



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE



Research Fund
for Coal & Steel



Seminář Požární normy po roce 2021

Požární odolnost sloupu vystaveného požáru

Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

Postup návrhu

- Normy (ČSN EN) shrnují postupy a mezní hodnoty
- **Části 1-2 pro požární návrh** (ČSN EN 1993-1-2, ČSN EN 1994-1-2,..)
- PO řešena po prvcích
- Postup



1. Definice teplotního zatížení (EC1)
2. Teplotní analýza prvku
3. Mechanické zatížení (EC0 + EC1)
4. Mechanická analýza prvků (EC2, 3, 4,...)

Teplotní zatížení

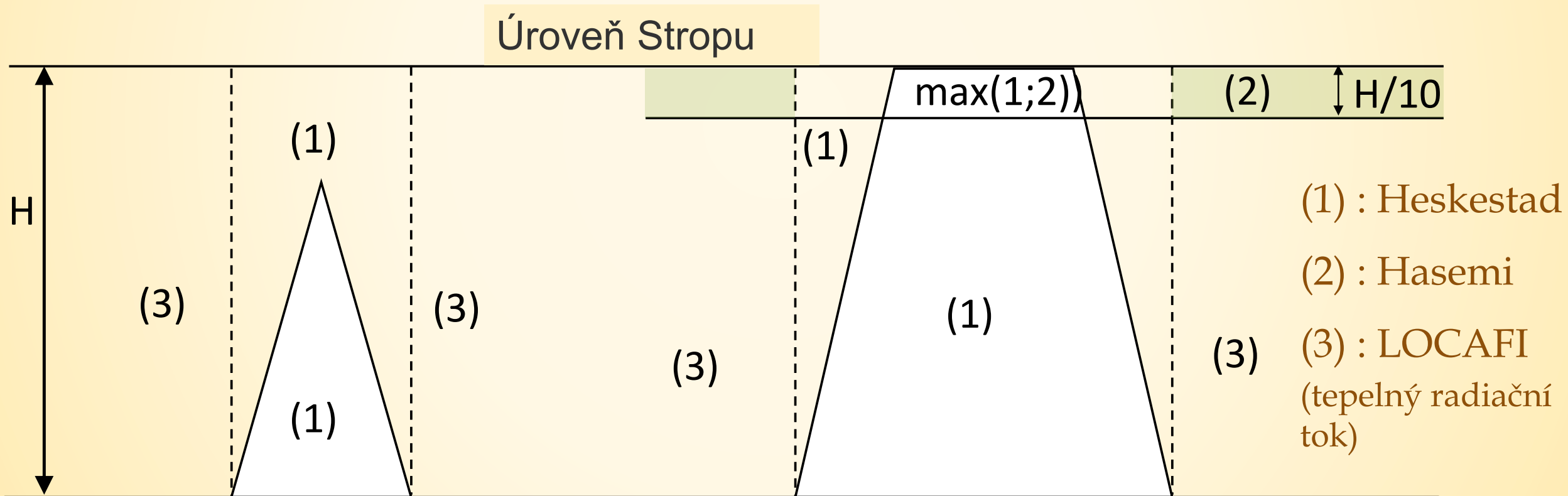
Definice požárních scénářů

- Prostorový požár
 - Normové teplotní křivky (ISO-834, Uhlovodíková,...)
 - Křivky přirozeného požáru (parametrická křivka dle Přílohy A ČSN EN 1991-1-2, zónové modely dle ČSN EN 1991-1-2 Přílohy D)
- Lokální požár
 - Požární scénář definovaný na základě vědeckých poznatků (průměrem požáru a RHR) – Příloha C ČSN EN 1991-1-2

Teplotní zatížení

Lokální požár

- výpočet tepelného toku přijatého sloupem dle oblasti, ve které se sloup nachází
- výpočet teploty sloupu (segment s maximální teplotou v ustáleném stavu)



Teplotní analýza

Teplotní bilance prvku v ustáleném stavu

Teplota v ustáleném stavu θ je teplota, při které je přijatý tok vyvažován emitovanými tepelnými (konvekčními a radiačními) toky

$$0 = \underbrace{\alpha_c(\theta - 20)}_{\text{Emitovaný tok prouděním}} + \underbrace{\sigma\epsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Emitovaný tok sáláním}} - \underbrace{\epsilon * \dot{h}_{m,r}}_{\text{Přijatý tepelný tok}} \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

V případě prostorového požáru musí být radiační tok $\dot{h}_{m,r}$ nahrazen $\dot{h}_{m,tot}$ včetně konvekčního a radiačního toku.

$$\dot{h}_{m,tot} = \min(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000) \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

Tento zjednodušený přístup zanedbává tepelnou setrvačnost prvku.

Teplotní analýza

Přírůstková metoda (rovnoměrné rozložení teploty)

Teplota konstrukčního prvku se vypočítá zavedením teplotní bilance prvku.

$$\rho C_p(T) \frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V} [\dot{h}_{m,r} + \alpha_c(20 - \theta) + \varepsilon(\sigma(293^4 - (\theta + 273)^4))]$$

Vlastnosti prvku: ρ – Hustota [kg/m³], C_p – Měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹] a A_m/V – Součinitel průřezu [m⁻¹]

ČSN EN 1993-1-2 předepisuje, že časový krok Δt nemá být větší než 5 sekund.

