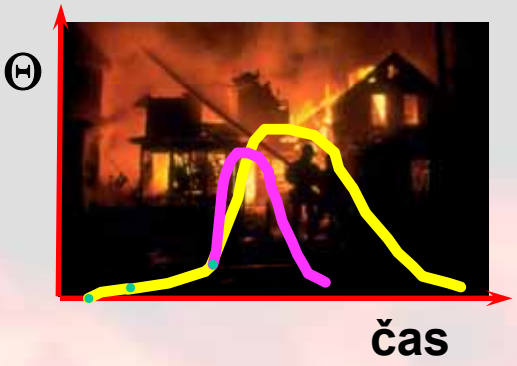
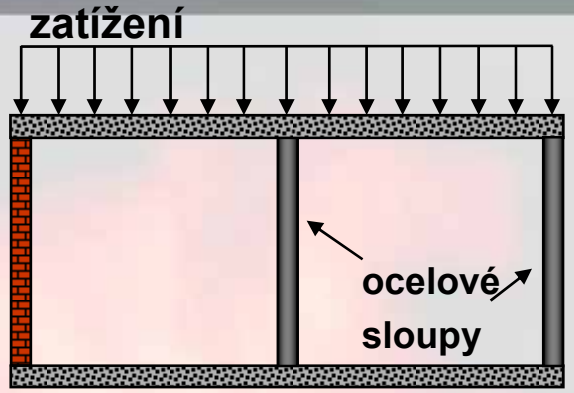
Část 3: Analýza konstrukce

Požární odolnost – řetěz událostí

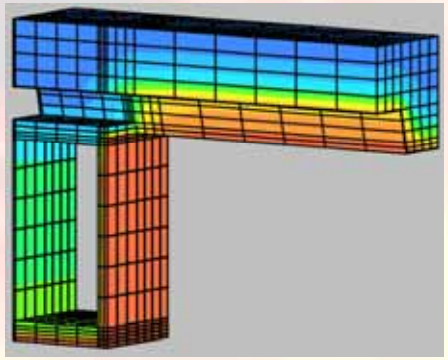
1: Vznik požáru



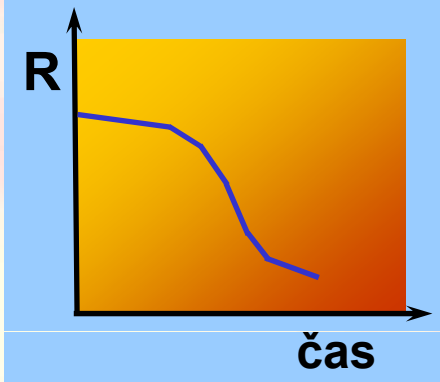
2: Tepelné zatížení



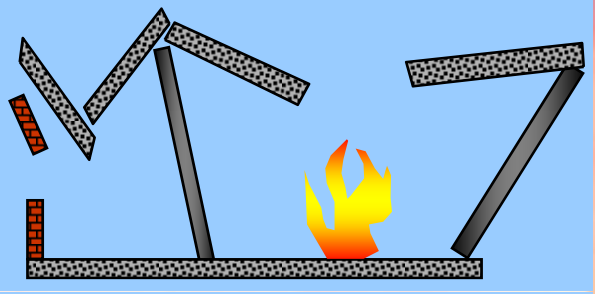
3: Mechanické zatížení



4: Teplota konstrukce



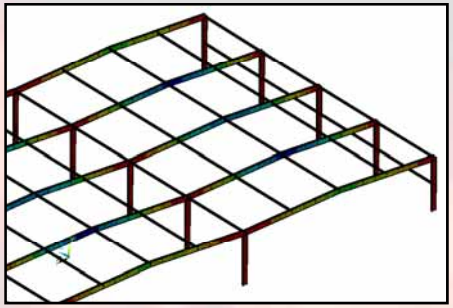
5: Analýza konstrukce



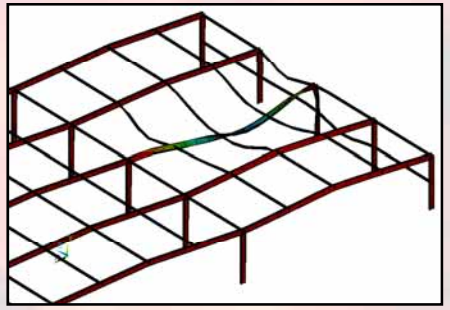
6: Možnost zřícení

Chování konstrukce při požáru

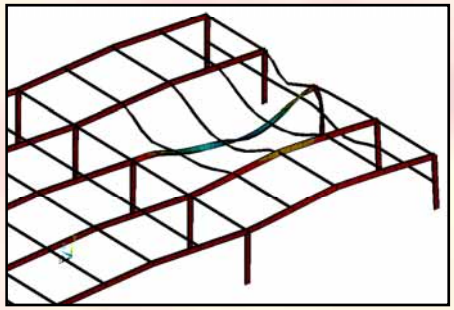
- Zvýšení teploty ➔ teplotní roztažnost + snížení tuhosti a únosnosti ➔ zvětšení deformací ⇒ možnost zřícení



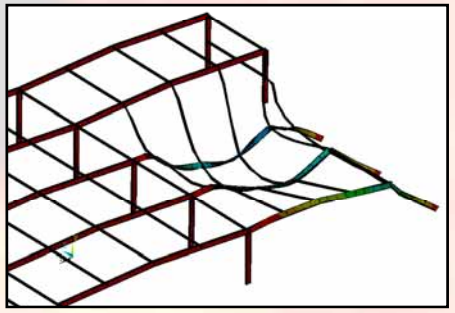
t = 0 θ = 20°C



16 min θ = 620°C



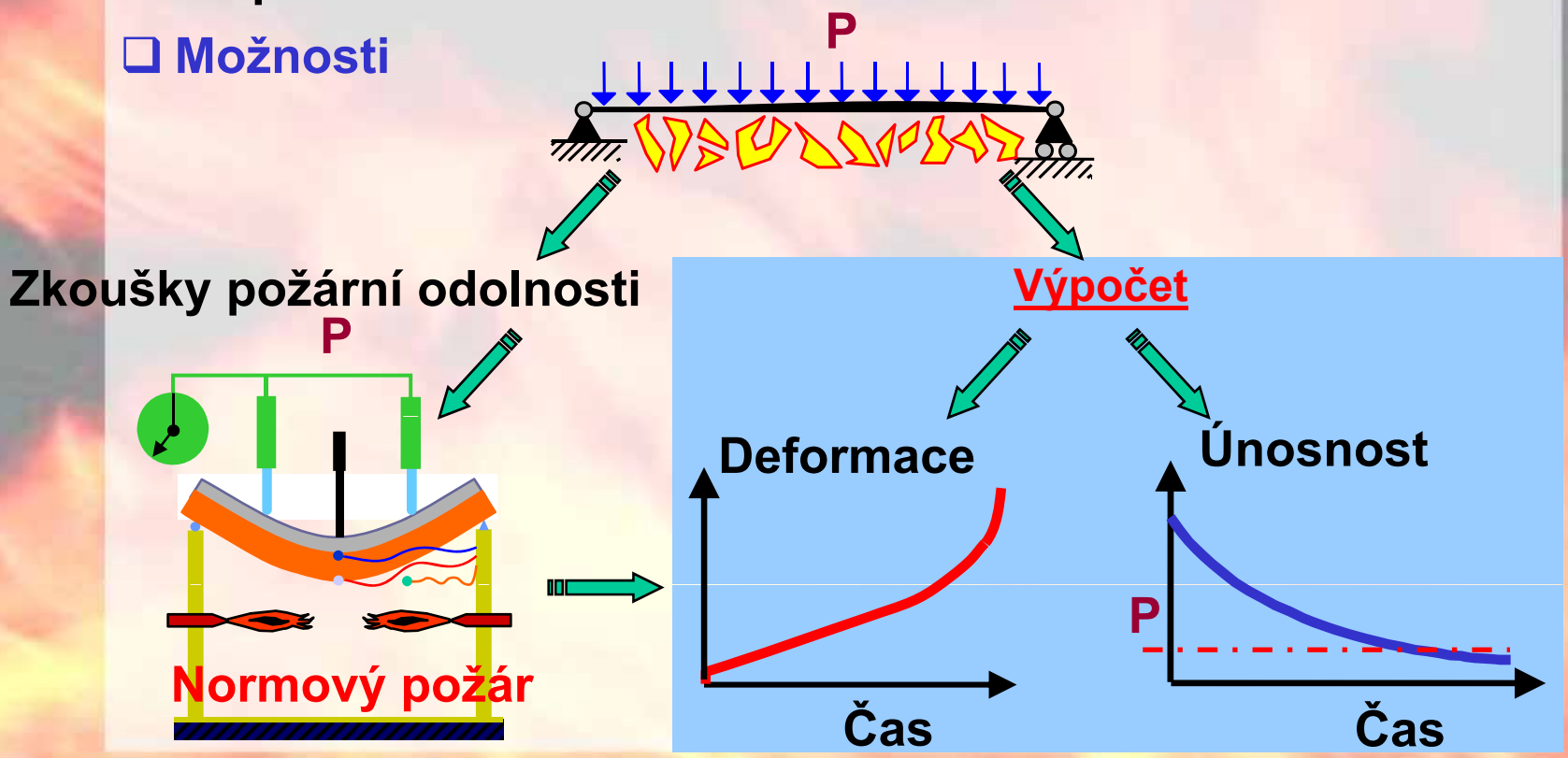
22 min θ = 720°C



31 min θ = 850°C

Předpověď chování konstrukce při požáru

- **Cíl**
  - popis **chování konstrukce** při libovolném průběhu požáru
- **Možnosti**



Hlavní kroky při analýze konstrukce při požáru

- Mechanické zatížení konstrukce při požáru
  - mimořádná kombinace zatížení
- Mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů při vysokých teplotách
  - modul pružnosti a pevnost závisí na teplotě
- Metody pro analýzu konstrukce při požáru
  - různé metody
  - oblasti použití
- Specifika pro požární odolnost ocelových a spřažených konstrukcí
  - přípoje, styčníky, apod.

Mechanické zatížení – kombinace zatížení podle Eurokódu (ČSN EN 1990 a ČSN EN1991-1-2)

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

$G_{k,j}$: characteristické hodnoty stálého zatížení

$Q_{k,1}$: characteristická hodnota dominantního nahodilého zatížení

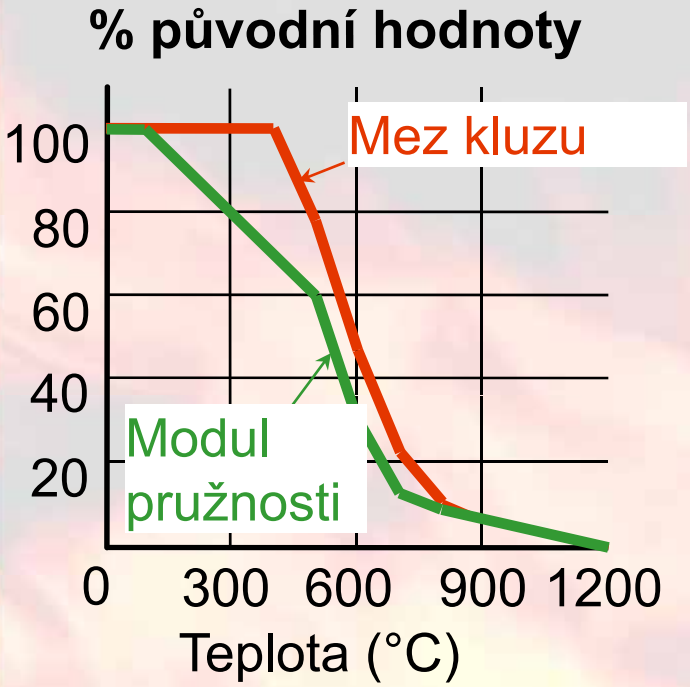
$Q_{k,i}$: characteristické hodnoty ostatních nahodilých zatížení

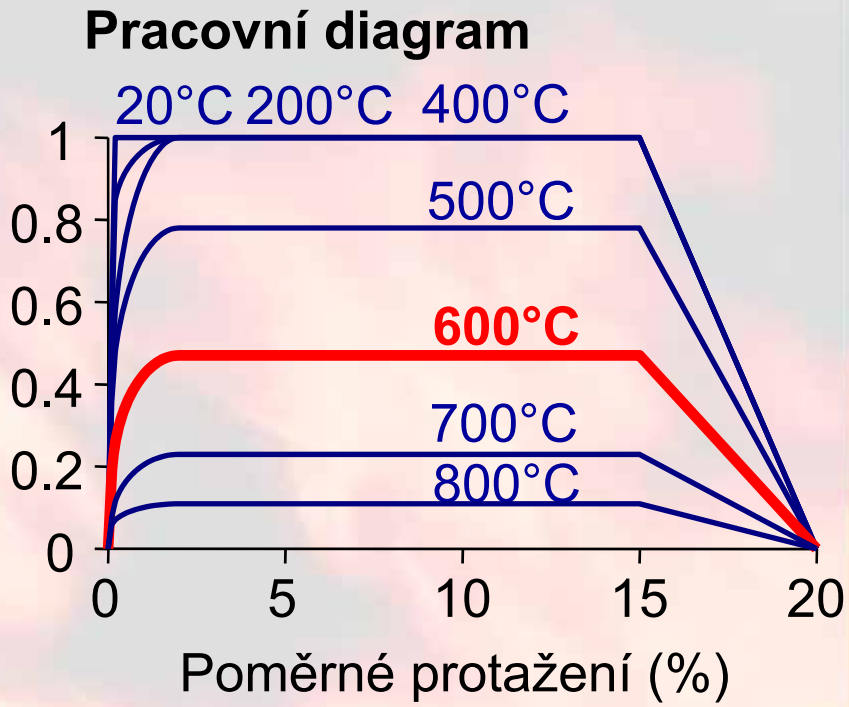
$\psi_{1,1}$: součinitel kombinace pro častou kombinaci zatížení (pro dominantní nahodilé zatížení)

