

133YBEX
Beton v extrémních podmínkách

Beton vystavený vysokým teplotám

Radek Štefan

E-mail: radek.stefan@fsv.cvut.cz

Web: <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/>

ČVUT v Praze, Fakulta stavební
katedra betonových a zděných konstrukcí

Obsah přednášky

- Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb
- Teplotní analýza požárního úseku
- Teplotní analýza konstrukce
- Vlastnosti betonu a výztuže při zvýšených teplotách
- Návrhové přístupy
- Tabulkové posouzení požární odolnosti
- Odštěpování betonu
- Ukázky vlastního experimentálního výzkumu

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární ochrana

Dvě základní složky požární ochrany [6]:

- Požární prevence - předcházení vzniku požáru, omezení rozsahu a následků vzniklého požáru
- Požární represe - účinné zdolávání požáru

Řešení požární bezpečnosti staveb patří do oblasti požární prevence.

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární bezpečnost staveb

Norma ČSN 73 0802 definuje požární bezpečnost jako:

„schopnost stavebních objektů bránit ztrátám na životech a zdraví osob, popř. zvířat a ztrátám na majetku v případě požáru“.

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární bezpečnost staveb

Pro zajištění požární bezpečnosti staveb se využívají [6]:

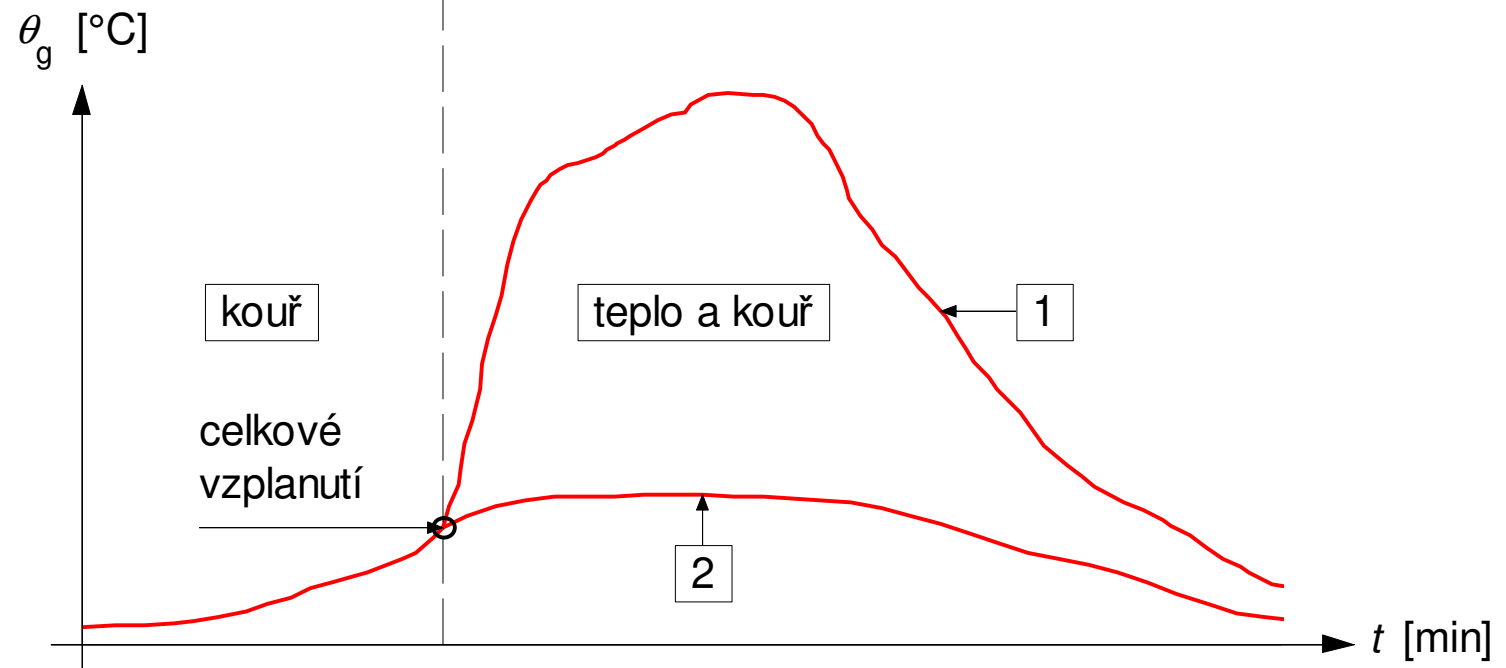
- Aktivní protipožární opatření
 - samočinná stabilní hasicí zařízení
 - zařízení dálkového přenosu informací
 - zařízení pro odvod kouře a tepla
 - elektrická požární signalizace
 - jednotky hasičského záchranného sboru
- Pasivní protipožární opatření
 - dělení na požární úseky
 - požární odolnost nosných, požárně dělicích a obalových konstrukcí
- Jejich kombinace

Aktivní požární ochrana

- samočinná stabilní hasicí zařízení
- zařízení dálkového přenosu
- zařízení pro odvod kouře a tepla
- elektrická požární signalizace
- jednotky hasičského záchranného sboru

Pasivní požární ochrana

- dělení na požární úseky
- požární odolnost nosné konstrukce
- požární odolnost požárně dělicích konstrukcí
- požární odolnost obalových konstrukcí



- 1 teplota v požárním úseku při plně rozvinutém požáru v případě selhání aktivních protipožárních opatření
- 2 teplota v požárním úseku pro nerozvinutý požár při užití aktivních protipožárních opatření

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Video - příklady rozvoje požáru:

1) obývacího pokoj - požár od vánočního stromku
(zdroj: www.youtube.com/watch?v=fsaLCdC3iWw)

2) obývacího pokoj - požár od pohovky
(zdroj: www.youtube.com/watch?v=QqMvm72FMRk)

3) ložnice - požár od vysoušeče vlasů
(zdroj: www.youtube.com/watch?v=ezJ6SorlpJo)

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požárně bezpečnostní řešení

- Nedílná součást stavební dokumentace
- Podrobné zhodnocení požadavků na požární bezpečnost objektu, prokázání splnění těchto požadavků včetně návrhu jednotlivých požárně bezpečnostních opatření

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požárně bezpečnostní řešení

- Zahrnuje [2]:
 - seznam podkladů
 - popis stavby
 - rozdělení stavby do požárních úseků
 - stanovení požárního rizika, stanovení stupně požární bezpečnosti
 - posouzení velikosti požárních úseků
 - **zhodnocení navržených stavebních konstrukcí** a požárních uzávěrů z hlediska jejich požární odolnosti
 - zhodnocení navržených stavebních hmot
 - zhodnocení možnosti provedení požárního zásahu, evakuace
 - stanovení a zhodnocení odstupových a bezpečnostních vzdáleností
 - vymezení požárně nebezpečného prostoru
 - určení způsobu zabezpečení stavby požární vodou
 - vymezení zásahových cest

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požárně bezpečnostní řešení

- zhodnocení příjezdových komunikací a nástupních ploch
- stanovení počtu, druhů a způsobu rozmístění hasicích přístrojů
- zhodnocení technických a technologických zařízení stavby
- stanovení zvláštních požadavků
- posouzení požadavků na zabezpečení stavby požárně bezpečnostními zařízeními
- stanovené rozsahu a způsobu rozmístění výstražných a bezpečnostních značek a tabulek
- výkresy požární bezpečnosti

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární odolnost konstrukce

Zhodnocení požární odolnosti navržených stavebních konstrukcí je důležitou součástí požárně bezpečnostního řešení budovy.

Norma ČSN 73 0802 definuje požární odolnost jako dobu *„po kterou je konstrukce schopna odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení její funkce“*.

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární odolnost konstrukce

Zhodnocení požární odolnosti = porovnání **skutečné požární odolnosti** konstrukce s **požadovanou požární odolností**

Požadovaná požární odolnost se určí s ohledem na [1]:

- výpočtové požární zatížení požárního úseku
- druh konstrukčního systému budovy (nehořlavý, smíšený, hořlavý)
- požární výšku objektu, ve kterém se požární úsek nachází

Skutečná požární odolnost se stanoví:

- zkouškou požární odolnosti
- výpočtem (případně s využitím tabulkových hodnot)
- kombinací zkoušek a výpočtů

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární odolnost konstrukce

V současnosti se pro stanovení skutečné požární odolnosti konstrukcí využívají výhradně evropské návrhové normy (Eurokódy) řady **ČSN EN 199x-1-2** (+ příslušné základní normy).

- zatížení ČSN EN 1991-1-2
- beton ČSN EN 1992-1-2
- ocel ČSN EN 1993-1-2
- ...
- zdivo ČSN EN 1996-1-2
- ...

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární odolnost konstrukce

Označuje se

- písmennou značkou - vyjadřuje funkci (vlastnost) konstrukce, ke které se hodnota odolnosti vztahuje
- číselnou hodnotou - udává dobu požární odolnosti v minutách

např. **R 60**

Označení požární odolnosti se může dále doplňovat označením druhu konstrukce z hlediska použitých materiálů (DP1, DP2, DP3), případně také označením požární křivky, ke které se příslušná hodnota vztahuje (např. „ef“ pro křivku vnějšího požáru, „HC“ pro uhlovodíkovou křivku apod).

Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Požární odolnost konstrukce

Základní kritéria požární odolnosti

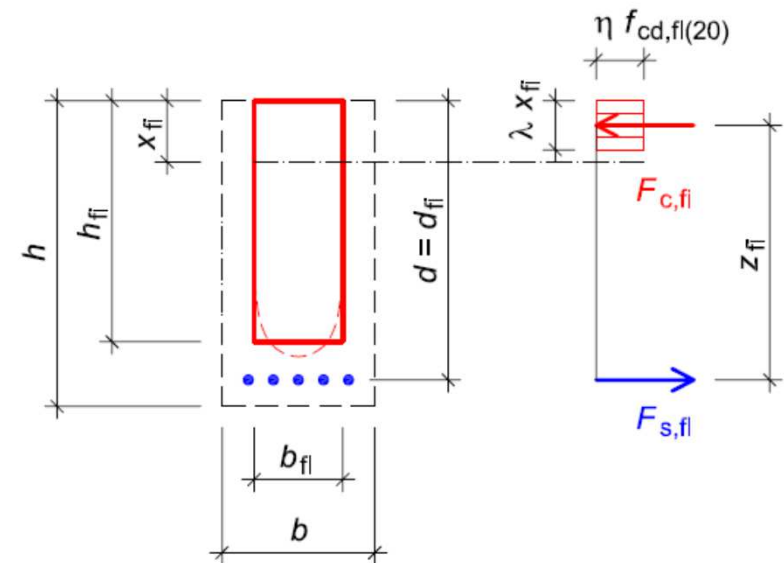
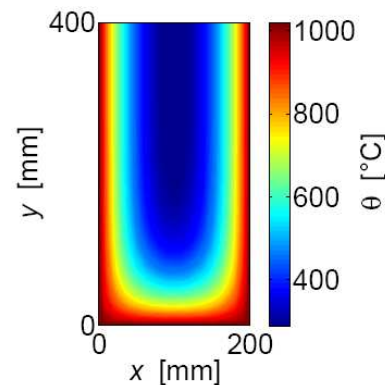
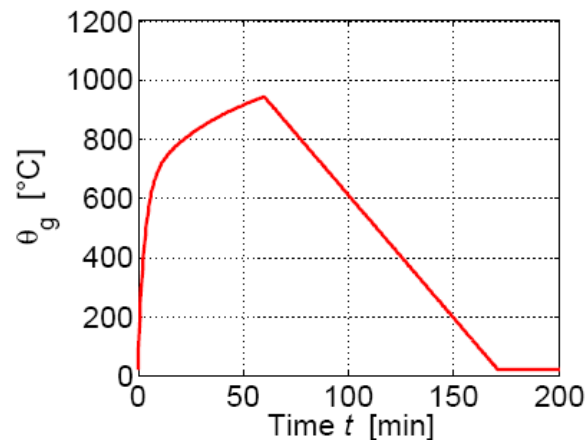
- R kritérium únosnosti
- E kritérium celistvosti
- I kritérium izolační schopnosti
- M kritérium mechanické odolnosti vůči nárazu

Spojením kritérií EI se vyjadřuje **požárně dělicí funkce** konstrukce.

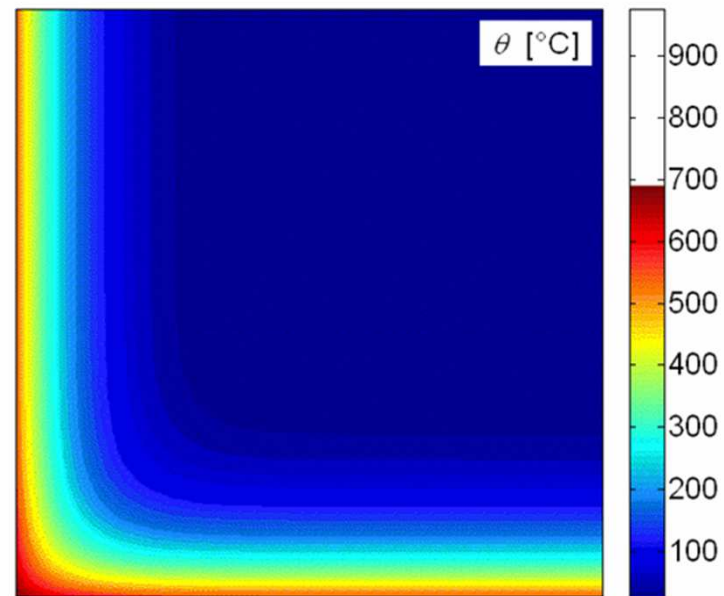
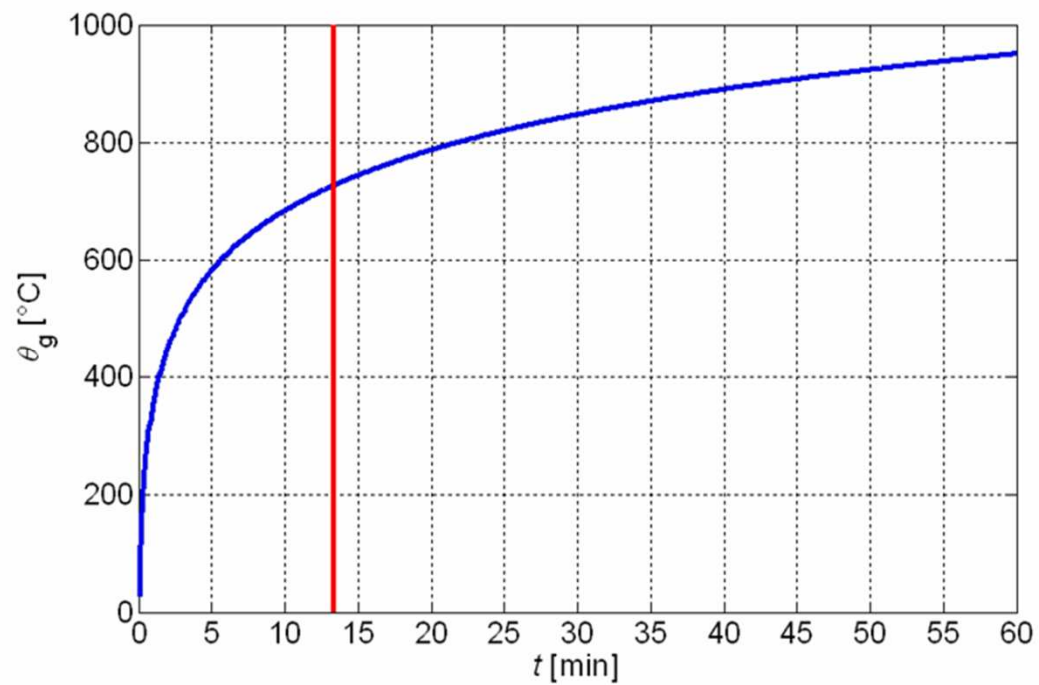
Úvod do problematiky požární bezpečnosti staveb

Postup návrhu (resp. posouzení) konstrukce na účinky požáru

- teplotní analýza požárního úseku
- teplotní analýza konstrukce
- vlastní návrh (resp. posouzení)



Teplotní analýza požárního úseku



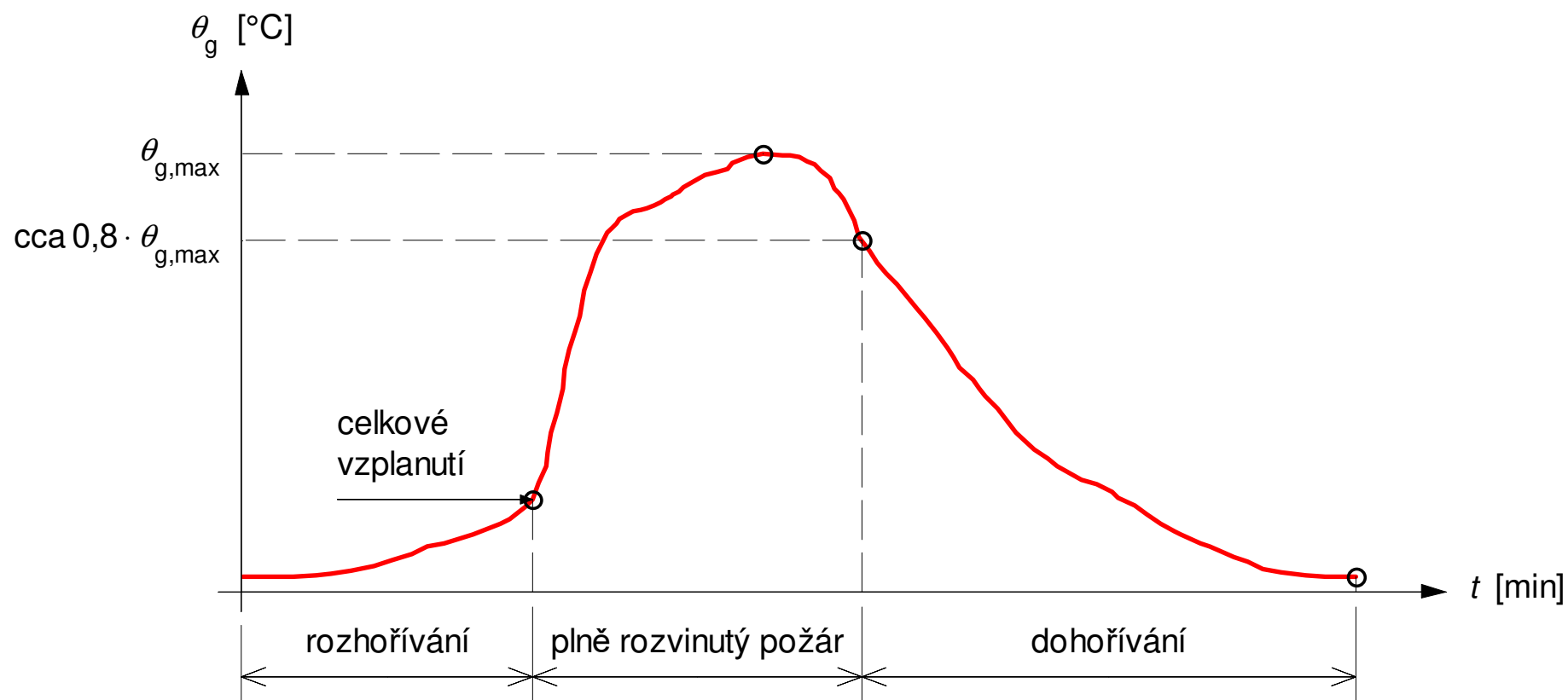
Teplotní analýza požárního úseku

Požární odolnost konstrukce

- Stanovení rozvoje požáru v požárním úseku pro účely návrhu:
požární riziko →
→ **návrhový požární scénář, příslušný návrhový požár**
- Rozvoj požáru se obvykle popisuje časovou závislostí teploty plynů v požárním úseku - tzv. **teplotní křivkou**
- Kromě teploty se v některých případech sleduje časová závislost dalších veličin (tlaku, rychlosti zahřívání, složení plynů)

