

133PSBZ

Požární spolehlivost betonových a zděných konstrukcí

Přednáška A5

ČVUT v Praze, Fakulta stavební
katedra betonových a zděných konstrukcí

Obsah přednášky

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 - vynikající vlastnosti z hlediska požární odolnosti.
- Přesto - chování betonu (resp. betonových a železobetonových konstrukcí) je 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

Převzato z [1], primární zdroje [3-7]

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

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.
- Přepočet charakteristických hodnot materiálových vlastností na návrhové - viz *přednáška 4*.

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Lze určit z pracovního diagramu charakterizovaného

- tabulkovými hodnotami $f_{ck,\theta}$ (resp. $f_{ck,\theta}/f_{ck}$), $\varepsilon_{c1,\theta}$, $\varepsilon_{cu1,\theta}$
- pro vzestupnou větev (oblast $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta}$) vztahem

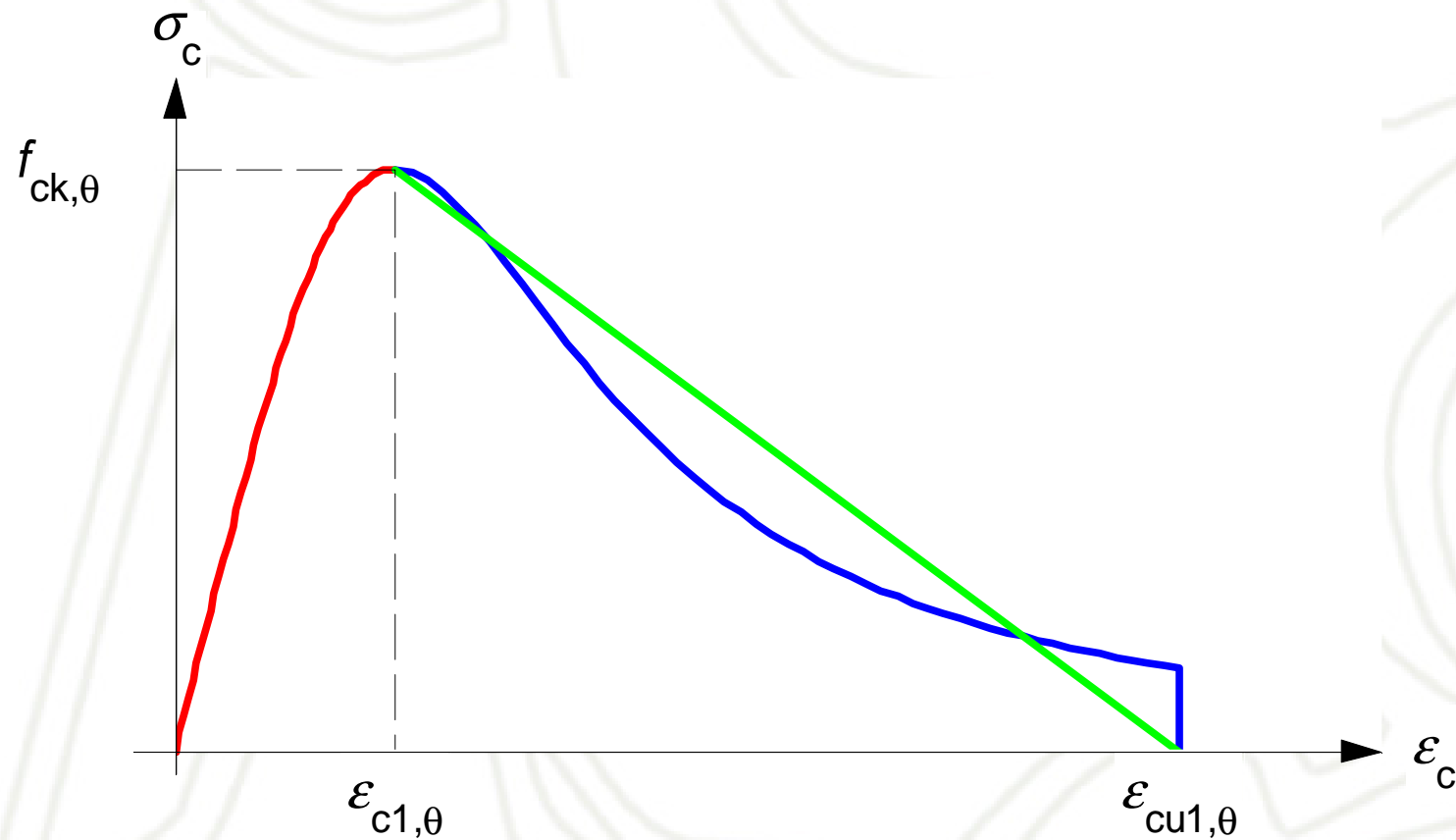
$$\sigma_c(\varepsilon_c, \theta) = \frac{3 \cdot \varepsilon_c \cdot f_{ck,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$$