$\psi_{2,i}$: součinitel kombinace pro kvazistálou kombinaci zatížení (pro ostatní nahodilá zatížení)

➔ redukční součinitel zatížení: $\eta_{fi,t}$ (viz WP1)

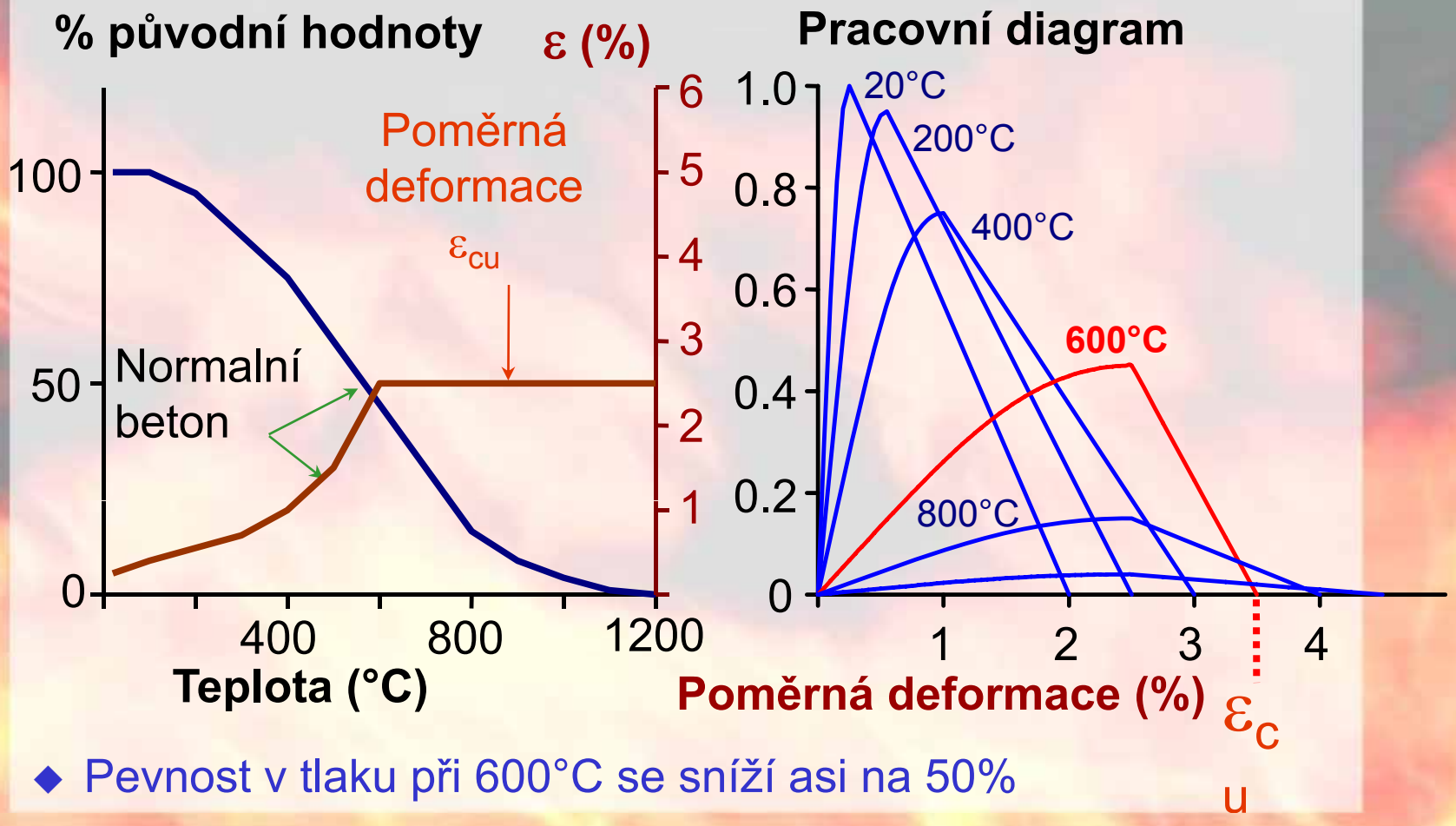
Mechanické vlastnosti oceli při vysokých teplotách (ČSN EN 1993-1-2)





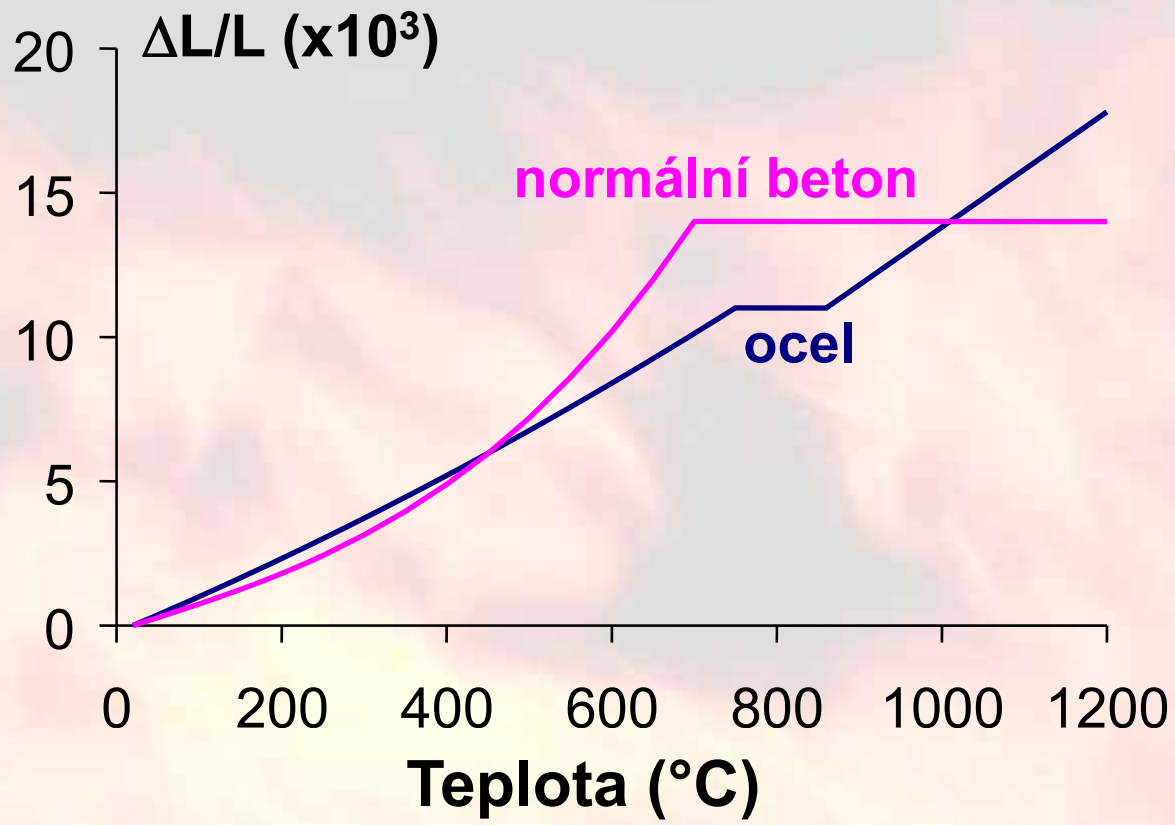
- Modul pružnosti při 600°C se sníží o více než 70%
- Mez kluzu při 600°C se sníží o více než 50%

Mechanické vlastnosti betonu při vysokých teplotách (ČSN EN 1994-1-2)



- Pevnost v tlaku při 600°C se sníží asi na 50%

Teplotní roztažnost oceli a betonu (ČSN EN 1993-1-2 a ČSN EN 1994-1-2)



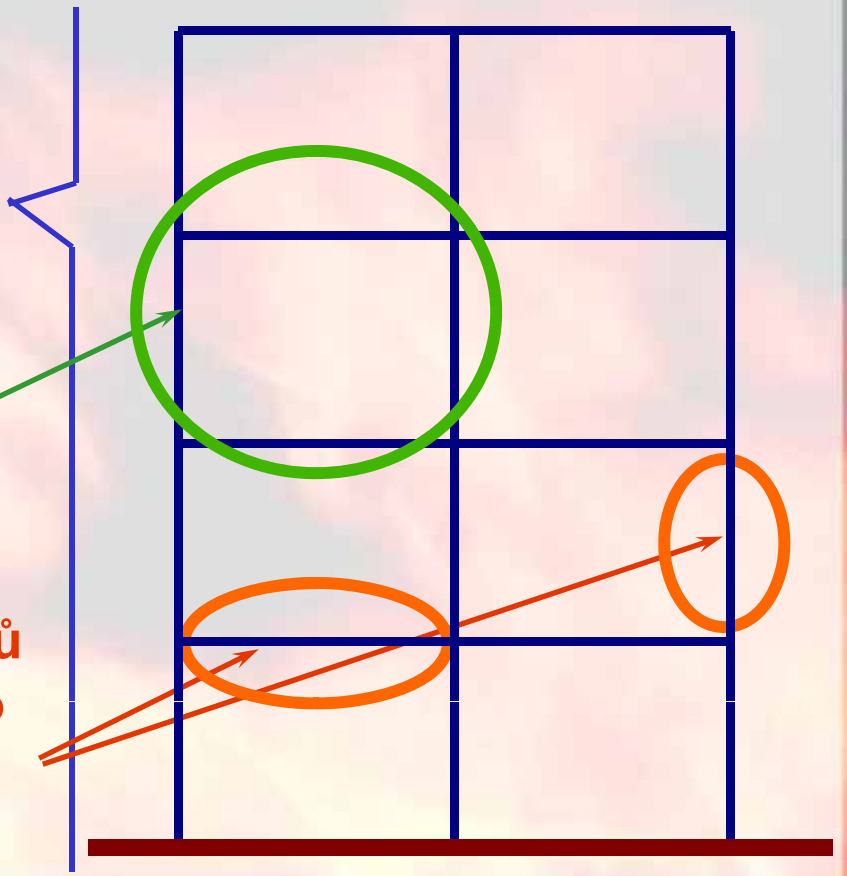
Různé přístupy k analýze konstrukce při požáru

- Tři postupy uplatněné v Eurokódech

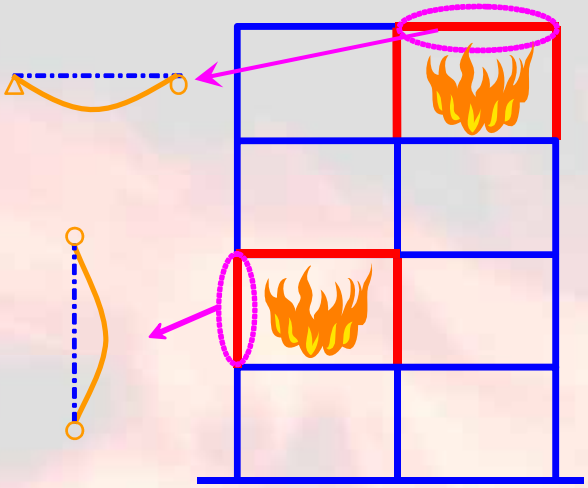
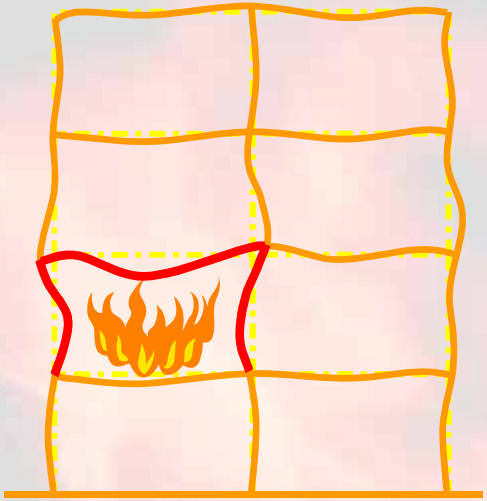
analýza konstrukce

analýza části konstrukce

analýza jednotlivých prvků (používaná především pro určení normové požární odolnosti)



Různé přístupy k analýze konstrukce při požáru

Analýza prvků	Analýza konstrukce
	
➢ analýza jednotlivých konstrukčních prvků ➢ jednoduchá ➢ zpravidla pro určení normové požární odolnosti	➢ zohledňuje spolupůsobení jednotlivých konstrukčních prvků ➢ poloha požárního úseku ➢ celistvost konstrukce