V případě prostorového požáru musí být průměrný radiační tok $\dot{h}_{m,r}$ nahrazen $\dot{h}_{m,tot}$ včetně konvekčního a radiačního toku.

$$\dot{h}_{m,tot} = \min(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000) \quad [\text{W.m}^{-2}]$$

Teplotní analýza

Přírůstková metoda (rovnoměrné rozložení teploty)

Teplotu v časovém kroku $t + \Delta t$ pro 60 s lze vyjádřit:

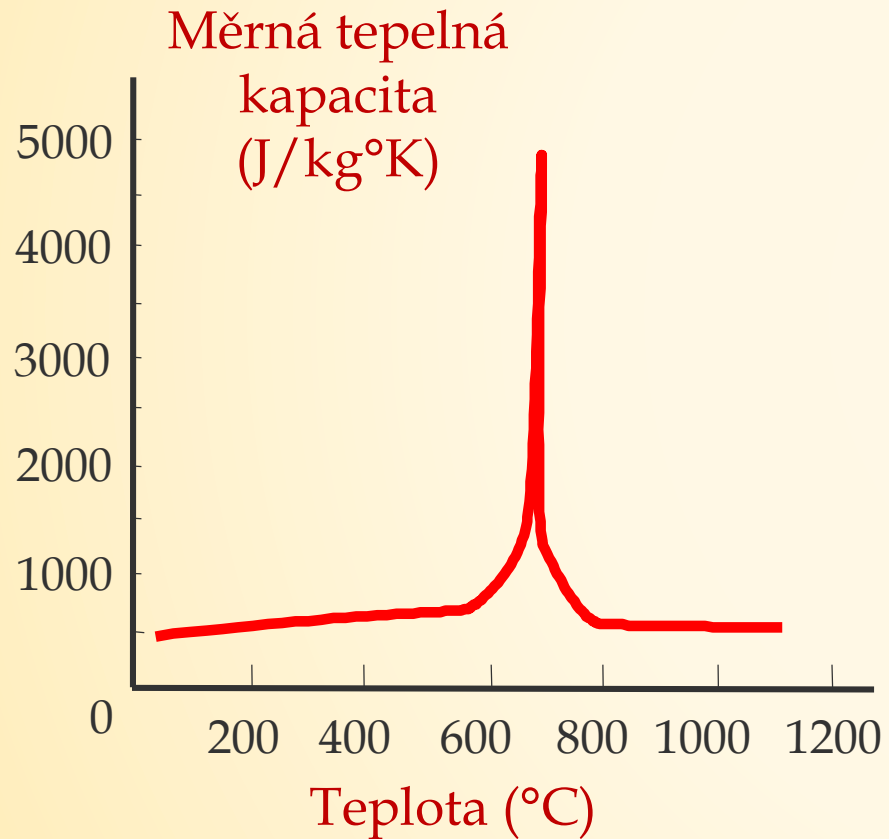
$$T^{t+\Delta t} = T^t + \Delta t \frac{A_m}{V} \frac{1}{\rho C_p(T^t)} [\dot{h}_{m,r} - \alpha_c(T - 20) - \varepsilon \sigma((\theta + 273)^4 - 293^4)]$$

Vlastnosti prvku: ρ – Hustota [kg/m^3], C_p – Měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] a A_m/V – Součinitel průřezu [m^{-1}]

Rovnici lze řešit tabulkový procesorem nebo v softwaru OZone.

Teplotní analýza

Přírůstková metoda – zavedení materiálových vlastností

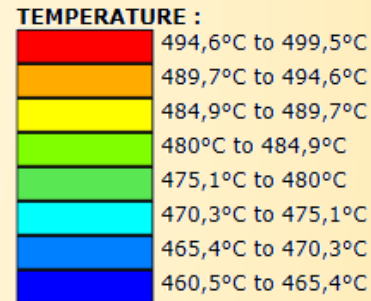
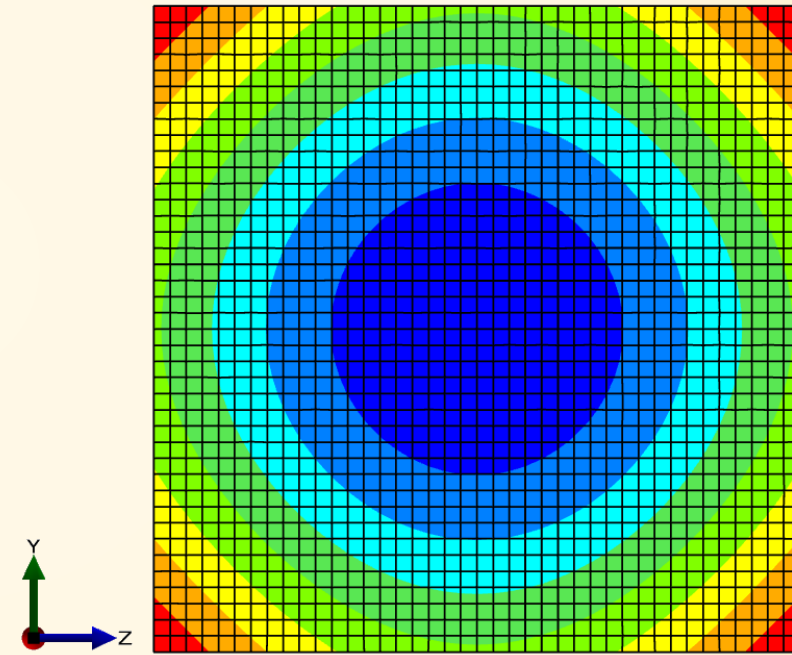
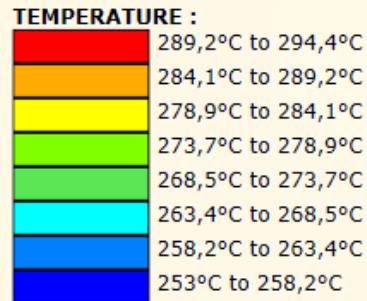
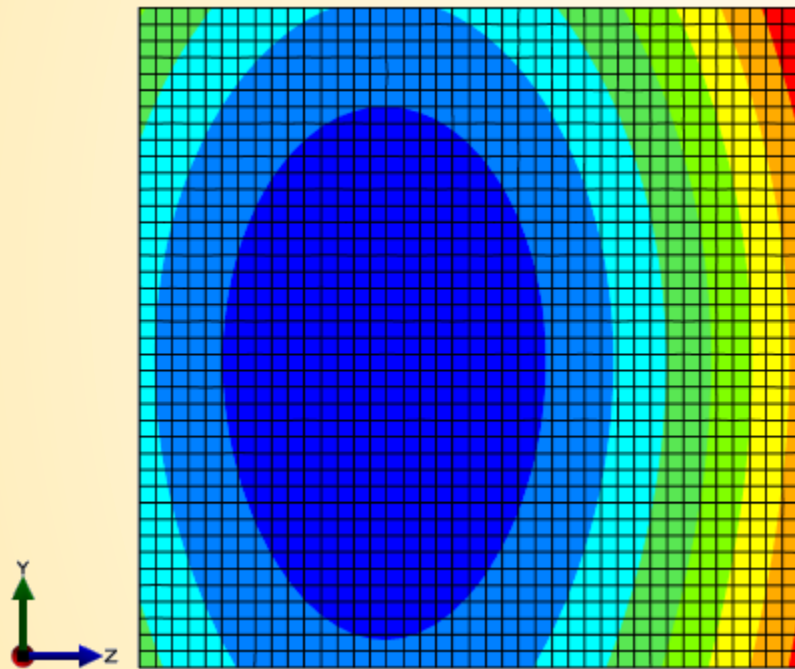