Teplotní analýza požárního úseku

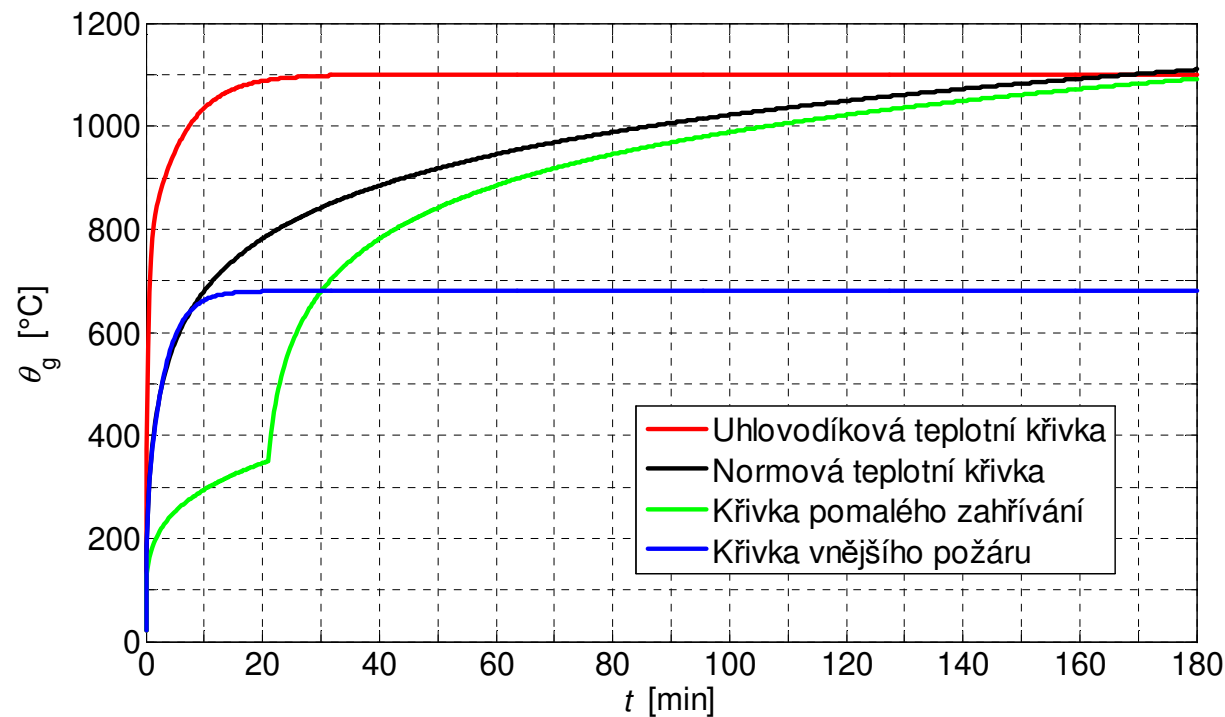
Příklad teplotní křivky popisující skutečný průběh teploty plynů v požárním úseku, fáze rozvoje požáru



Teplotní analýza požárního úseku

Nominální teplotní křivky

- nejjednodušší modely požáru
- definují teplotu plynů v požárním úseku pouze jako funkci času trvání požáru, popisují fázi plně rozvinutého požáru



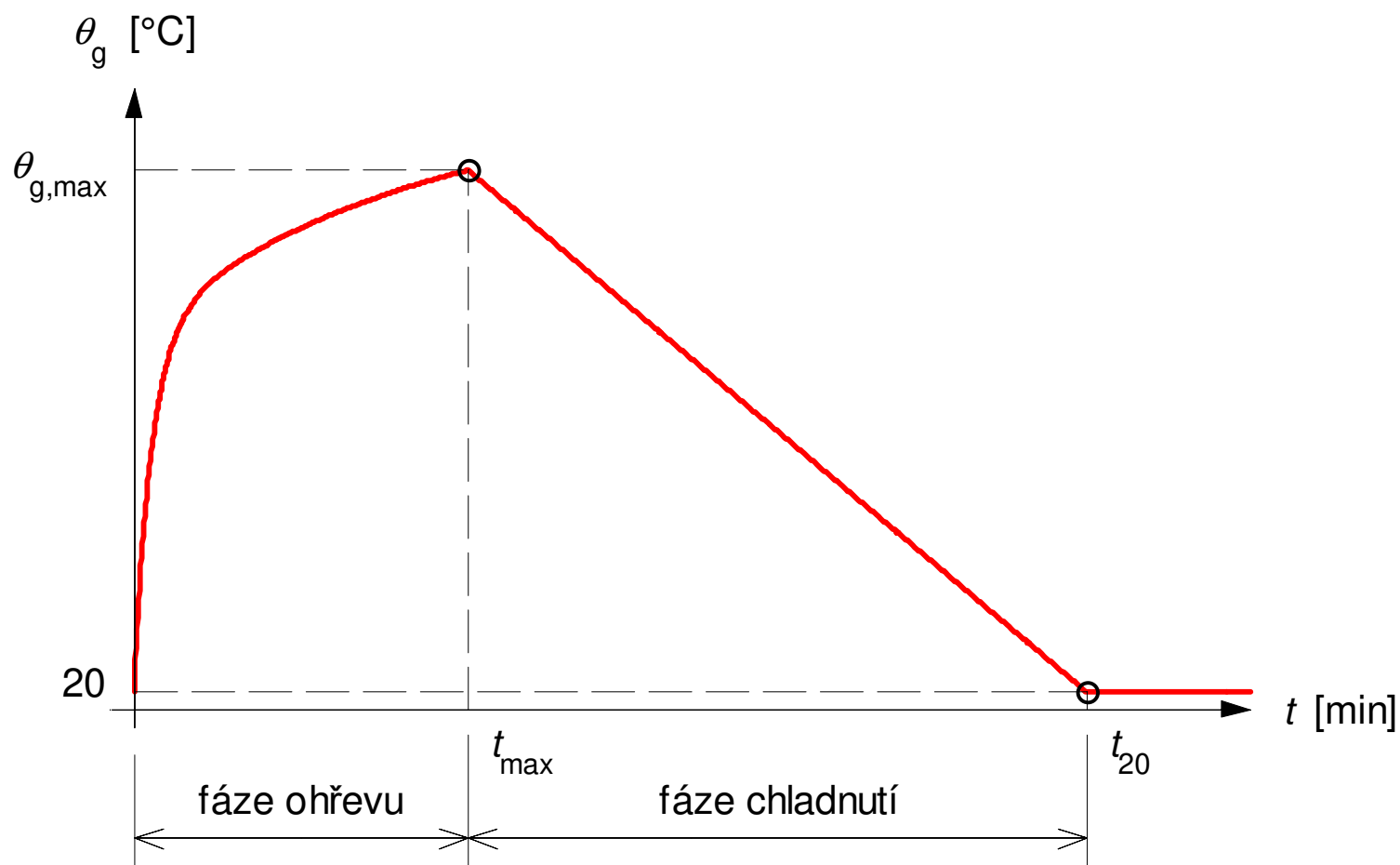
Teplotní analýza požárního úseku

Přirozené modely požáru

- Zjednodušené modely
 - modely požáru celého prostoru požárního úseku - rovnoměrné rozložení teploty (např. *parametrická teplotní křivka uvedená v příloze A normy ČSN EN 1991-1-2*)
 - modely lokálních požárů - nerovnoměrné rozložení teploty
- Zpřesněné modely
 - jednozónový model
 - dvouzónový model
 - výpočetní dynamické modely kapalin a plynů (*CFD modely - computational fluid dynamic models*)

Teplotní analýza požárního úseku

Parametrická teplotní křivky dle normy ČSN EN 1991-1-2



Teplotní analýza požárního úseku

Parametrická teplotní křivky dle normy ČSN EN 1991-1-2

- Parametry vstupující do výpočtu
 - požární zatížení
 - vlastnosti ohraničujících konstrukcí (ρ , c , λ)
 - rozměry požárního úseku
 - podmínky větrání (plochy a rozměry otvorů)

Teplotní analýza požárního úseku

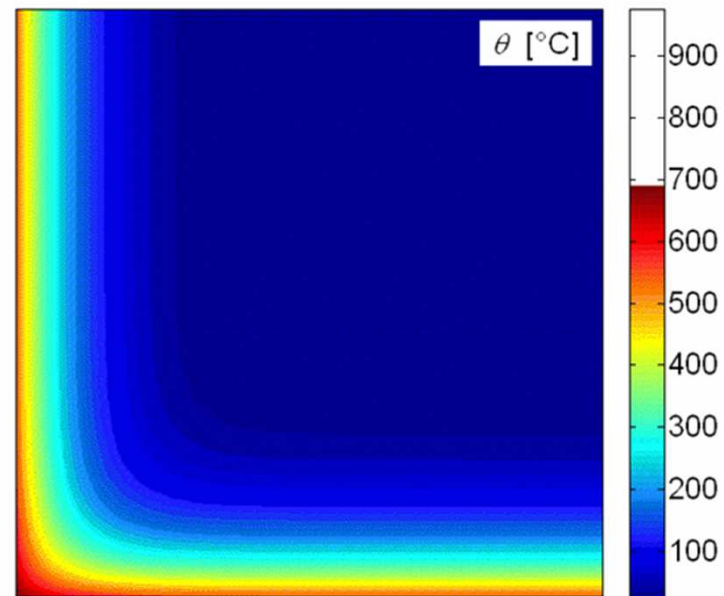
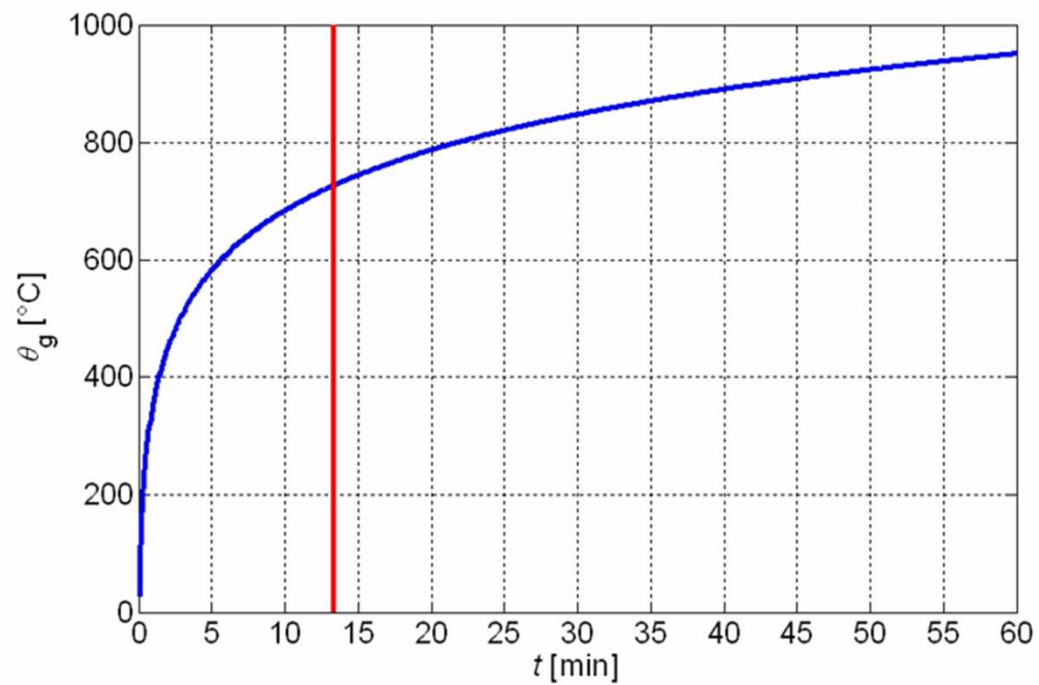
Přirozené modely požáru

- Zjednodušené modely
 - modely požáru celého prostoru požárního úseku - rovnoměrné rozložení teploty (např. parametrická teplotní křivka uvedená v příloze A normy ČSN EN 1991-1-2)
 - modely lokálních požárů - nerovnoměrné rozložení teploty
- Zpřesněné modely
 - jednozónový model
 - dvouzónový model
 - výpočetní dynamické modely kapalin a plynů (*CFD modely - computational fluid dynamic models*)

Teplotní analýza požárního úseku

Video - příklad modelování požáru pomocí CFD nástroje:
(zdroj: www.youtube.com/watch?v=pgDbsv62cu8)

Teplotní analýza konstrukce

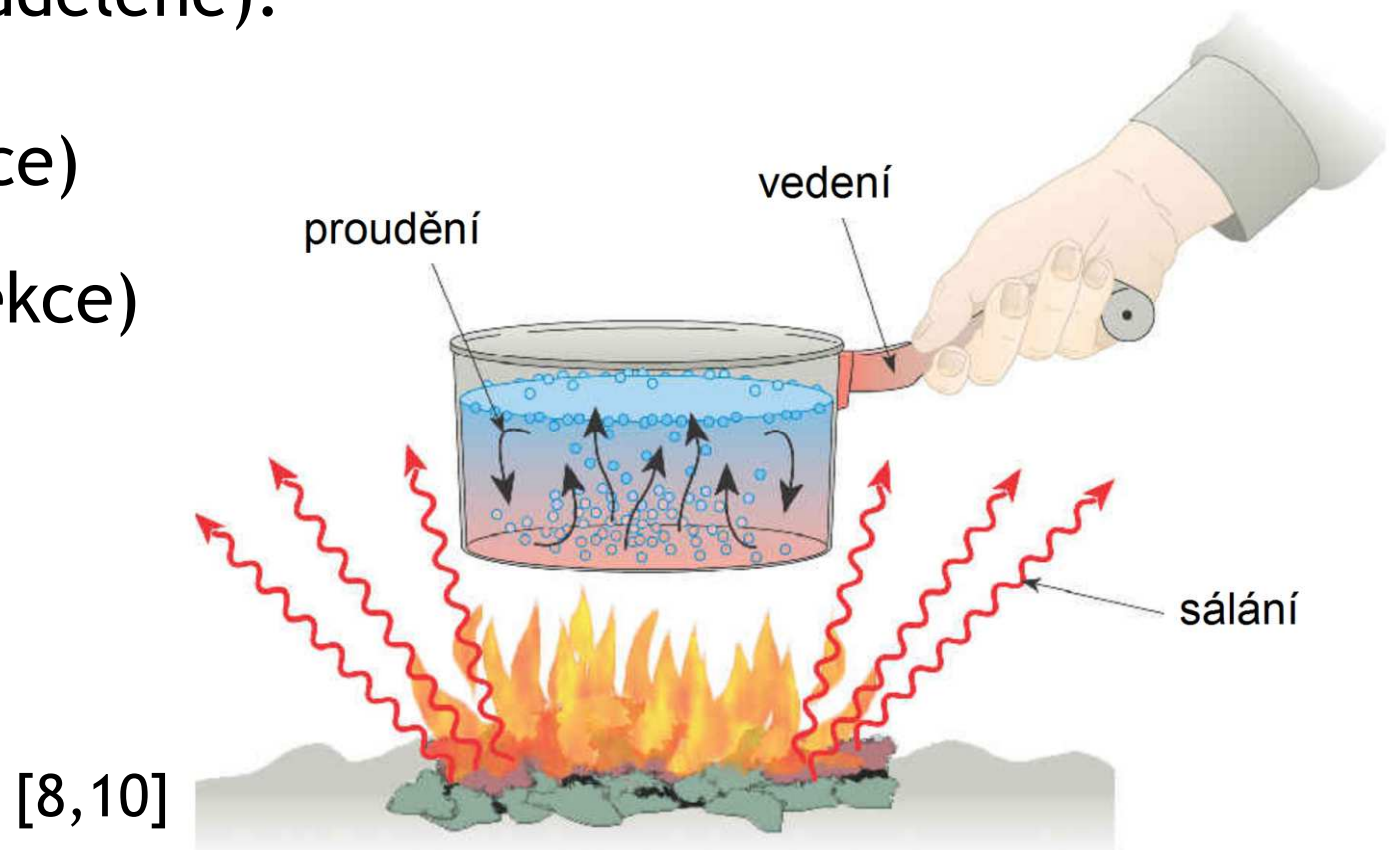


Teplotní analýza konstrukce

Sdílení tepla

Přenos energie ve formě tepla, který probíhá třemi způsoby (společně nebo odděleně):

- Vedení (kondukce)
- Proudění (konvekce)
- Sálání (radiace)



Teplotní analýza konstrukce

- Rovnice vedení tepla (1D)


$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = Q \quad \text{pro } x \in \Omega$$


- Počáteční podmínka

$$\theta(x, t) = \theta_0(x) = \theta_0 = 20 \text{ °C} \quad \text{pro } t = 0$$

- Okrajové podmínky - tepelné zatížení na hranici

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$


$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$


$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (\theta_r^4 - \theta_m^4)$$