Tři úrovně návrhových modelů konstrukce při požárů

- **Tabulky**
  - ocelobetonové prvky
- **Jednoduché návrhové modely**
  - kritická teplota
  - ocelové a ocelobetonové prvky

→ ***Tradiční přístup***

- **Zdokonalené návrhové modely**
  - všechny typy konstrukcí
  - modely založené na:
    - metodě konečných prvků
    - metodě konečných diferencí

→ **Moderní metody navrhování**

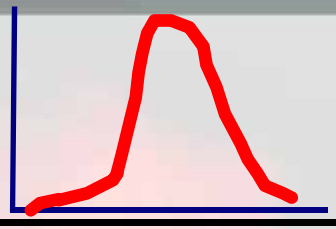
Použití jednotlivých návrhových metod pro posouzení konstrukce při požáru

❑ Teplotní analýza: nominální teplotní křivky

Analýza	Tabulky	Jednoduché návrhové modely	Zdokonalené návrhové modely
Analýza jednotlivých prvků	Ano ISO-834 normová křivka	Ano	Ano
Analýza části konstrukce	Ne	Ano (pokud lze)	Ano
Analýza konstrukce	Ne	Ne	Ano

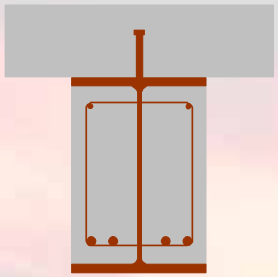
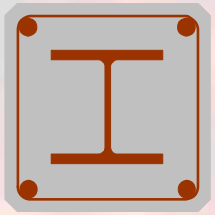
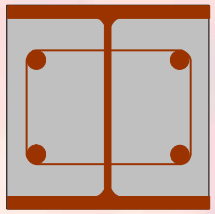
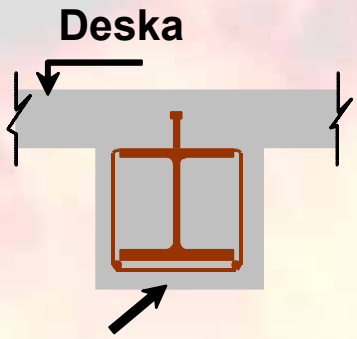
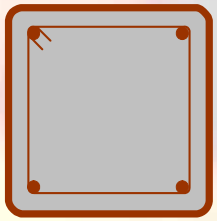
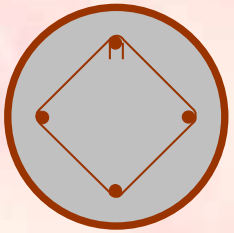
Použití jednotlivých návrhových metod pro posouzení konstrukce při požáru

- Teplotní analýza: model přirozeného požáru

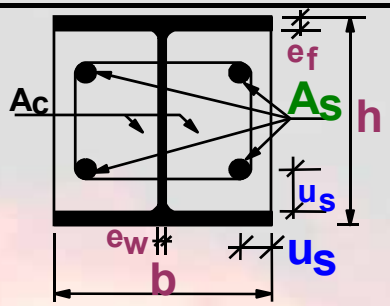


Analýza	Tabulky	Jednoduché návrhové modely	Zdokonalené návrhové modely
Analýza jednotlivých prvků	Ne	Ano (pokud lze)	Ano
Analýza části konstrukce	Ne	Ne	Ano
Analýza konstrukce	Ne	Ne	Ano

Tabulky (ocelobetonové konstrukce)

Ocelobetonové nosníky	Ocelobetonové sloupy
	 
	 

Tabulky – důležité parametry (ocelobetonové sloupy – ČSN EN 1994-1-2)



		Normová požární odolnost			
		R30	R60	R90	R120
	Minimální poměr tloušťky stěny a pásnice e_w/e_f	0,5			
1	Minimální rozměry průřezu pro součinitel zatížení	$\eta_{fi,t} \leq 0,28$			
1.1	minimální rozměry h a b [mm]	160	200	300	400
1.2	minimální osová vzdálenost výztuže u_s [mm]	-	50	50	70
1.3	minimální procento vyztužení $A_s/(A_c+A_s)$ [%]	-	4	3	4
2	Minimální rozměry průřezu pro součinitel zatížení	$\eta_{fi,t} \leq 0,47$			
2.1	minimální rozměry h a b [mm]	160	300	400	-
2.2	minimální osová vzdálenost výztuže u_s [mm]	-	50	70	-
2.3	minimální procento vyztužení $A_s/(A_c+A_s)$ [%]	-	4	4	-
3	Minimální rozměry průřezu pro součinitel zatížení	$\eta_{fi,t} \leq 0,66$			
3.1	minimální rozměry h a b [mm]	160	400	-	-
3.2	minimální osová vzdálenost výztuže u_s [mm]	40	70	-	-
3.3	minimální procento vyztužení $A_s/(A_c+A_s)$ [%]	1	4	-	-

Normová požární odolnost

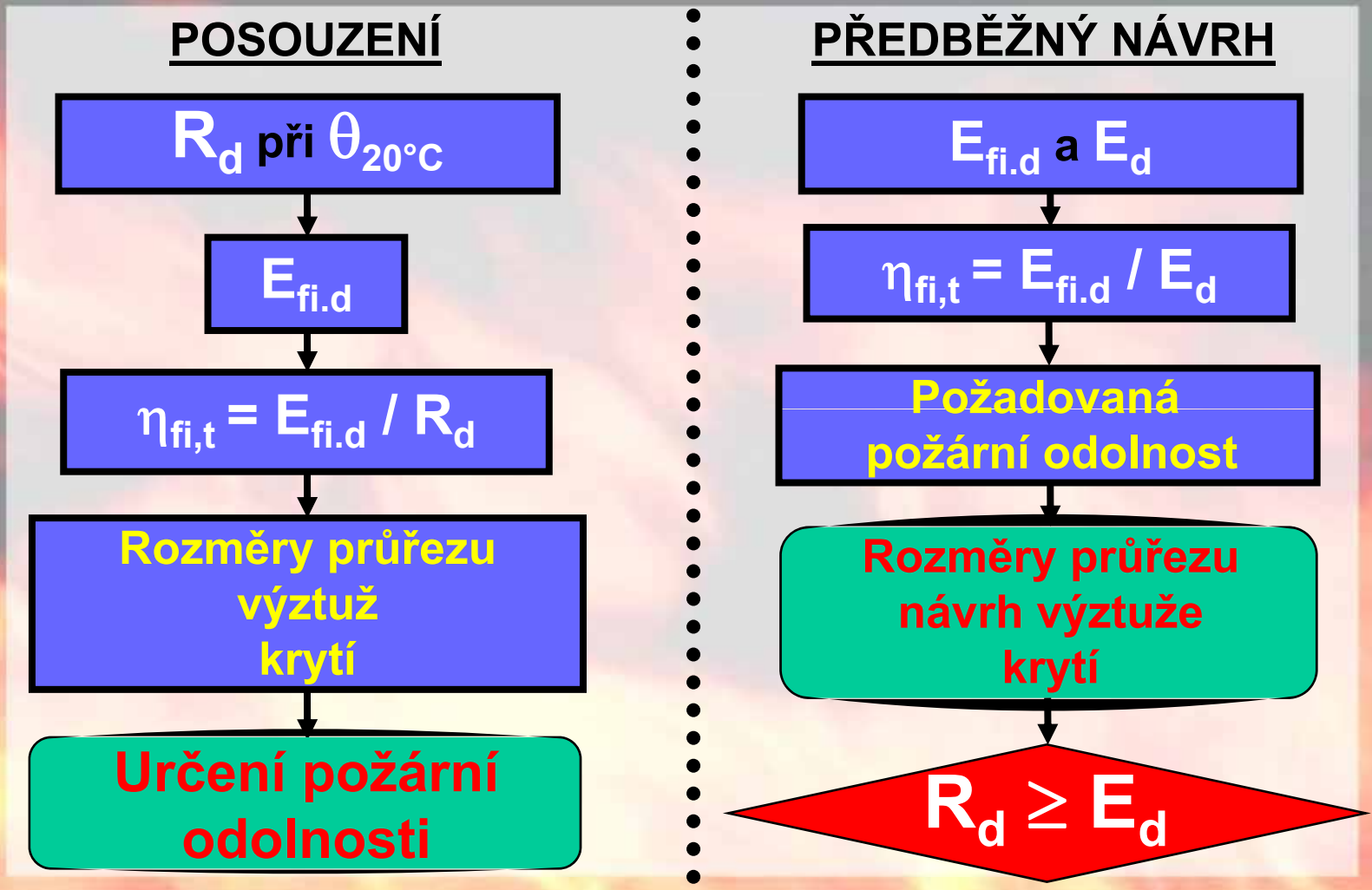
Zatížení

Rozměry průřezu

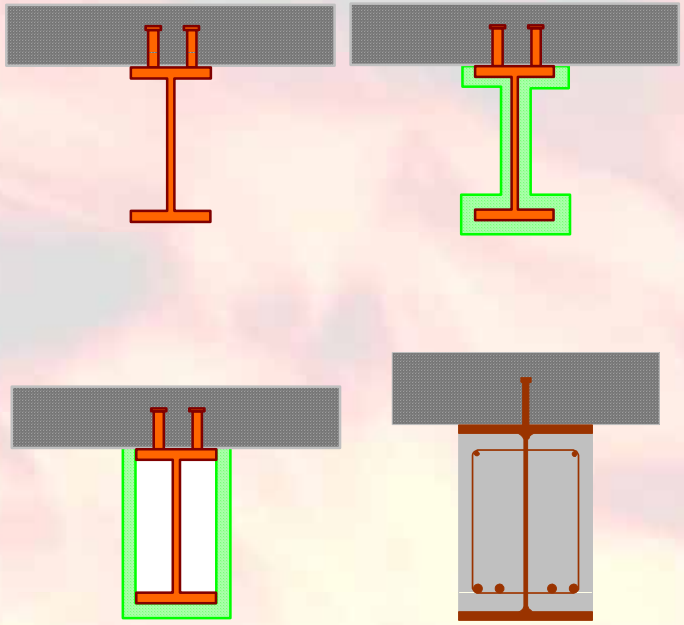
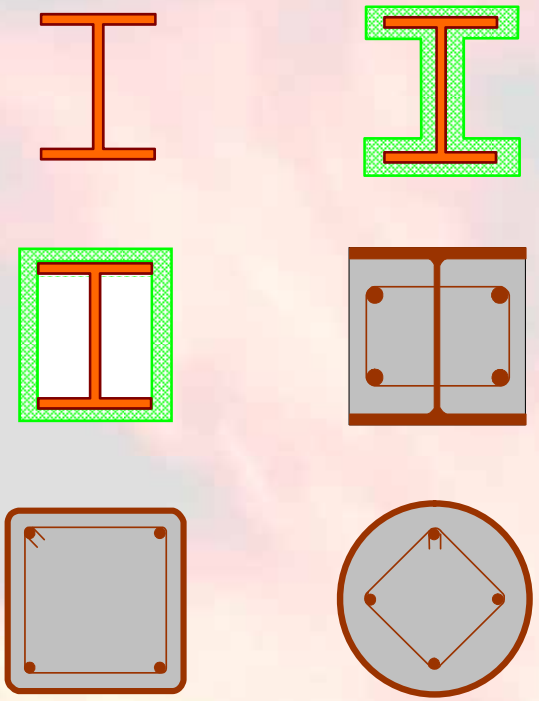
Výztuž

Krytí

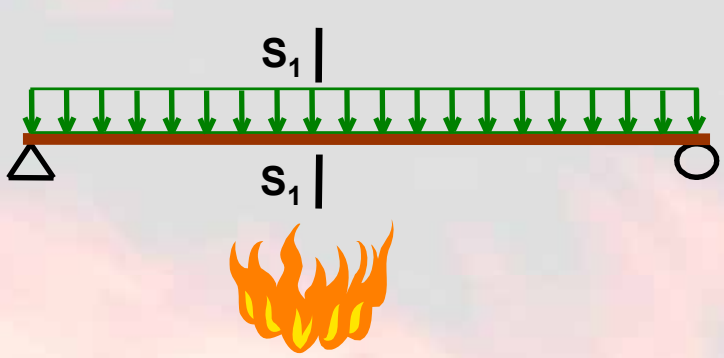
Použití tabulek při požárním návrhu (dvě odlišné situace)

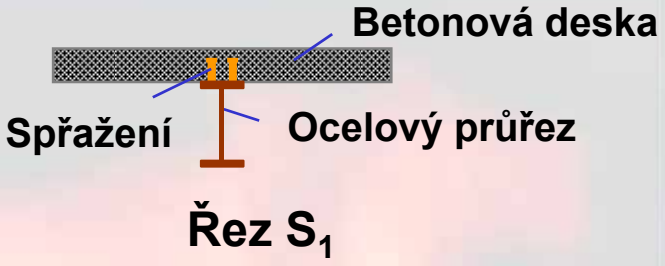


Jednoduché návrhové modely (ocelové a ocelobetonové konstrukce)