Objemová hmotnost oceli: 7850 kg/m^3

Nezávisle na teplotě

Teplotní analýza

MKP analýza (nerovnoměrné rozložení teploty)



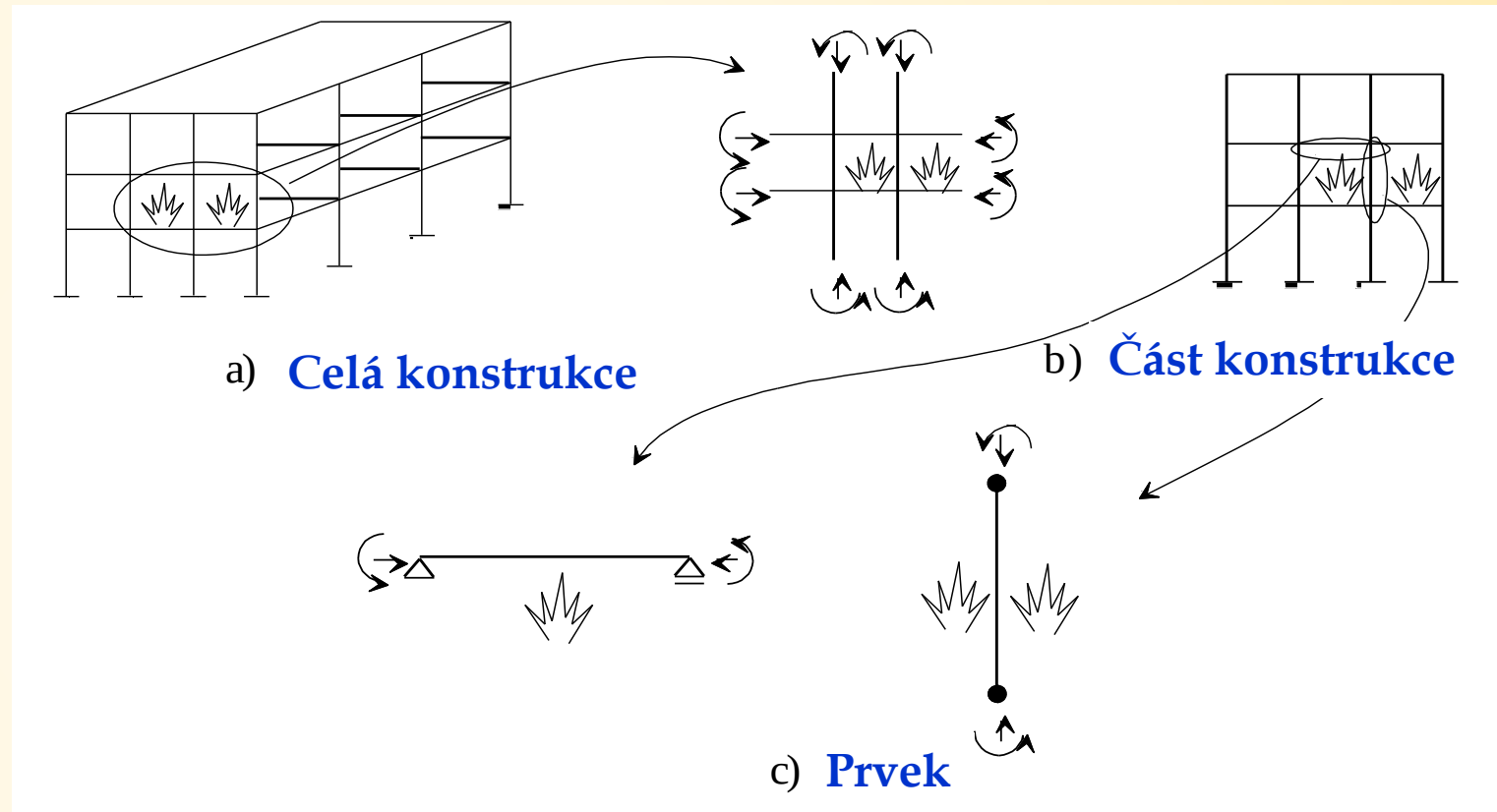
Rozložení teploty [°C] po 33 minutách ve sloupu výšky 3,36 [m] čtvercového průřezu 130 [mm] x 130 [mm]. Okolo sloupu jsou rozestavěny 3 hořící vozy a 1 vana s hořlavou kapalinou a) výšky 0,94 [m]; b) výška 3,1 [m].