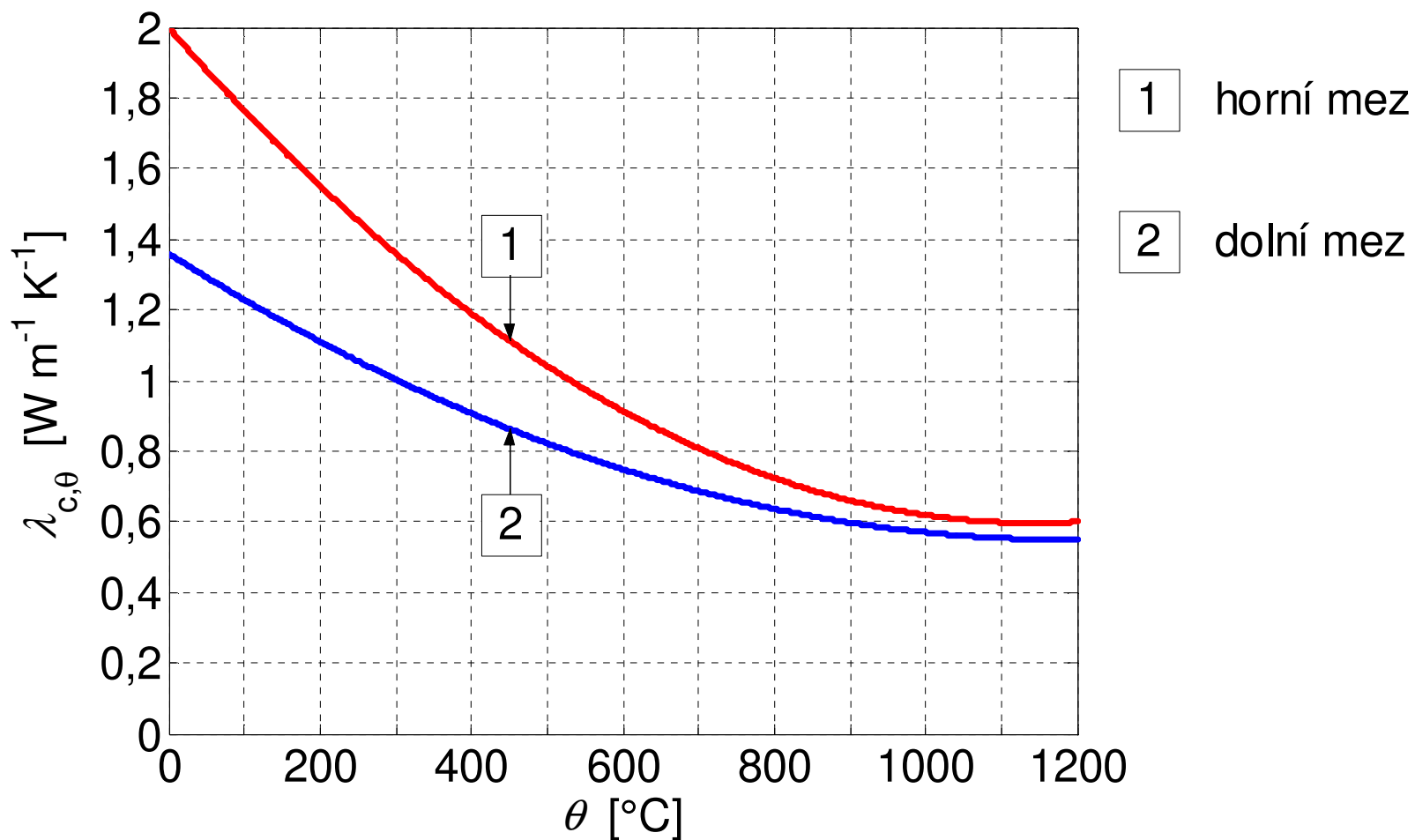
Teplotní analýza konstrukce

Teplotní a fyzikální vlastnosti materiálů

- Parametry vstupující do rovnice vedení tepla
- Závislé na teplotě (případně také na jiných parametrech, např. na vlhkosti)
- U železobetonových konstrukcí se přítomnost výztuže při teplotní analýze obvykle zanedbává
- Vztahy vyjadřující teplotní závislost vlastností betonu (případně také výztuže) lze nalézt v normě ČSN EN 1992-1-2

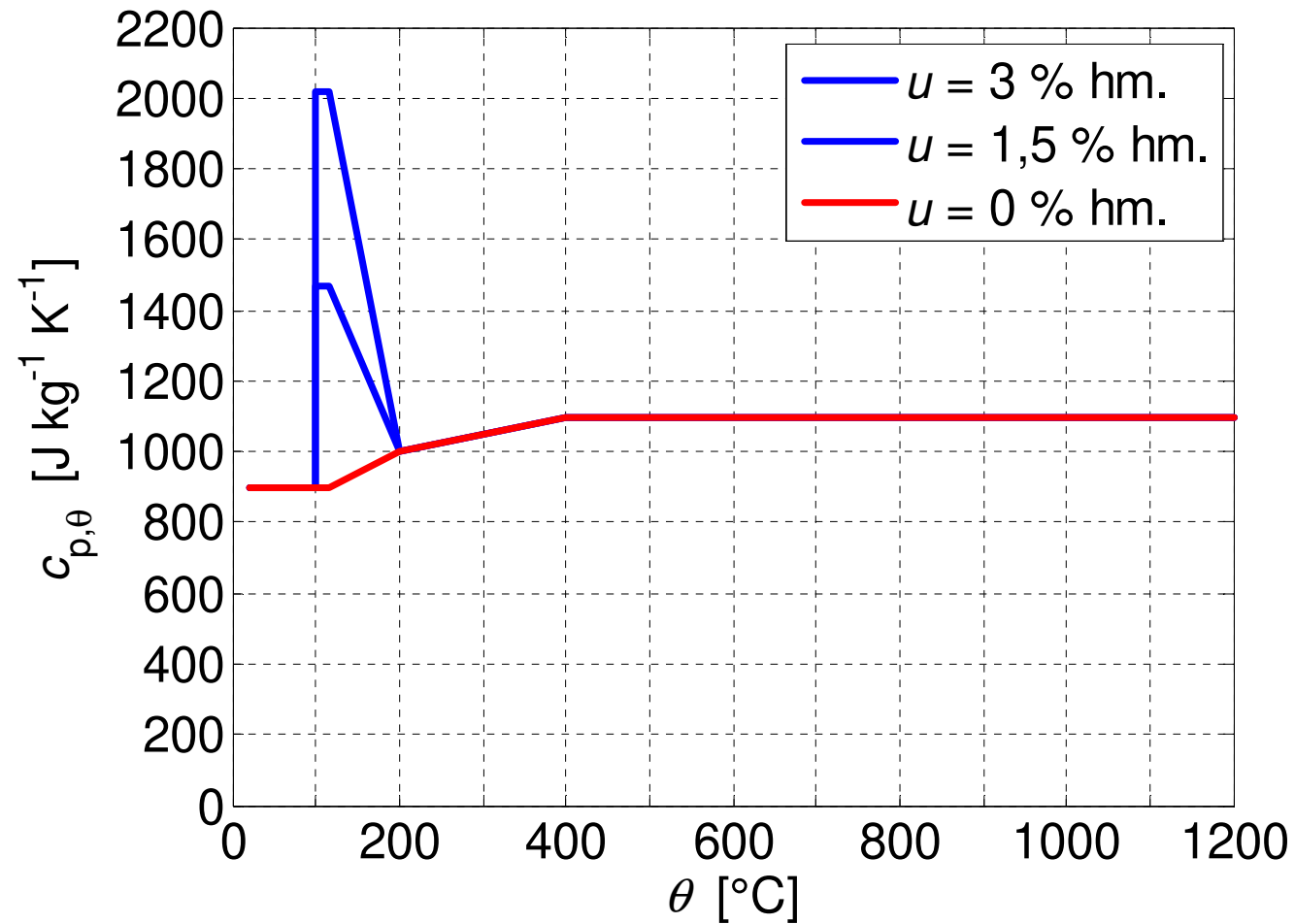
Teplotní analýza konstrukce

Tepelná vodivost betonu dle ČSN EN 1992-1-2



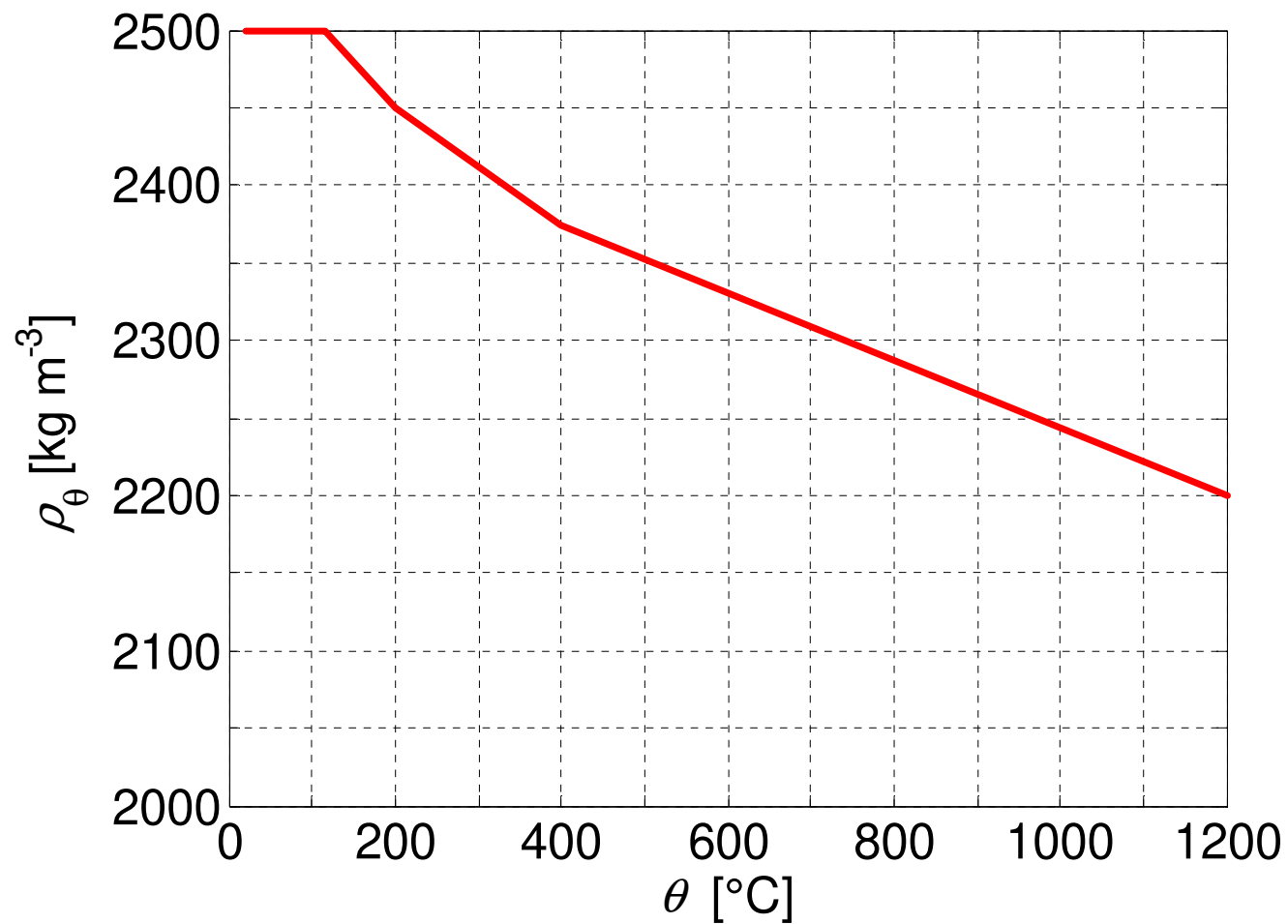
Teplotní analýza konstrukce

Měrná tepelná kapacita betonu dle ČSN EN 1992-1-2



Teplotní analýza konstrukce

Objemová hmotnost betonu dle ČSN EN 1992-1-2



Teplotní analýza konstrukce

Přístupy k teplotní analýze konstrukce

- Požární zkoušky
- Výpočet
- Využití dříve změřených nebo vypočítaných hodnot

Teplotní analýza konstrukce

Požární zkoušky

- Analýza netypických konstrukcí
- Ověření výpočetních modelů a postupů
- Zjištění vlastností a chování netradičních materiálů
- **Velice nákladné**



Teplotní analýza konstrukce

Výpočet

- Vyřešení problému sdílení tepla popsaného příslušným modelem (model může popisovat i transport dalších veličin - např. vlhkosti)
- V případě betonových a zděných konstrukcí nelze příliš uplatnit zjednodušené metody výpočtu (nepřesné)
- Složitost modelů popisujících transportní procesy v betonu nebo zdivu znemožňuje řešit dané úlohy analyticky
- Využívají se numerické metody výpočtu - např. MKP
- Vlastní výpočet se obvykle provádí s využitím výpočetních programů

Teplotní analýza konstrukce

**Využití dříve změřených nebo vypočítaných hodnot
(databáze dostupných údajů)**

- Nejjednodušší přístup
- Hodnoty mohou být dostupné ve formě tabulek nebo grafických pomůcek
- Příkladem jsou teplotní profily uvedené v normě ČSN EN 1992-1-2 (pro betonové prvky)

Teplotní analýza konstrukce

- Normové teplotní profily popisují rozložení teploty v průřezech běžných prvků (desky/stěny, nosníky, sloupy) vystavených normovému požáru pro doby odpovídající klasifikačním dobám požární odolnosti (30, 60, 90, 120, (150), 180, 240 minut)
- Nevýhoda normových profilů - omezená platnost

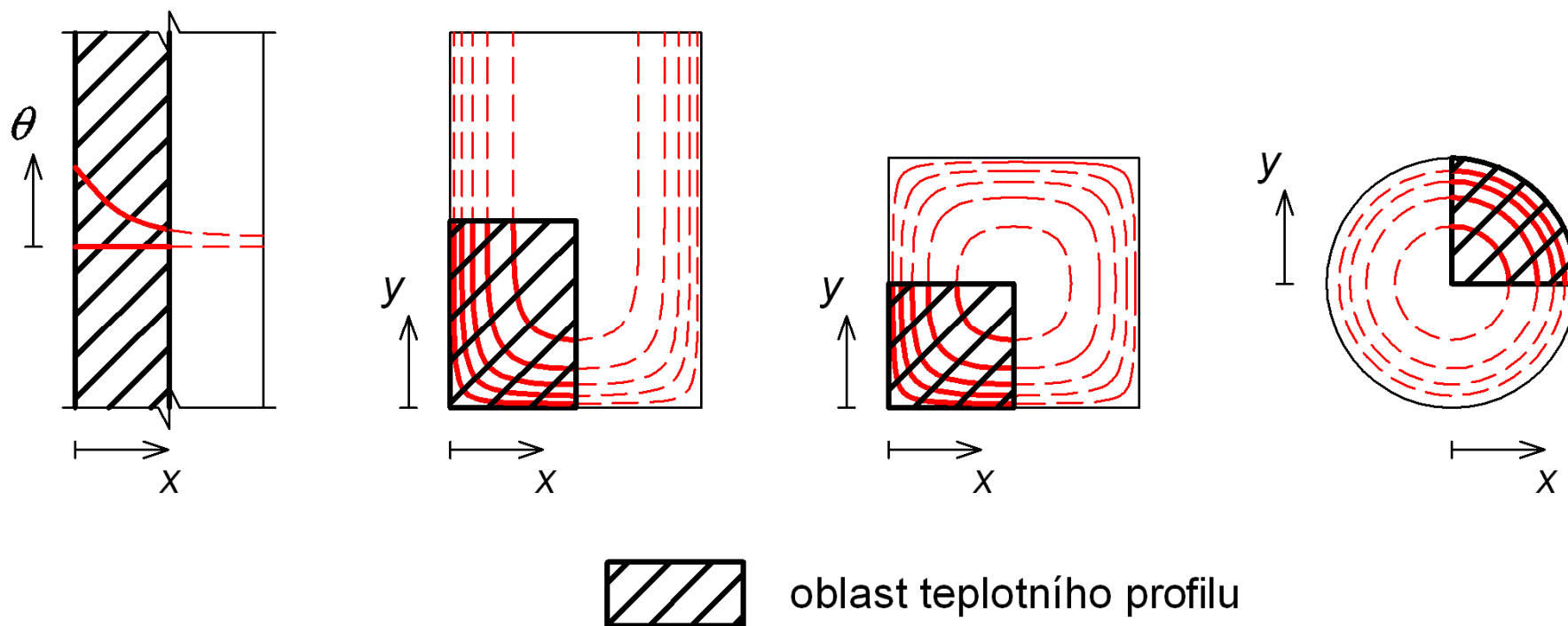
Teplotní analýza konstrukce

Teplotní profily průřezů betonových prvků uvedené v příloze A normy ČSN EN 1992-1-2

Prvek	Rozměr průřezu [mm]	Vystavení požáru	Doba vystavení požáru [min]
deska/stěna	200 (tloušťka)	z jedné strany	30, 60, 90, 120, 180, 240
nosník/sloup obdélníkového průřezu	80 × 150 ($b \times h$) 160 × 300 ($b \times h$) 300 × 600 ($b \times h$) 500 × 800 ($b \times h$)	ze tří stran	30 30, 60, 90 60, 90, 120 90, 120, 180, 240
nosník/sloup čtvercového průřezu	300 × 300 ($b \times h$)	ze čtyř stran	30, 60, 90, 120
sloup kruhového průřezu	300 (průměr)	po obvodě	30, 60, 90, 120

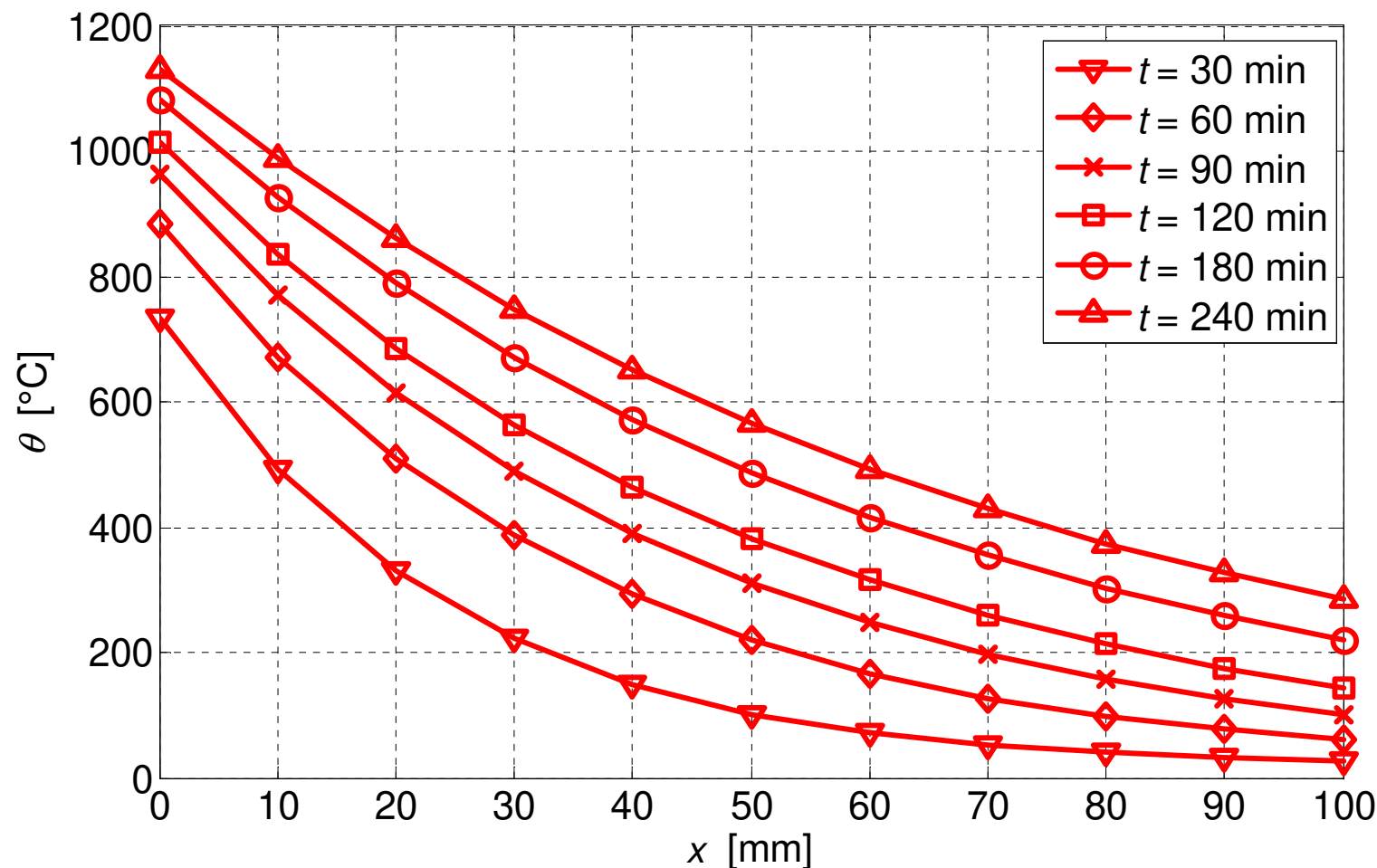
Teplotní analýza konstrukce

Teplotní profily průřezů betonových prvků uvedené v příloze A normy ČSN EN 1992-1-2