Nosníky (ocelové, ocelobetonové)	Sloupy
	

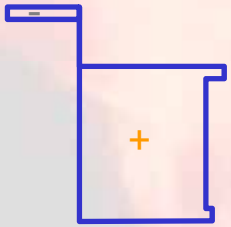
Jednoduchý návrhový model (ocelobetonový nosník) – plastický moment únosnosti



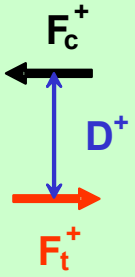


Rozměry průřezu

Teplota průřezu



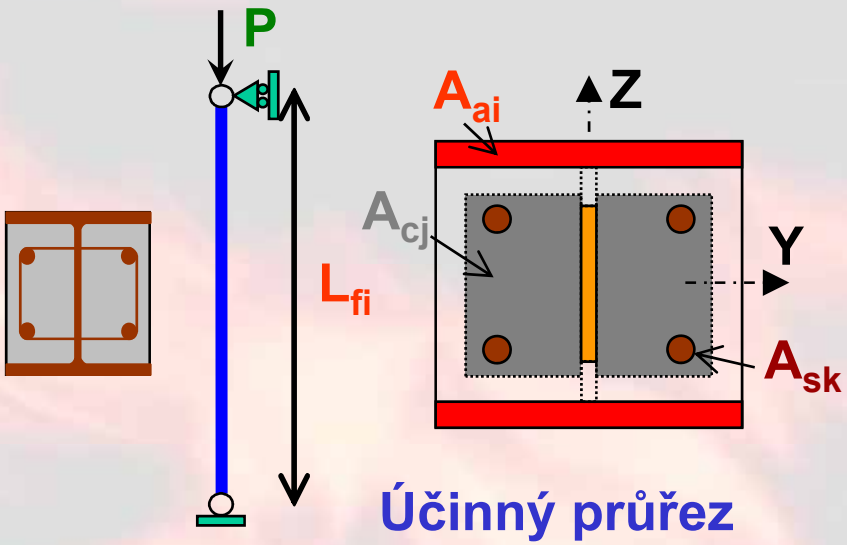
Průběh napětí



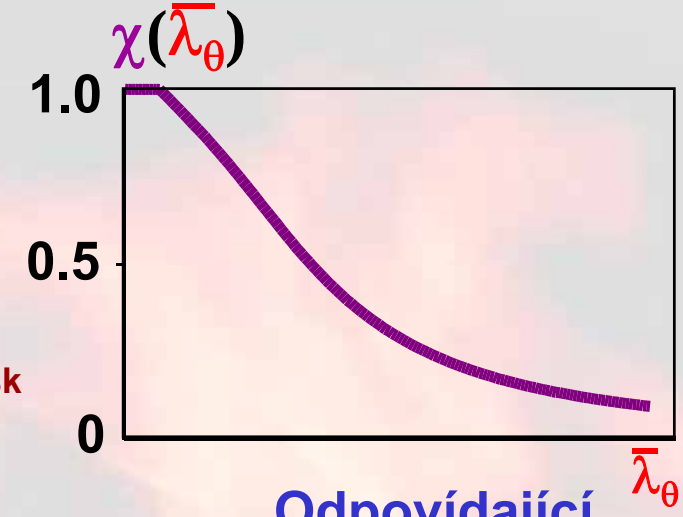
Momentová únosnost

$$M_{fi,Rd^+} = F_t^+ \times D^+$$

Jednoduchý návrhový model (ocelobetonový sloup) – únosnost ve vzpěrném tlaku



Účinný průřez

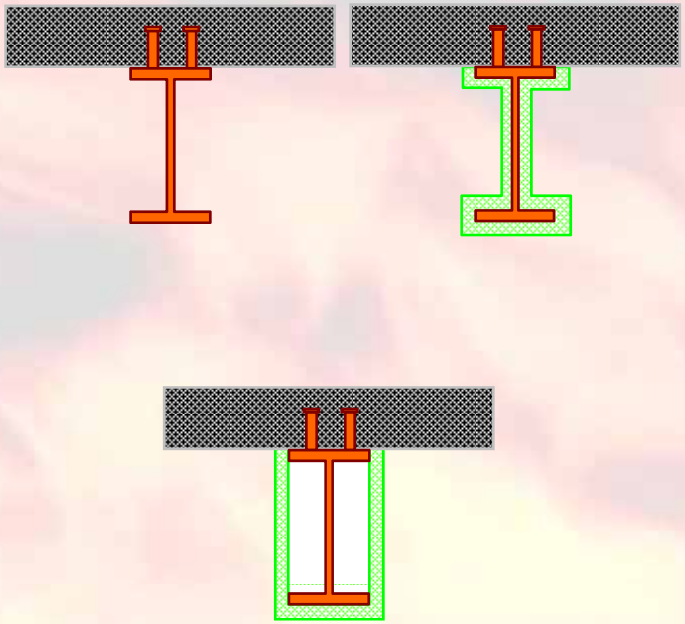
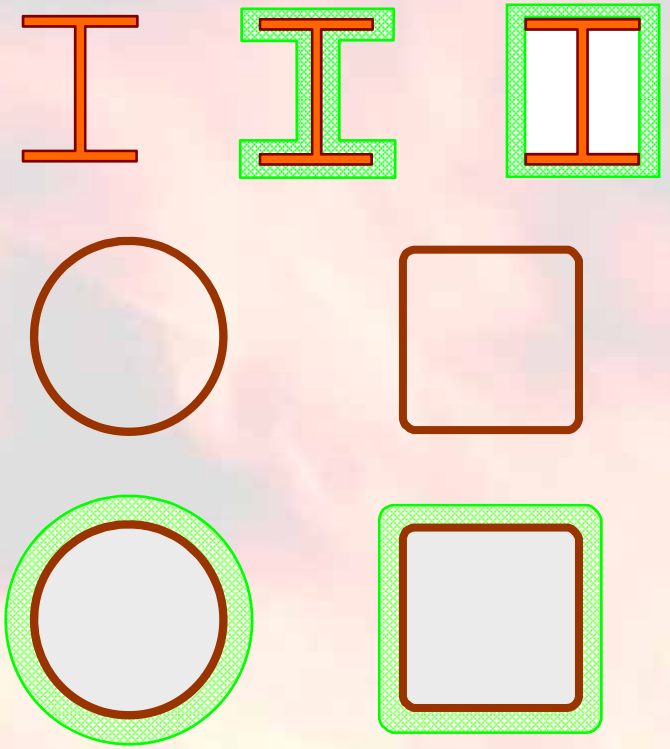


Odpovídající vzpěrnostní křivka

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

$\chi(\bar{\lambda}_\theta)$ ⇐ **únosnost** a **tuhost** účinného průřezu + vzpěrná délka sloupu L_{fi}

Kritická teplota (jen pro ocelové a některé ocelobetonové prvky)

Nosníky (ocelové, ocelobetonové)	Sloupy
	

Kritická teplota

- Podle jednoduchých návrhových modelů použitých pro prvek s rovnoměrným rozložením teploty po průřezu platí:

$$R_{fi,d,t} = k_{y,\theta} R_{fi,d,0}$$

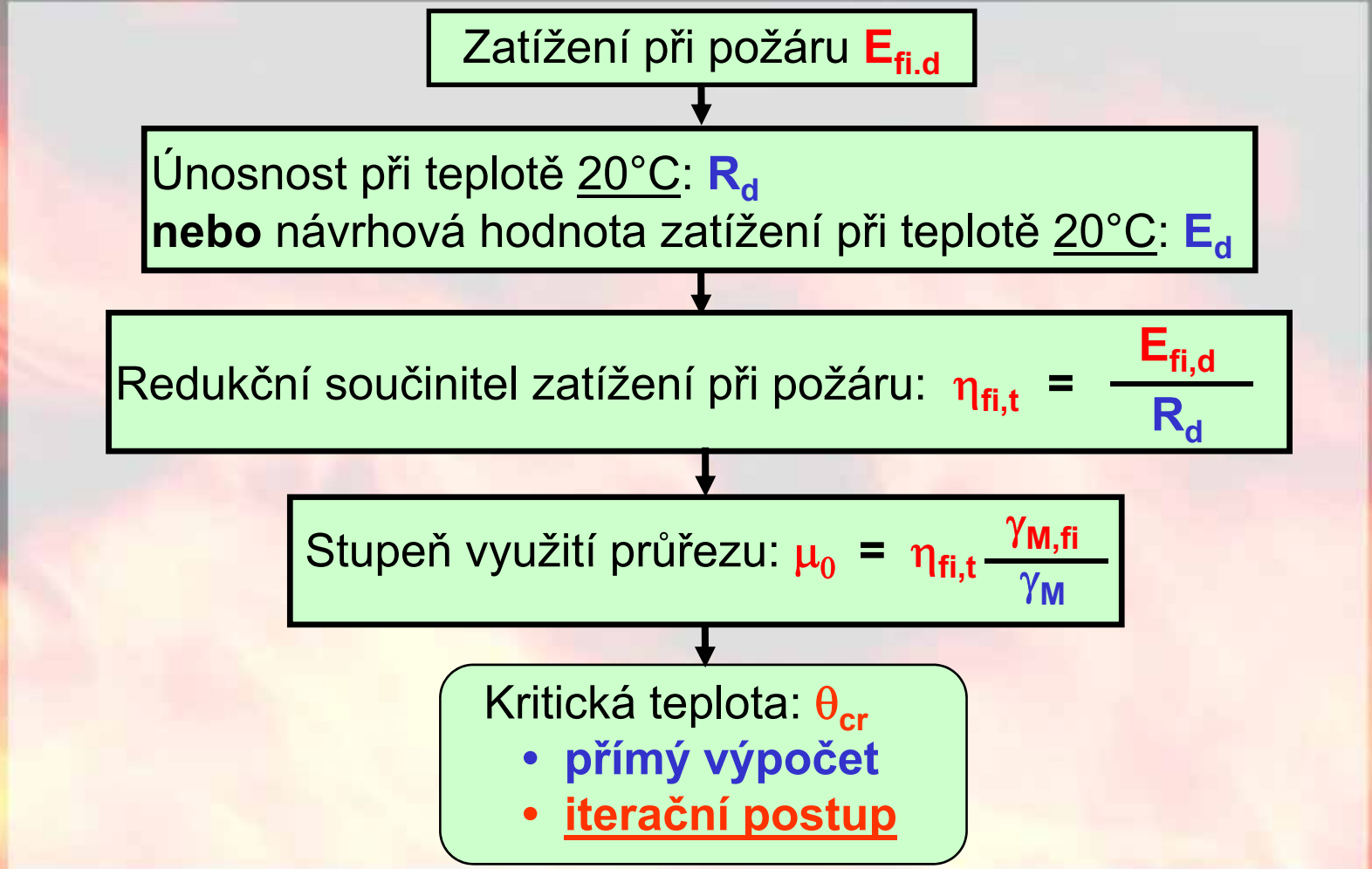
- Současně, pro únosnost platí:

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

- Když $k_{y,\theta} = \mu_0$, odpovídající teplota je tzv. kritická teplota průřezu θ_{cr}
- V normě ČSN EN 1993-1-2 je použit jednoduchý výraz pro výpočet kritické teploty průřezu θ_{cr}

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

Použití kritické teploty při požárním návrhu



Iterační postup pro určení kritické teploty (návrh ocelového sloupu)

- **Krátký sloup zatížený prostým tlakem**

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

Redukční součinitel meze kluzu $k_{y.\theta.max}$ pro teplotu $\theta_{a,max}$

- **Sloup zatížený vzpěrným tlakem**

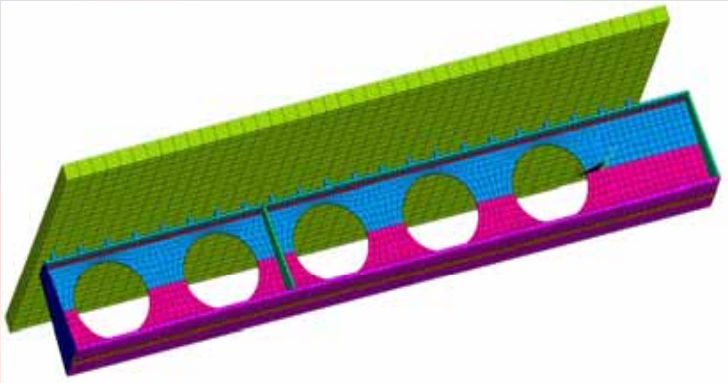
$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi(\lambda_\theta) A k_{y,\theta max} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}}$$

Vzpěrnostní součinitel $\chi(\lambda_\theta)$ závisí na:

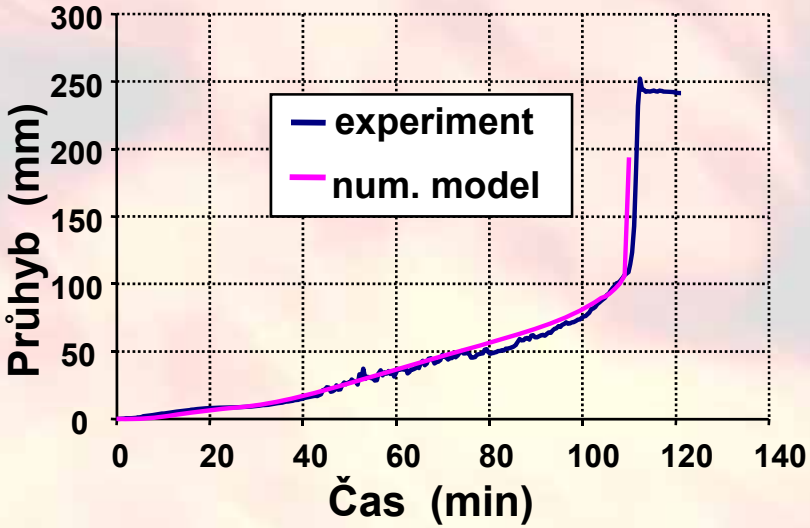
- únosnosti
- **tuhosti (modulu pružnosti)**

