

The logo consists of the word "DIFISEK" in a bold, black, sans-serif font. The letter "I" is significantly larger and colored blue. Surrounding the "I" is a circular arrangement of twelve yellow stars, similar to the European Union flag, with blue outlines. The background is a blurred, abstract image with warm colors like red, orange, and yellow.

DIFISEK

ČÁST 2
TEPLOTNÍ ODEZVA

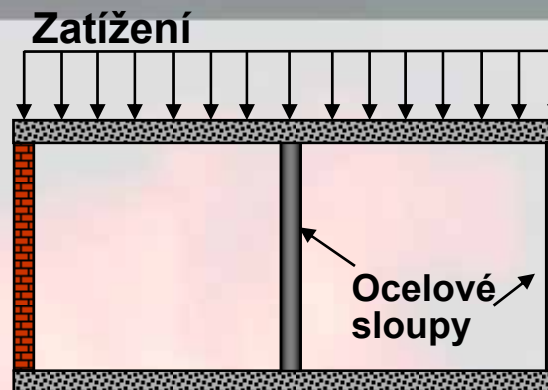
Stanovení požární odolnosti



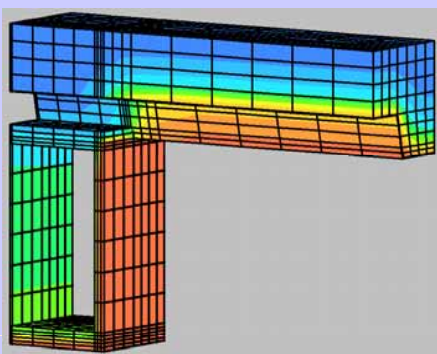
1: Zapálení



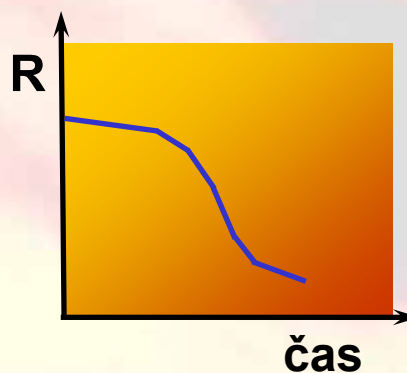
2: Tepelné zatížení



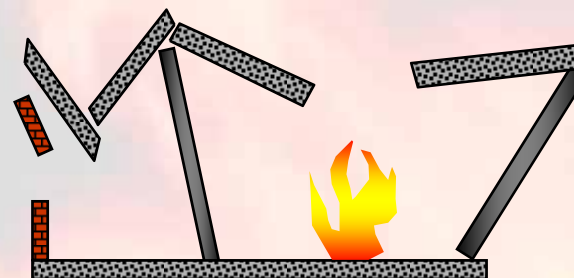
3: Mechanické zatížení



4: Teplotní odezva



5: Mechanická odezva



6: Možný kolaps

Obsah

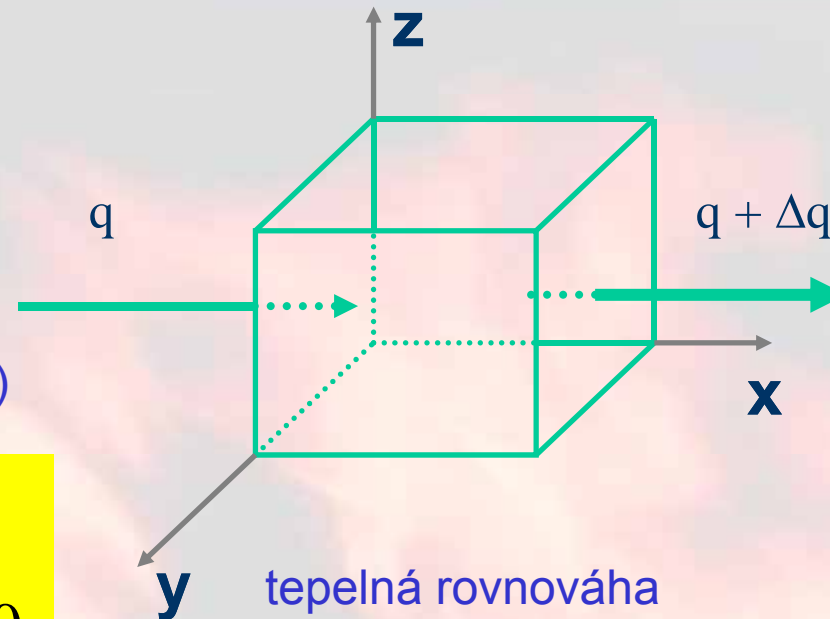
- 1. Úvod
- 2. Základní vztahy a názorné příklady
- 3. Pravidla výpočtu pro ocelové prvky
- 4. Pravidla výpočtu pro ocelobetonové prvky

- Přílohy
 - ✧ Fourierova diferenciální rovnice
 - ✧ Teplotní odezva ocelových prvků
 - ✧ Tabulkové hodnoty a zjednodušené modely podle EN 1994-1-2
 - ✧ Pravidla EN pro požární odolnost desek s trapézovými plechy s ohledem na kritérium izolace
 - ✧ Pravidla EN pro vyztužení desek s trapézovými plechy v oblasti kladných momentů

Teplotní odezva

Základy

- Tepelná vodivost ($= \lambda$)
- Tepelná kapacita ($= \rho \cdot c_p$)



DR: (pouze pro jeden směr)

$$\frac{\partial(\rho c_p \Theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x})}{\partial x} = 0$$

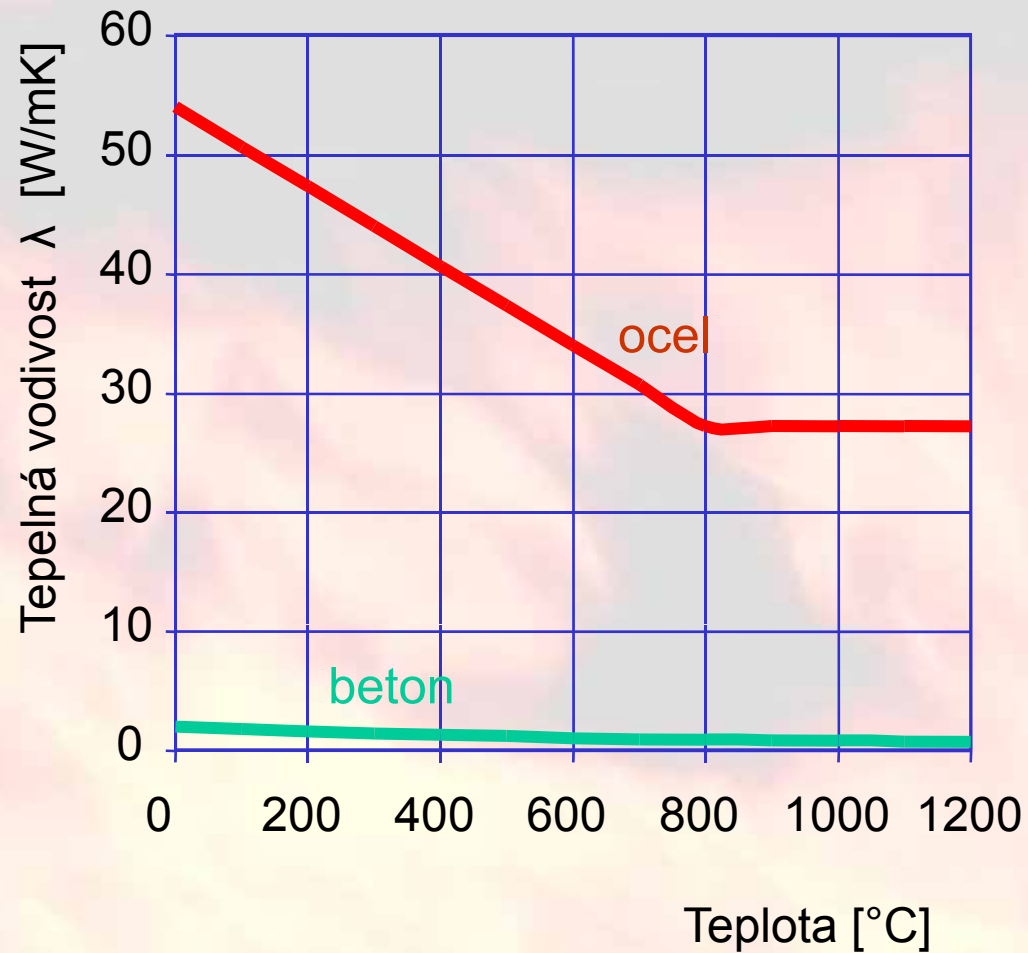
$$\Delta q / \Delta x + \Delta(\rho c_p \Theta) / \Delta t = 0$$

okrajové podmínky: přidané/odebrané teplo
na povrchu : $h_{\text{net,tot}}$
počáteční podmínky: počáteční teplota