- pro sestupnou větev (oblast $\varepsilon_{c1,\theta} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$) lineárním poklesem nebo výše uvedeným vztahem

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Model pracovního diagramu betonu v tlaku při zvýšených teplotách [1-2]



Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu obyčejného betonu při zvýšených teplotách [1-2]

Teplota θ [°C]	Beton s křemičitým kamenivem			Beton s vápencovým kamenivem		
	$f_{ck,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$f_{ck,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

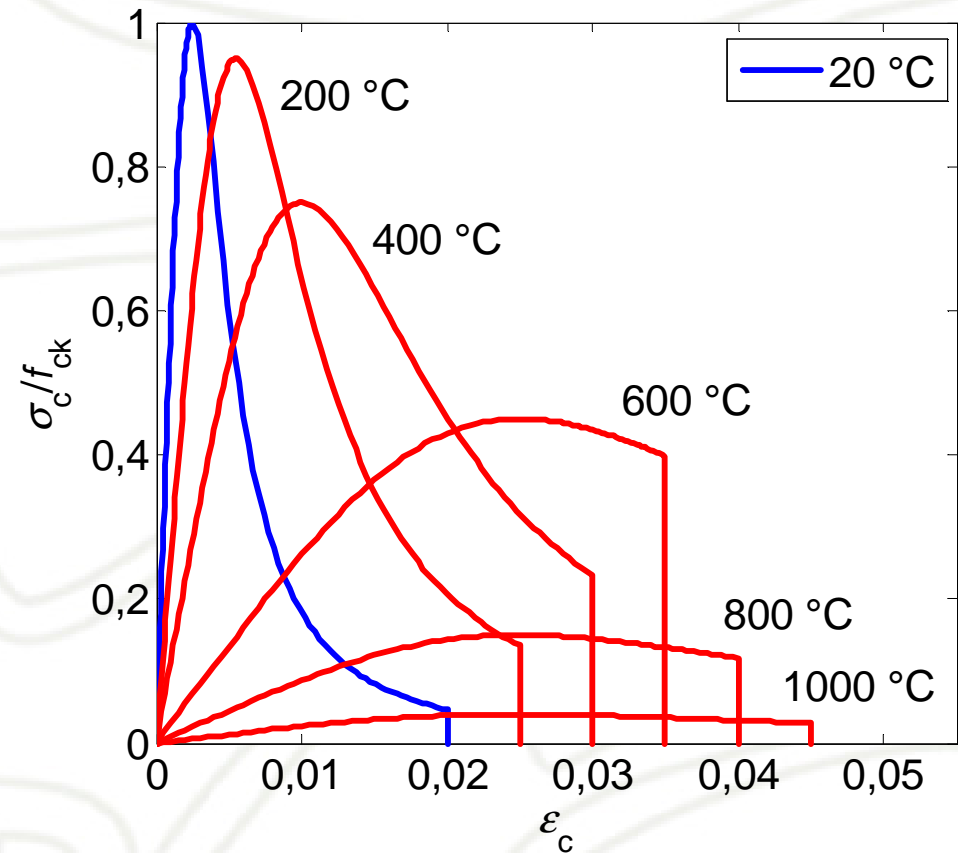
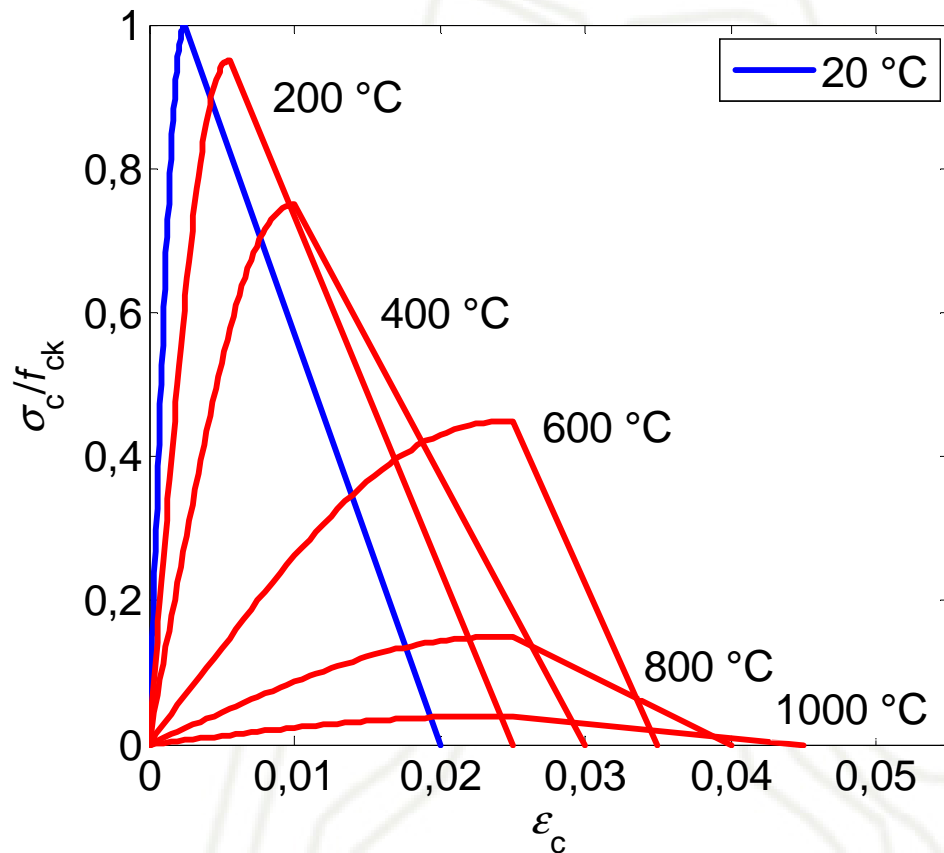
Beton