- **V případě stabilitních jevů je pro určení kritické teploty $\theta_{a,max}$ třeba použít jednoduchý iterační postup**

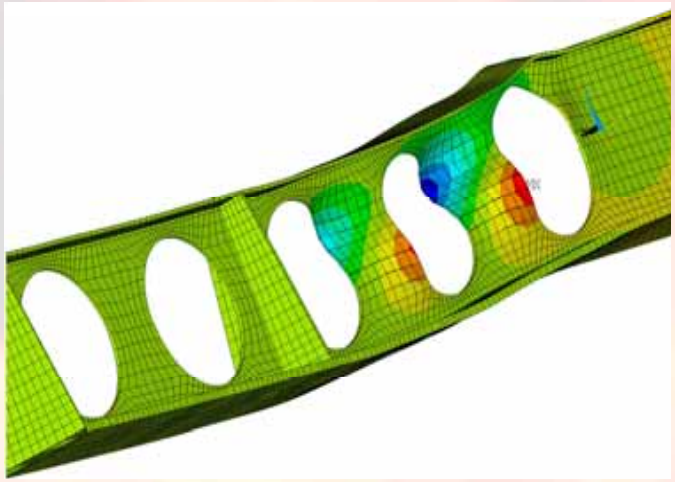
Zdokonalené návrhové modely (prolamovaný ocelobetonový nosník)



Porušení při experimentu



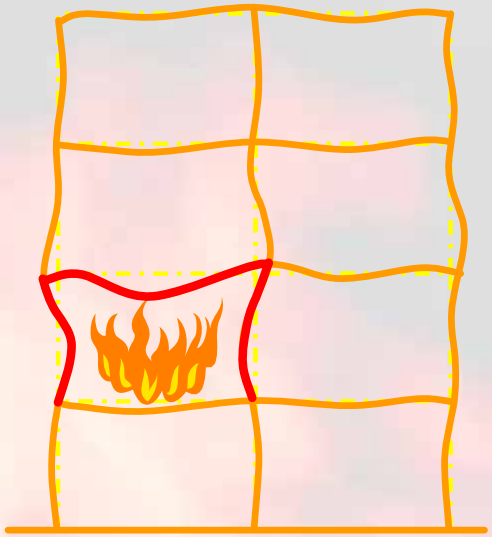
Porovnání experimentu a numerického modelu



Numerický model

Analýza konstrukce při požáru

- **Obecná pravidla**
  - nutnost použití pokročilého návrhového modelu
  - výběr vhodného modelu
  - okrajové podmínky
  - zatížení
  - vhodné materiálové modely
  - okrajové podmínky vzhledem k částem konstrukce, které nejsou modelovány
  - zhodnocení výsledků, posouzení únosnosti
  - zohlednění vlivů, které nebyly zahrnuty do modelu (shoda modelu a konstrukčního řešení – přípoje, atd.)



Zdokonalený model při požárním návrhu

- Pravidla pro použití zdokonaleného návrhového modelu
  - požadavky na model materiálu
    - úplný pracovní diagram
    - kinematický model
    - vlastnosti při chladnutí
  - přírůstkové řešení, iterační postup
  - kontrola způsobů porušení nezohledněných v numerickém modelu
    - porušení v důsledku nadměrné deformace ocelových prvků
    - trhliny v betonu

Požadavky na model materiálu

složky poměrných přetvoření

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

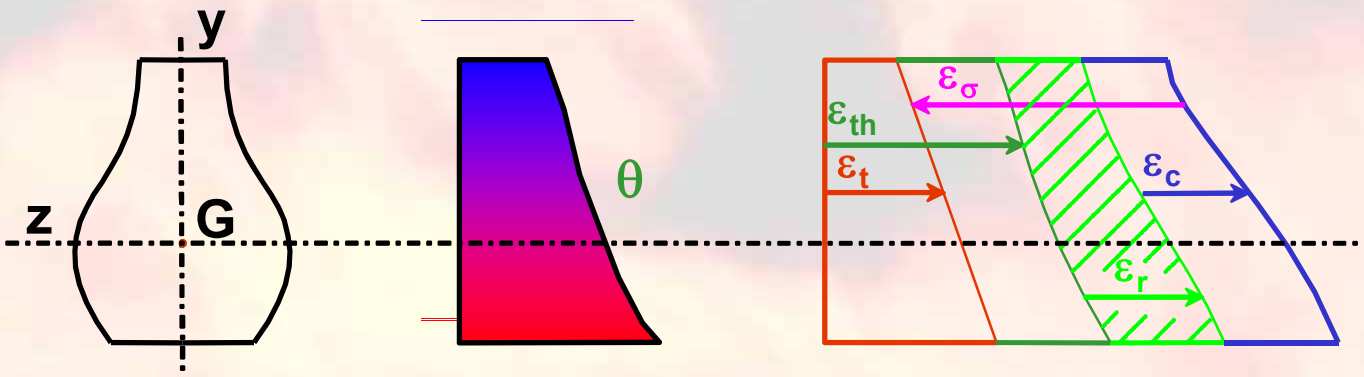
ε_t: celkové poměrné přetvoření

ε_t: poměrné přetvoření od teploty

ε_σ: poměrné přetvoření od zatížení

ε_r: poměrné přetvoření od reziduálních napětí (pokud existují)

ε_c: poměrné přetvoření od dotvarování



průřez

průběh teploty (konstantní ve směru osy z)

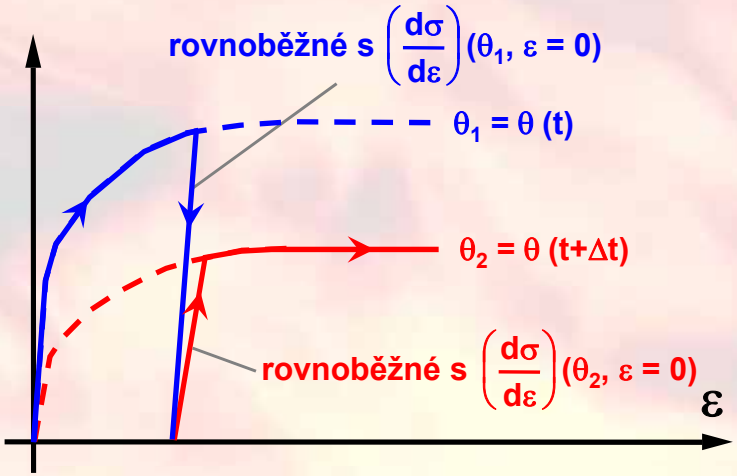
poměrné přetvoření

Požadavky na model materiálu

kinematický model materiálu

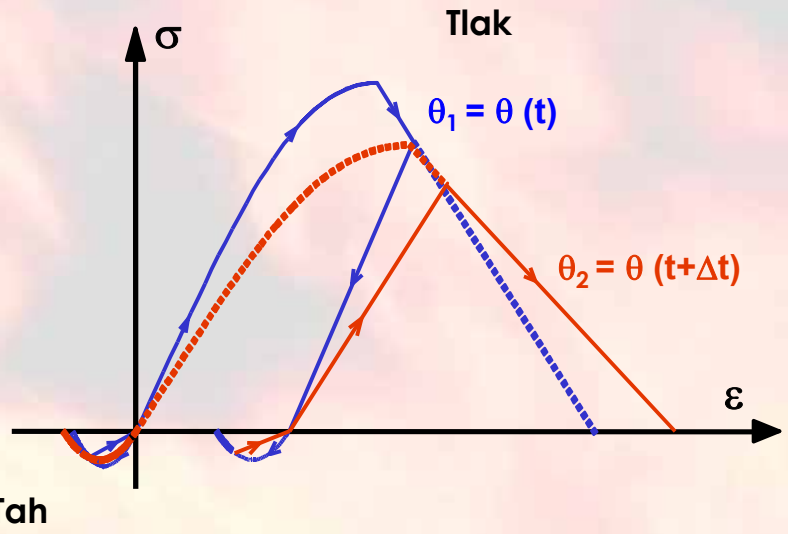
Ocel

(izotropní materiál)



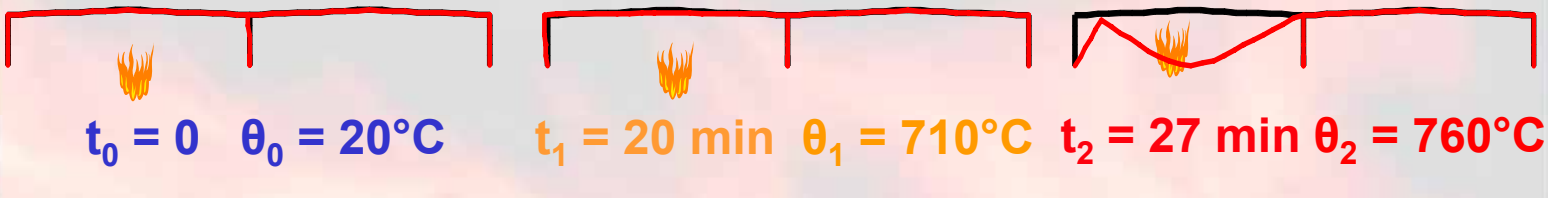
Beton

(anizotropní materiál)

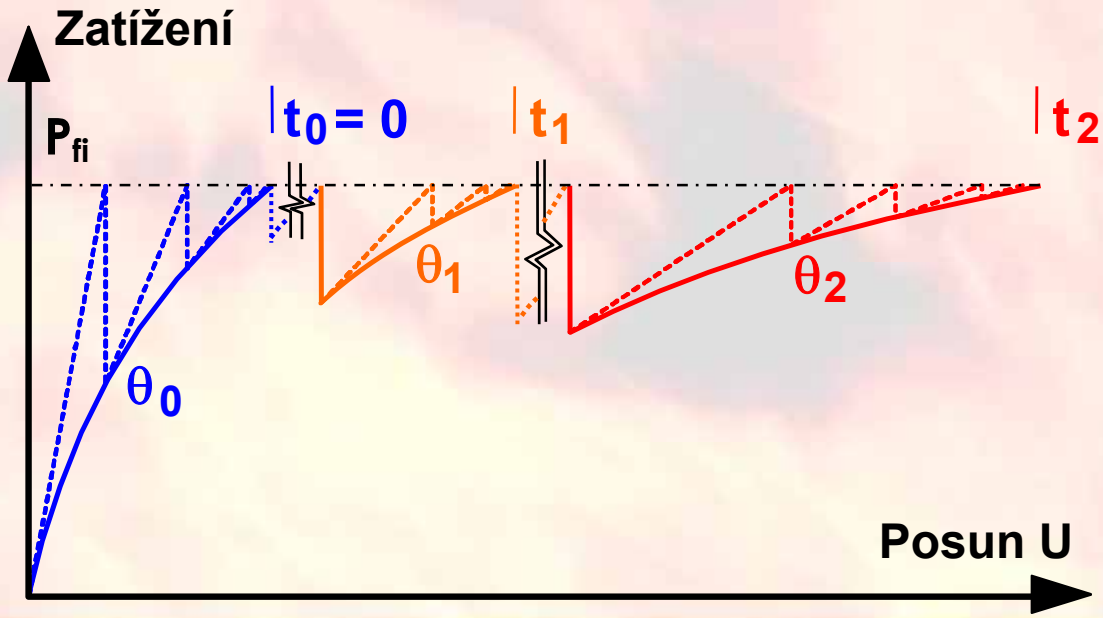


Přírůstkové řešení, iterace

- Při výpočtu je třeba zohlednit závislost únosnosti i tuhosti konstrukce na teplotě