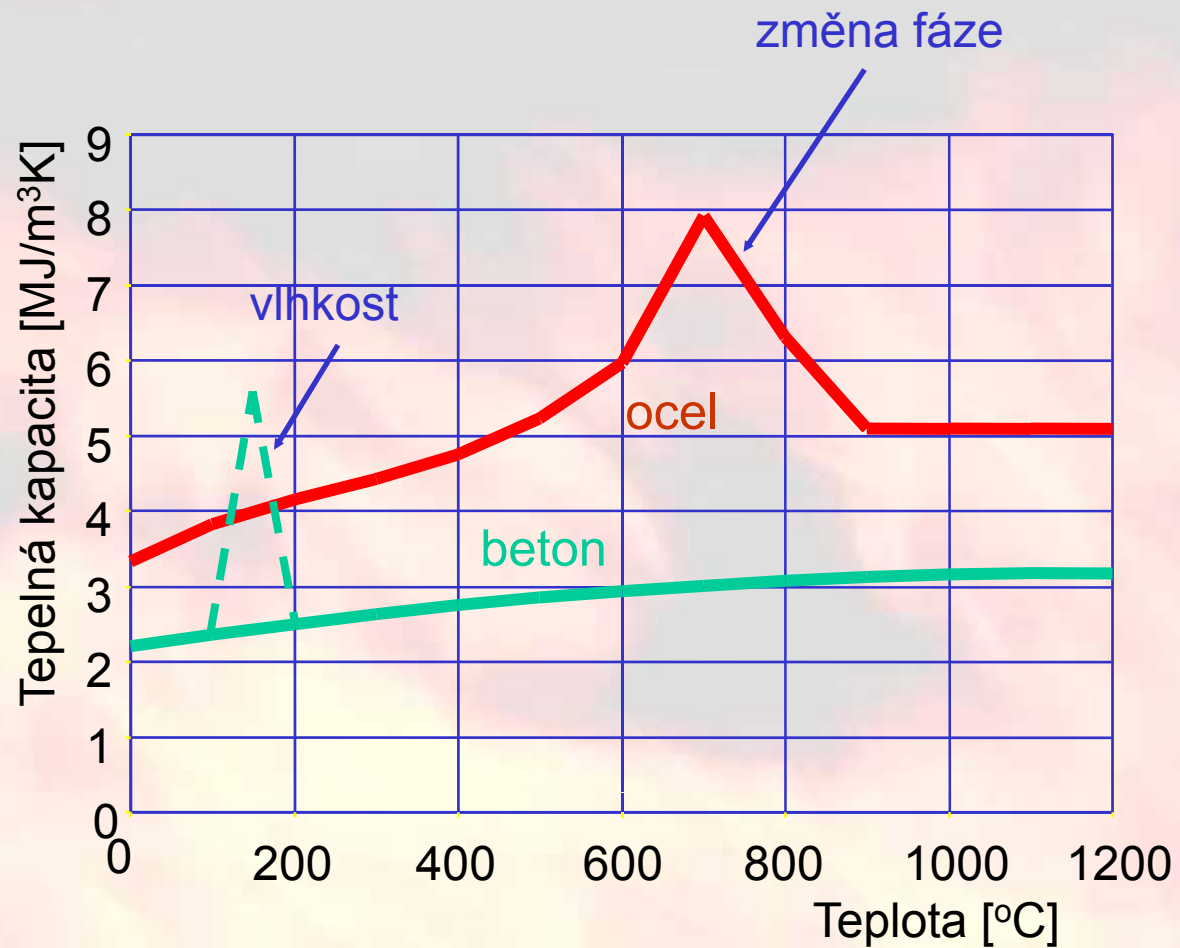
Fourierův zákon

$$q = \lambda \Delta \Theta / \Delta x$$

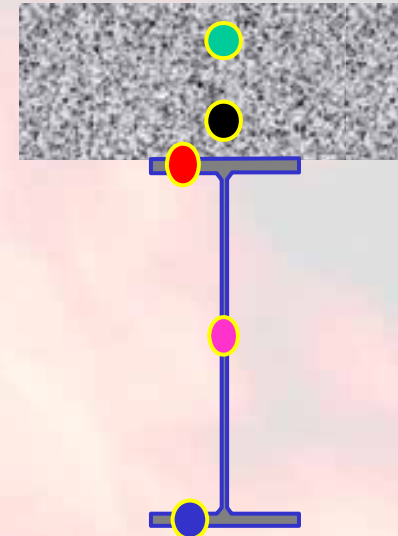
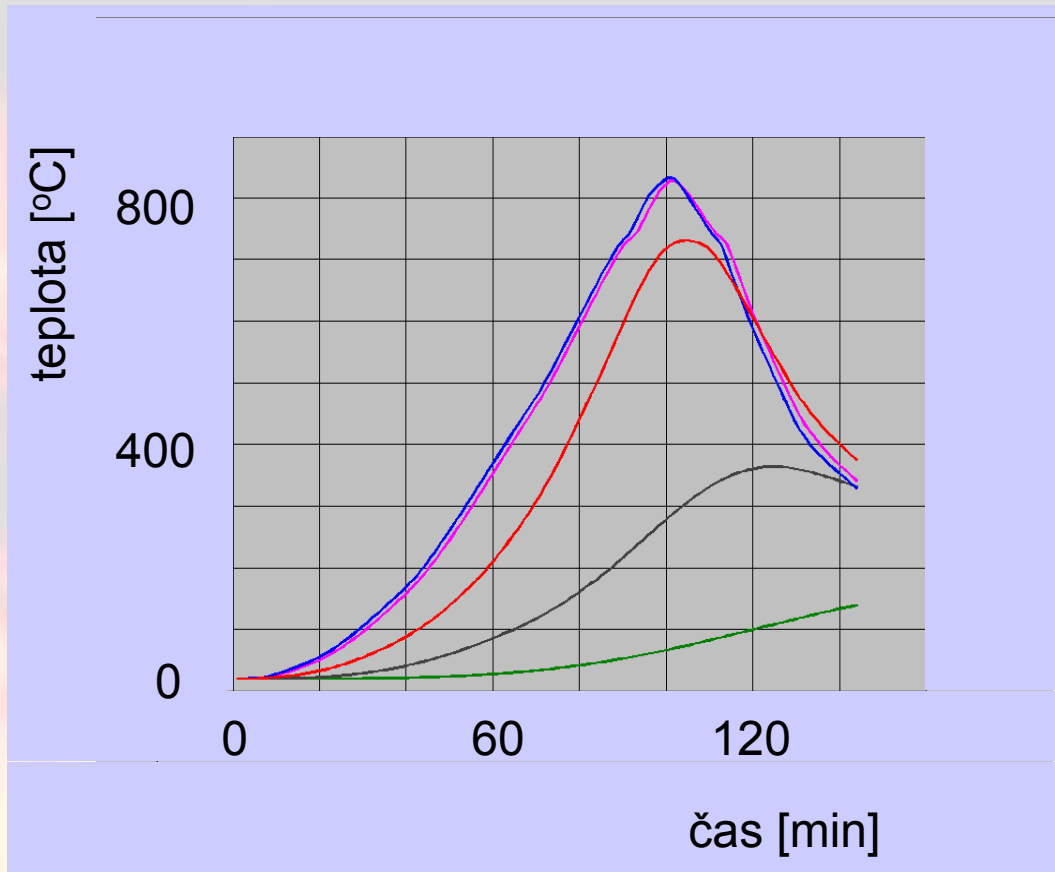
Tepelná vodivost betonu a oceli



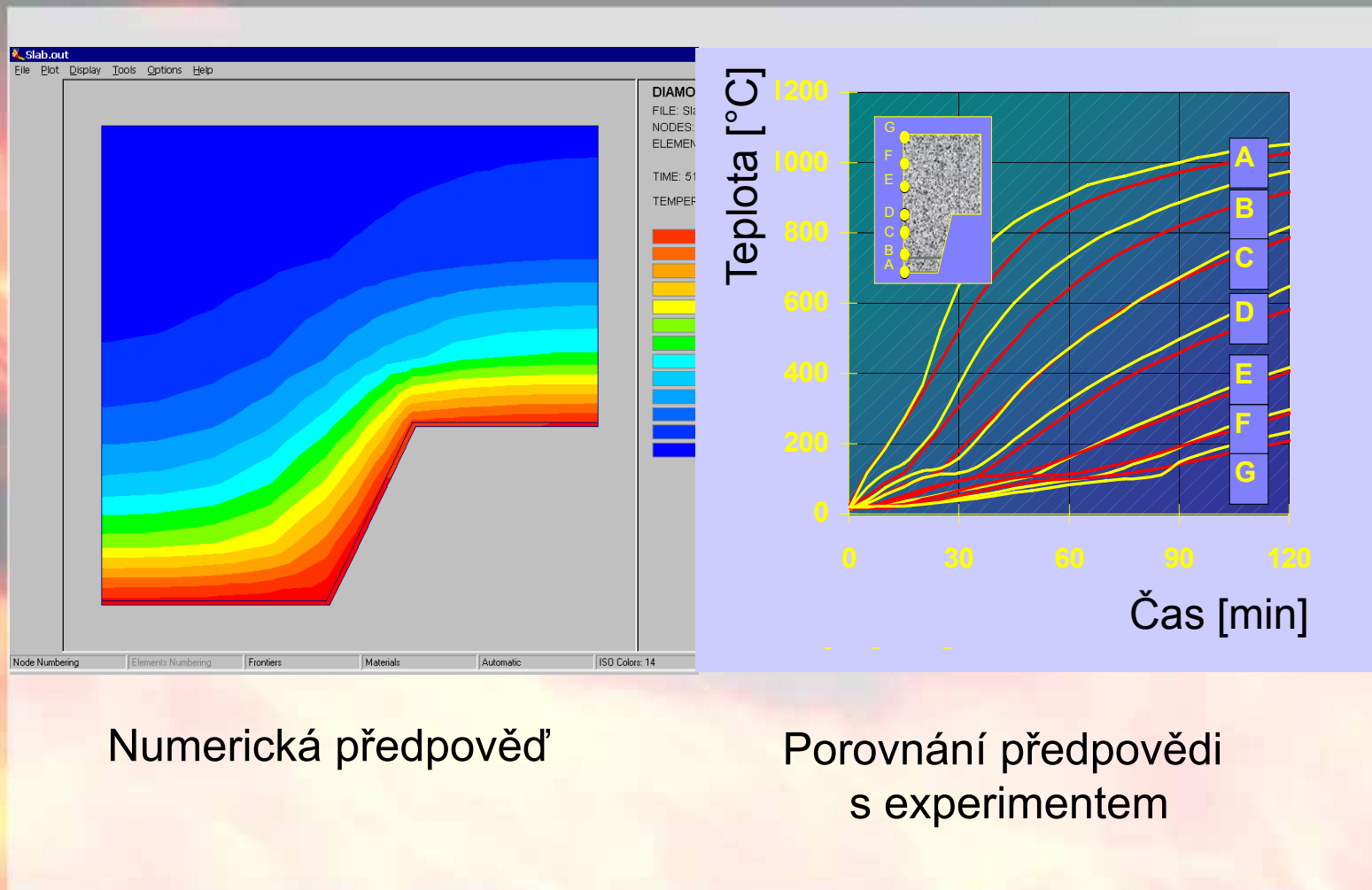
Tepelná kapacita betonu a oceli



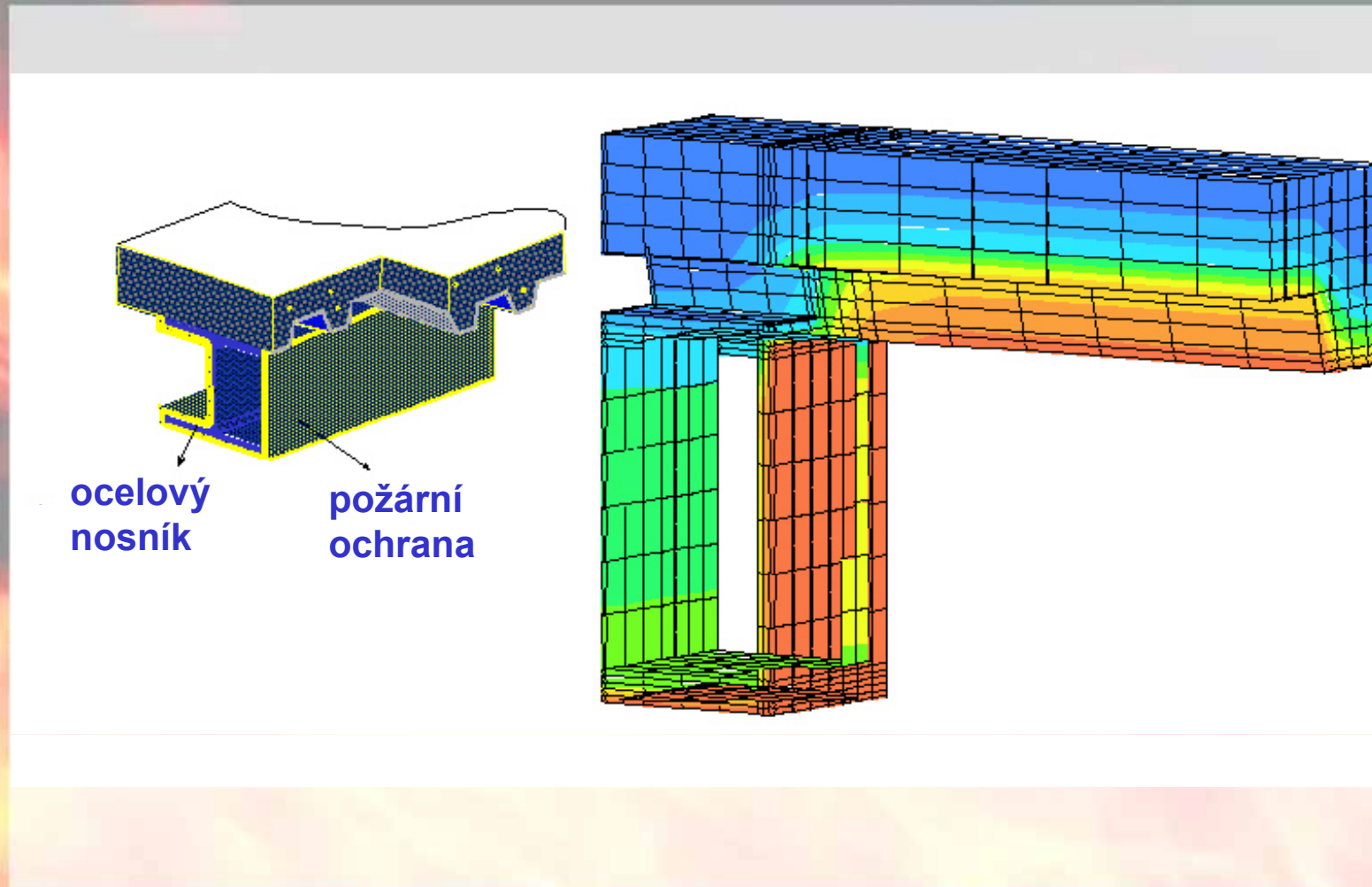
Teplotní odezva Ocelový nosník s betonovou deskou (2D)