Teplotní analýza konstrukce

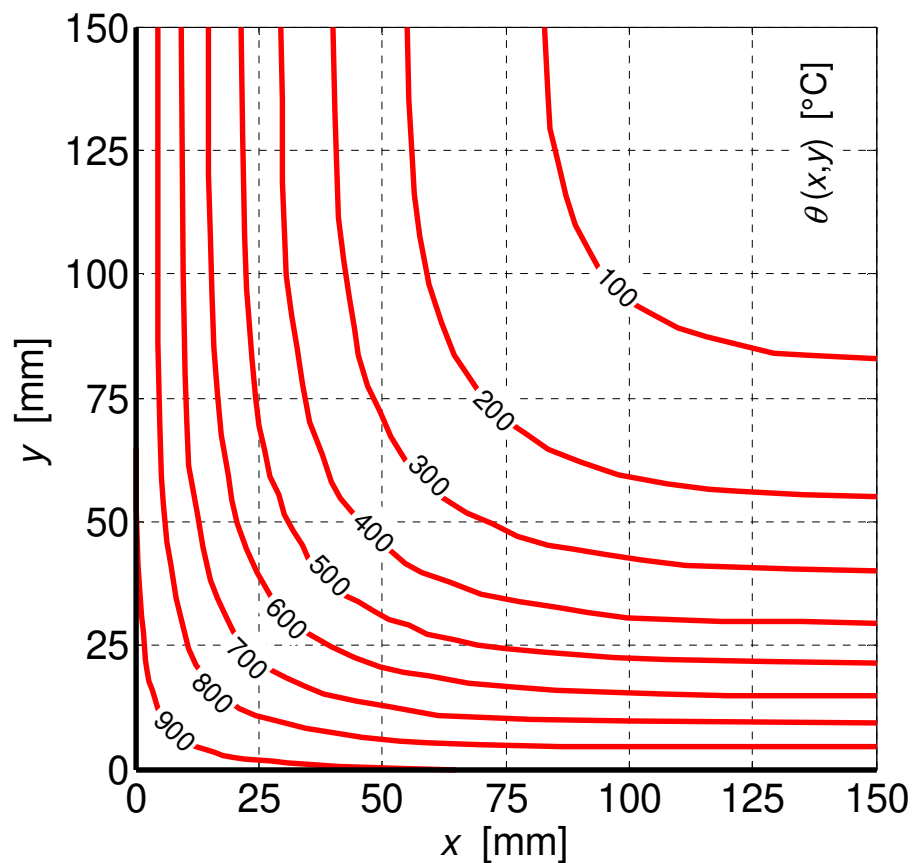
Teplotní profily průřezů betonových prvků uvedené v příloze A normy ČSN EN 1992-1-2



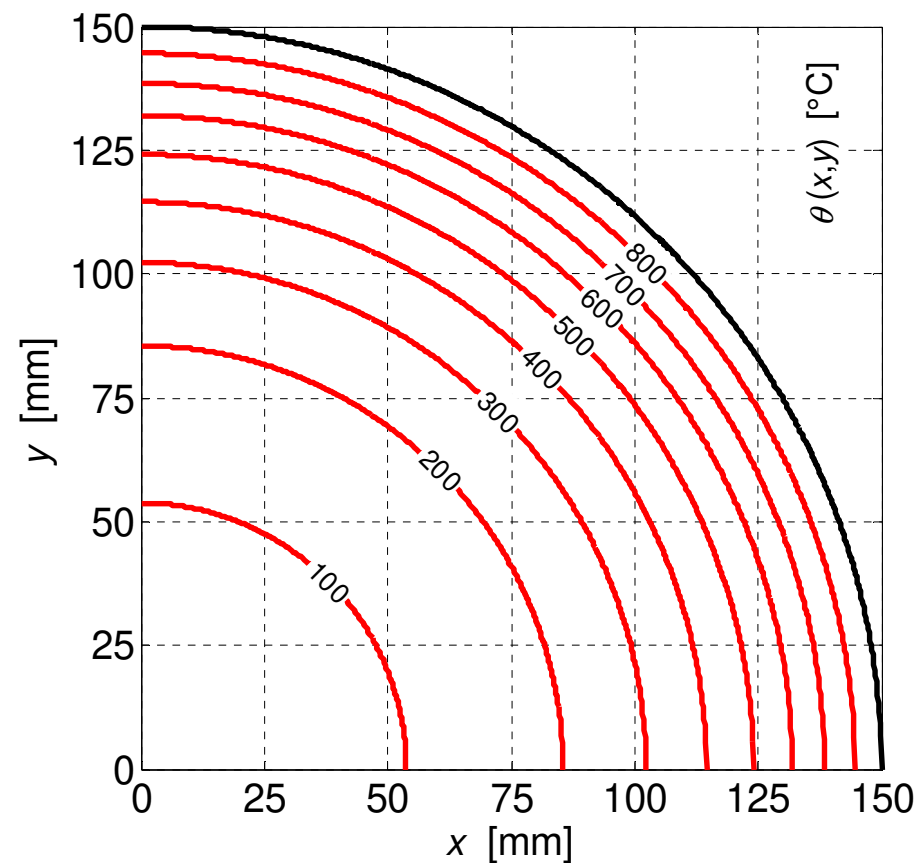
Deska/stěna
tl. 200 mm

Teplotní analýza konstrukce

Teplotní profily průřezů betonových prvků uvedené v příloze A normy ČSN EN 1992-1-2



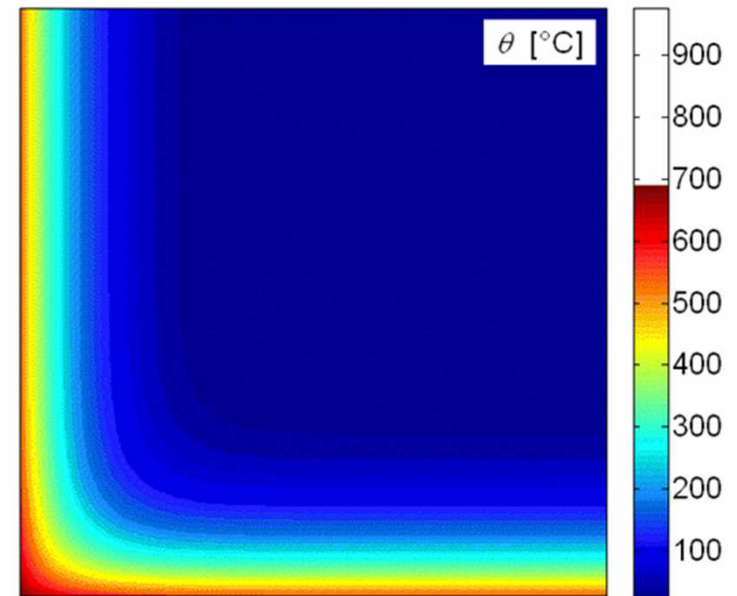
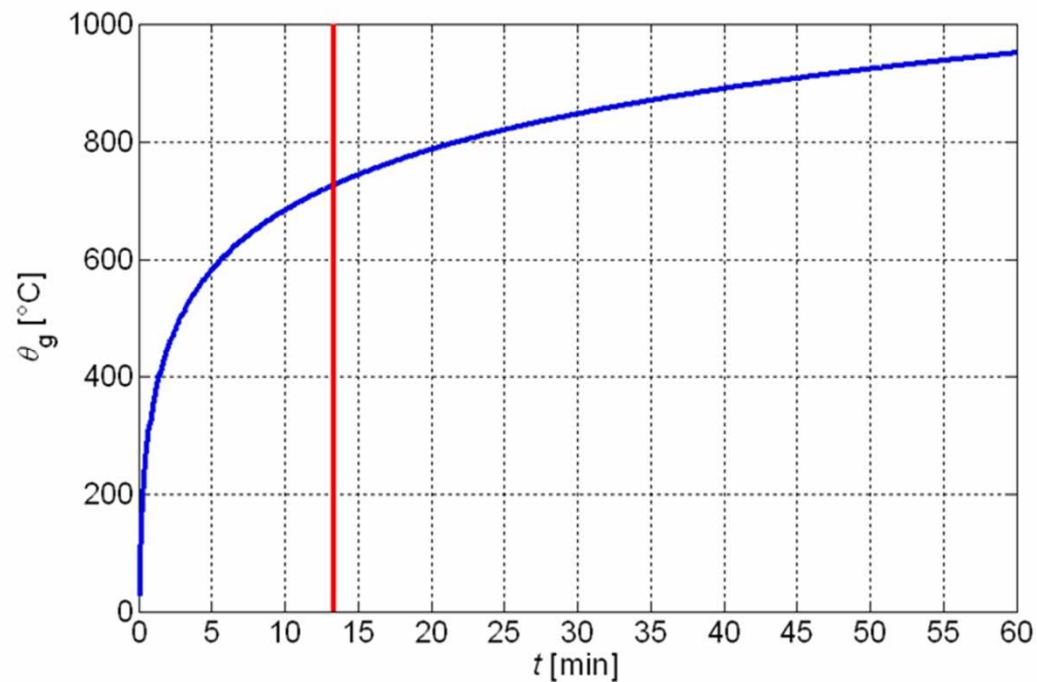
Sloup 300 x 300 mm², 60 minut



Sloup ø 300 mm, 60 minut

Teplotní analýza konstrukce

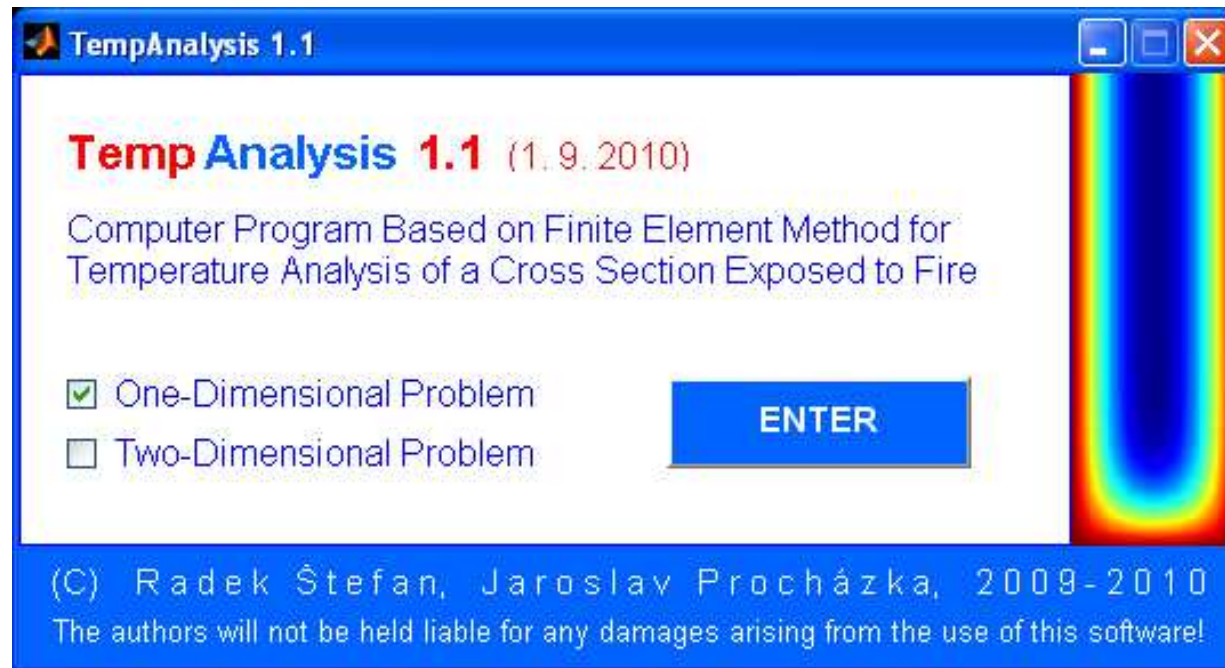
Programy vyvíjené na katedře betonových a zděných konstrukcí FSv ČVUT v Praze



TempAnalysis

- Výpočetní program pro teplotní analýzu obdélníkových průřezů (deska, stěna, nosník, sloup) vystavených požáru.
- Uživatelské rozhraní v anglickém jazyce.
- Řeší 1D (desky/stěny) a 2D (nosníky/sloupy) úlohy.

Úvodní okno programu



TempAnalysis

Vstupy

- materiálové vlastnosti průřezu (materiál s konstantními vlastnostmi, materiál s nelineárními vlastnostmi, beton dle ČSN EN 1992-1-2)
- rozměry průřezu
- tloušťka a vlastnosti izolační vrstvy
- návrhový požární scénář (normová teplotní křivka, parametrická teplotní křivka dle ČSN EN 1991-1-2)
- požární expozice (doba vystavení požáru, požár z jedné/dvou/tří/čtyř stran)

Okno programu pro zadání vstupů

Materiál

Material

- Material with Constant Material Properties
- Material with Non-Linear Material Properties
- Concrete (EN 1992-1-2)

Define Material Properties

Rozměry

Cross-Sectional Dimensions

Width b [m] Height h [m]

Izolace

Protective Layer

Enter Protective Layer? No Yes

Thickness of the Insulation d_{ins} [m]

Density ρ_{ins} [kg/m³]

Heat Capacity $c_{p,ins}$ [J/kgK]

Thermal Conductivity λ_{ins} [W/mK]

Error Notification

OK

Design Fire Scenario

Temperature-Time Curve:

Standard Parametric

Fire Load Density $q_{t,d}$ [MJ/m³]
<50,1000>

Opening Factor O [m^{1/2}]
<0.02,0.20>

Thermal Inertia b [J / m² s^{1/2} K]
<100,2200>

Fire Growth Rate

Temperature-Time Curve

Fire Exposure

Three-Sided Exposure

Time in Fire Exposure t [min]