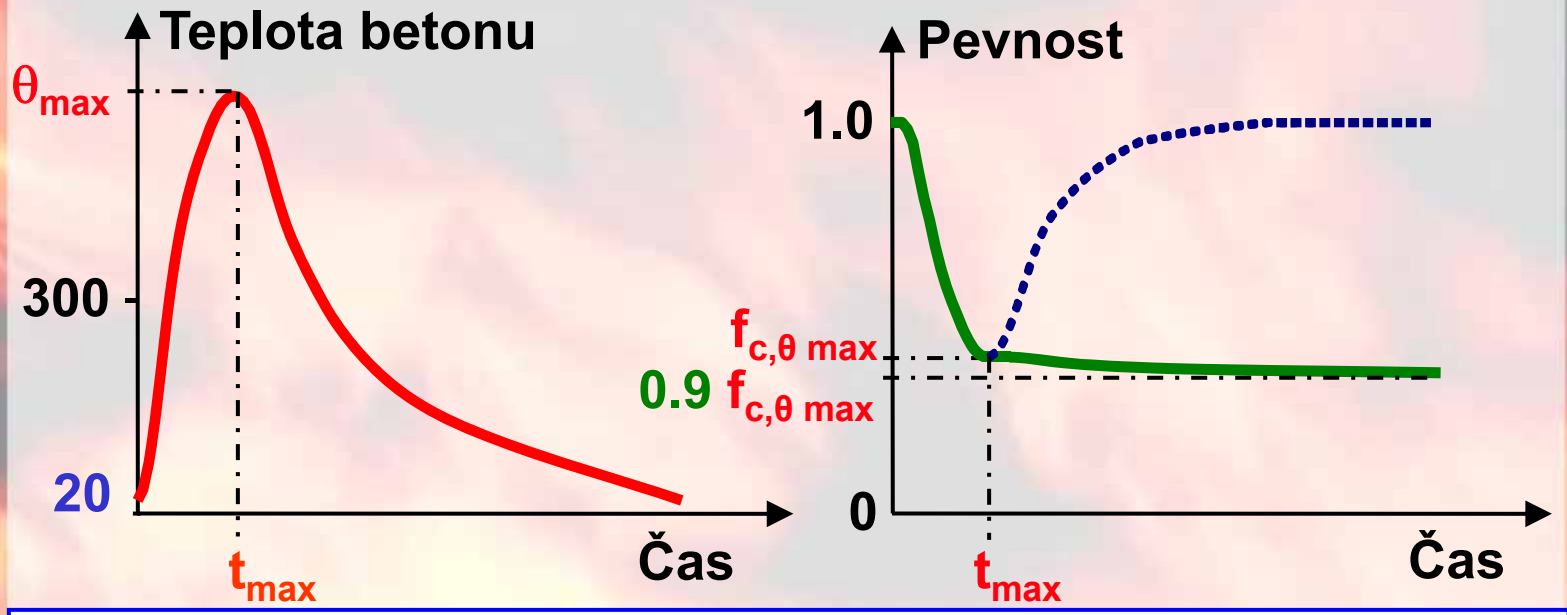


$t_0 = 0$ $\theta_0 = 20°C$ $t_1 = 20$ min $\theta_1 = 710°C$ $t_2 = 27$ min $\theta_2 = 760°C$



Vlastnosti materiálu při chladnutí

- Ocel získává při chladnutí původní vlastnosti
- Beton při chladnutí

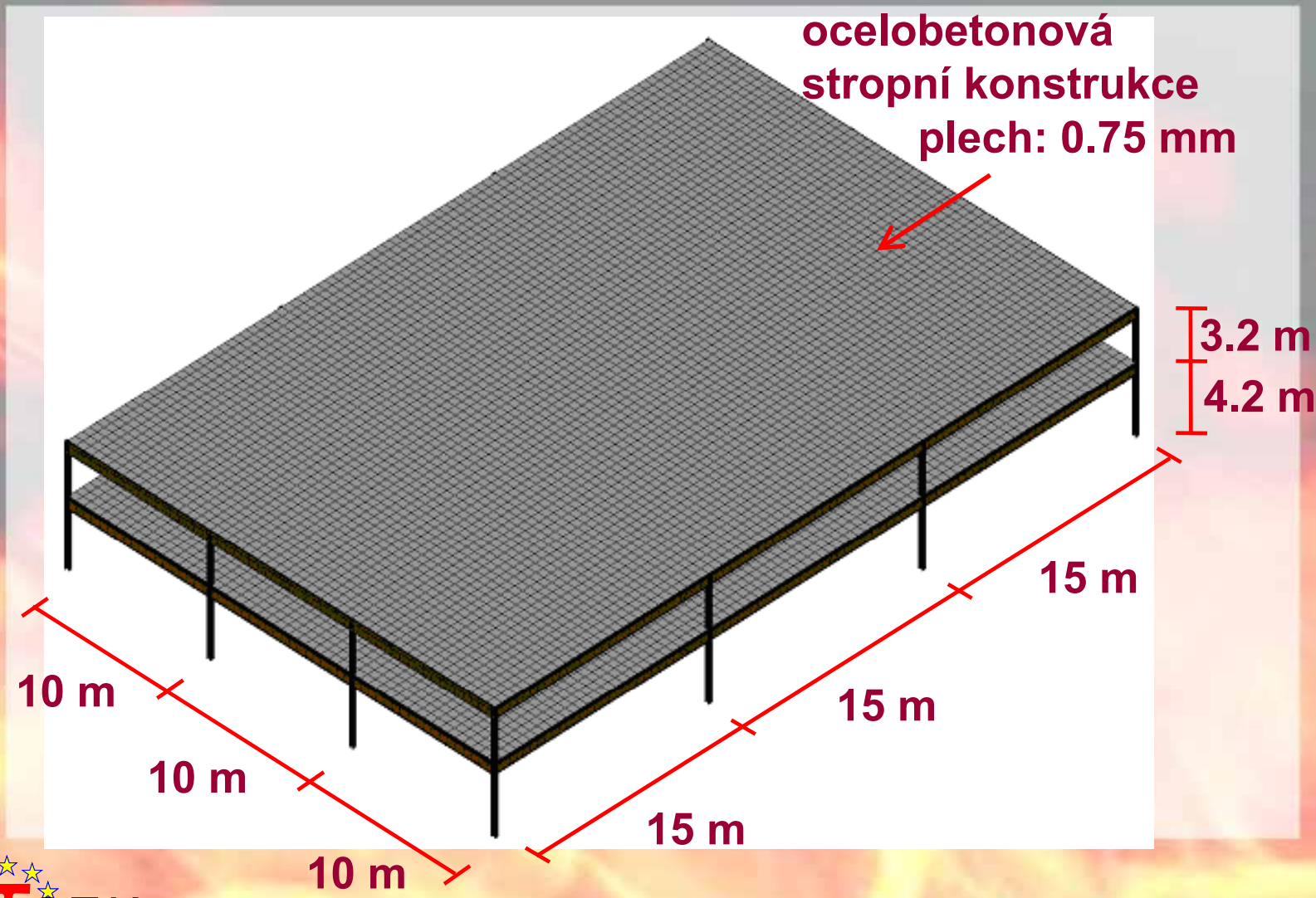


Například při teplotě $\theta_{max} \geq 300$ °C

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

Pro určení $f_{c,\theta}$ mezi θ_{max} a 20°C se použije lineární interpolace

Analýza ocelobetonové konstrukce při lokalizovaném požáru

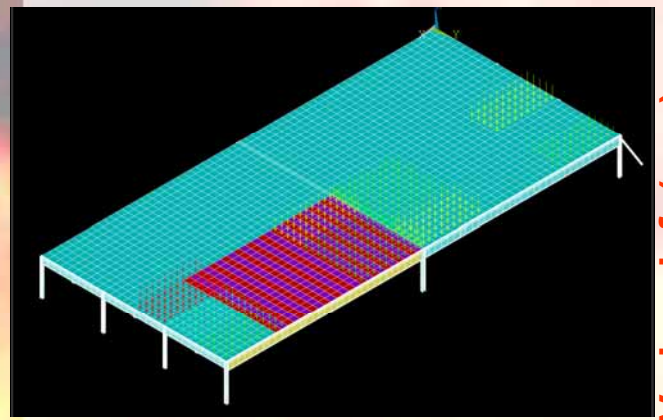


Výběr modelu

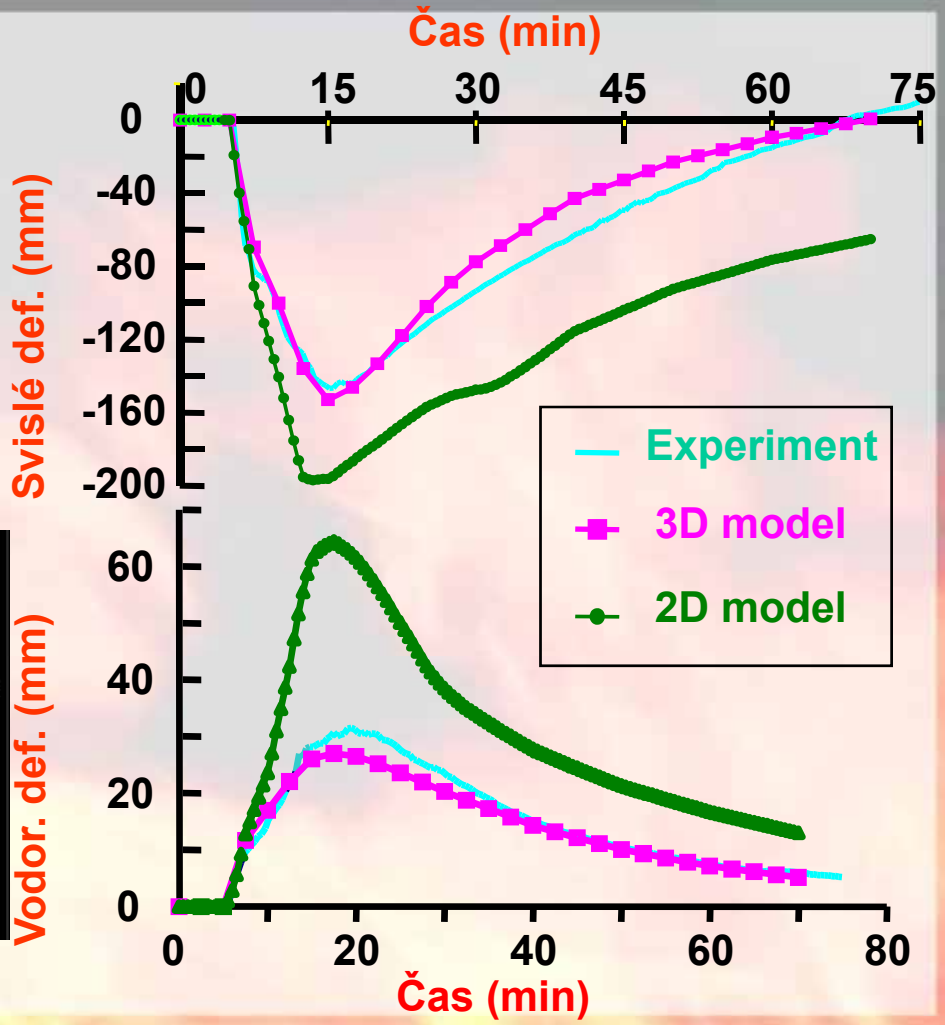
- Lze použít dva způsoby modelování
  - 2D ocelobetonový rám (prutové prvky)
    - membránové působení je omezeno pouze na jeden směr
    - přerozdělování zatížení mezi sousedními nosníky není možné
  - 3D ocelobetonová konstrukce (různé typy prvků)
    - membránové působení v celé stropní konstrukci
    - přerozdělování zatížení je možné při použití skořepinových prvků
- 3D model ocelobetonové konstrukce lépe odpovídá skutečnému chování