Teplotní odezva Ocelobetonová deska (2D)



Teplotní odezva Ocelobetonový krajní nosník (3D)



Pravidla výpočtu pro ocelové prvky

- Úvod
- Nechráněná ocelová konstrukce
- Chráněná ocelová konstrukce
- Návrhové parametry pro rozvoj teploty
 - ✧ Obecně
 - ✧ Součinitel průřezu
 - ✧ Vlastnosti požární ochrany
 - ✧ Použití podmínek nenormového požáru

Požární odolnost ocelových prvků

Princip

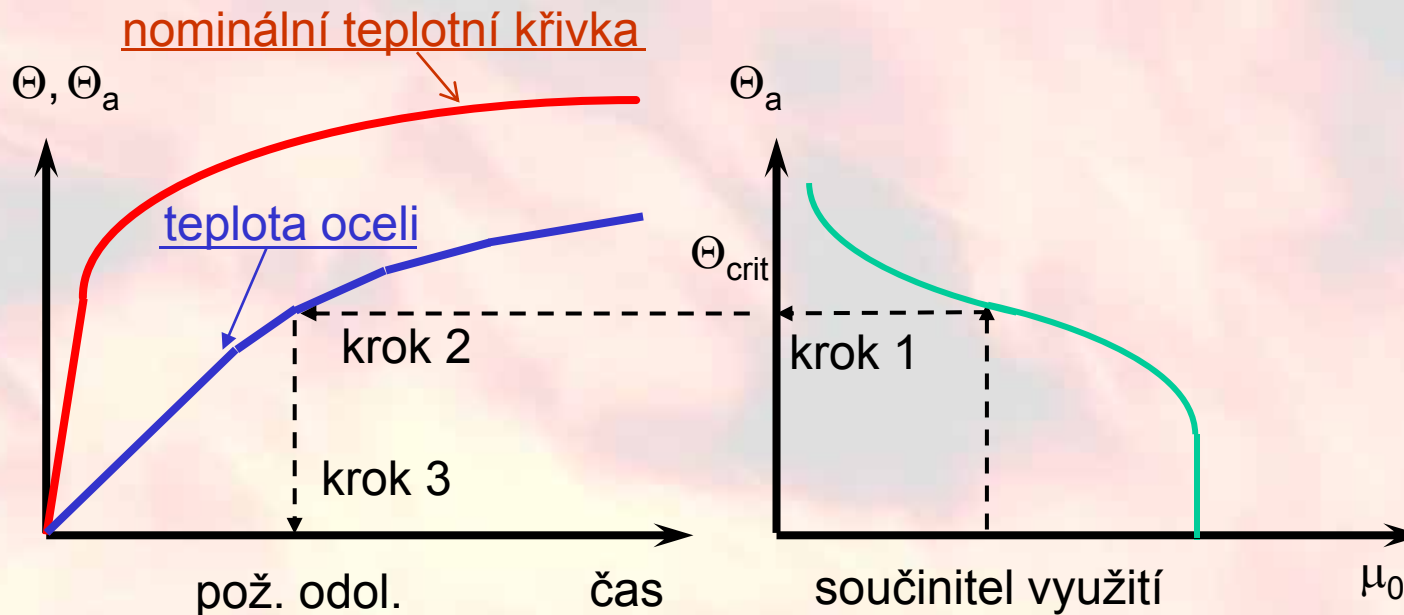
- Pouze nosná funkce
 - ⇒ Únosnost
- Rovnoměrné teplotní rozdělení
 - ⇒ Koncepce kritické teploty oceli

Pozn.: více v EN 1993-1-2 (zjednodušené výpočetní modely)

Požární odolnost ocelových prvků

Postup výpočtu

- Krok 1: určení mechanické odezvy $\mu_a \Rightarrow \Theta_{crit}$
- Krok 2: určení teplotní odezvy $\Rightarrow \Theta_a$
- Krok 3: určení požární odolnosti \Rightarrow požární odolnost



Teplotní zatížení

Přenos tepla na exponované straně

- přenos tepla sáláním:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4]$$

- přenos tepla prouděním:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_m \cdot (\Theta_g - \Theta_m)$$

kde:

Θ_r je teplota sálání [°C]

$\Rightarrow \Theta_{rad} \rightarrow \Theta_g \rightarrow$ požární křivka

Θ_m je teplota povrchu [°C]

\Rightarrow teplotní odezva

ε_m je emisivita povrchu [-]

\Rightarrow ocel: 0,7

α_c je souč. přestupu tepla prouděním $\Rightarrow 25 - 50 \text{ W/m}^2\text{K}$

(v závislosti na modelu požáru)

Φ je polohový faktor [-]

$\leq 1,0 \Rightarrow$ konzervativně: 1,0

σ je Stephan-Boltzmannova konstanta = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Pozn.: zjednodušeno!; podrobně viz EN 1991-1-2

Teplotní odezva Ocelové profily

$$\frac{\partial(\rho c \Theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x})}{\partial x} = 0$$

okrajové a počáteční podmínky

$$\frac{d \cup_d}{dt} = \frac{\dot{h}_{tot} A_m}{\rho_a c_a V}$$

kde

A_m je exponovaná plocha prvku [m^2/m]

V je objem prvku [m^3/m]

Pozn.: klíčové je rovnoměrné rozdělení teploty

Nárůst teploty v nechráněné konstrukci

Základní rovnice

$$\frac{d\Theta_a}{dt} = k_{sh} \frac{A_m/V}{\rho_a c_a} \cdot \dot{h}_{net,tot} \quad \dots (1)$$

$$\Delta\Theta_a = k_{sh} \frac{K_{bare} \cdot A_m}{\rho_a c_a V} \cdot (\Theta_g - \Theta_a) \cdot \Delta t \quad \dots (2)$$

Legenda:

$\Delta\Theta_a$: přírůstek teploty

Δt : časový interval

A_m/V : součinitel průřezu

K_{bare} : souč. přestupu tepla



k_{sh} : opravný součinitel zastínění

kde

$$K_{bare} = \alpha_c + \frac{\varepsilon_m \sigma \left[(\Theta_g + 273)^4 - (\Theta_a + 273)^4 \right]}{\Theta_g - \Theta_a} \quad \dots (3)$$

Vliv zastínění (shadow effect)

Základy

- Při tomto jevu dochází k místnímu zastínění a tím k zabránění sálání z důvodů tvaru ocelového profilu:
 - ✧  profily, vliv zastínění: ano
 - ✧  profily, vliv zastínění: ne

- Bez sálání k vlivu zastínění nedochází, proto:
 - ✧ nechráněné prvky, vliv zastínění : ano
 - ✧ chráněné prvky, vliv zastínění : ne

Vliv zastínění

Důsledky

➤ Nechráněné prvky:

$$\Delta \Theta_a = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

kde:

✧ pro I – profily:

$$k_{sh} = 0,9 [A_m/V]_{box} / [A_m/V]$$

✧ pro “všechny” ostatní profily:

$$k_{sh} = [A_m/V]_{box} / [A_m/V]$$

➤ Chráněné prvky: žádný vliv

Nárůst teploty v chráněné oceli

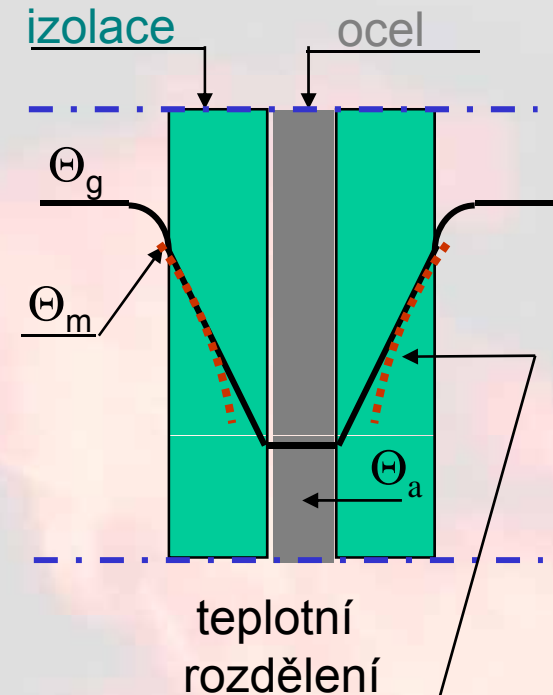
Základní vztahy

$$\Delta \Theta_a = \frac{K_{ins}}{\rho_a c_a} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot (\Theta_g - \Theta_a) \cdot \Delta t \quad \dots (a)$$

kde

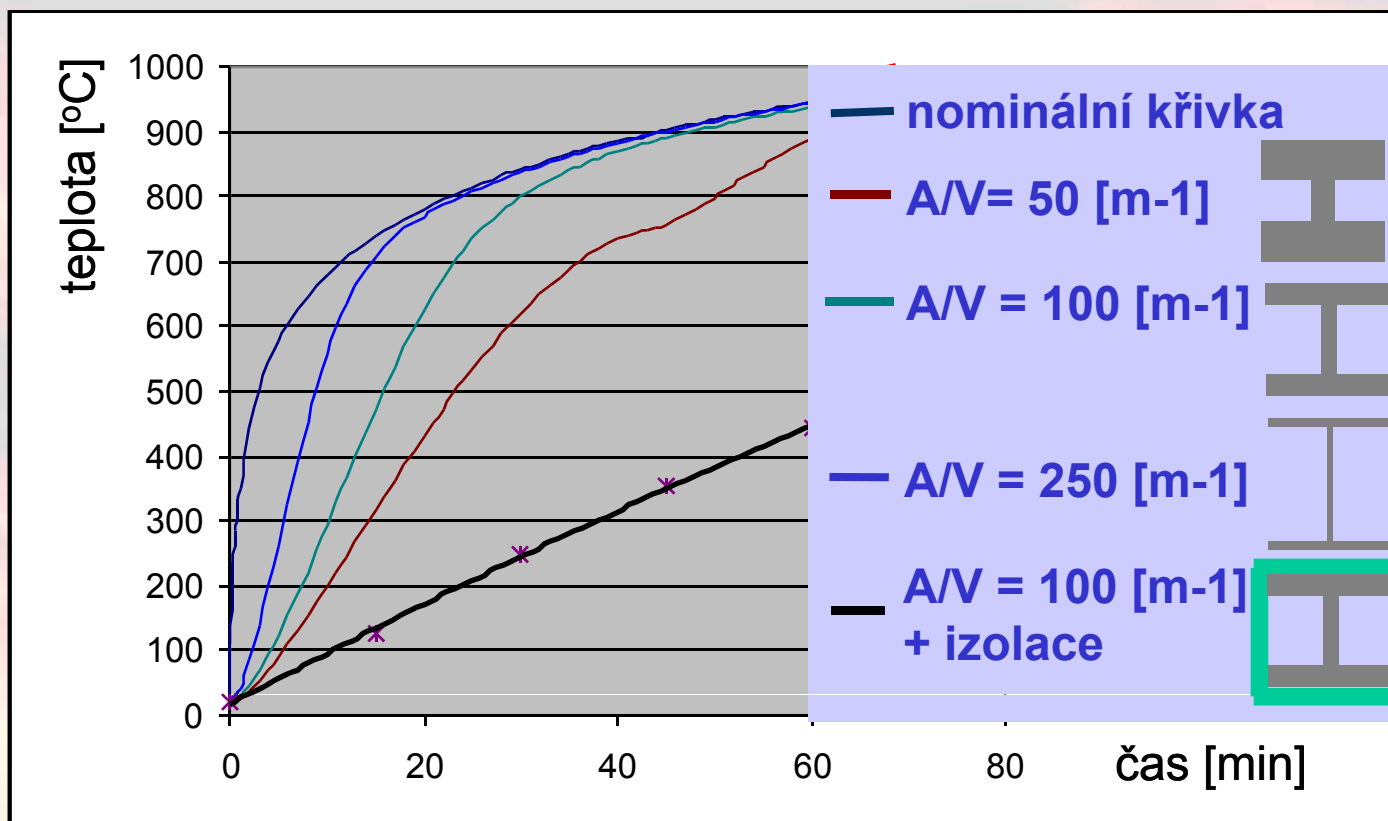
$$K_{ins} = K_{ins} \left(\frac{\lambda}{d}, \rho_p, c_p, \rho_a, c_a \right) \quad \dots (b)$$