CALCULATION

FEA SETTING

NEW

EXIT

Požár

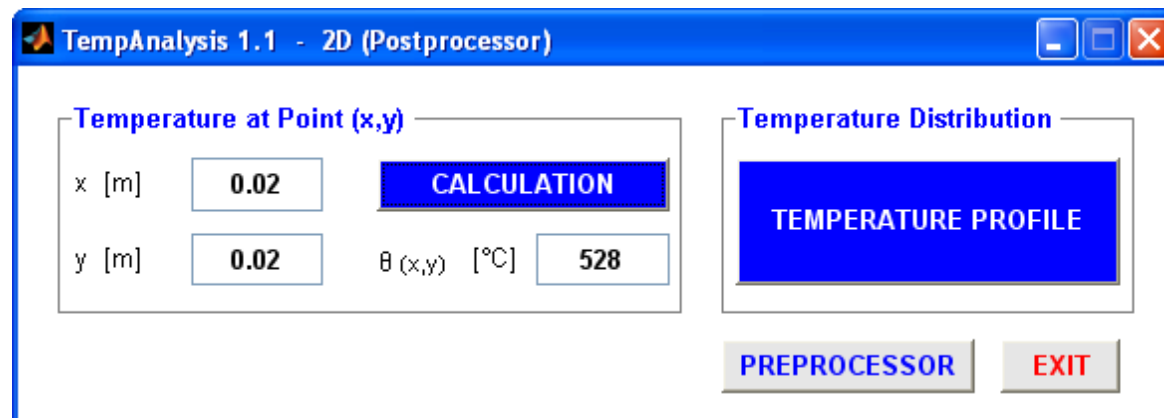
Expozice

TempAnalysis

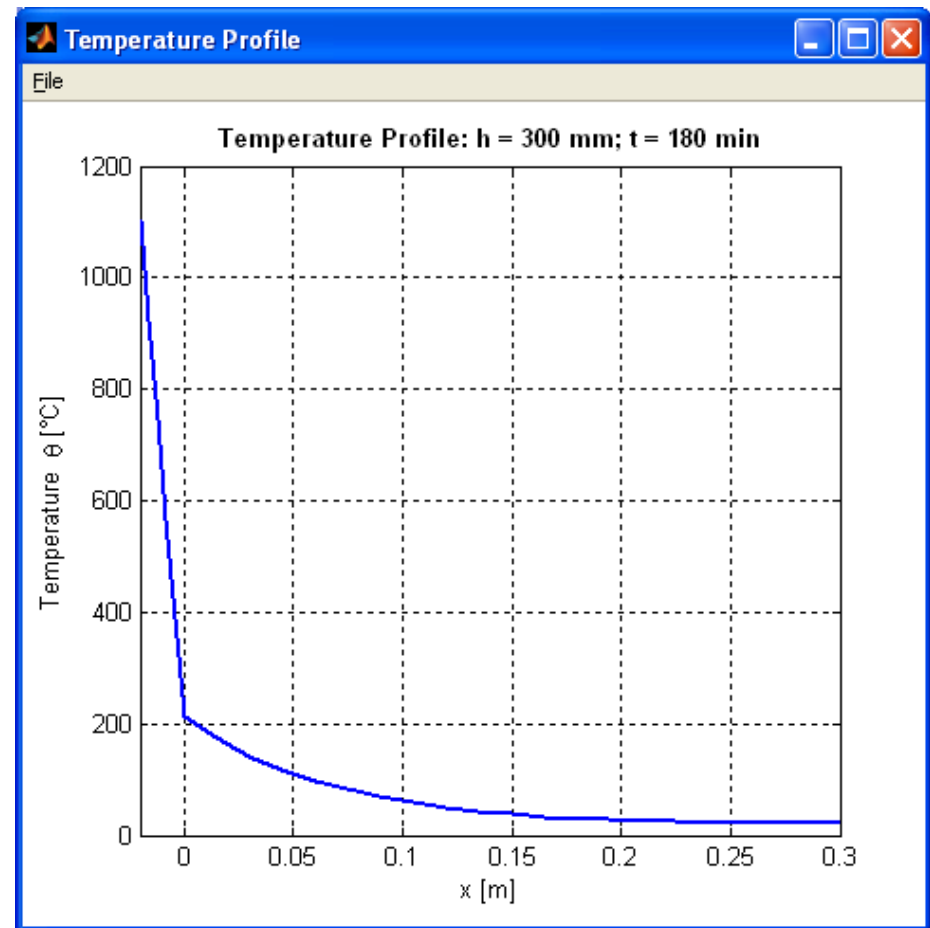
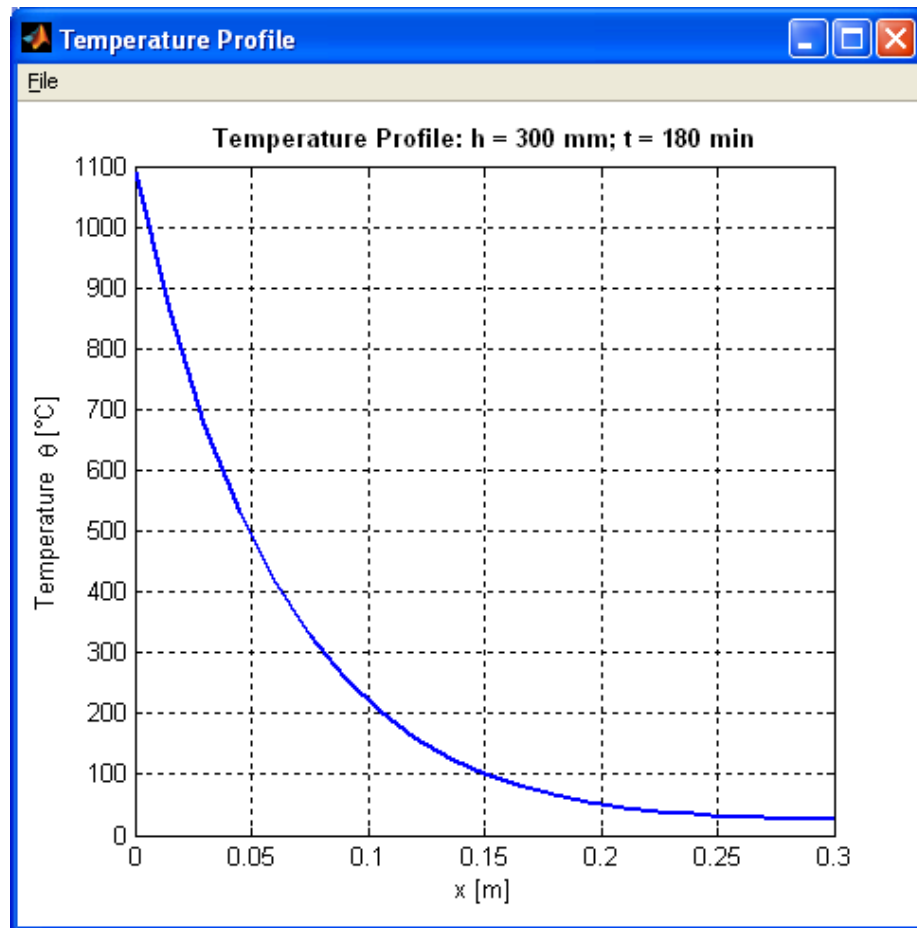
Výstupy

- teplota v libovolném bodě průřezu pro zadanou dobu vystavení požáru
- teplotní profil průřezu (pro 2D úlohu možno zvolit mezi zobrazením pomocí izoterem nebo pomocí barevné škály)

Okno programu pro zobrazení výstupů

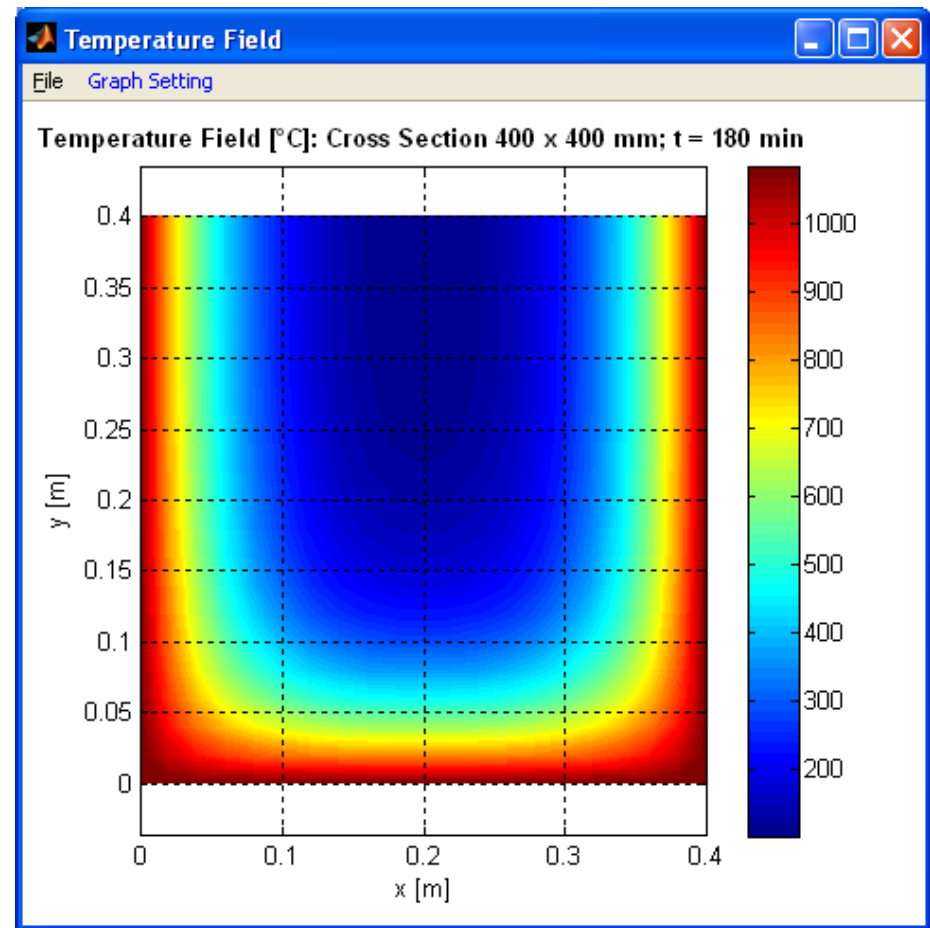
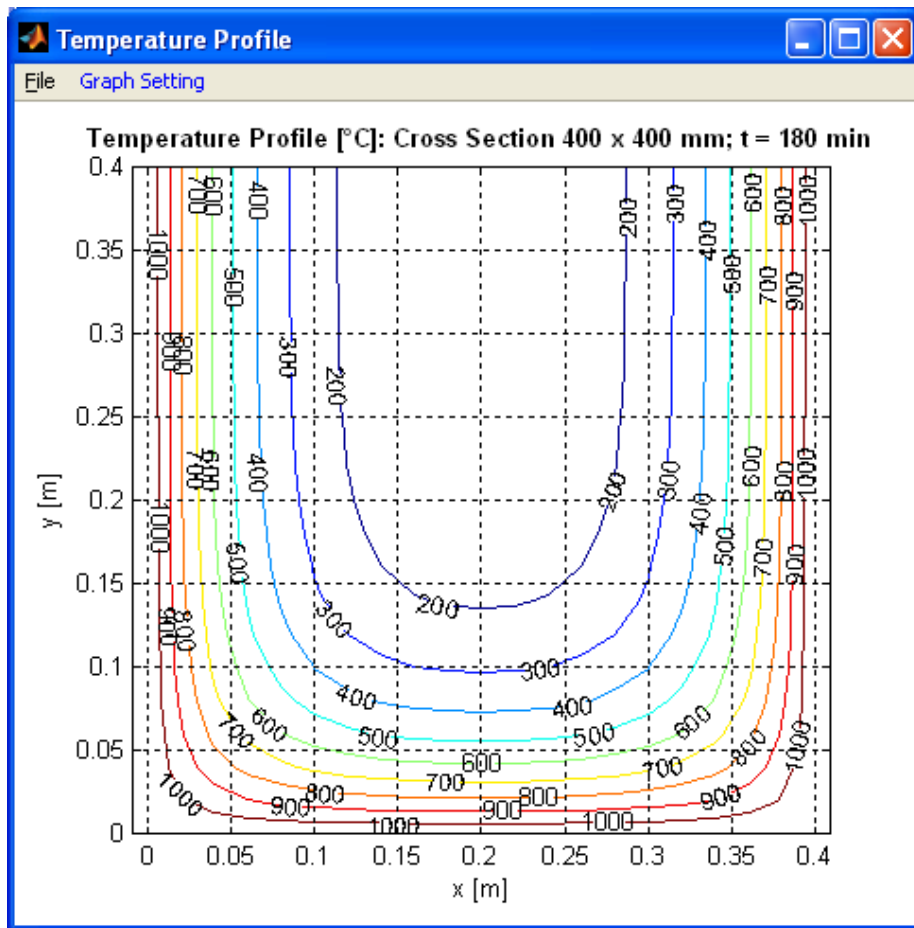


TempAnalysis



Teplotní profil desky/stěny tl. 300 mm vystavené normovému požáru po dobu 180 min: bez izolace (vlevo), s izolační vrstvou tl. 20 mm (vpravo)

TempAnalysis



Teplotní profil nosníku o průřezu 400 x 400 mm² vystaveného normovému požáru ze tří stran po dobu 180 min: zobrazení pomocí izoterem (vlevo), zobrazení pomocí barevné škály (vpravo)

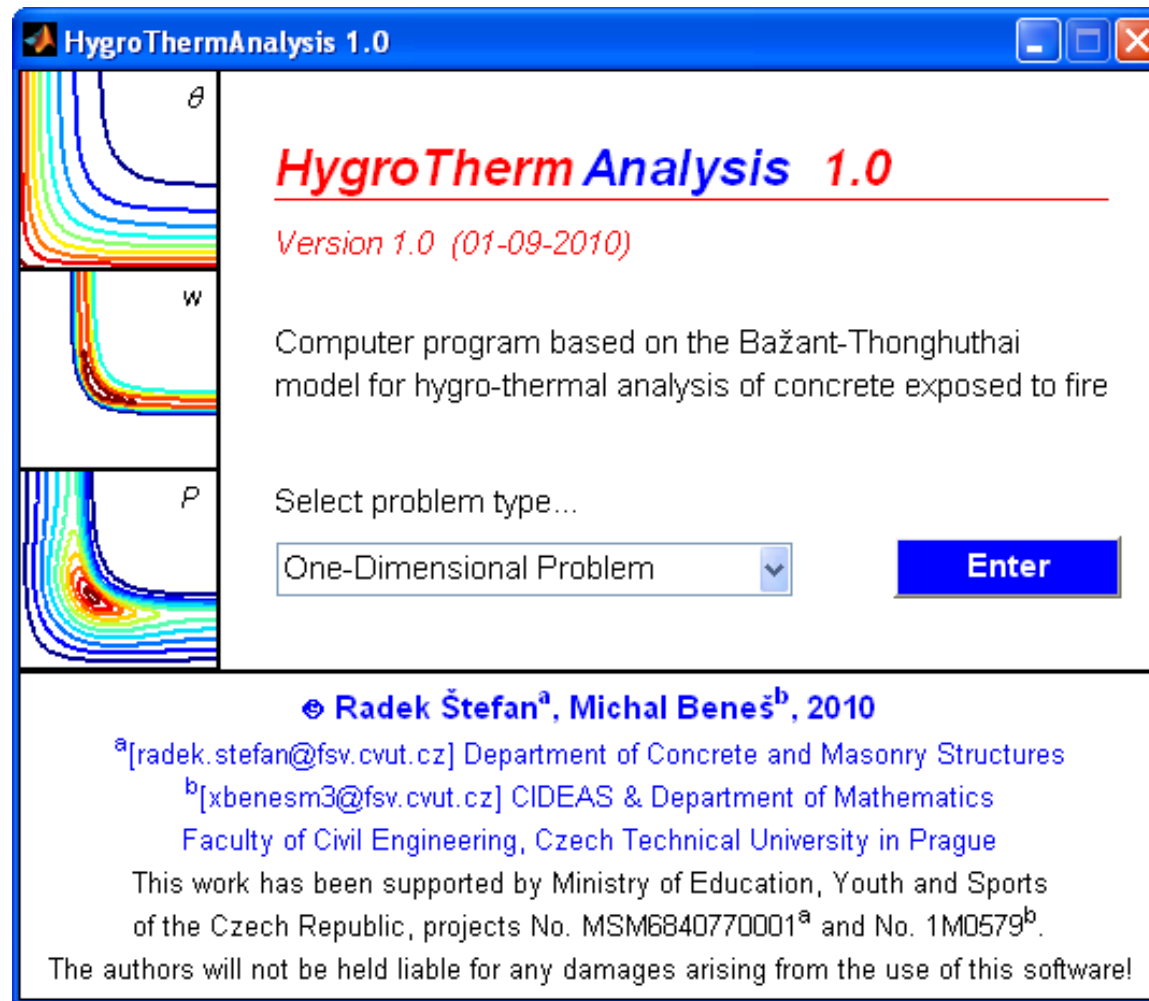
HygroThermAnalysis

- Výpočetní program pro teplotně-vlhkostní analýzu betonových obdélníkových průřezů (desky, stěny, nosníky, sloupy) vystavených požáru.
- Narozdíl od programu **TempAnalysis** umožňuje zohlednit vliv vlhkosti a jejího transportu.
- Slouží pro stanovení rozložení teploty, vlhkosti a pórového tlaku v betonových průřezech vystavených požáru a k určení rizika odštěpování betonu způsobeného nárůstem pórového tlaku.

HygroThermAnalysis

- Řeší 1D (desky/stěny) a 2D (nosníky/sloupy) úlohy.

Úvodní okno programu



HygroThermAnalysis

Vstupy

- rozměry průřezu
- materiálové vlastnosti betonu
- doba vystavení normovému požáru
- okrajové podmínky
- počáteční podmínky
- nastavení výpočtu (počet konečných prvků, časový krok)

Okno programu pro zadání vstupů

2D HygroThermAnalysis 1.0 - Preprocessor

Dimensions

b [m] ?

h [m] ?

Material Properties

$w_{s,25}$ [kg/m³] ?

c [kg/m³] ?

ρ_{25} [kg/m³] ?

$c_{p,25}$ [J/(kg·K)] ?

a_{25} [m/s] ?

Fire Exposure

t_f [s] ?

[K] [°C]

Boundary Conditions

Fire exposure on:

1 2 3 4

3 4

α_c [W/(m²·K)] ?

β_c [m/s] ?

e [-] ?

FEA Setting

n_x [-] ?

n_y [-] ?

Δt [s] ?

Initial Conditions

θ_0 [K] ?

RH_0 [-] ?

Computational Time

Calculation will take
???? min.

HygroThermAnalysis

Výstupy

- hodnoty teploty, vlhkosti a pórového tlaku v libovolném bodě průřezu
- grafické znázornění rozložení hledaných veličin v analyzovaném průřezu
- grafické vyznačení oblasti průřezu, ve které je riziko odštěpení betonu

Okno programu pro zobrazení výstupů

2D HygroThermAnalysis 1.0 - Postprocessor

Results Plot

Temperature [K] [°C]

Water Content [kg/m³]

Pore Pressure [MPa]

at time t [s] ?

Isolines Isoareas

Plot

Results in Point [x,y]

x [m] ?

y [m] ?

at time t [s] ?

Calculate

$\theta(x,y)$ [K]

$w(x,y)$ [kg/m³]

$P(x,y)$ [MPa]

Spalling Prediction

ϕ_{25} [-] ?

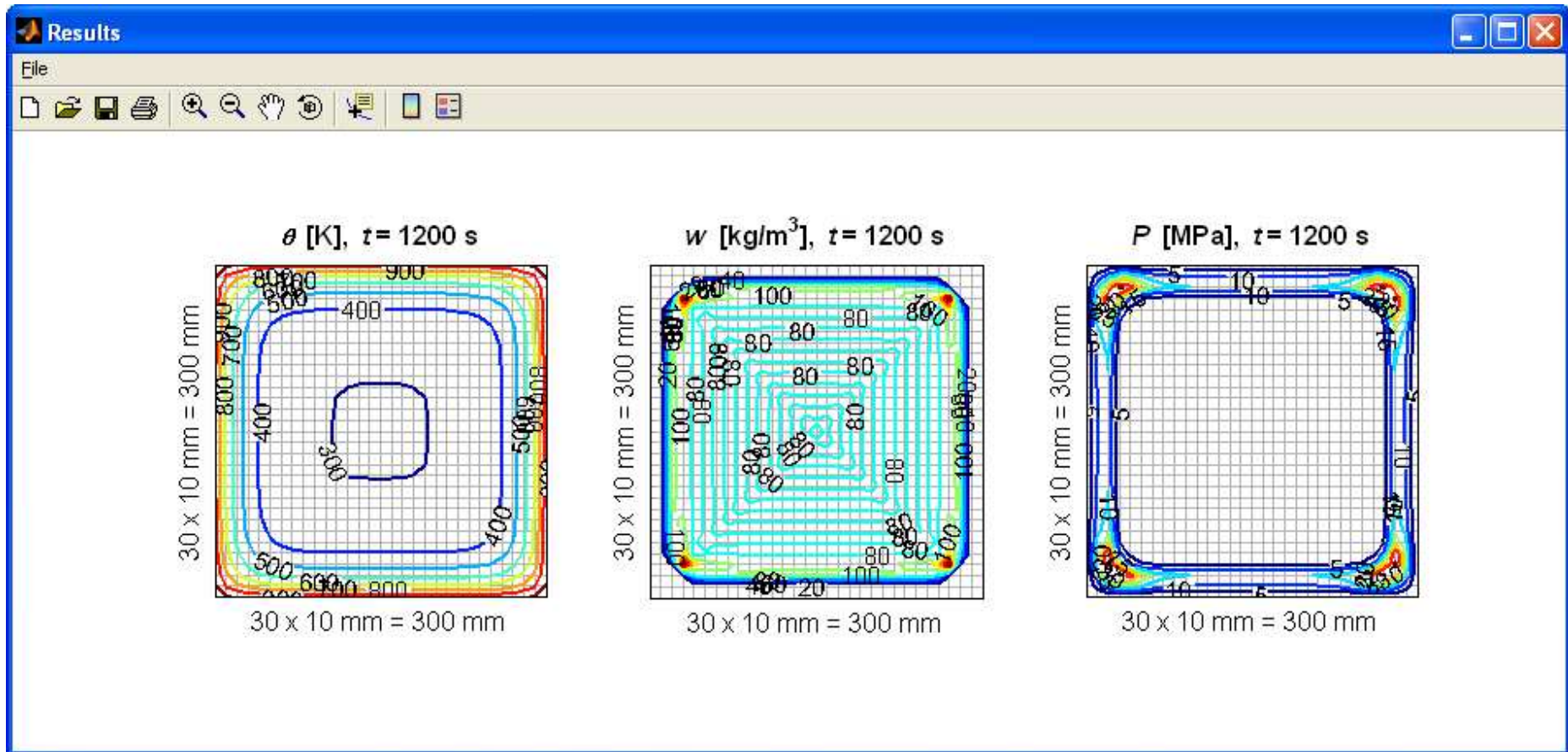
$f_{ct,25}$ [MPa] ?

at time t [s] ?