Porovnání modelů s experimentem

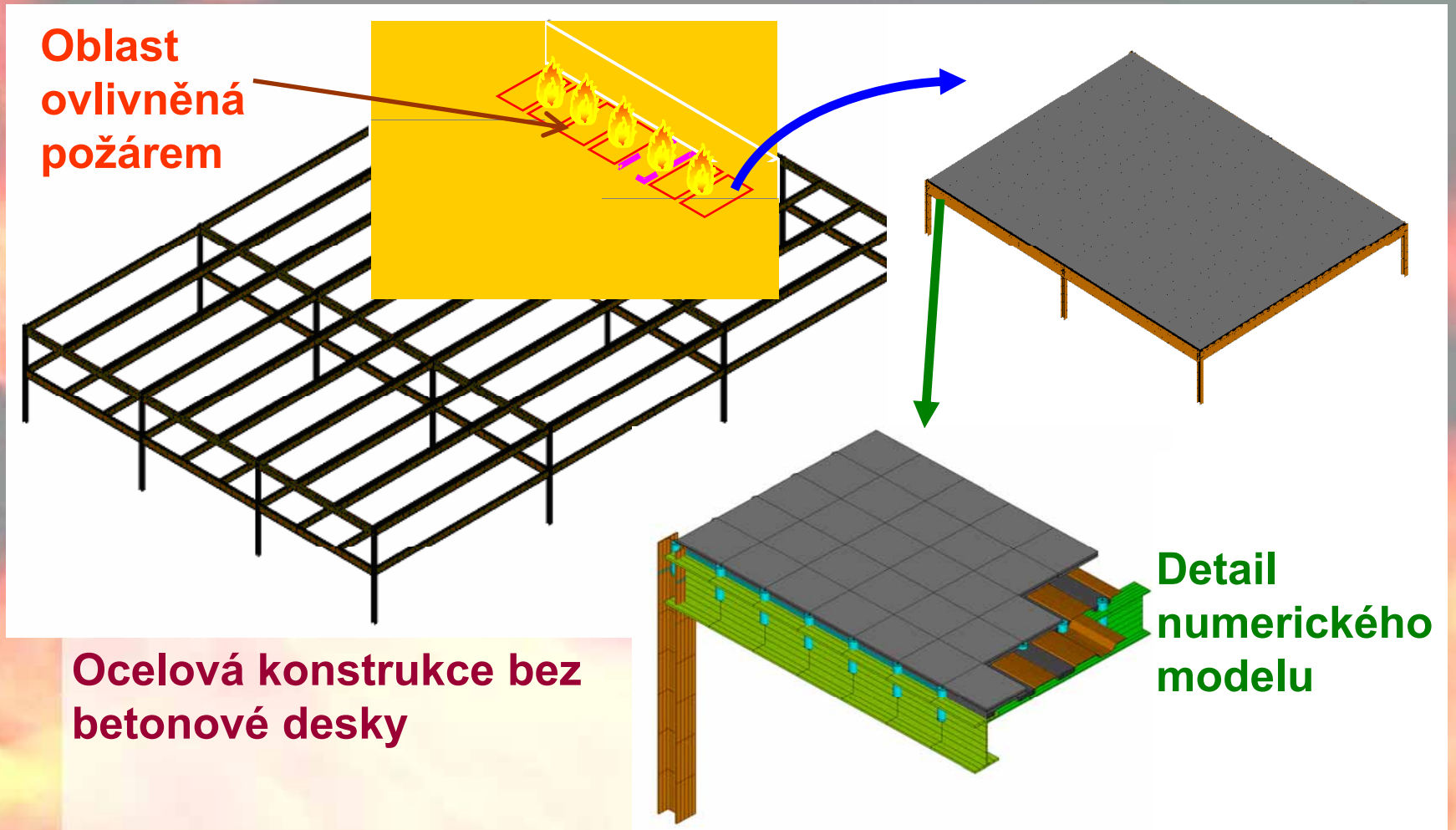
Experiment



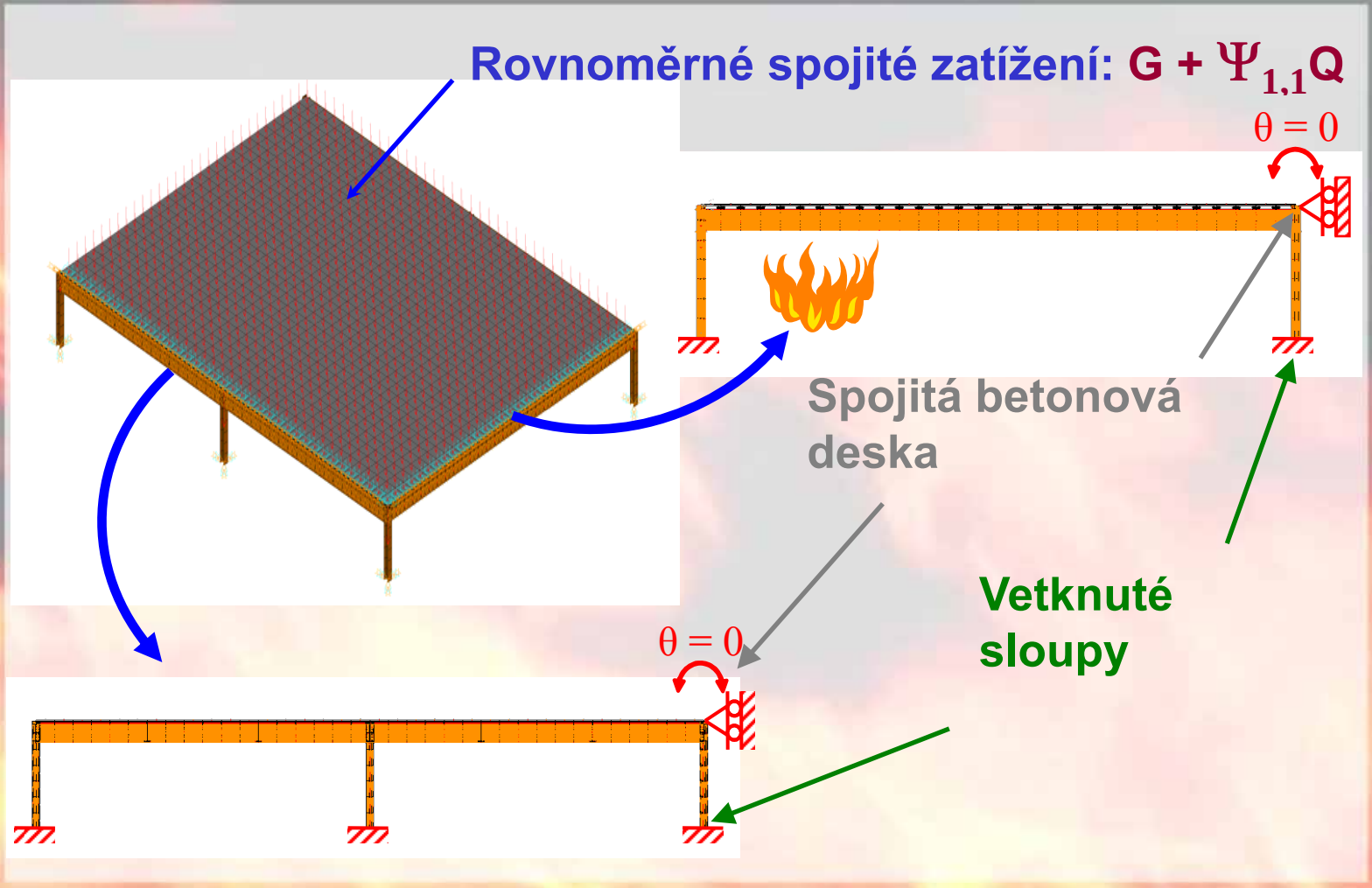
3D model



3D model ocelobetonové konstrukce

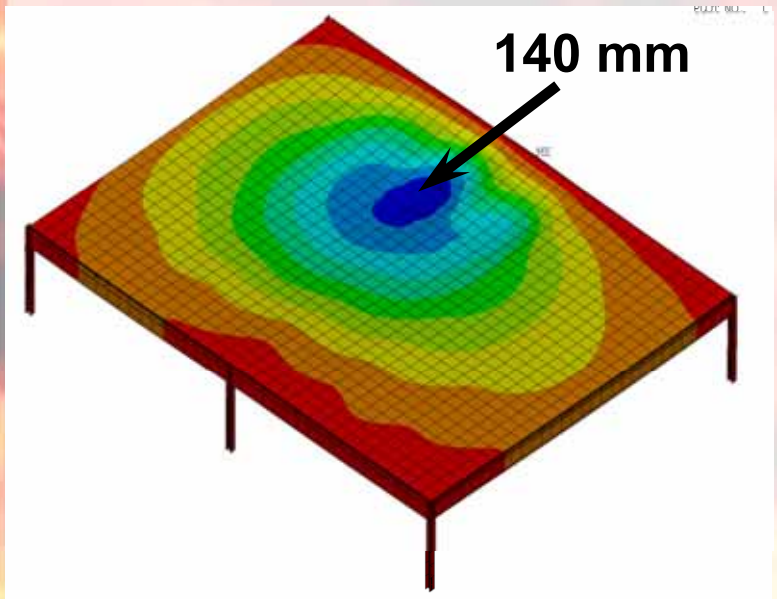


Mechanické zatížení a okrajové podmínky

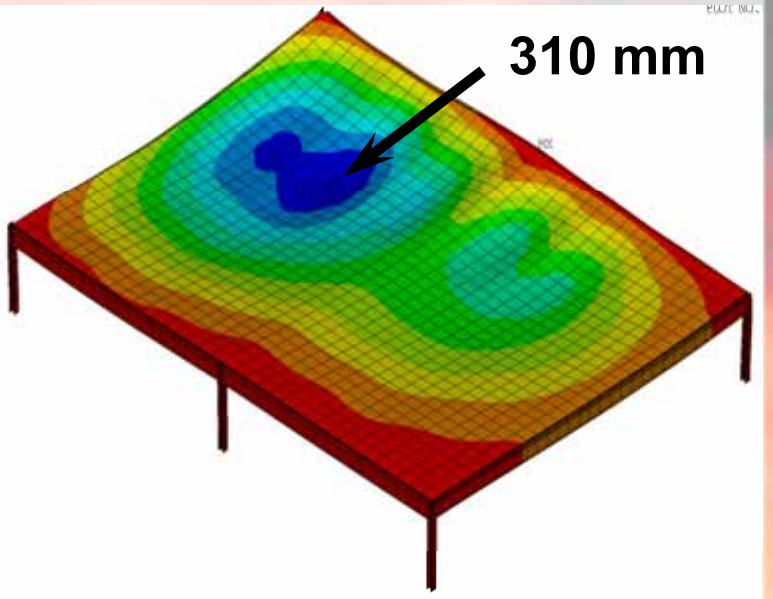


Chování konstrukce při požáru

➢ **Průhyb stropní konstrukce**



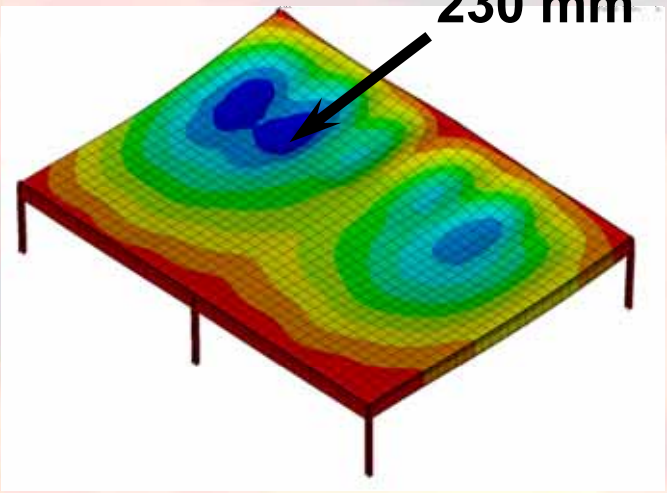
20 min



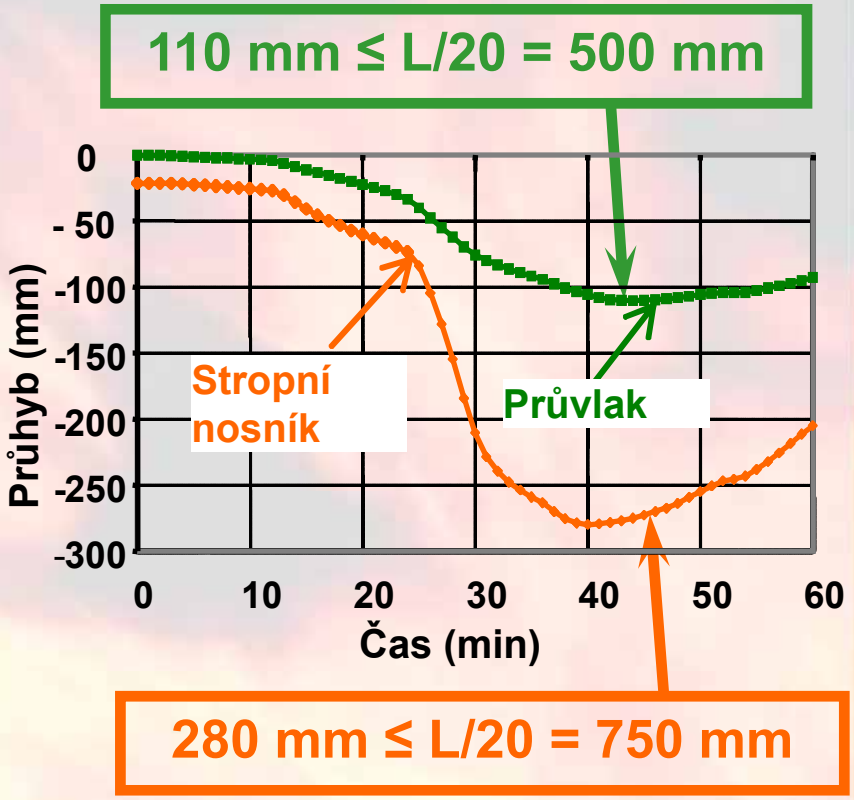
40 min

Chování konstrukce při požáru

- Kontrola maximálních povolených průhybů

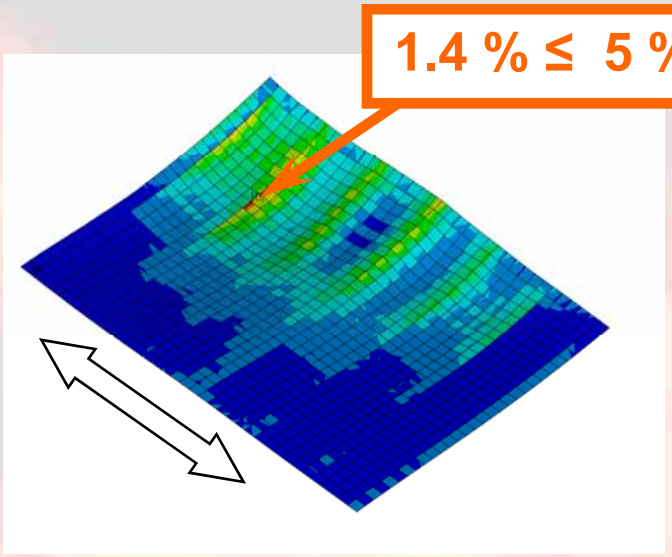


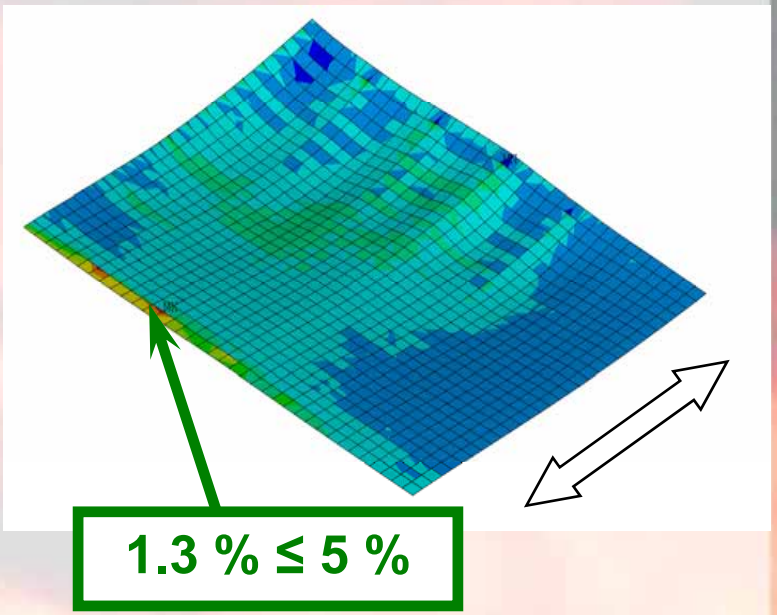
60 min



Chování konstrukce při požáru

➢Kontrola maximálního protažení výztuže



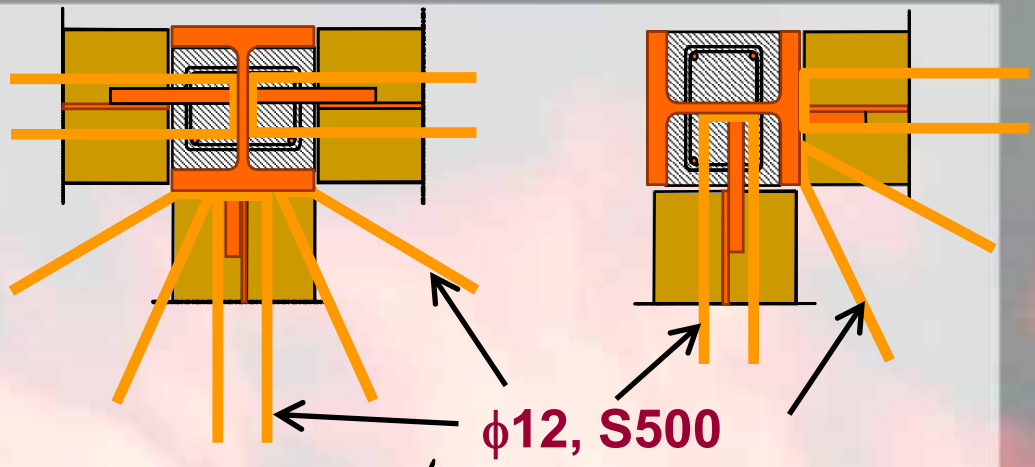


Poměrné protažení výztuže rovnoběžné s rozpětím desky

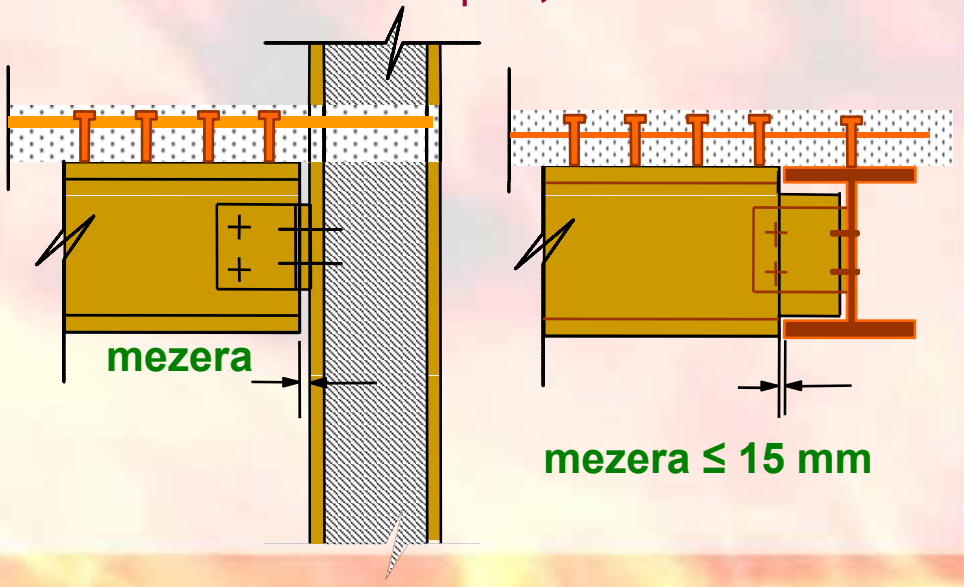
Poměrné protažení výztuže kolmé k rozpětí desky

Konstrukční řešení musí odpovídat návrhovému modelu

Připojení výztuže desky ke krajním sloupům



Maximální mezera mezi nosníkem a sloupem a mezi spodními pásnicemi nosníků je 15 mm



Skutečná konstrukce s nechráněnými nosníky , návrh pomocí pokročilého modelu

Při montáži

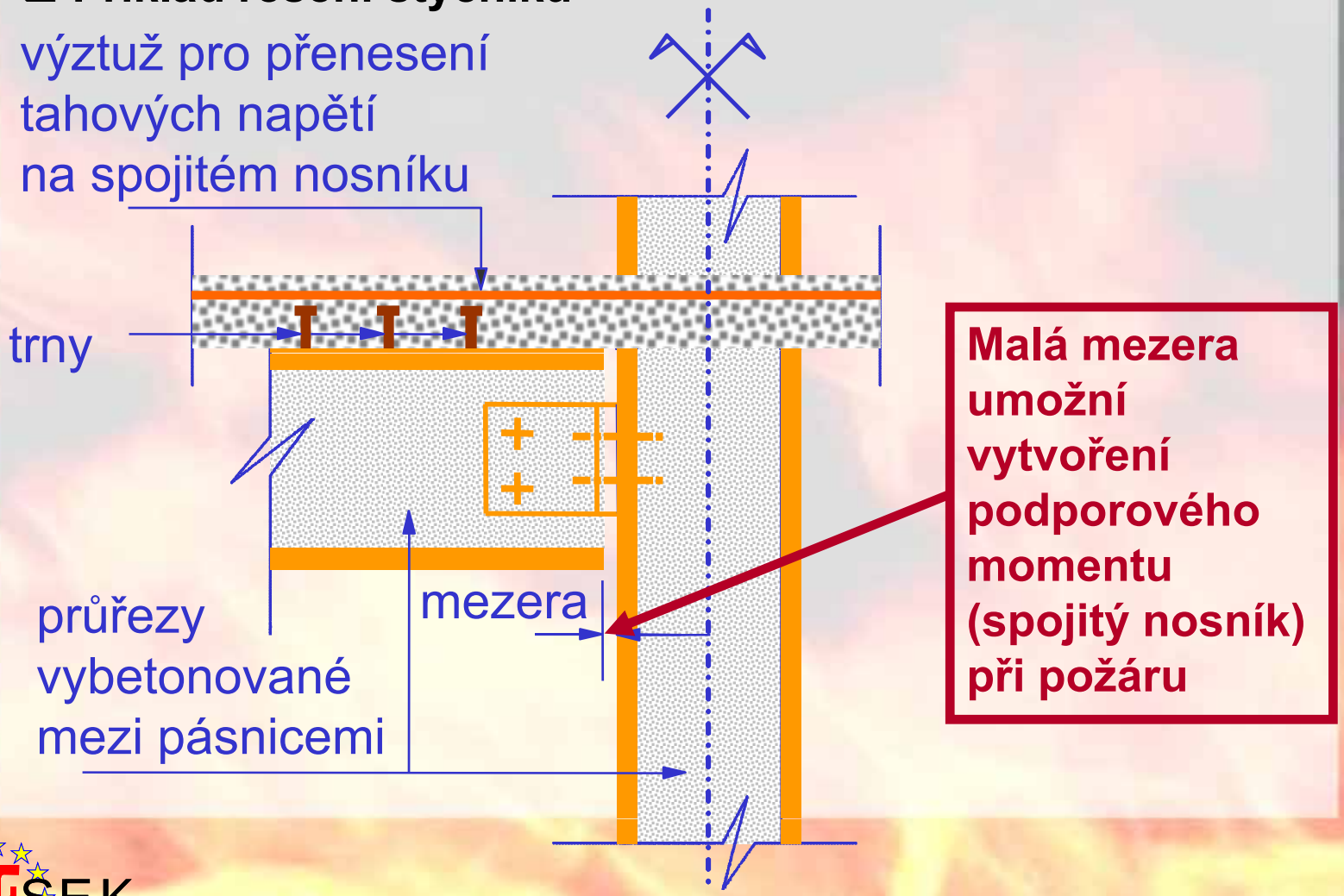
Po dokončení

Konstrukční řešení ve vztahu k požární odolnosti konstrukce