Pozn.: (a) $\Theta_g - \Theta_m \ll \Theta_m - \Theta_a$
 (b) pro lehkou izolaci:
 $K_{ins} \approx \lambda/d$



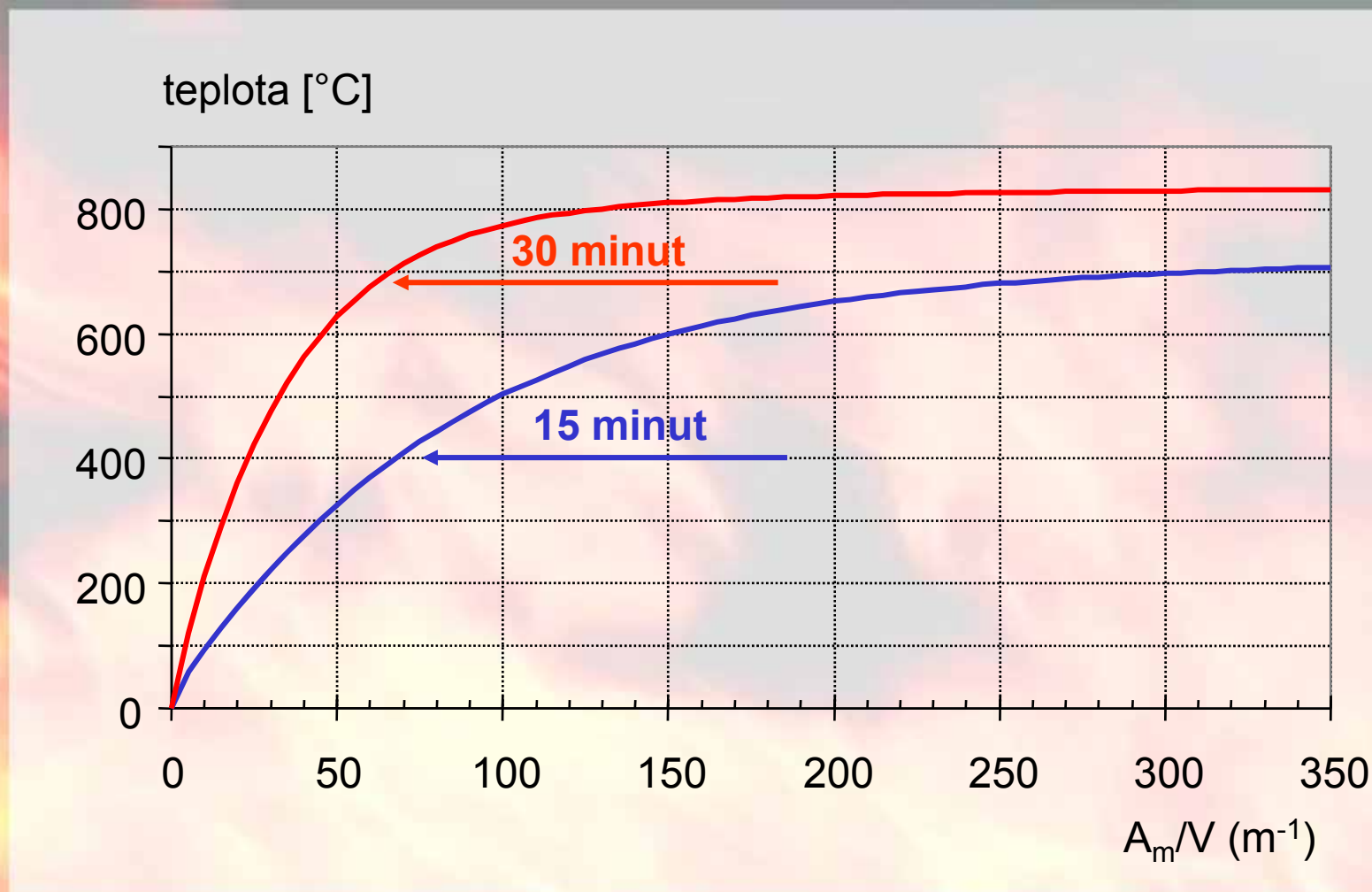
lineární část díky
 rozdílu v tepelných
 kapacitách

Rozvoj teploty v ocelových profilech



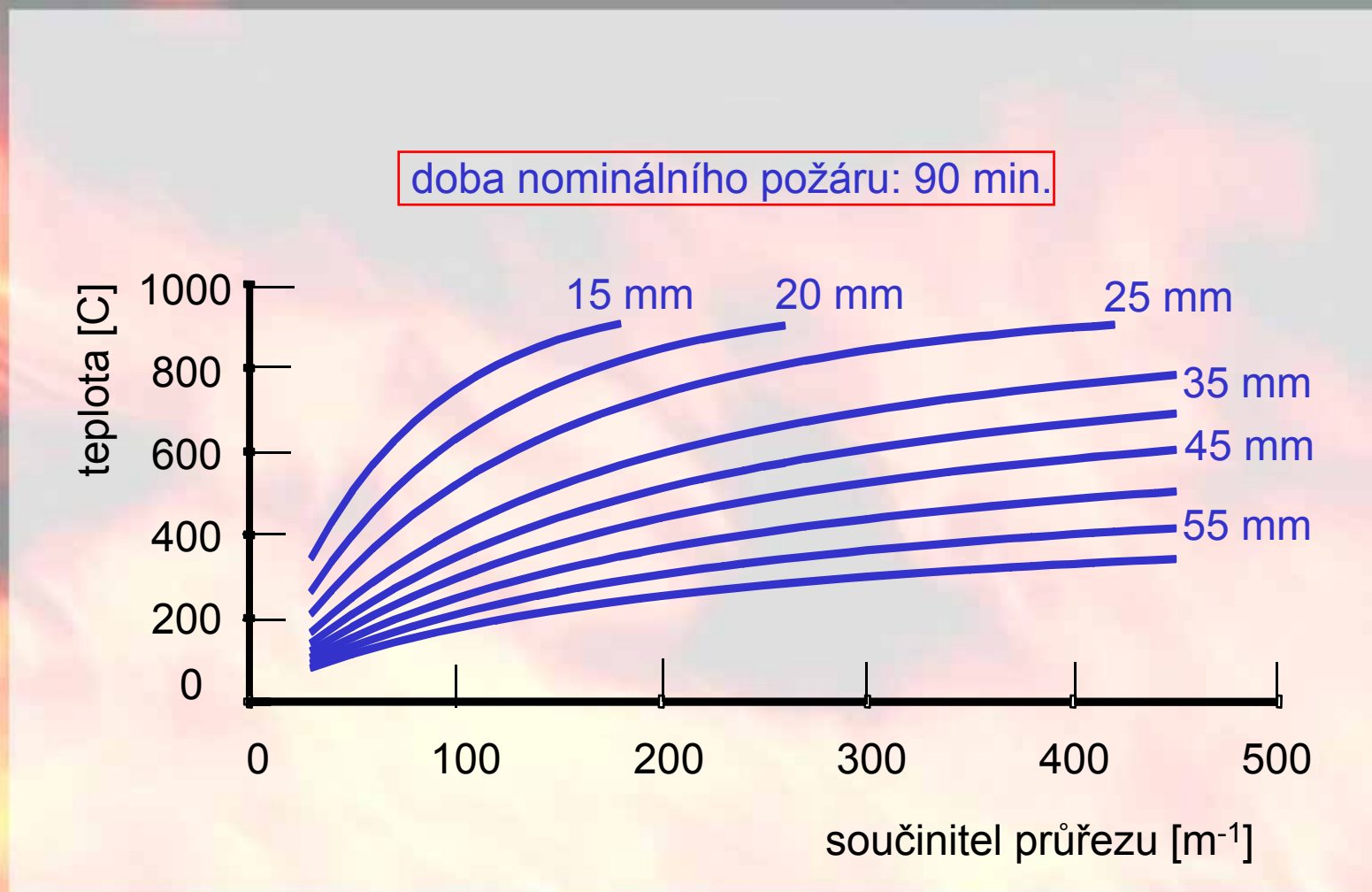
Teplota oceli v závislosti na součiniteli průřezu

Nechráněné ocelové profily



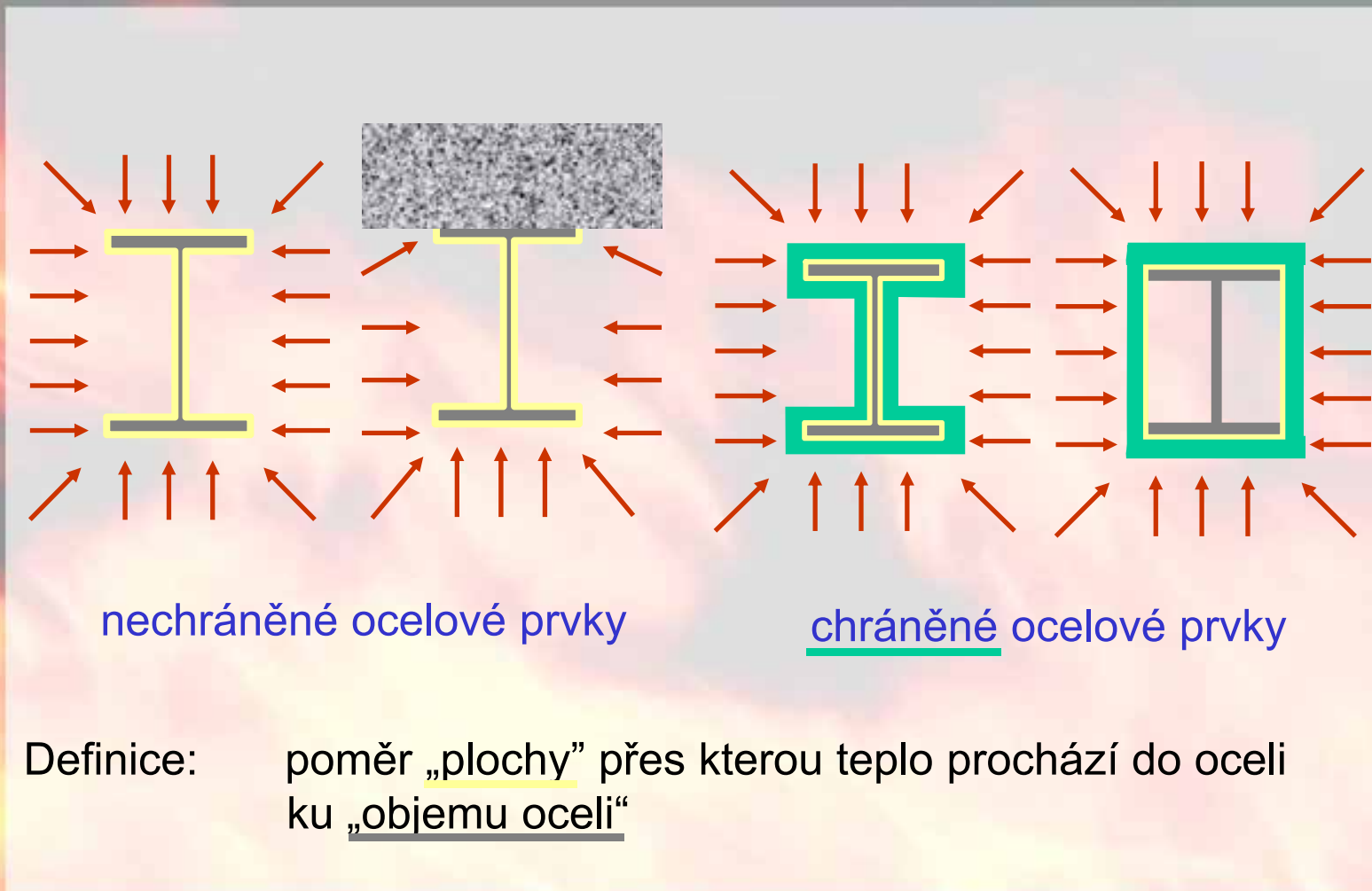
Teplota oceli v závislosti na součiniteli průřezu

