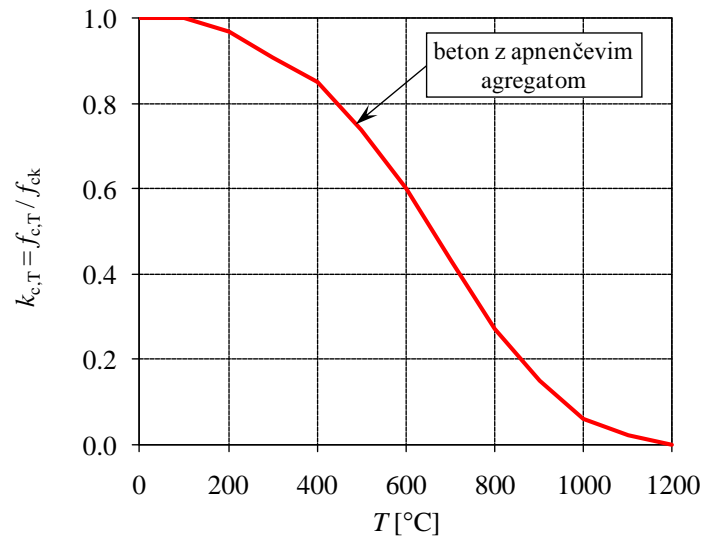


Temperaturno odvisni  
konstitucijski model betona z  
apnenčevim agregatom po  
SIST EN 1992-1-2:2005

Temperaturno odvisni  
konstitucijski model hladno  
obdelanega jekla za armiranje  
(razred N) po SIST EN 1992-1-  
2:2005



# Redukcijski faktorji trdnosti betona in armature



*Redukcijski faktor za karakteristično trdnost jekla za armiranje pri povišanih temperaturah skladno s SIST EN 1992-1-2:2005*

*Redukcijski faktor za karakteristično tlačno trdnost betona iz apnenčevega agregata pri povišanih temperaturah skladno s SIST EN 1992-1-2:2005*