- **Konstrukční řešení**
  - **Řešení styčníků (ocelových a ocelobetonových)**
  - **Spojení oceli a betonu**
    - **Spřažení**
    - **Výztuž**
- **Chování konstrukce při chladnutí**
  - **Styčníky**

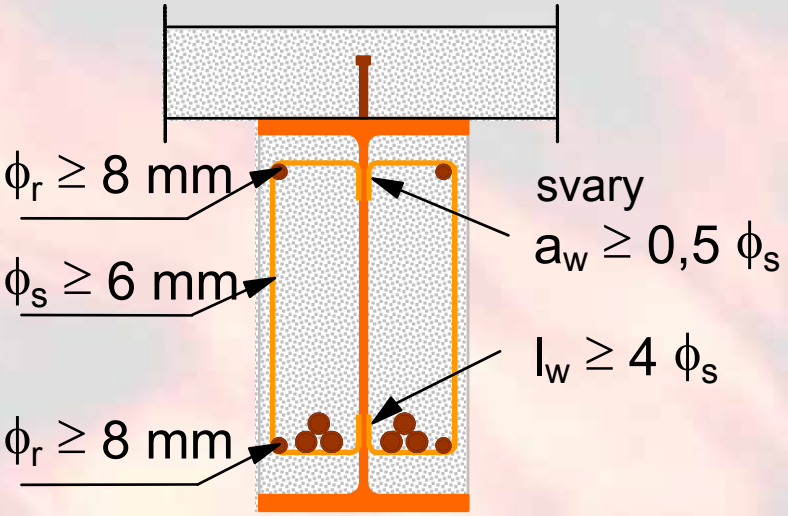
Konstrukční řešení umožňující vznik spojitého nosníku při požáru (ČSN EN 1994-1-2)

❑ **Příklad řešení styčníku**

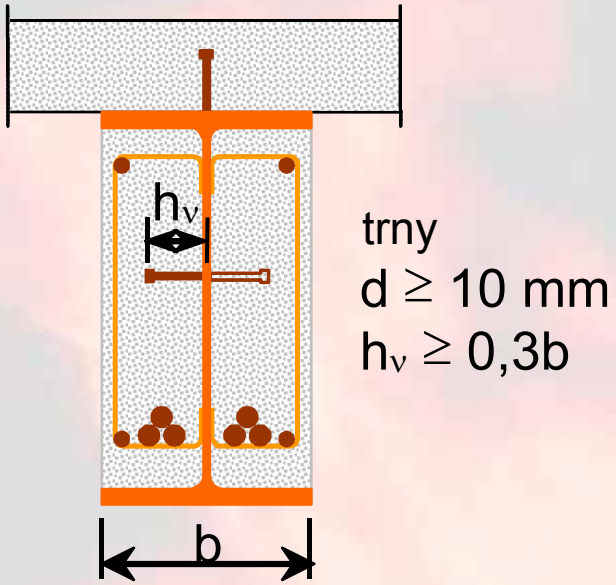


Konstrukční řešení pro spojení mezi nosníkem a betonem (ČSN EN 1994-1-2)

- **Spojení mezi ocelovým nosníkem a betonem**



Třmínky přivařené ke stěně nosníku



Trny přivařené ke stěně nosníku

Národní přílohy k ČSN EN 1993-1-2 a ČSN EN 1994-1-2

ČSN EN 1993-1-2 (ocelové konstrukce)

- Umožňuje volbu parametrů v 6 odstavcích
- Přejímá hodnoty z EN 1993-1-2 beze změny
- Vyjímkou je kritická teplota tenkostěnných konstrukcí
  - ohýbané prvky: θ_{cr} = 500ºC
  - tlačené prvky: θ_{cr} = 450ºC
- Navíc: kritická teplota požárně odolné oceli FRS 275 N (tab. 2.1)
- kritická teplota za studena tvarovaných tažených prvků (tab. 2.2)

ČSN EN 1994-1-2 (ocelobetonové konstrukce)

- Umožňuje volbu parametrů v 8 odstavcích
- Přejímá původní hodnoty
- Použití evropského softwaru je možné bez úprav

Děkuji za pozornost

sokol@fsv.cvut.cz
URL: fire.fsv.cvut.cz/difisek