Mechanická analýza

Únosnost konstrukce je splněna tehdy, jestliže během příslušné doby vystavení požáru t platí:

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

kde $E_{fi,d,t}$: návrhové zatížení (Eurokódy 0 a 1)
 $R_{fi,d,t}$: odpovídající únosnost konstrukce v čase t

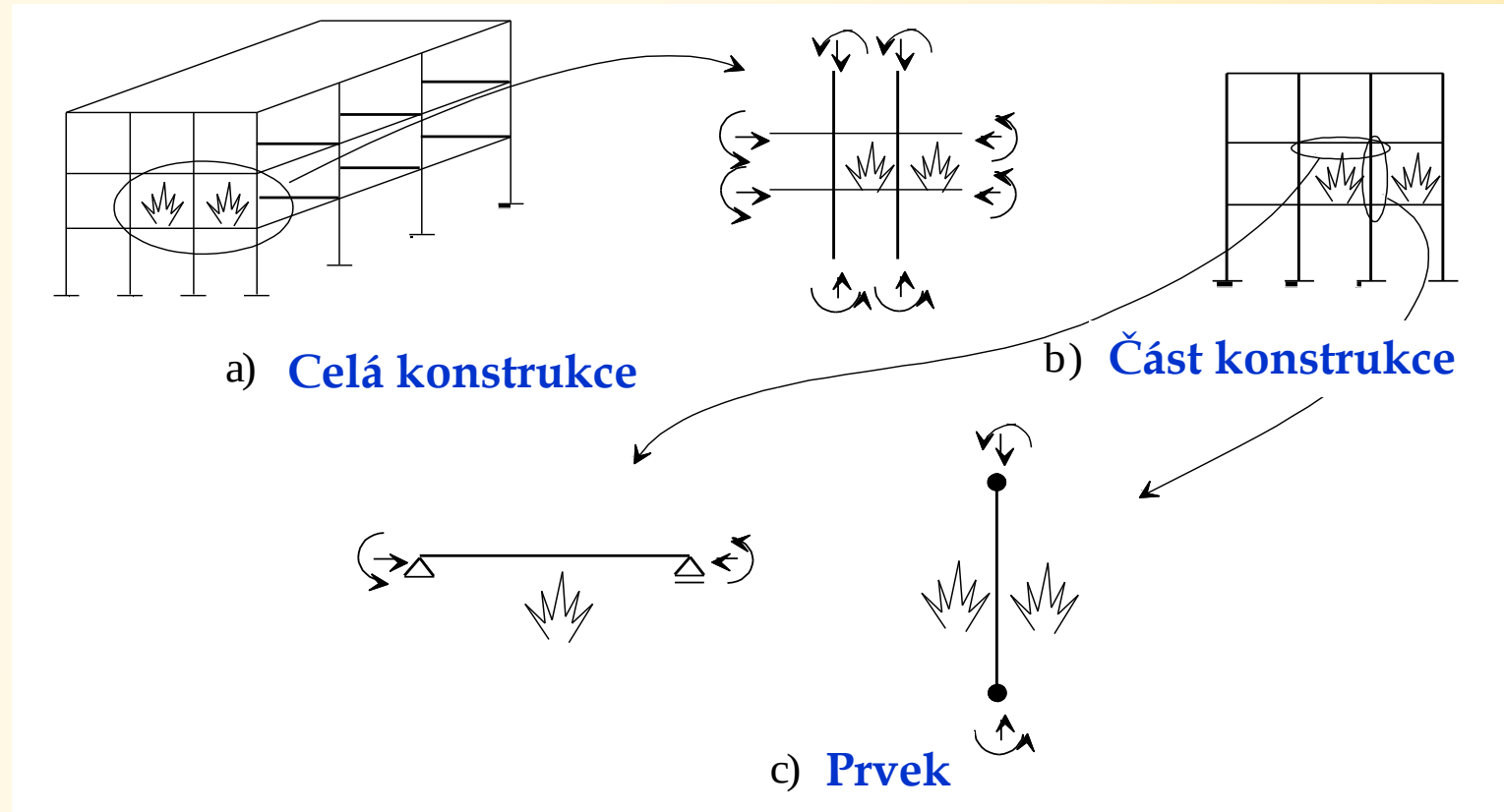


Mechanická analýza

Únosnost konstrukce je splněna tehdy, jestliže během příslušné doby vystavení požáru t platí:

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

kde $E_{fi,d,t}$: návrhové zatížení (Eurokódy 0 a 1)
 $R_{fi,d,t}$: odpovídající únosnost konstrukce v čase t



Mechanické zatížení

Kombinace zatížení pro MSÚ (ČSN EN 1990)

$$E_d = 1.35 * \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1.5 * Q_{k,1} + 1.5 * \sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Kombinace pro mimořádné zatížení

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{1,1} \text{ nebo } \Psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

*Doporučeno použít dle
odpovídající Národní přílohy
odst. 2.10*

$\Psi_{1,1}$...časté hodnoty

$\Psi_{2,1}$...kvazistálé hodnoty

U halových objektů se při kombinaci
s uvažováním větru a sněhu
doporučují časté hodnoty

Zatížení dle provozu	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Kategorie A: domácnosti, obytné prostory	0.7	0.5	0.3
Kategorie B : kancelářské prostory	0.7	0.5	0.3
Kategorie C : shromažďovací prostory	0.7	0.7	0.6
Kategorie D : obchody a obchodní centra	0.7	0.7	0.6
Kategorie E : skladovací prostory	1	0.9	0.8
...	...	...	...

Ověření požární odolnosti

Ověření požární odolnosti konstrukce dle jedné z následujících tří metod:

Teplotou : $\theta_{cr,d} \geq \theta_d$

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

Časem : $t_{fi,d} \geq t_{fi,required}$

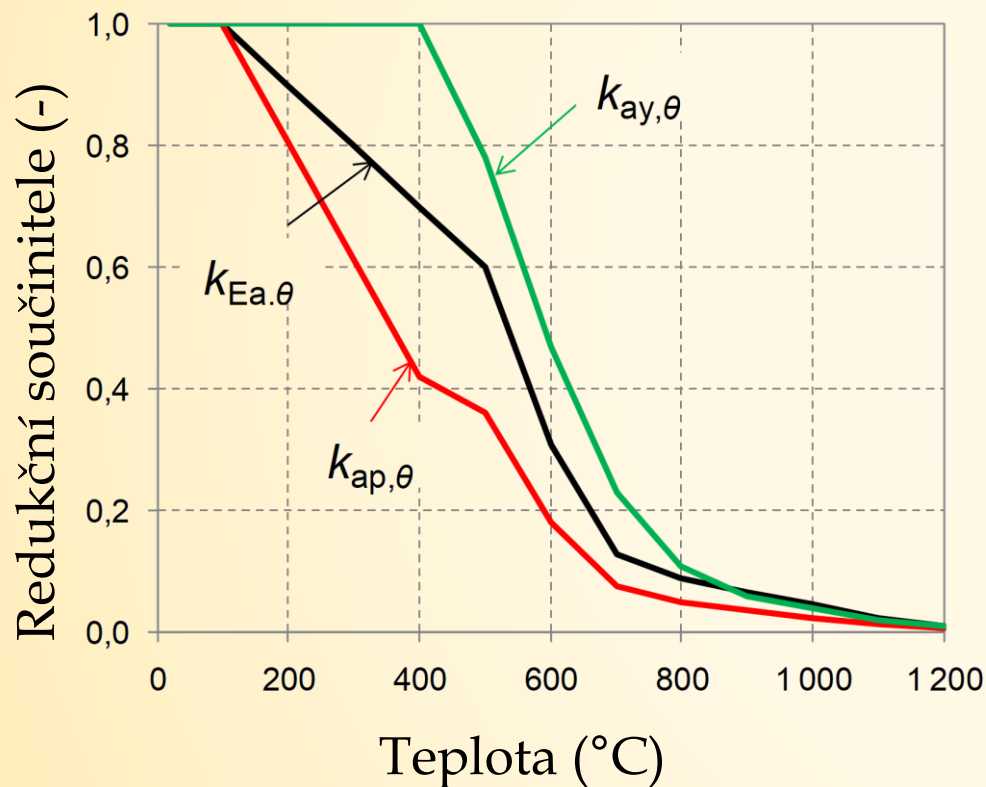
Méně obvyklá metoda, platná pouze pro danou T.

Možnost ručního výpočtu (snížená kapacita v požadované době).

Nejpřehledněji vyjadřuje rezervy spolehlivosti - pokročilé nástroje (modely používající MKP).

Ověření požární odolnosti - teplotou

Ověření PO teplotou – pomocí kritické teploty



$k_{y,\theta}$: redukce meze kluzu

$$k_{y,\theta} = \left\{ 0.9674 \left(e^{\frac{\theta_a - 482}{39.19}} + 1 \right) \right\}^{-1/3.833} \leq 1$$

$$\theta_{a,cr} = (k_{y,\theta})^{-1}$$

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 k_{y,\theta}^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

Ověření požární odolnosti - teplotou

Kritická teplota

ČSN EN 1993-1-2

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

Stupeň využití

$$\mu_0 = \left(\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} \right) = \eta_{fi,t} \left(\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right)$$

Redukční součinitel pro návrhovou hodnotu zatížení při požáru

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d,t}}{R_d} < \eta_{fi}$$

**Návrhová únosnost
za běžné teploty**

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{2.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} Q_{k.1}}$$

Zjednodušeně se doporučuje $\eta_{fi} = 0.65$
(kromě Kategorie E, $\eta_{fi} = 0.7$)

Ověření požární odolnosti - teplotou

Ověření PO teplotou – pomocí kritické teploty

V případě, že chování prvku zahrnuje nestabilitu, je vyžadována snížená nepoddajnost.

$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
μ_0											
0.04	1000	977	949	913	880	839	787	742	696	678	659
0.06	900	885	866	837	795	756	700	679	656	630	602
0.08	860	839	811	785	749	697	674	647	616	588	564
0.10	820	797	780	752	703	677	648	614	585	557	527
0.12	792	777	755	719	685	656	622	588	559	526	474
0.14	775	757	730	694	668	636	597	567	533	487	373
0.16	758	737	705	681	652	615	580	546	507	408	
0.18	742	717	691	668	636	596	563	524	453		
0.20	725	698	680	655	619	582	545	503	384		
0.22	708	689	669	641	603	568	528	457			
0.24	696	679	658	628	591	554	511	406			
0.26	688	670	647	615	579	540	485				
0.28	679	660	636	602	568	526	446				
...	...	...	...	...	...	...	...				

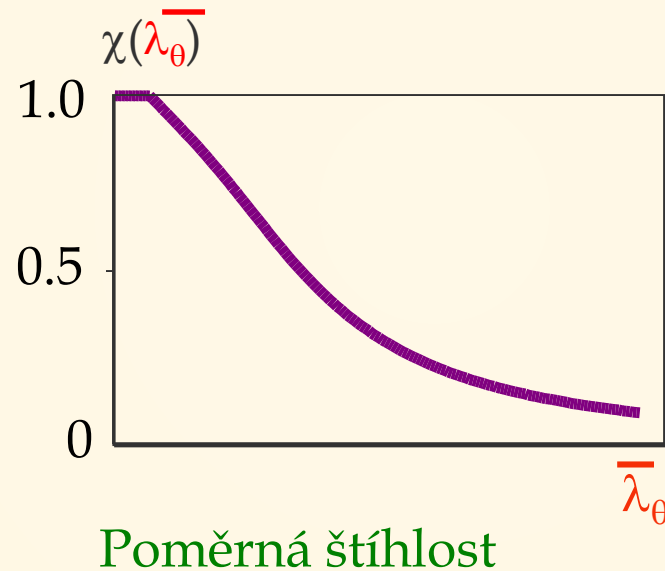
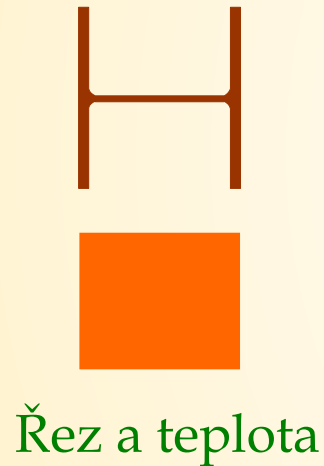
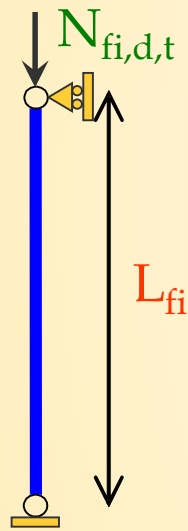
Kritická teplota ocelových prvků při nestabilitě určená pomocí specifických tabelovaných dat založených na:

- bezrozměrná štíhlost v čase 0
 - konkrétní úroveň zatížení
- $$\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$$
- každá třída oceli má své vlastní tabulkové údaje

Ověření požární odolnosti pomocí únosnosti

Únosnost sloupu dle ČSN EN 1993-1-2

Tlačený prut třídy 1, 2 nebo 3



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

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}}$$

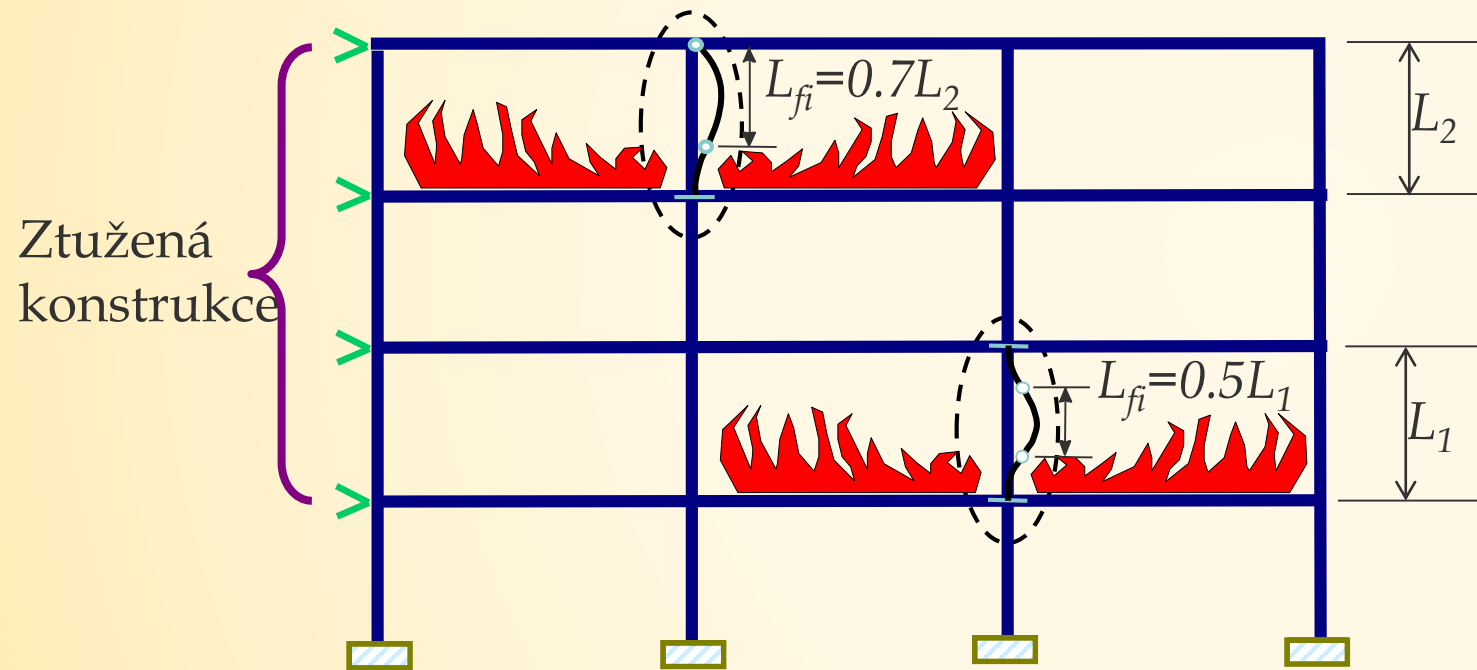
$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right]$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

Součinitele spolehlivosti oceli při zvýšených teplotách $\gamma_{M,fi} = 1.0$

Ověření požární odolnosti pomocí únosnosti

Redukce vzpěrných délek při požáru

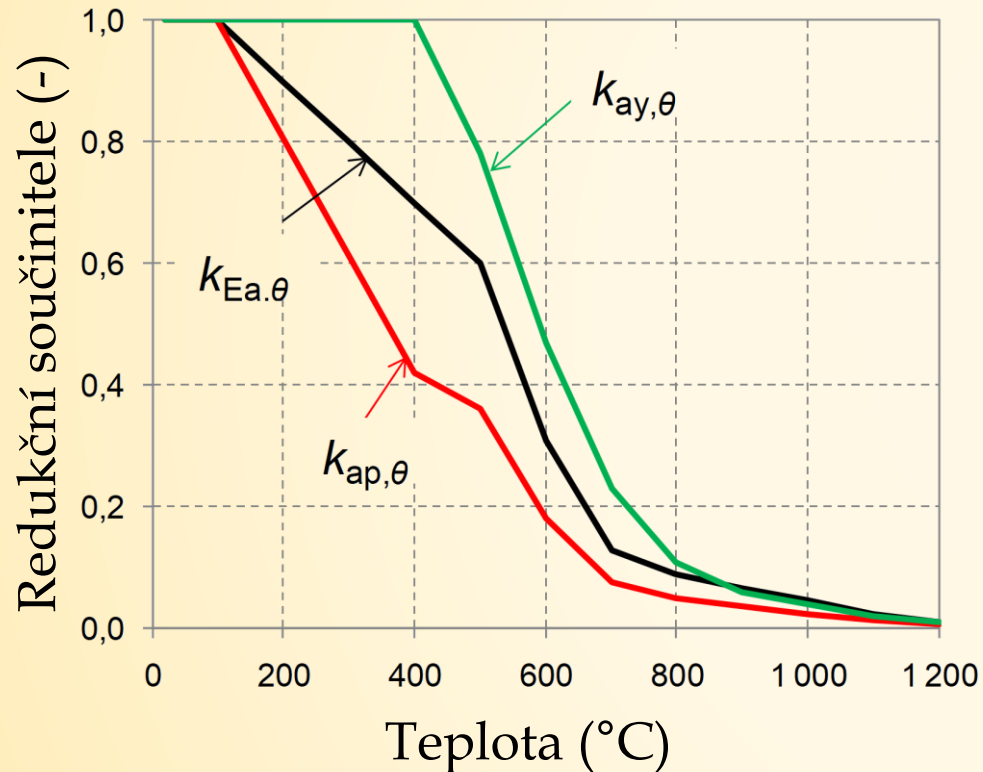


Podmínky:

- Konstrukce je propojená s okolními prvky
- Je ukončena nebo pokračuje přes sloupy
- Sloupy a stropní konstrukce mají stejnou požární odolnost R

Ověření požární odolnosti pomocí únosnosti

Redukce materiálových vlastností



$k_{y,\theta}$: snížení meze kluzu

$k_{E,\theta}$: snížení modulu pružnosti

$k_{p,\theta}$: snížení meze úměrnosti

Aktuální verze ČSN EN 1993-1-2 platí pro třídy oceli S235 až S460

Ověření požární odolnosti pomocí únosnosti

Únosnost sloupu dle ČSN EN 1993-1-2

Tlačený prut třídy 1, 2 nebo 3

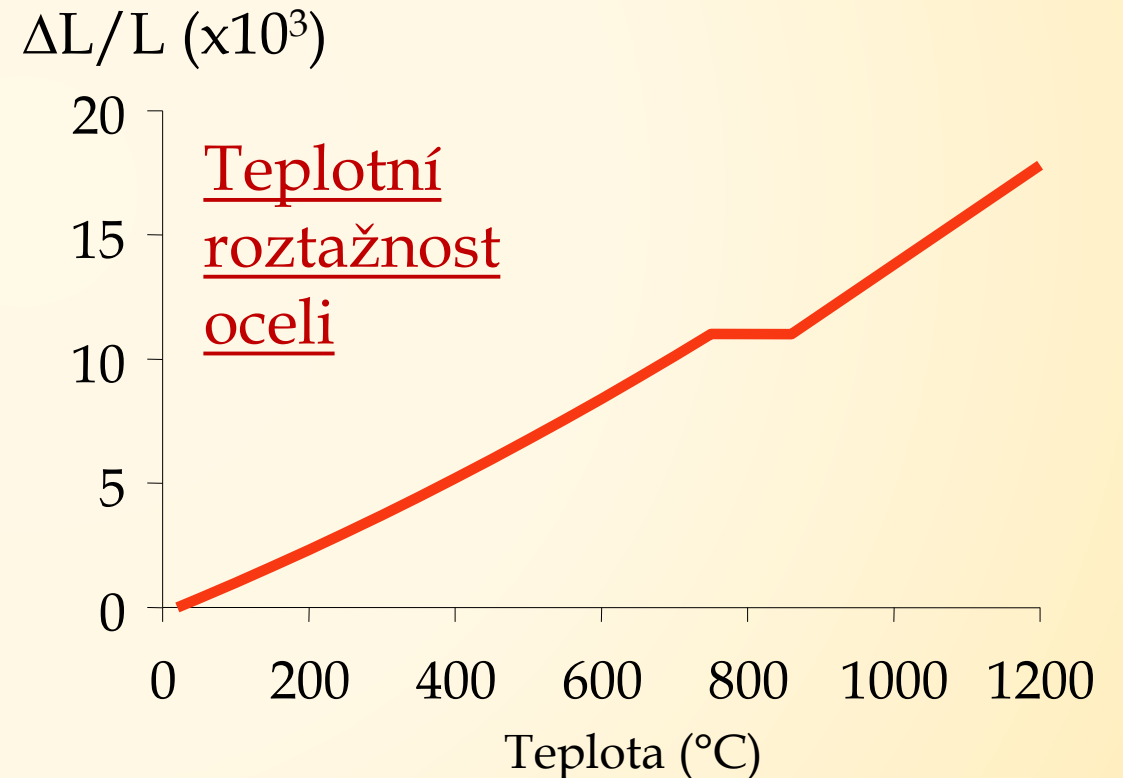
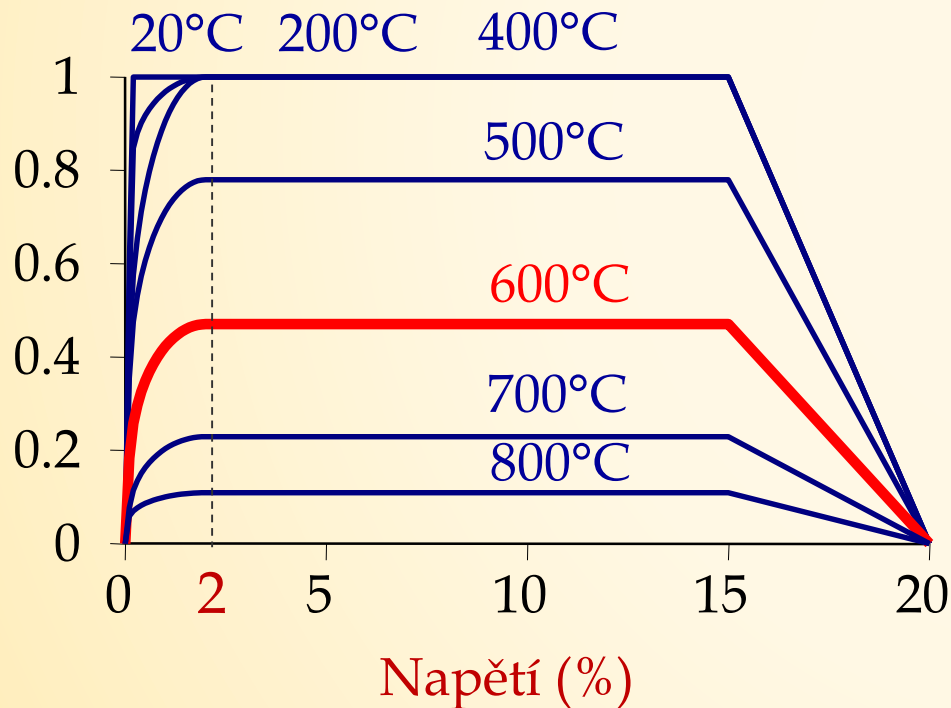
$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