Chráněné ocelové profily



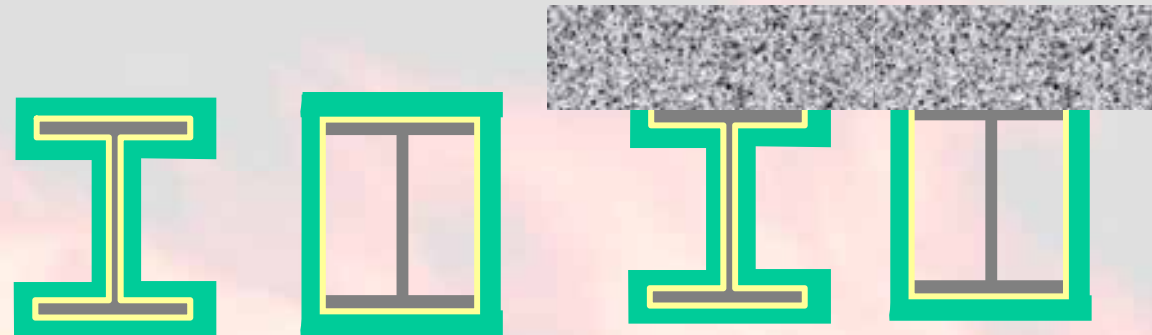
Součinitele průřezu pro ocelový profil

Koncepce



Součinitel průřezu (A/V)

Číselné příklady



IPE100	387	300	334	247
HE280A	165	113	136	84
HE320B	110	77	91	58

Pozn.: rozsah: $\approx 50 - 400 \text{ [m}^{-1}\text{]}$

Součinitel přestupu tepla

Chráněné ocelové prvky

- Aproximace: $K_{\text{ins}} \approx \lambda/d$ (pro lehkou izolaci)
kde: d je tloušťka izolačního materiálu
 λ je tepelná vodivost
- Určení: polo-empirický přístup
⇒ ENV 13381, str. 4

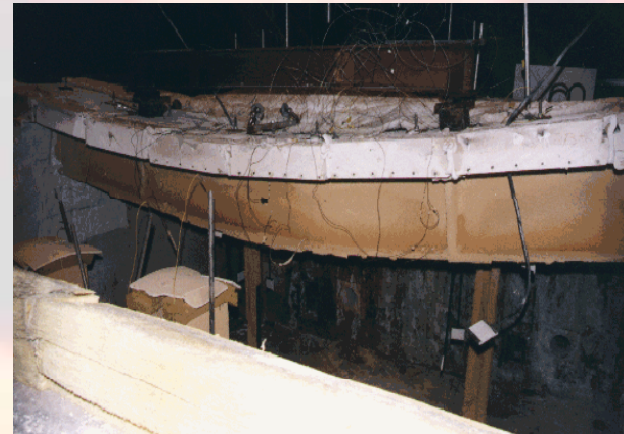
Pozn.: Při požárním návrhu nepoužívat tabulkové hodnoty pro běžnou teplotu při určování λ !

Zkoušky pro zjištění vlastností Požární ochrana ocelových prvků

- Účel: získání izolačních vlastností požární ochrany oceli
- Komplikace: „soudržnost“
- Metodika:
 - ✧ zatížený a nezatížený nosník (2 páry)
 - ✧ nezatížené sloupy (10 x)
- Podle EN 13381-4



nosník před zkouškou



nosník po zkoušce

Požárně ochranné systémy

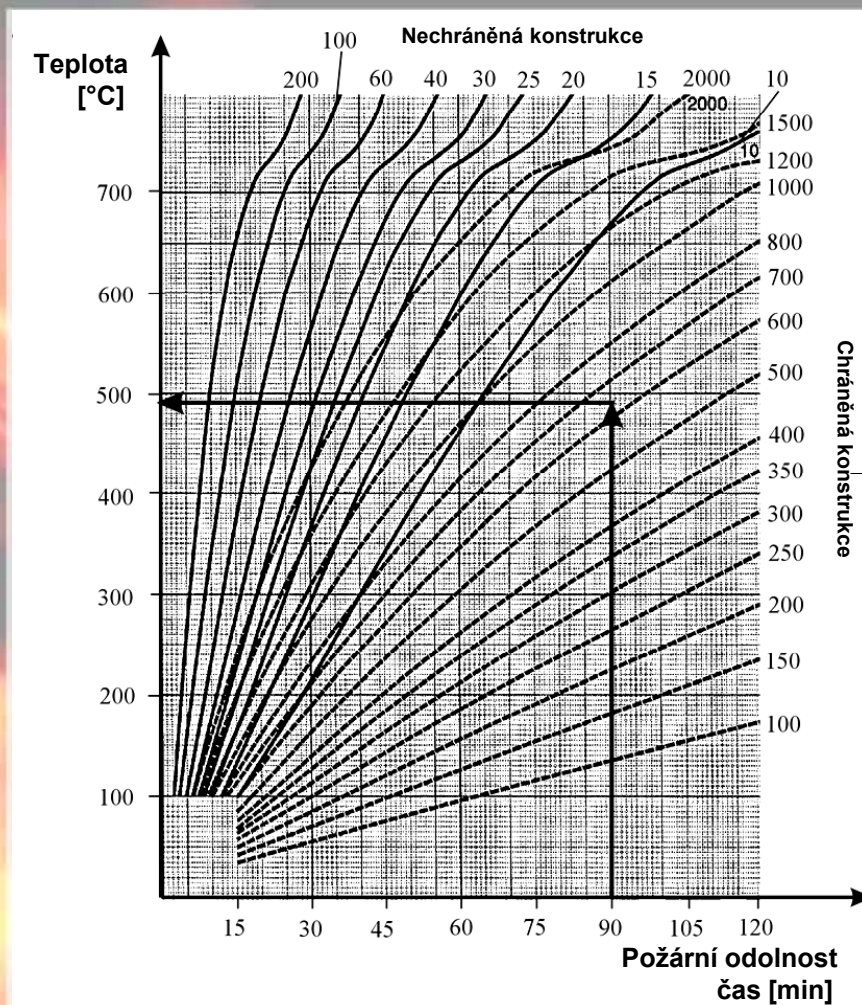
Možnosti

- Desky
- Nástříky
- Zpěňující nátěry

- Clony
 - ✧ ochrana vodorovných prvků (→ stropní konstrukce)
(EN 13381-1)
 - ✧ ochrana svislých prvků (→ přepážky)
(EN 13381-2)

Pozn.: získání podrobností o vlastnostech požární izolace:
(a) protokoly ze zkoušek v laboratořích
(b) informace výrobců

Evropské nomogramy



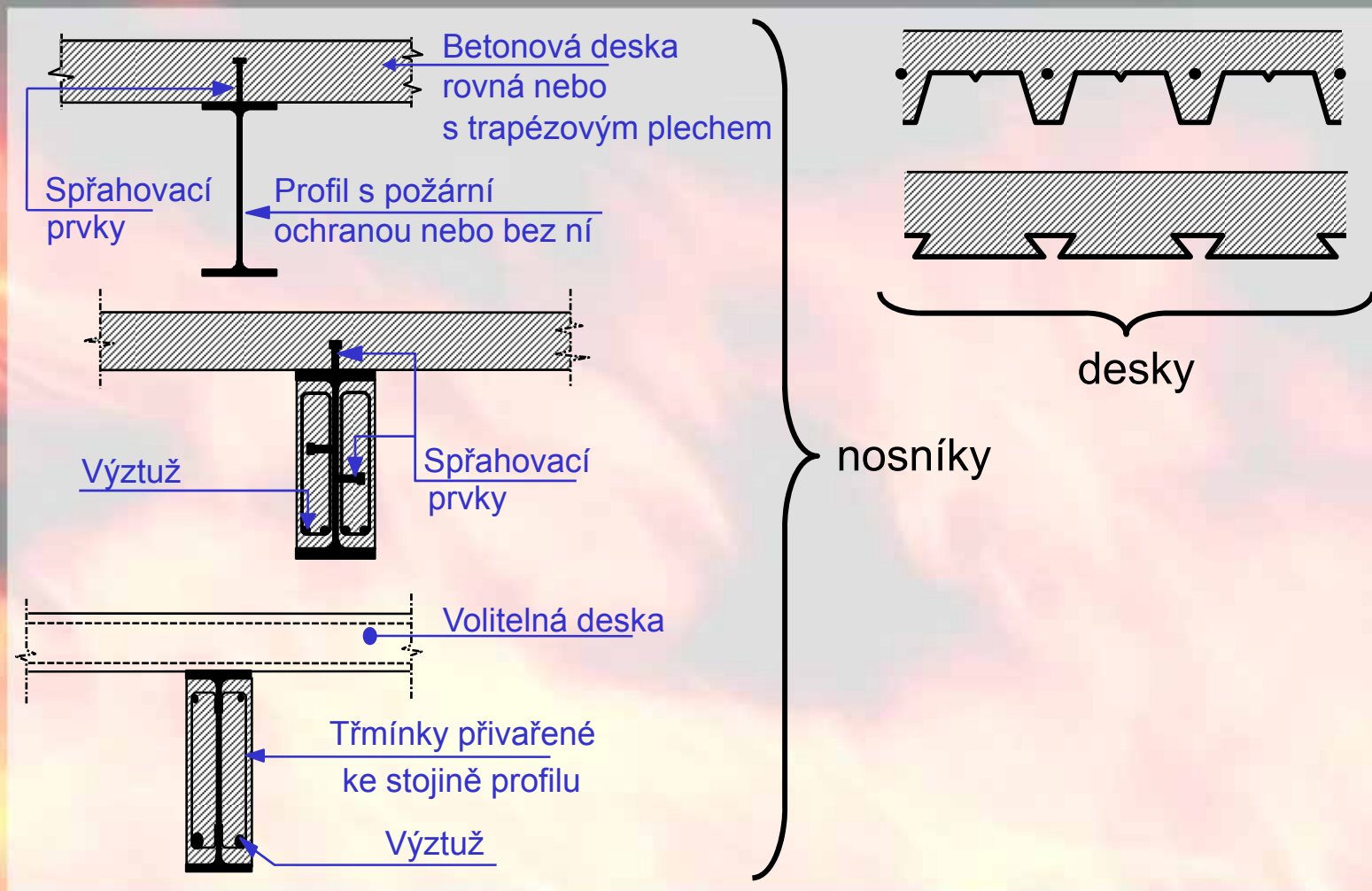
Ize využít jako první odhad pro chráněnou ocelovou konstrukci