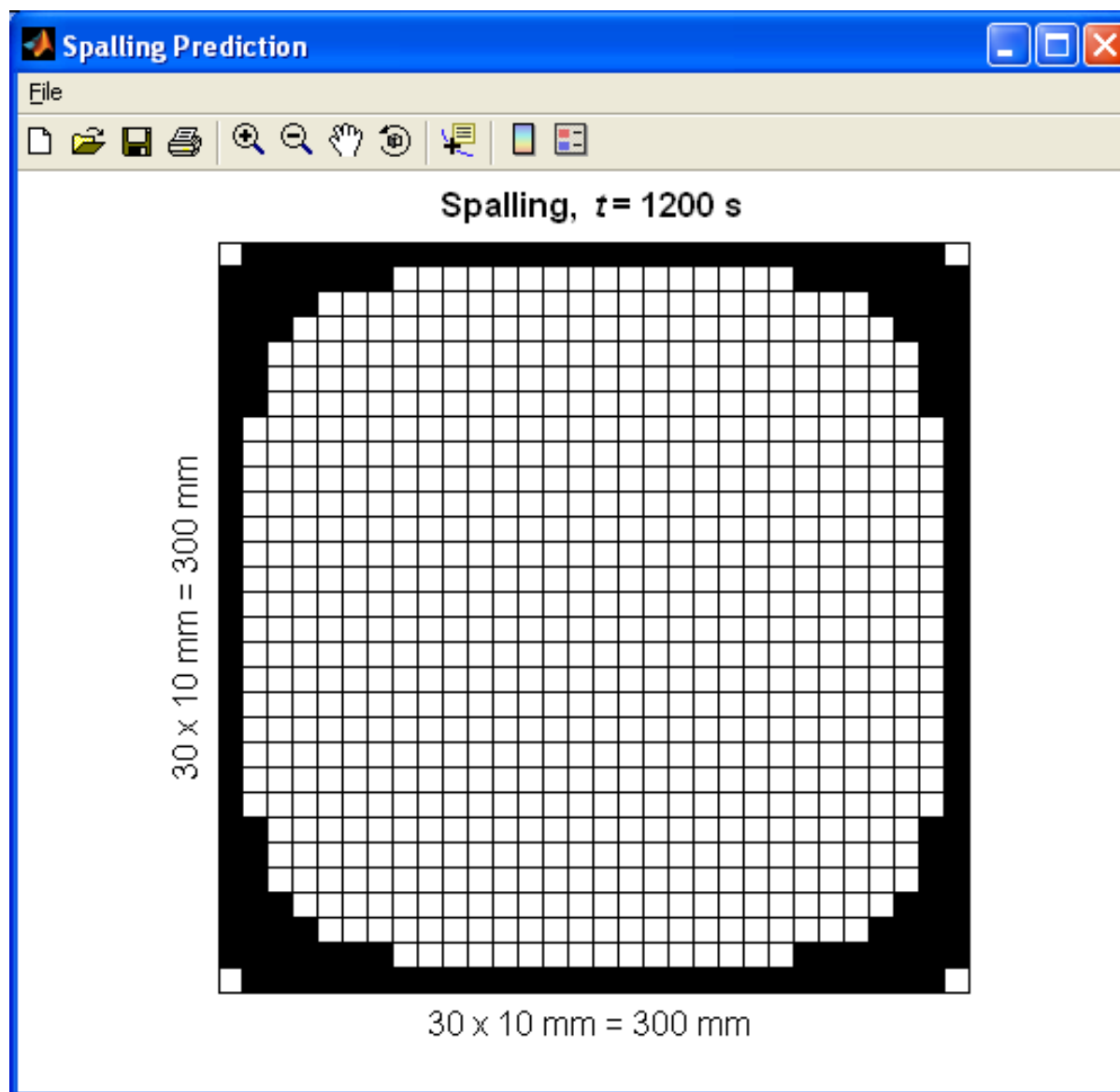
Plot

<< **BACK** **NEW** **EXIT**

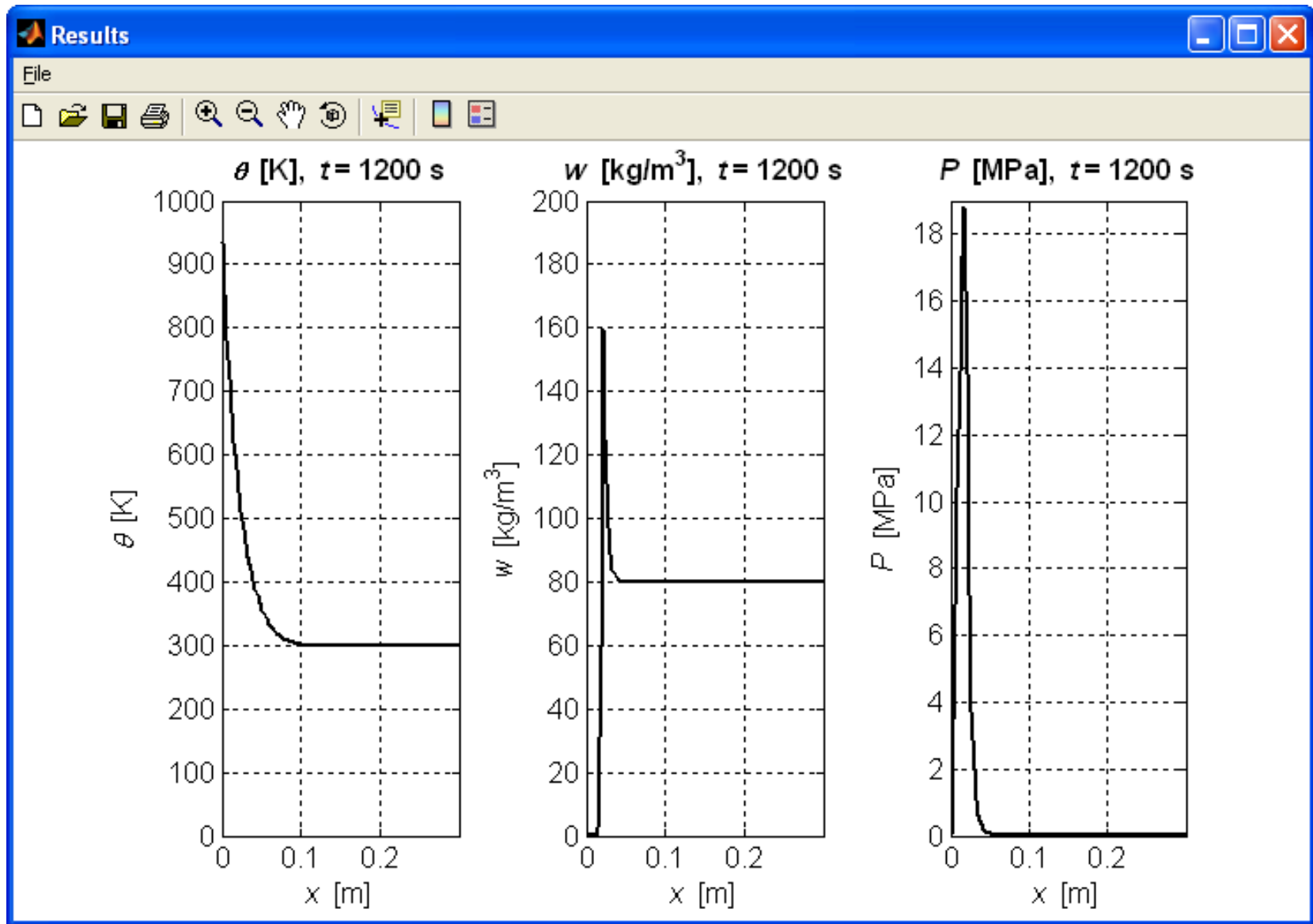
Grafické znázornění rozložení hledaných veličin v analyzovaném průřezu - 2D



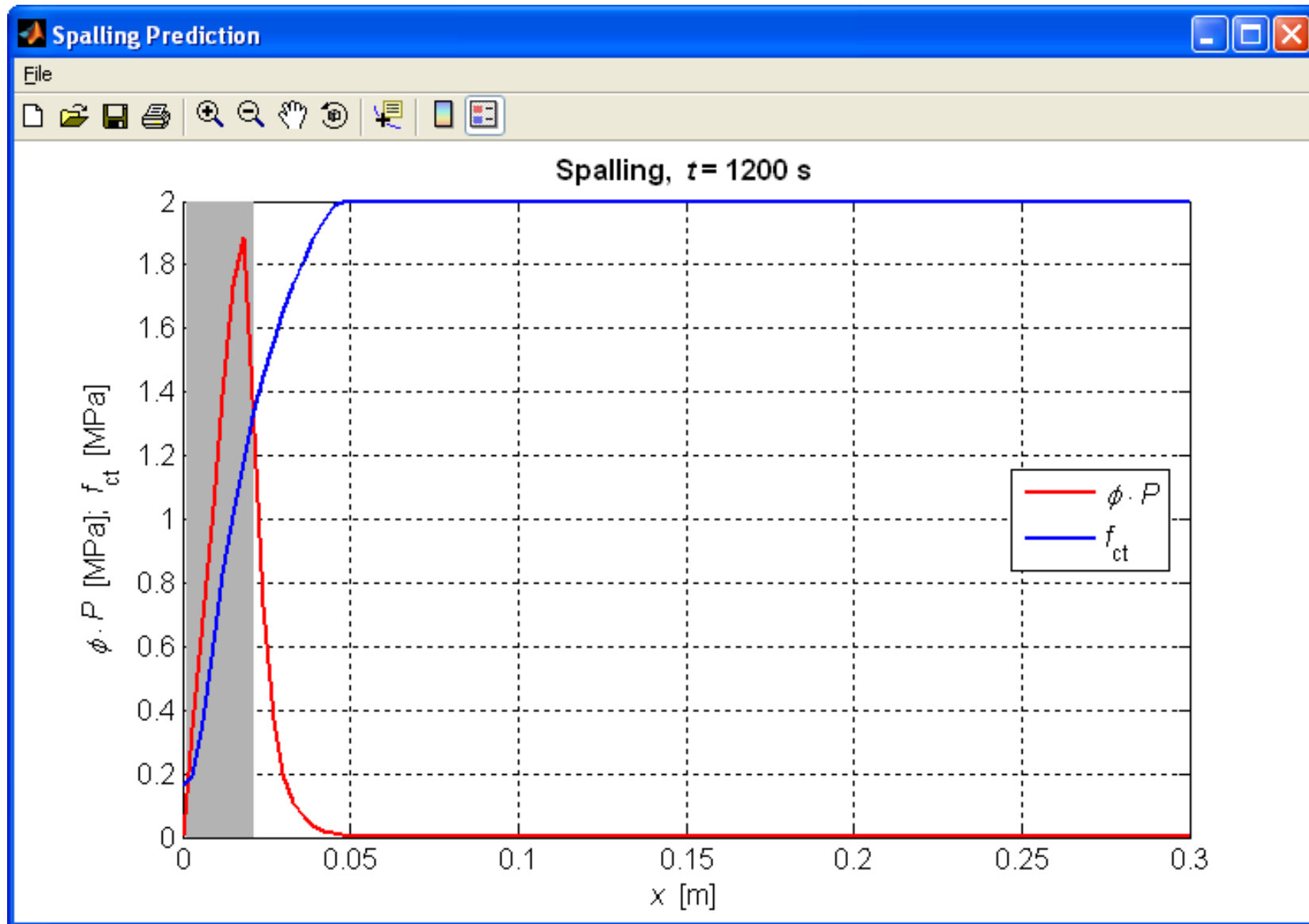
Vyznačení oblasti průřezu, ve které je riziko odštěpení betonu - 2D



Grafické znázornění rozložení hledaných veličin v analyzovaném průřezu - 1D



Vyznačení oblasti průřezu, ve které je riziko odštěpení betonu - 1D



Vlastnosti betonu a výztuže při zvýšených teplotách

Beton

- Procesy a změny v betonu při vystavení požáru
- Mechanické vlastnosti betonu
- Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Výztuž

- Mechanické vlastnosti výztuže
- Teplotní a fyzikální vlastnosti výztuže

Beton

- Nehořlavý materiál.
- Ve srovnání s jinými stavebními materiály má vynikající vlastnosti z hlediska požární odolnosti.
- Přesto je chování betonu (resp. betonových a železobetonových konstrukcí) působením požáru negativně ovlivněno.
- Při vystavení zvýšeným teplotám dochází v betonu k mechanickým, fyzikálním a chemickým procesům vedoucím k nevratným změnám jeho vlastností.

Beton

θ [°C]

Procesy a změny v betonu při vystavení požáru

[8,14-18]

20-100

Dochází k hydrataci (přeměna volné vody v chemicky vázanou). Vznik CSH a Ca(OH)_2 .

100

Začíná dehydratace cementového tmelu - uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů.

150

Vrcholí první fáze rozkladu CSH.

200+

Dochází k uvolňování vázané vody.

300+

Pokračuje rozklad CSH a Ca(OH)_2 za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo.

Beton

550-600

Dochází k fázové změně křemene z triklinické soustavy na soustavu hexagonální. To vede společně s vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k narušování vazeb mezi kamenivem a cement. tmelem.

700-750

Vrcholí druhá fáze rozkladu CSH.

800+

Hydraulické vazby v cementovém tmelu přecházejí na vazby keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při které vzniká CO_2 .

900

Totální dekompozice cementového tmelu.

1000+

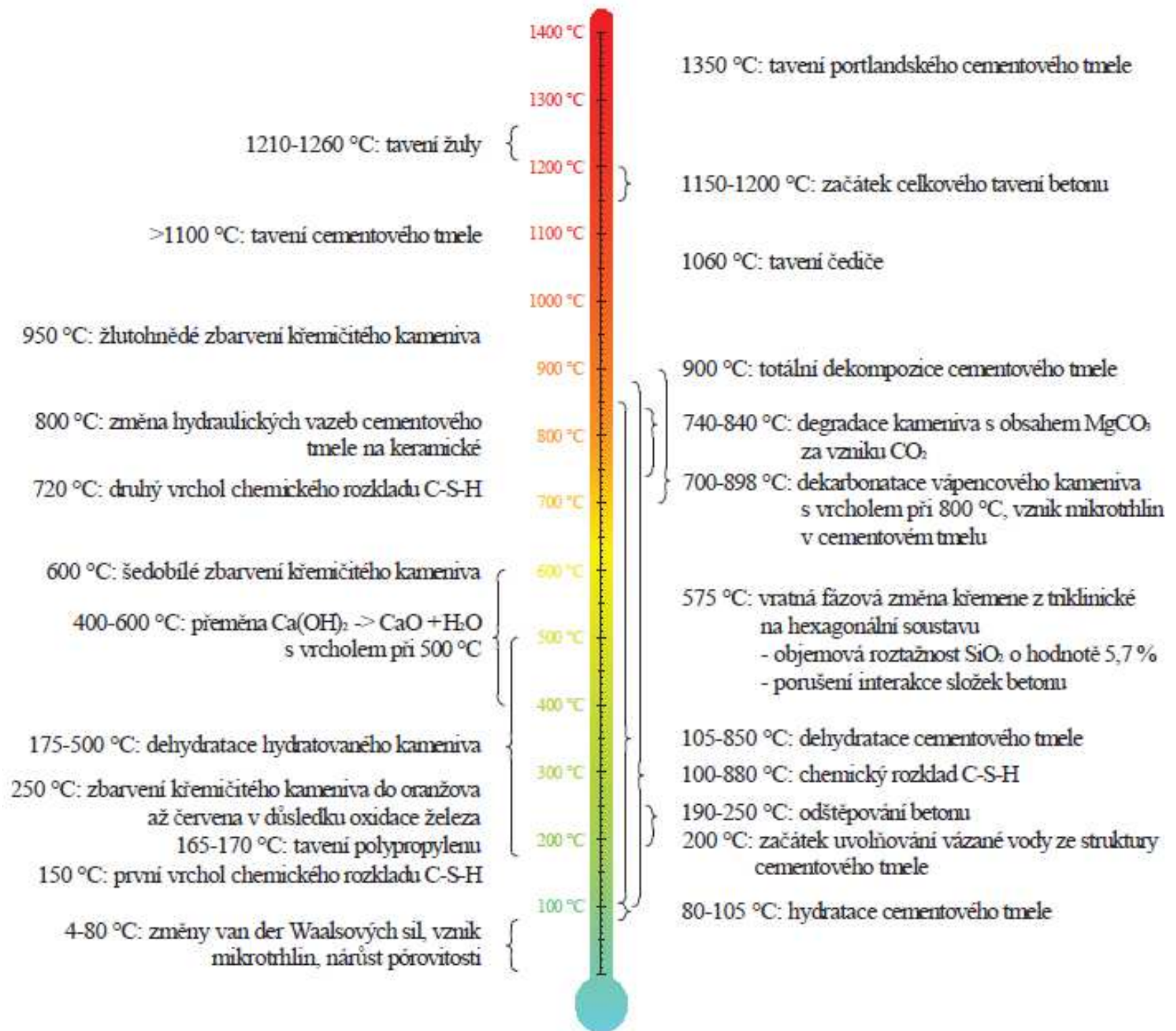
Začíná tavení některých složek betonu.

1200+

Celkové tavení materiálu.

Beton

[19]



Beton

Mechanické, teplotní a fyzikální vlastnosti betonu
v závislosti na teplotě podle ČSN EN 1992-1-2

- Hodnoty vlastností založeny na zkouškách při rychlosti zahřívání $2-50 \text{ K min}^{-1}$ (~ odpovídá normovému požáru).
- Při dlouhodobém vystavení zvýšené teplotě mohou být vlastnosti jiné.