Ověření požární odolnosti podle času

Metoda konečných prvků

materiálové vlastnosti závislé na čase/teplotě

Normalizovaná namáhání

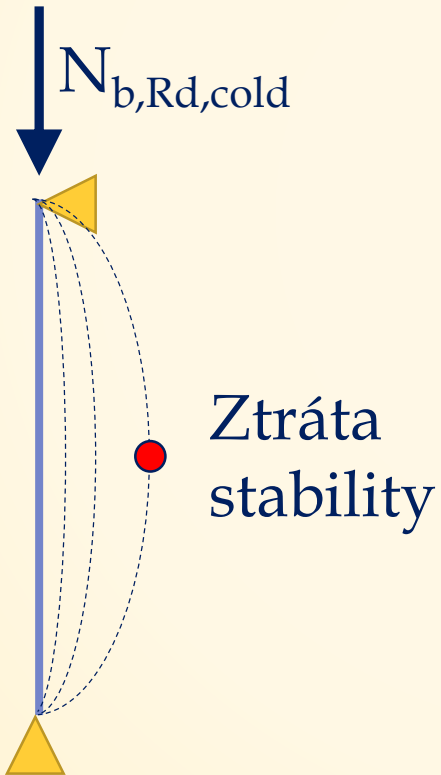


Ověření požární odolnosti podle času

Metoda konečných prvků

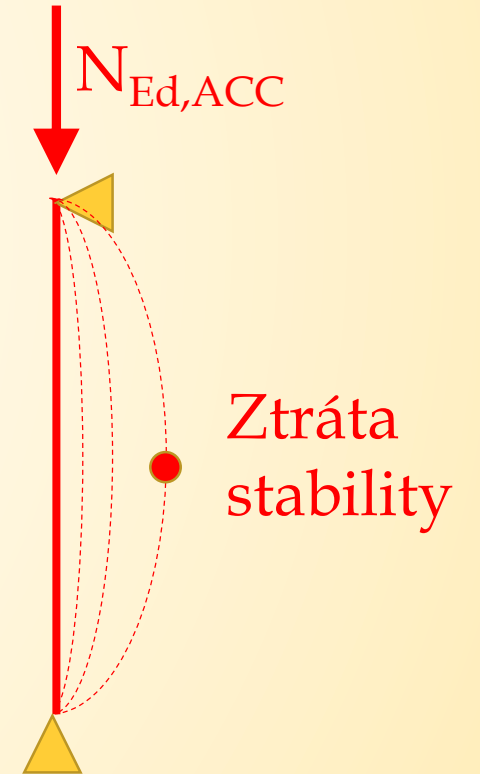
Návrh za studena

- Počáteční imperfekce
- Zatížení je zvyšováno až do selhání



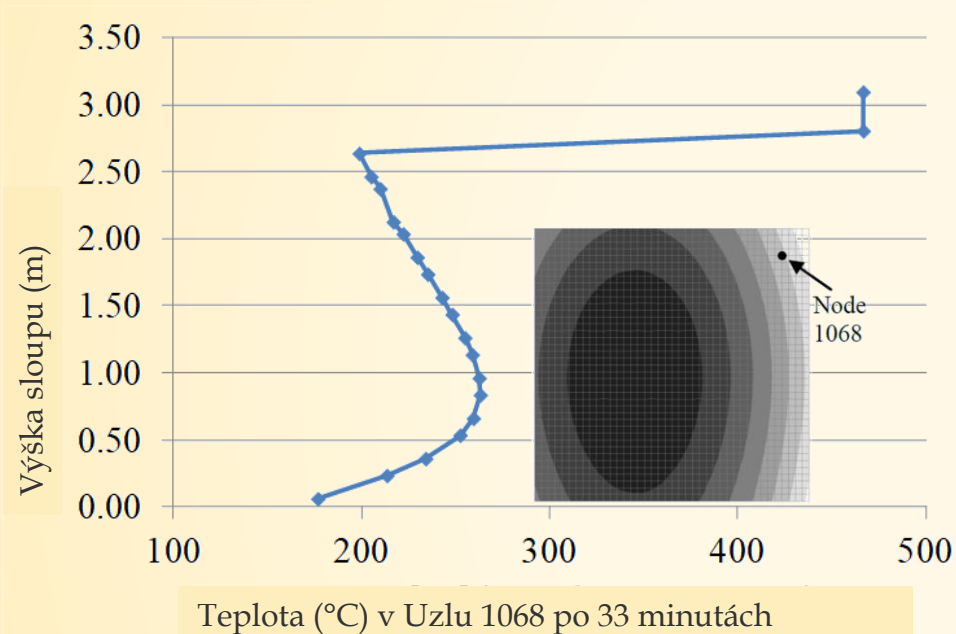
Návrh za zvýšené teploty

- Počáteční imperfekce
- Počáteční zatížení
- Teplota je zvyšována až do selhání

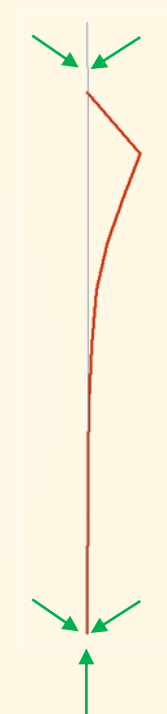
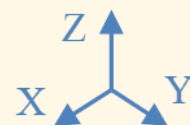


Ověření požární odolnosti podle času

Metoda konečných prvků



Rozložení teploty v uzlu 1068 po 33 min ve výšce 3.36 [m] sloupu čtvercového průřezu 130x130 mm zatíženého požárem 3 vozidel a 1 vany s hořlavou kapalinou



Tvar vybočení tohoto sloupu

Shrnutí

Postup návrhu/posouzení PO konstrukčního prvku při požáru

- 
1. Definice teplotního zatížení
 2. Teplotní analýza prvku
 3. Mechanické zatížení
 4. Mechanická analýza prvků



Výpočet teploty sloupu při lokálním požáru

- Dle umístění vůči požáru a stropu (Hasemi, Heskestad, LOCAFI)

Děkuji za pozornost

Kamila Cábová