Pravidla výpočtu pro ocelobetonové prvky

- Úvod
- Teplotní odezva ocelových sloupů s betonem mezi pásnicemi
- Ověření kriteria izolace u ocelobetonových desek
- Teplota v přídatné výztuži v ocelobetonových deskách
- Teplotní odezva betonem vyplněných sloupů uzavřených průřezů
- Zhodnocení

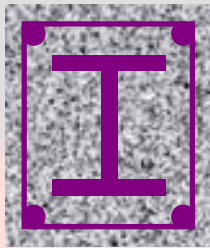
Ocelobetonové nosníky a desky

Možnosti

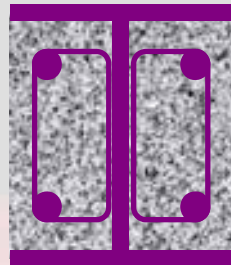


Ocelobetonové sloupy

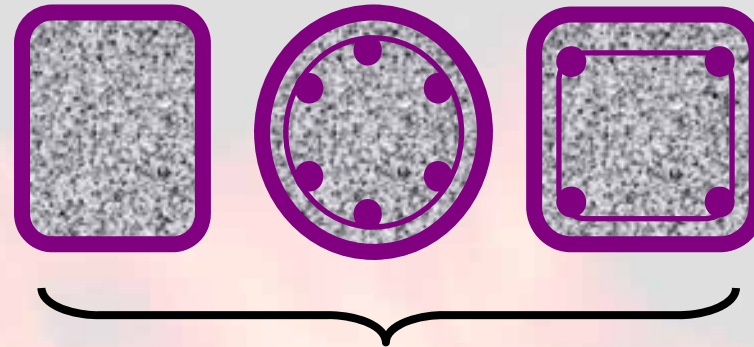
Možnosti



(a)



(b)



(c)

- a: obetonovaný ocelový profil (tradiční přístup)
b: beton mezi pásnicemi (p.o. závisí na výztuži)
c: vybetonovaný uzavřený profil
- bez výztuže (p.o. cca. 30 minut nebo méně)
- s výztuží (p.o. závisí na výztuži)

Pozn.: p.o. znamená požární odolnost

Výpočetní postup teplotní odezvy Ocelobetonové prvky

- Nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu

- Nosná a dělící funkce
 - ✧ Únosnost
 - ✧ Tepelně izolační schopnost
 - ✧ Celistvost

- Možnosti
 - ✧ tabulkové hodnoty
 - ✧ zjednodušený výpočetní model
 - ✧ pokročilý výpočetní model

Pozn.: podrobnosti v EN 1994-1-2

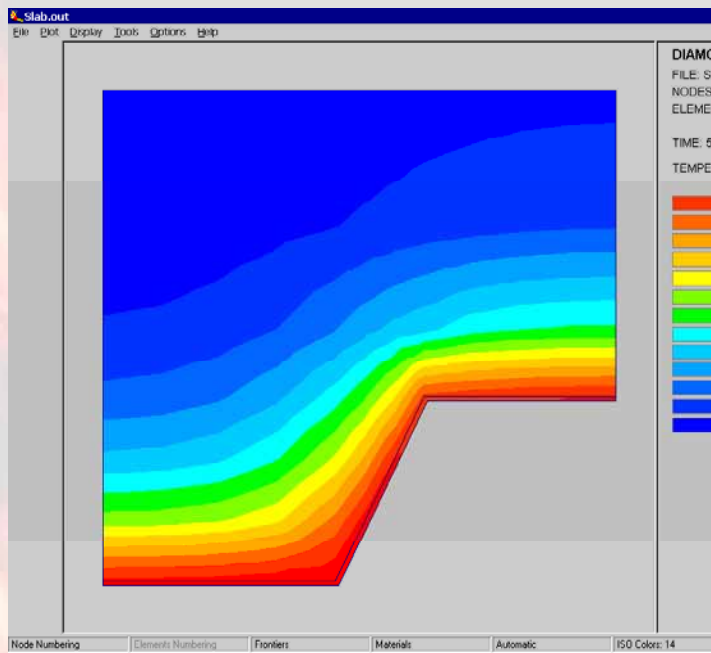
Ocelobetonové prvky

Výpočetní pravidla pro teplotní odezvu

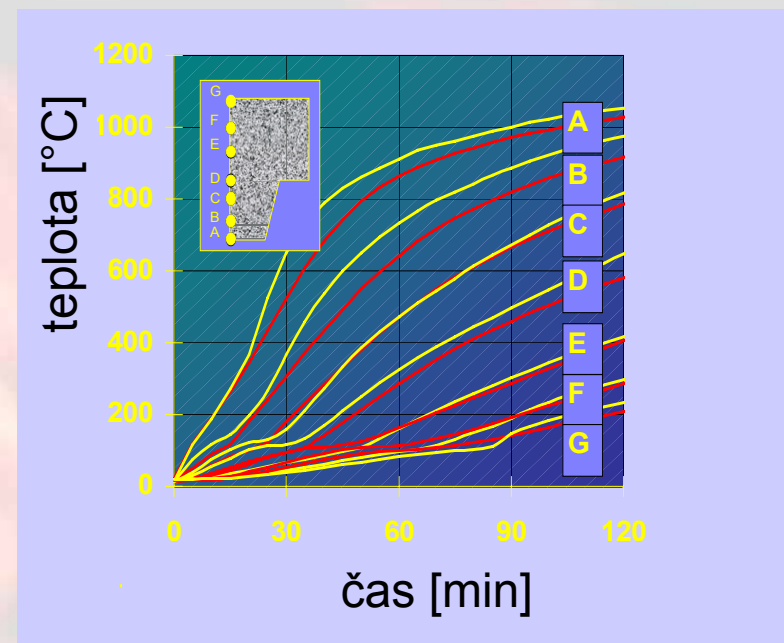
- Podobně jako u betonových prvků
- Komplikace kvůli tvaru
- Dostupná zjednodušená výpočetní pravidla
 - ✧ různé podklady
 - ✧ viz EN 1994-1-2

Teplotní odezva ocelobetonových prvků

Pokročilý model (ukázka)



počítačová simulace



porovnání zkoušek s teorií

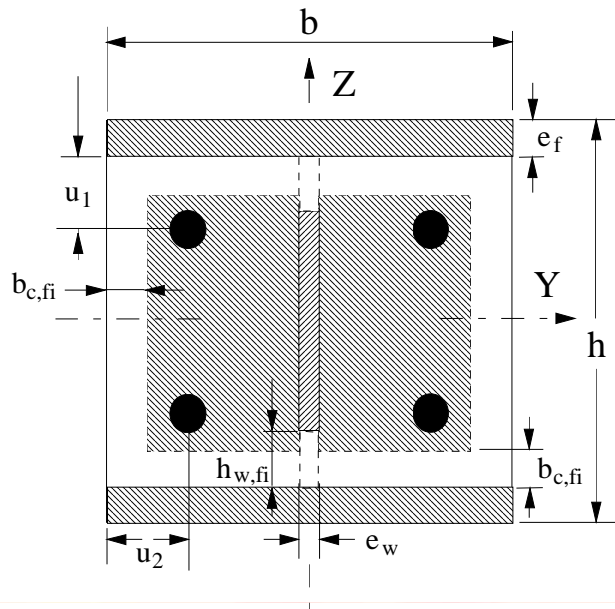
Ocelobetonové prvky

Zjednodušené modely tepelné odezvy

- Polo-empirický přístup
- Parametrická studie založená na podrobných výpočtech za pomoci pokročilých výpočetních modelů
- Přímá aplikace pokročilých výpočetních modelů

Zjednodušené výpočetní modely

Polo-empirický přístup



Redukovaný průřez

Části průřezu:

- pásnice ocelového profilu
- stojina ocelového profilu
- beton
- výztuž

Pro každou část:

- redukce únosnosti
- a/nebo
- redukce plochy

Podrobněji v EN 1994 -1-2

Zjednodušené výpočetní modely

Parametrická studie

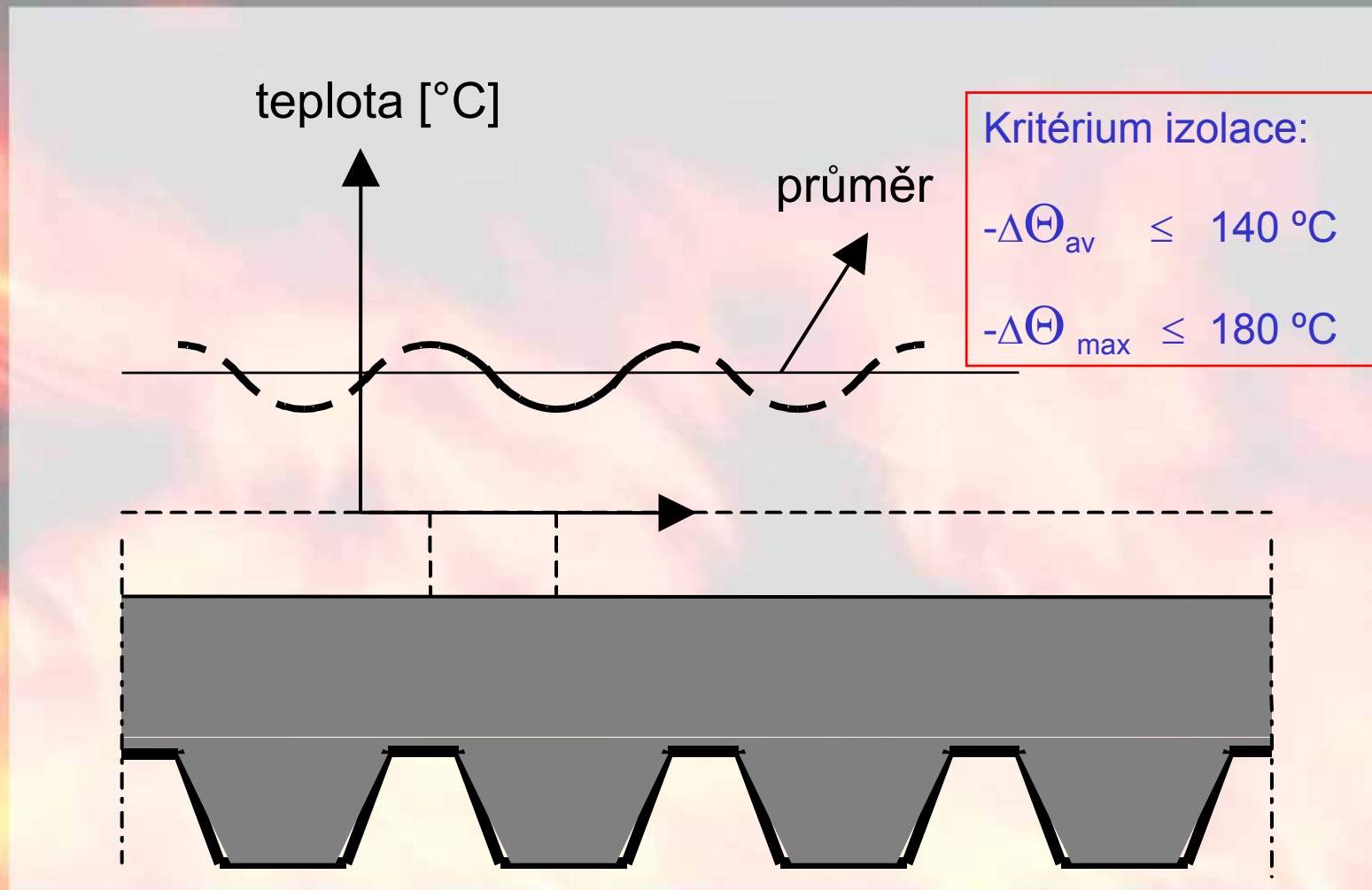
➤ Ocelobetonové desky s profilovaným plechem