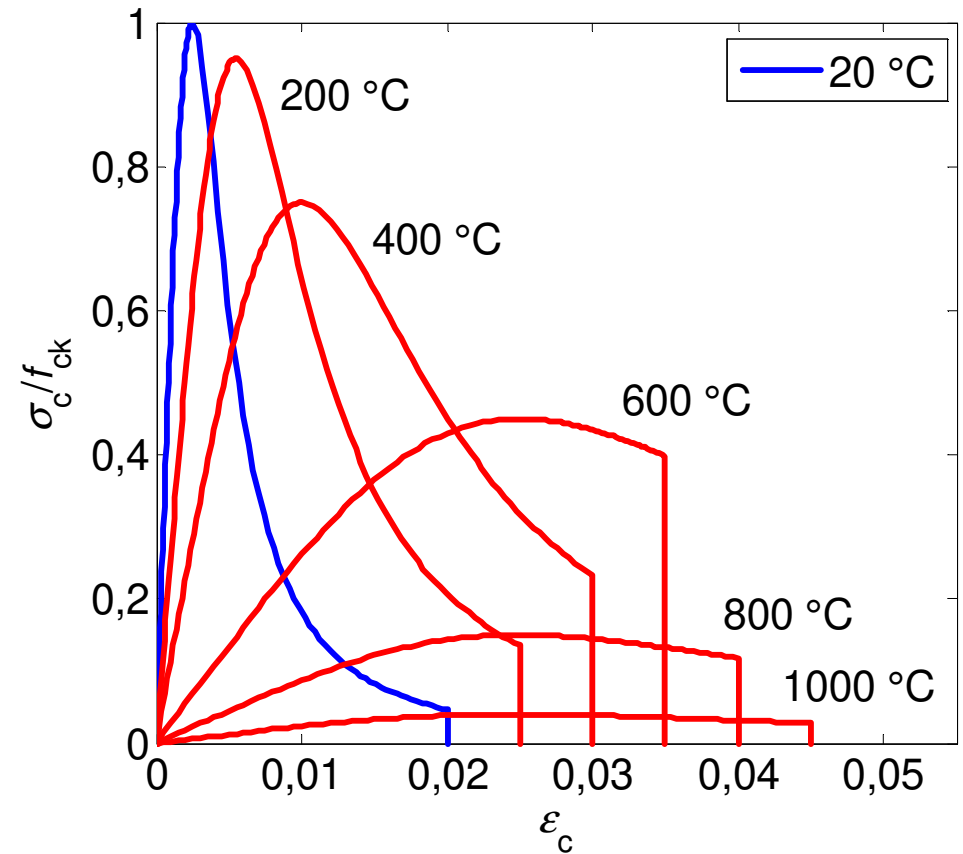
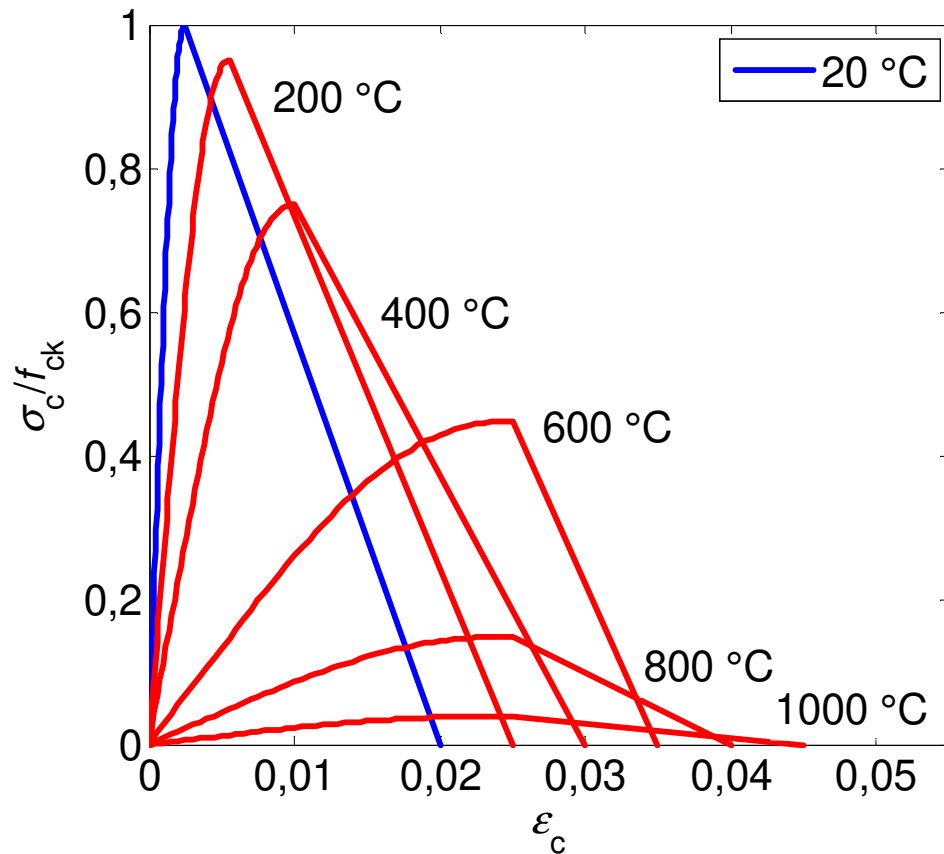
Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Obyčejný beton s křemičitým kamenivem:

lineární model sestupné větve

nelineární model sestupné větve



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Norma udává vztahy vyjadřující teplotní závislost

- teplotního poměrného přetvoření betonu
- měrné tepelné kapacity betonu
- objemové hmotnosti betonu
- tepelné vodivosti betonu

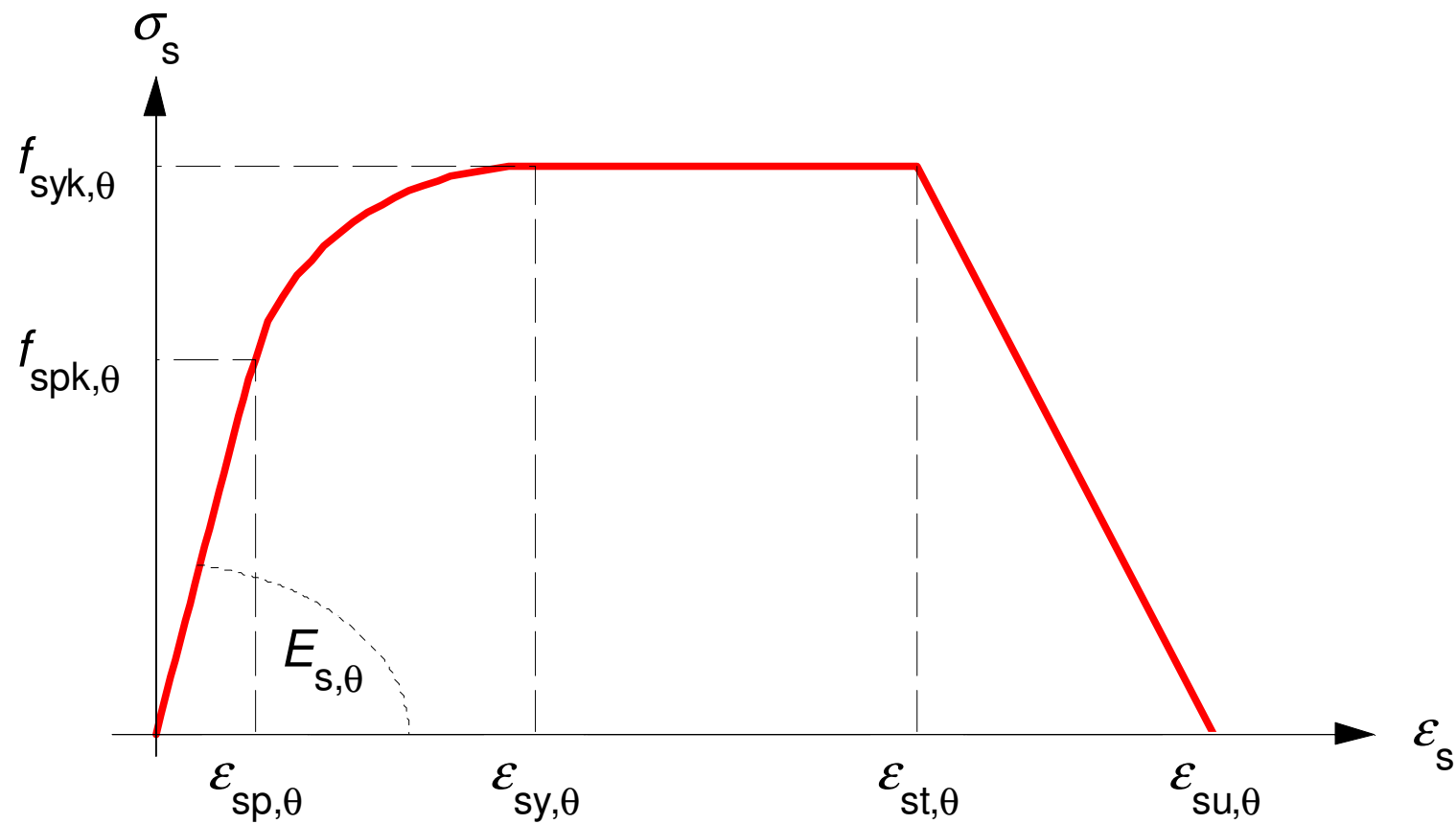
Výztuž

- Norma ČSN EN 1992-1-2 rozlišuje vlastnosti betonářské a předpínací výztuže.

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

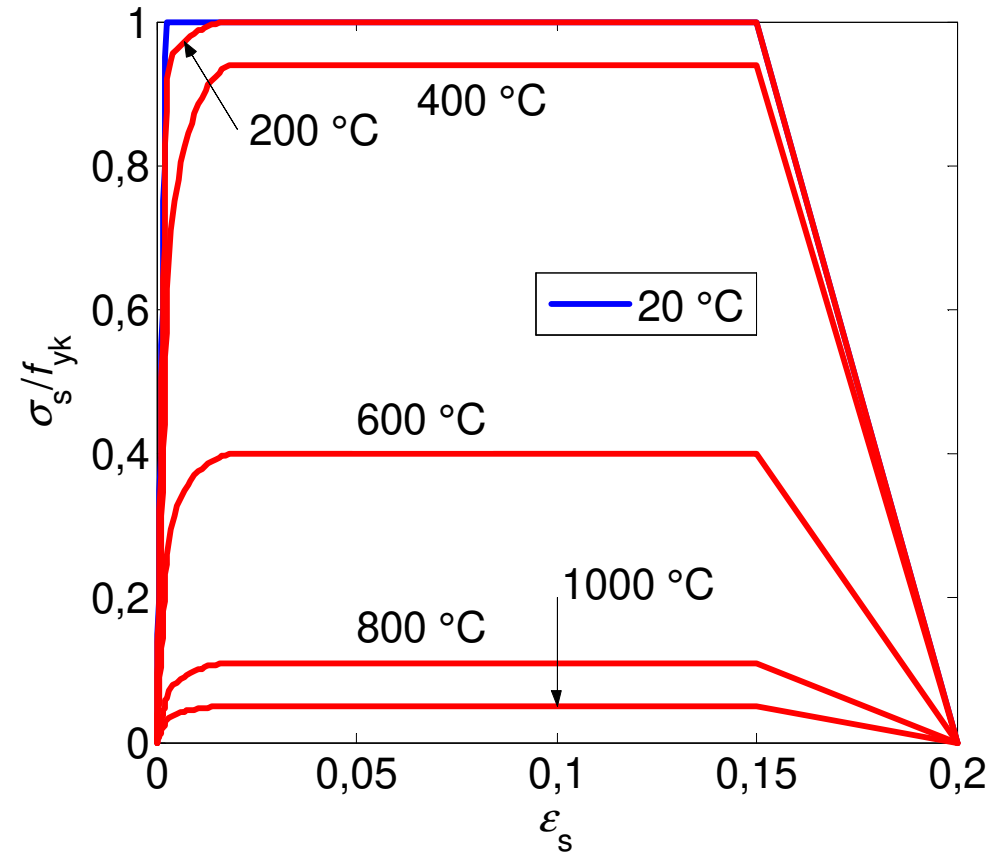
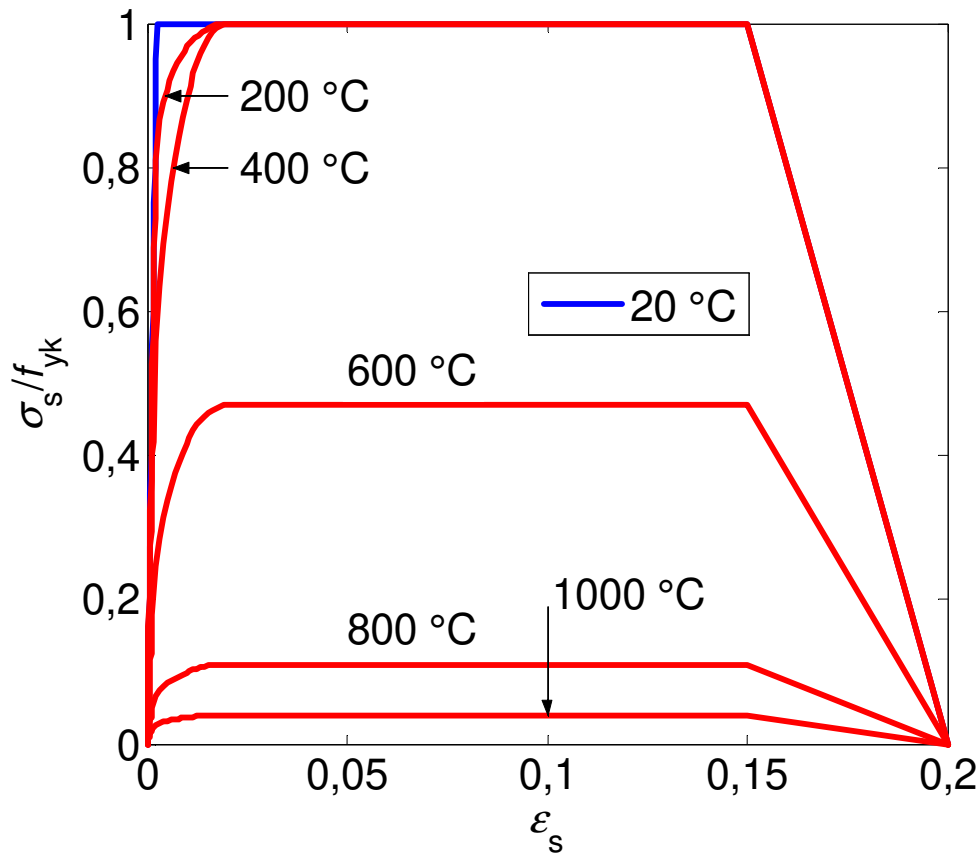
Model pracovního diagramu betonářské výztuže při zvýšených teplotách



Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

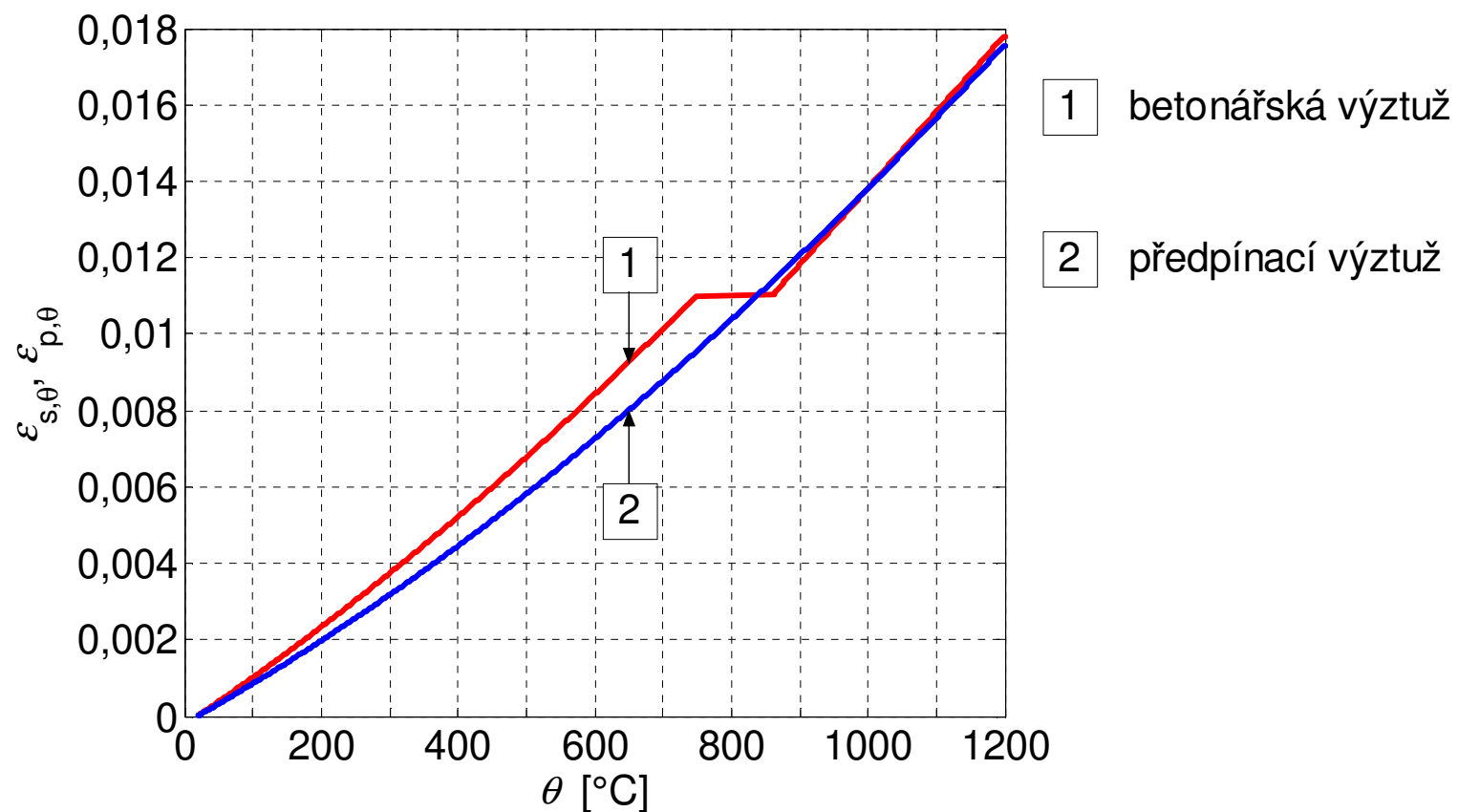
Pracovní diagramy betonářské výztuže třídy N a třídy tažnosti B:
výztuž válcovaná za tepla výztuž tvářená za studena



Výztuž

Teplotní a fyzikální vlastnosti výztuže

Norma udává pouze vztahy vyjadřující teplotní závislost teplotního poměrného přetvoření výztuže, další vlastnosti viz ČSN EN 1993-1-2 nebo ČSN EN 1994-1-2.



Návrhové přístupy

Rozdělení dle úrovně přesnosti a komplexnosti

- analýza prvku
- analýza části konstrukce
- globální analýza konstrukce

Návrhové přístupy

Rozdělení dle použitých metod návrhu

- návrh založený na normalizovaných zkouškách požární odolnosti
- návrh s využitím tabulkových údajů
- návrh pomocí zjednodušených výpočetních metod
- návrh pomocí zpřesněných výpočetních metod
- návrh vycházející z požární zkoušky celé konstrukce (*full-scale testing*)

tabulky a zkoušky ... tzv. *osvědčená návrhová řešení*

Návrhové přístupy

Rozdělení dle uvažovaného modelu požáru

- požární scénář předpokládající rovnoměrné rozložení teploty plynů v požárním úseku (nominální teplotní křivky, parametrické teplotní křivky)
- požární scénář předpokládající nerovnoměrné rozložení teploty plynů v požárním úseku (vicezónové modely, výpočetní dynamické modely)

Návrhové přístupy

Faktory ovlivňují volbu návrhového přístupu

- typ konstrukce (typická, atypická)
- účel objektu (provoz)
- požadovaná přesnost vystižení reálné odezvy konstrukce při vystavení požáru
- dostupný výpočetní aparát
- použité materiály (běžné, netradiční)
- požadavek na rychlost dosažení výsledků apod.