Typ plechu	Tloušťka desky H_B [mm]	Typ betonu
samosvorný (6x)	50, 60, 70, 80,	normální a lehčený podle ENV 1994-1-1
trapézový (49x)	90, 100, 110, 120	

- nominální teplotní křivka
- započítán tvar profilovaného plechu
- tepelné vlastnosti podle EN
- průměrná vlhkost: 4% (normální beton) a 5% (lehčený beton)

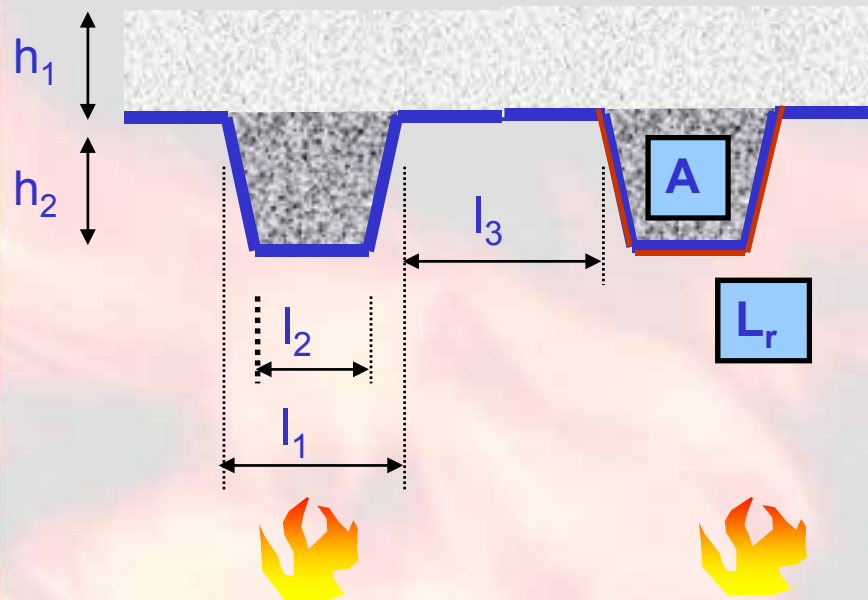
Pozn.: celkový počet simulací: 880

Typické rozdělení teploty na neexponované straně ocelobetonové desky



Ocelobetonové desky

Teplotní izolace (ukázka)



Neznámé:

$$t_f = t_f(l_1, l_2, \dots, A/L_r, \phi)$$

kde:

l_1, l_2, \dots geometrie desky
 A objem žebra
 L_r povrch žebra
 ϕ polohový faktor

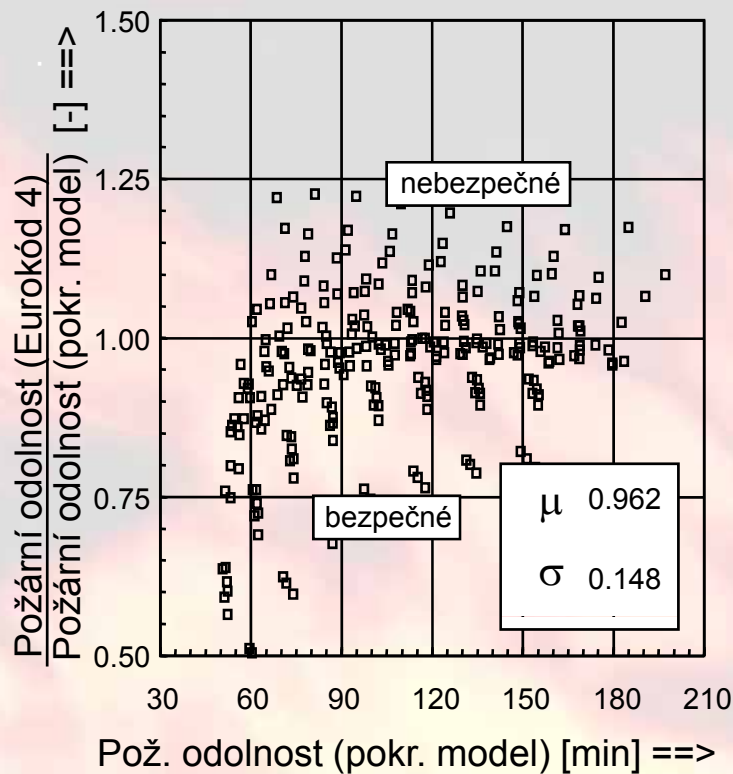
$$t_f = a_0 + a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot \phi + a_3 \cdot A/L_r + a_4 \cdot 1/L_3 + a_5 \cdot A/L_r \cdot 1/l_3 \quad [\text{min}]$$

kde:

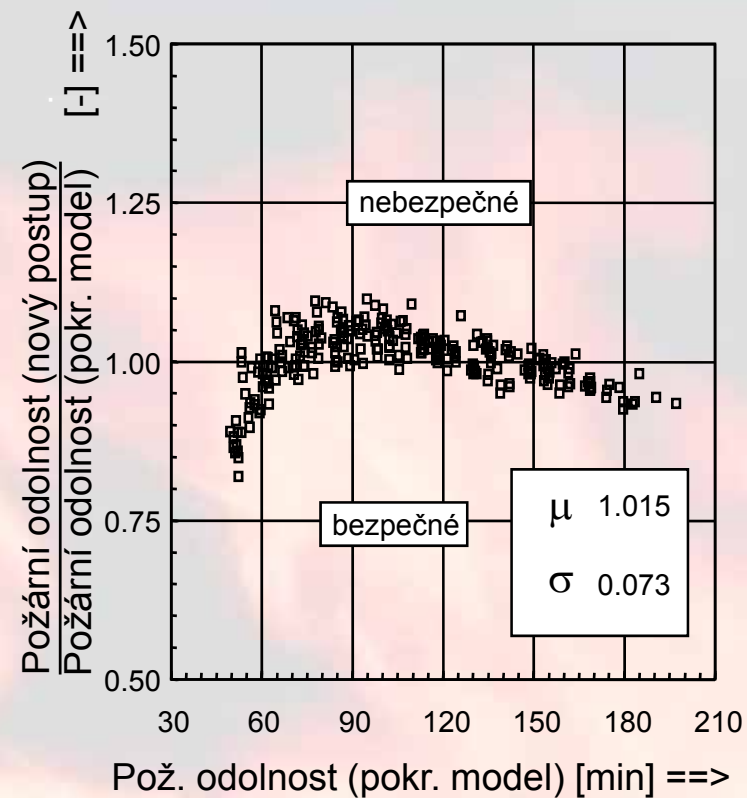
a_i součinitele závislé na době vystavení nominálnímu požáru