Návrhové přístupy - možné kombinace

[15]

		Požární scénář		
		Rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku		Nerovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku
		Nominální teplotní křivky	Parametrické teplotní křivky	
Úroveň návrhu	Analýza prvku	Zkoušky Tabulky <i>Zjednodušené metody</i> Zpřesněné metody	Zkoušky? Tabulky? <i>Zjednodušené metody</i> Zpřesněné metody	Zkoušky <i>Zjednodušené metody</i> Zpřesněné metody
	Analýza části konstrukce	Zkoušky? <i>Zjednodušené metody?</i> Zpřesněné metody	Zkoušky? <i>Zjednodušené metody?</i> Zpřesněné metody	Zkoušky Zpřesněné metody
	Globální analýza konstrukce	Zpřesněné metody	Zpřesněné metody	Zkoušky Zpřesněné metody

„?“ v současnosti tuto metodu nelze použít, avšak není vyloučeno, že v budoucnu to možné bude.

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1992-1-2 pro betonové konstrukce

- Tabulkové hodnoty pro
 - sloupy
 - stěny
 - tažené prvky
 - nosníky
 - desky

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1992-1-2 pro betonové konstrukce

- Zjednodušené výpočetní metody
 - metoda izotermy 500 °C pro prvky namáhané ohybovým momentem a/nebo normálovou silou (B.1)
 - zónová metoda pro prvky namáhané ohybovým momentem a/nebo normálovou silou (B.2)
 - metoda pro štíhlé sloupy ztužených konstrukcí (B.3), na které jsou založeny tabulky uvedené v příloze C
 - metoda pro ověření únosnosti ve smyku a kroucení (D)
 - zjednodušená výpočetní metoda pro nosníky a desky (E)

Návrhové přístupy

Norma ČSN EN 1992-1-2 pro betonové konstrukce

- Zpřesněné výpočetní metody
 - norma definuje pouze obecné zásady
- Požární zkoušky
 - nejsou předmětem *návrhových norem* (stanovení požární odolnosti pomocí požárních zkoušek se provádí podle příslušných *zkušebních norem*)
- Normu ČSN EN 1992-1-2 nelze použít pro konstrukce s vnější předpínací výztuží a pro skořepinové konstrukce!

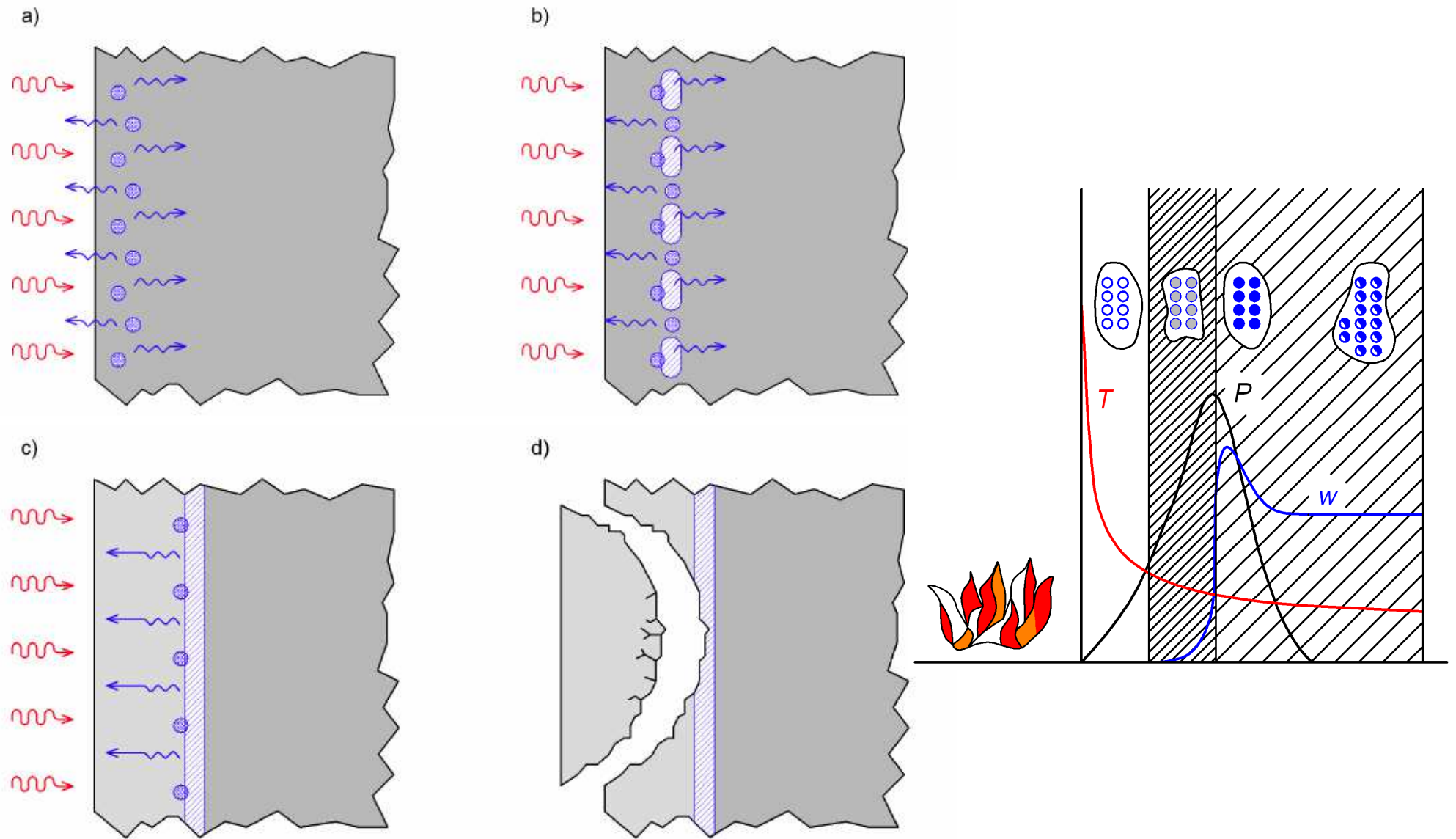
Odštěpování betonu

Odštěpování obecně

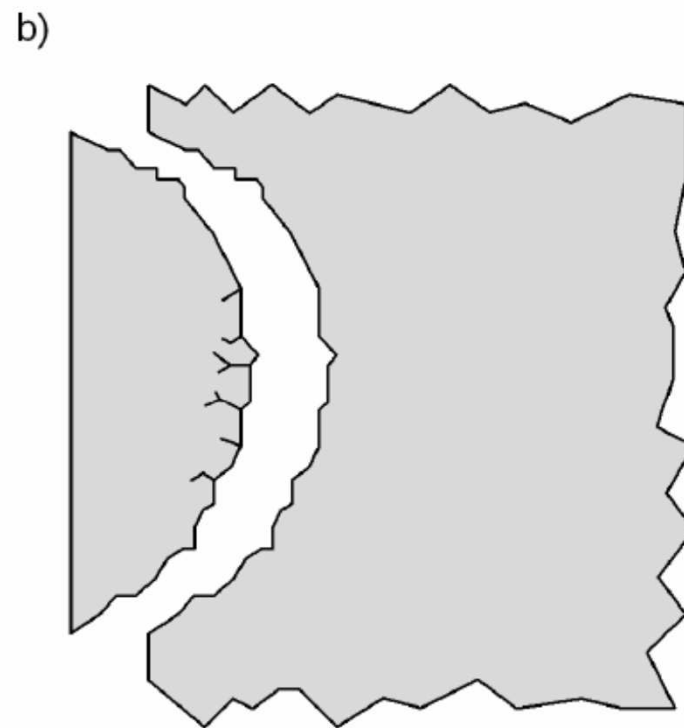
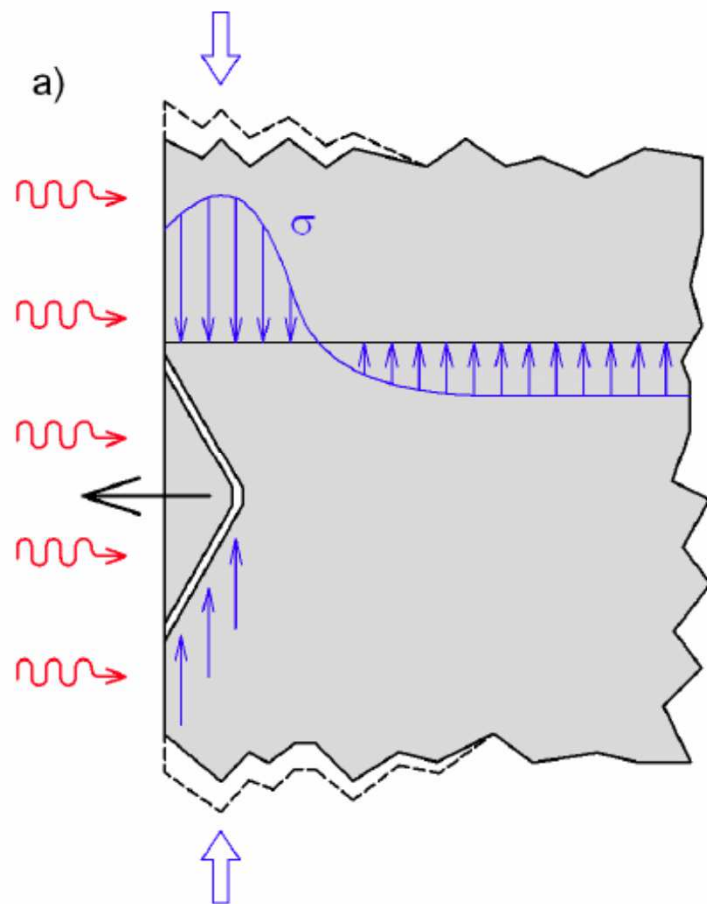
“Oddělování vrstev nebo jednotlivých částí betonu z povrchu konstrukčního prvku při vystavení vysokým a rychle rostoucím teplotám“ [20]



Hypotéza založená na nárůstu pórových tlaků [23,24]



Hypotéza založená na nárůstu teplotních napětí [23,24]



Odštěpování betonu

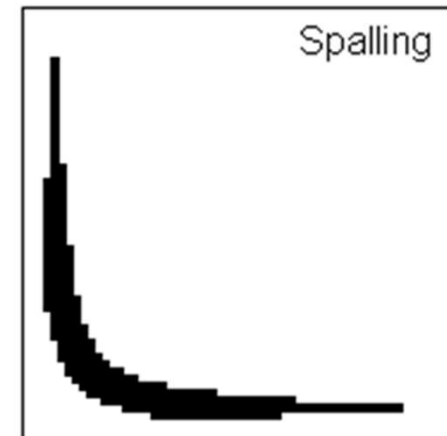
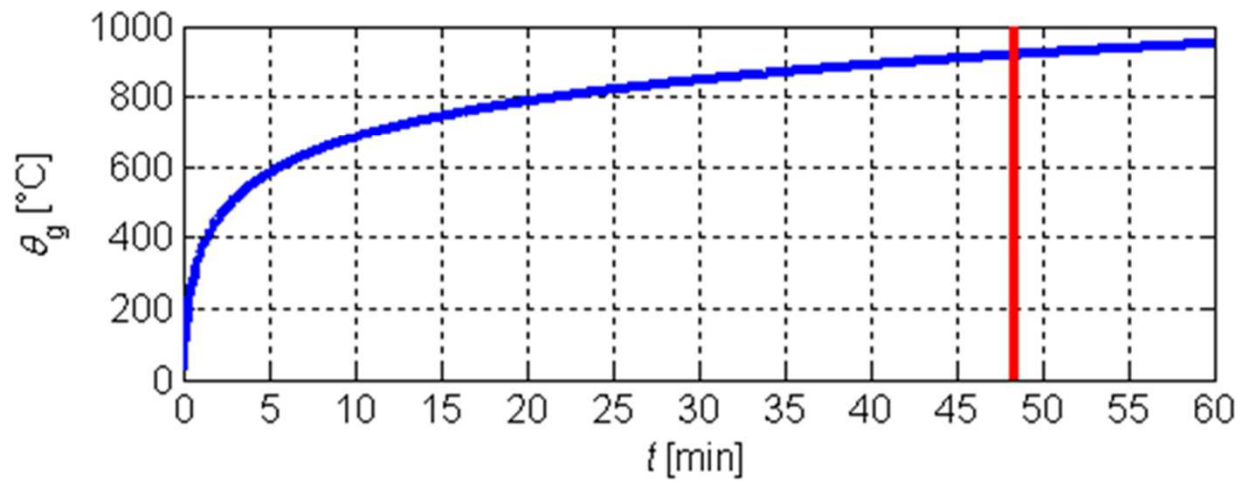
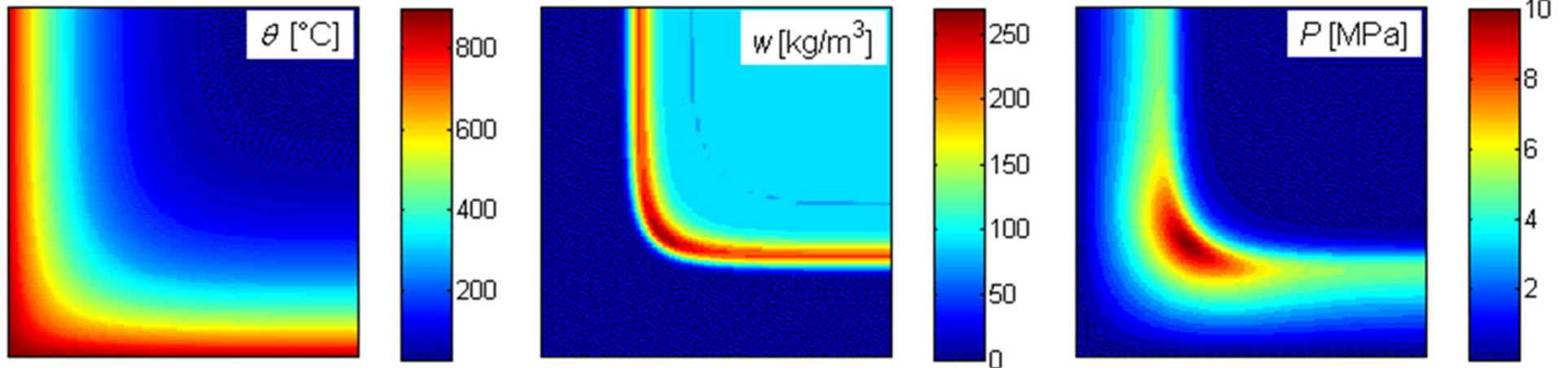
- Při vlhkosti menší než 3 % hm. betonu je odštěpování betonu nepravděpodobné.
- Při vyšší vlhkosti nebo při použití vysoko pevnostních betonů nutno posoudit nebo zvolit vhodné opatření.

Odštěpování betonu

Možná opatření

- Navrhne se povrchová výztužná síť s krytím 15 mm, pruty o průměru min. 2 mm, rozteče max. 50 mm. Krycí vrstva hlavní výztuže ≥ 40 mm.
- Použije se beton, pro který prokazatelně (zkoušky nebo místní zkušenosti) při jeho vystavení účinkům požáru k odštěpování nedojde.
- Navrhnou se ochranné vrstvy, které prokazatelně (zkoušky nebo místní zkušenosti) při požáru zamezují odštěpování.
- Do betonové směsi se použijí propylenová vlákna v množství větším než 2 kg m^{-3} .

Odštěpování betonu



Vlastní experimentální výzkum

Děkuji za pozornost!

Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN 73 0802. Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [2] Vyhláška Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci), ze dne 29. června 2001.
- [3] ČSN EN 1990. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: ČNI, 2004.
- [4] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: ČNI, 2004.
- [5] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006.
- [6] Wald, F. a kol. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03157-8.
- [7] Wald, F. et al. *Software ke stanovení požární odolnosti nosných konstrukcí*. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2011. 134 s. ISBN 978-80-01-04746-0. + prezentace ke školení
- [8] Procházka, J. a kol. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [9] Comprehensive fire protection and safety with concrete. Brussels: European Concrete Platform ASBL, April 2007. Český překlad dostupný na:
<http://www.betontks.cz/downloads/Komplexni-pozarni-ochrana.pdf>

Seznam použitých zdrojů

- [10] The three mechanisms of heat transfer (graphic) [online]. [cit. 10. 6. 2010].
URL: <http://geography.hunter.cuny.edu>
- [11] Hlaváčová, I. Termokinetika [online]. [cit. 10. 6. 2010].
URL: <http://if.vsb.cz/Kontakt/-Hlavacova/termokinetika.doc>
- [12] Štefan, R. - Procházka, J. *TempAnalysis - Computer Program for Temperature Analysis of Cross Sections Exposed to Fire* [software online]. Praha: ČVUT, 2009-2016.
- [13] Štefan, R. - Beneš, M. *HygroThermAnalysis* [software online]. Praha: ČVUT, 2010.
- [14] Beneš, M. Změny struktury betonu vlivem hydratačních a dehydratačních procesů za vysokých teplot. Praha: CIDEAS, 2006.
- [15] Fire Design of Concrete Structures - Material, Structures and Modelling (Bulletin 38). Lausanne: fib, 2007
- [16] Khoury, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog. Struct. Engng Mater.* 2 (2000), 429-447.
- [17] Kupilík, V. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2006. 272 s. ISBN 80-247-1329-2.
- [18] Zadražil, T. - Vodák, F. - Klokočnicková, H. Změny struktury a pevnosti betonu vyvolané teplotním namáháním. *Stav. obzor*, 2005, roč. 14, č. 5, s. 141-143. ISSN 1210-4027.

Seznam použitých zdrojů

- [19] Nosková, L. Experimentální porovnání vlastností různých druhů betonu při vysokých teplotách. Diplomová práce. Praha: Fakulta stavební ČVUT, 2014.
- [20] Khoury, G.A. - Anderberg, Y. Fire safety design. Concrete spalling review. Swedish National Road Administration, 2000.
- [21] Fire damaged concrete tunnel segment [online]. Newkem. [cit. 8. 11. 2011]. URL: http://itscoming.codez.in/newkem/?page_id=678
- [22] Spalling of Reinforced Concrete slabs after severe fire test using catastrophic fire curve [online]. University of Ulster. 2009 [cit. 8. 11. 2011]. URL: <http://www.firesert.ulster.ac.uk/srg.php>
- [23] Zeiml, M. - Lackner, R. - Mang, H.A. Experimental Insight into Spalling Behavior of Concrete Tunnel Linings under Fire Loading. Acta Geotechnica 3 (2008), 295-308.
- [24] Štefan, R. Fire Resistance of Concrete Structures. Prezentace při SDZ. 2010.

© Radek Štefan, Jaroslav Procházka, 2012-2020

Poslední úprava: 9. 10. 2020

Připomínky a návrhy na vylepšení prezentace zasílejte prosím na adresu radek.stefan@fsv.cvut.cz

Upozornění:

Materiál slouží pouze pro studijní a výukové účely v rámci předmětů vyučovaných na Fakultě stavební ČVUT v Praze!