Teplotní izolace ocelobetonových desek

Ověření zjednodušeného postupu



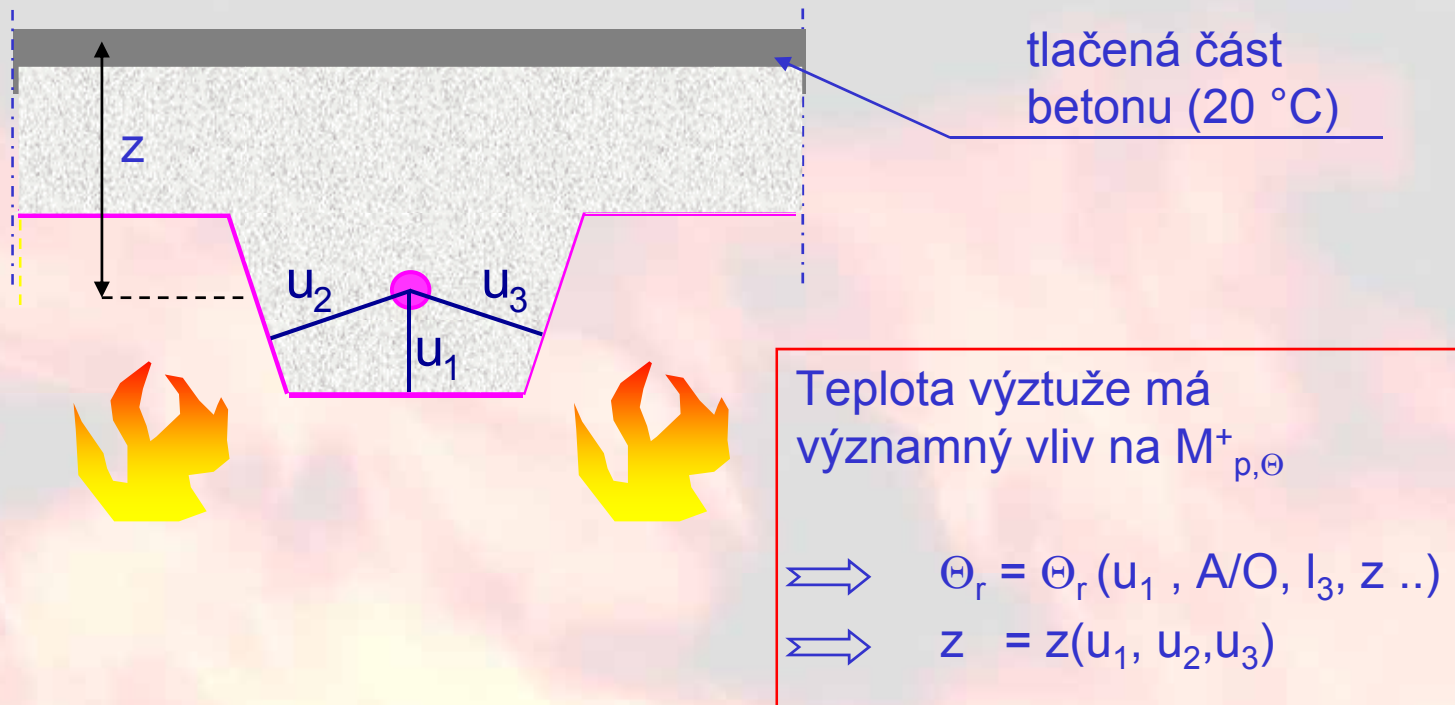
a) postup podle ENV



(b) nový postup

Ocelobetonové desky

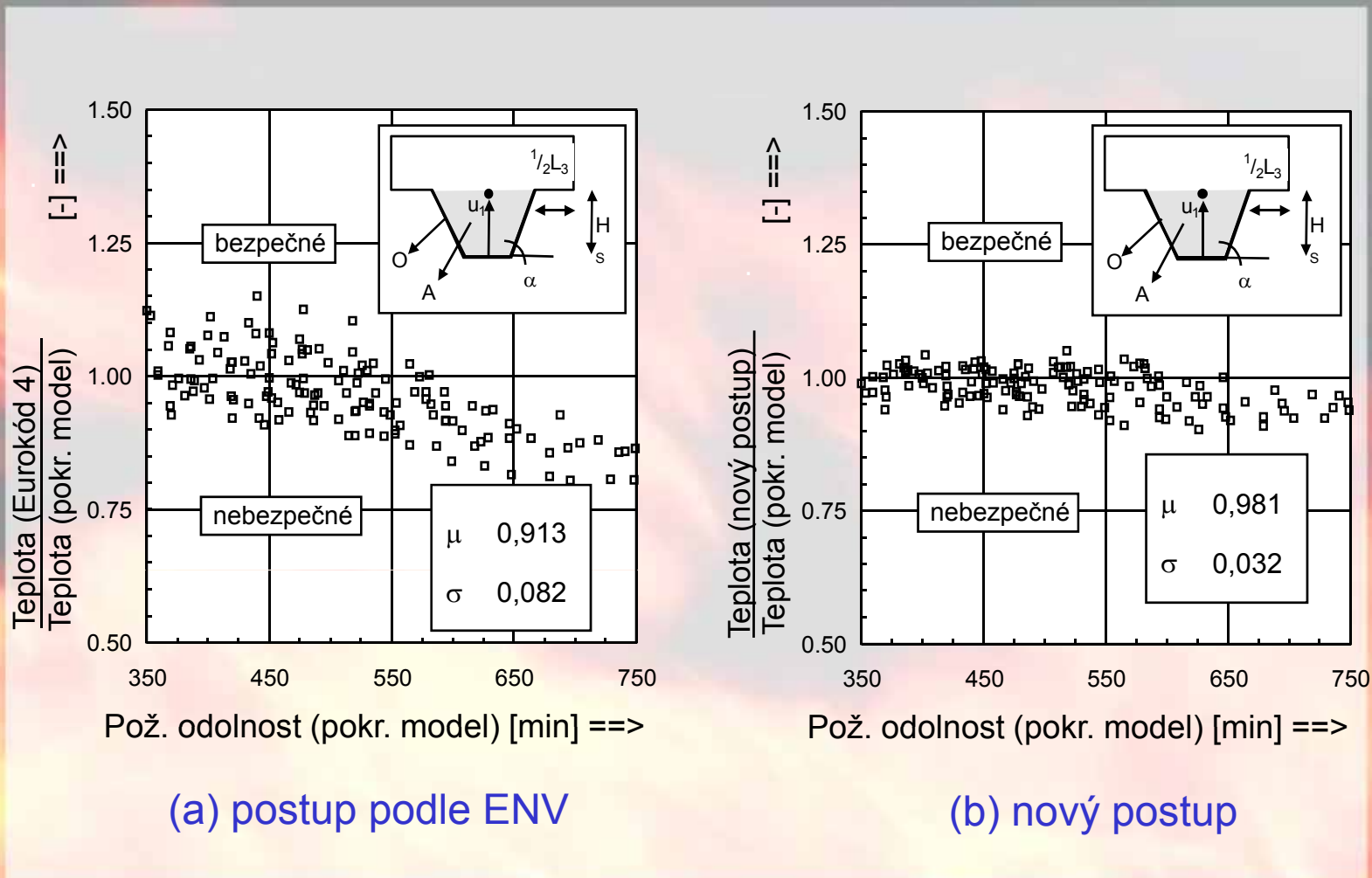
Teplotní odezva výztuže v oblasti kladných momentů



Pozn.: ocelový plech může významně přispívat k celkové únosnosti!

Teplotní odezva výztuže v oblasti kladných M

Zjednodušený výpočetní postup

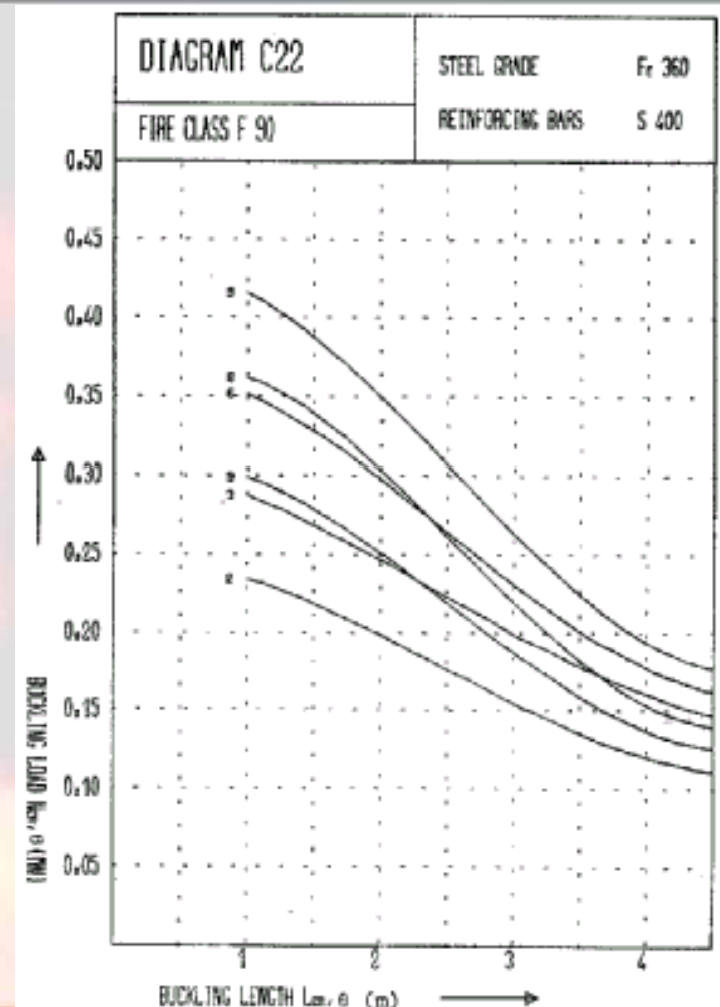
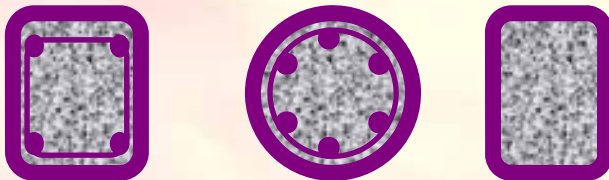


Uzavřené průřezy vyplněné betonem

Požární odolnost (tradiční přístup)

- Dostupné návrhové grafy
- Nepraktické
- Potřeba návrhového nástroje
- ⇒ např. POTFIRE

č.	kvalita betonu	% vyztužení
1	C20	1,0
2	C20	2,5
3	C20	4,0
4	C30	1,0
5	C30	2,5
6	C30	4,0
7	C40	1,0
8	C40	2,5
9	C40	4,0



POTFIRE

Vstup a výstup

PotFire

Section

Type of section: Circular

Dimensions of steel section

Diameter: 323.9 mm

Wall thickness: 6 mm

Reinforcement bars

By nr of bars By %

Re-bars : # 4 20 mm

Concrete covering from rebars axis: 30 mm

Equal to: 1.645 %

Buckling length

Buckling length: 3 m

Material characteristics

Yield strength of steel section: 355 N/mm²

Yield strength of re-bars: 500 N/mm²

Compressive strength of concrete (cylinder at 28 days): 30 N/mm²

Eccentricity of the load

Eccentricity \perp to buckling axis: 0 mm

Calculation of

Ultimate load Fire resistance duration

Fire duration: 30 min

Result

Non-dimensional slenderness: 0.4185

Ultimate load: 2912 kN

pot1.txt - Notepad

Calculation nr 18

Section :

Type of Section : Square

Width : 240 mm

Wall thickness : 8 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars :

- In the corner : 4

Diameter : 24 mm

- In the mid-size : None

Percentage of re-bars : 3.739 %

Concrete covering : 40 mm

Buckling length : 1.8 m

Material characteristics :

Steel section : 275 N/mm²

Reinforcement bars : 500 N/mm²

Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 90 min

Result :

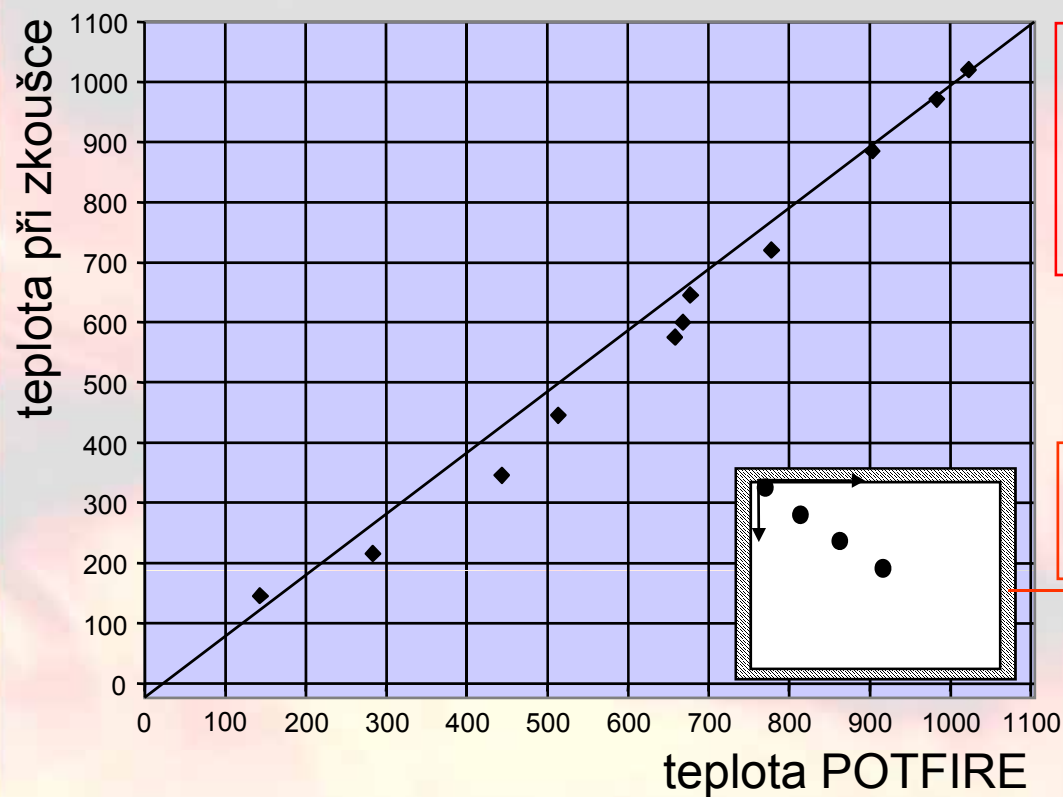
NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .2718

ULTIMATE LOAD : 618 kN

vstup ↑

výstup →

Ověření modelu programu POTFIRE



předpoklady:

- $\alpha_{\text{conv}} = 25 \text{ W/m}^2\text{k}$

- $\varepsilon_{\text{res}} = 0,7$

Vybetonovaný
uzavřený průřez

Ocelobetonové prvky

Zhodnocení teplotní odezvy

- Teplotní odezva je poměrně komplikovaná
- Jsou k dispozici zjednodušené ověřovací postupy*):
 - ✧ tabulkové hodnoty
 - ✧ návrhové grafy
 - ✧ specializované počítačové programy (např. POTFIRE)
- Alternativa: „pokročilé“ výpočetní modely
 - ✧ vhodné pro koncepci odolnosti vůči přirozenému požáru

*) „Zjednodušené postupy“ mají omezenou oblast použití!

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
- Výjimkou je kritická teplota tenkostěnných konstrukcí
(viz třetí lekce DIFISEK+)

ČSN EN 1994-1-2 (ocelobetonové konstrukce)

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

Děkuji za pozornost

jiri.chlouba@fsv.cvut.cz
URL: fire.fsv.cvut.cz/difisek