Mechanické vlastnosti betonu

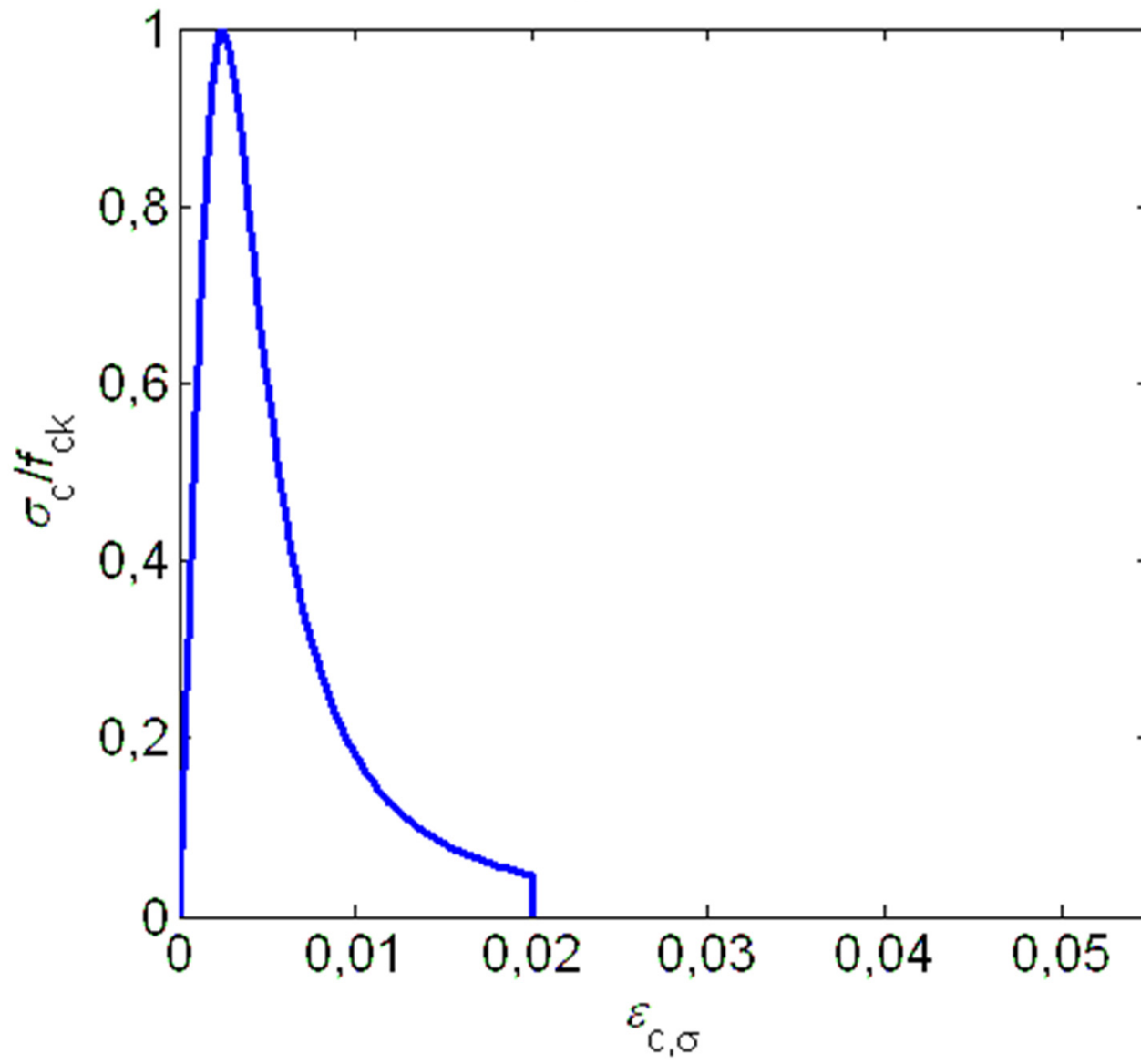
Obyčejný beton s křemičitým kamenivem [1]:

lineární model sestupné větve

nelineární model sestupné větve



$\theta_c = 20\text{ }^\circ\text{C}$



Beton

Mechanické vlastnosti betonu

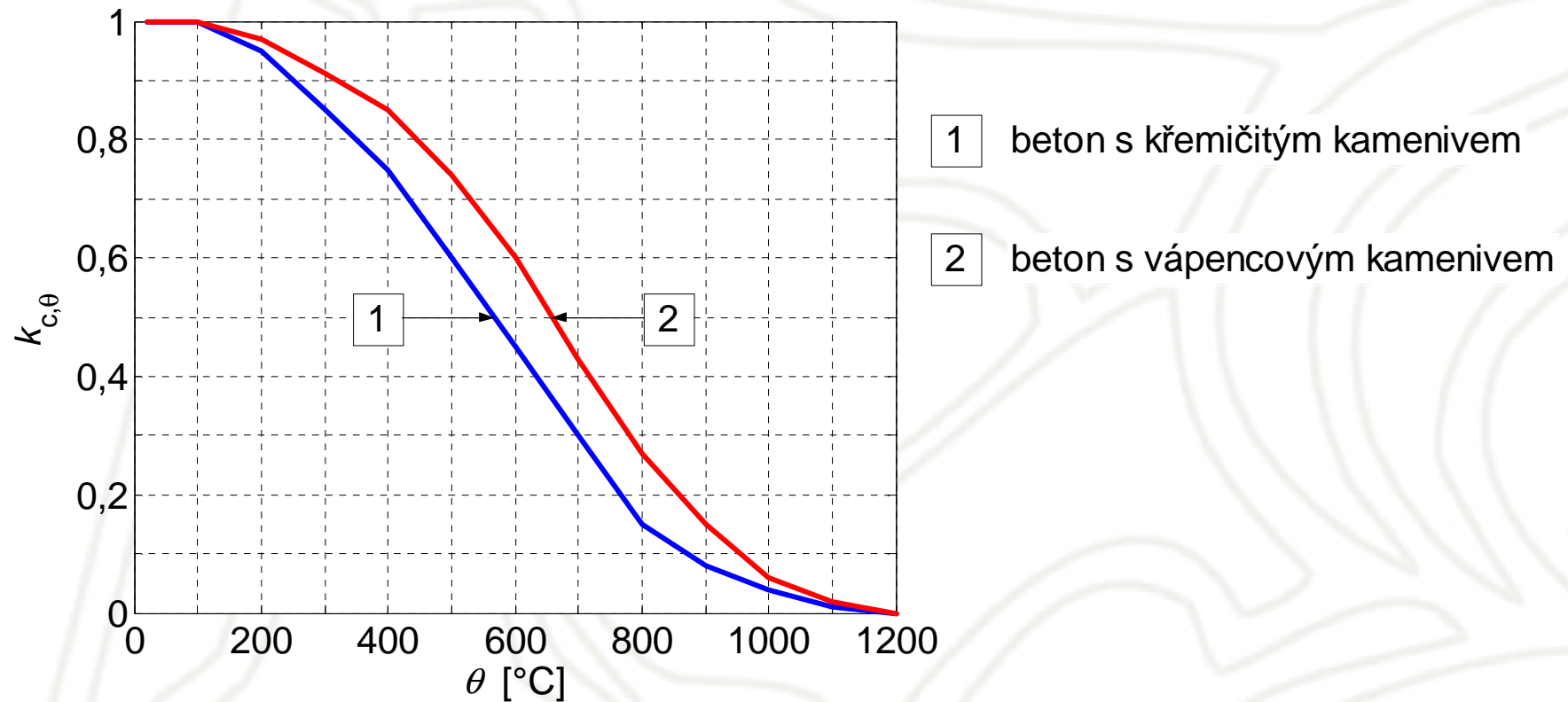
- Poměr $f_{ck,\theta}/f_{ck}$ uvedený v tabulce normy (viz snímek 10) označujeme $k_{c,\theta}$ - součinitel pro redukci charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tlaku.
- Platí:

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_{ck}$$

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Součinitel $k_{c,\theta}$ pro redukci charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tlaku při zvýšených teplotách [1,2]



Beton

Mechanické vlastnosti betonu

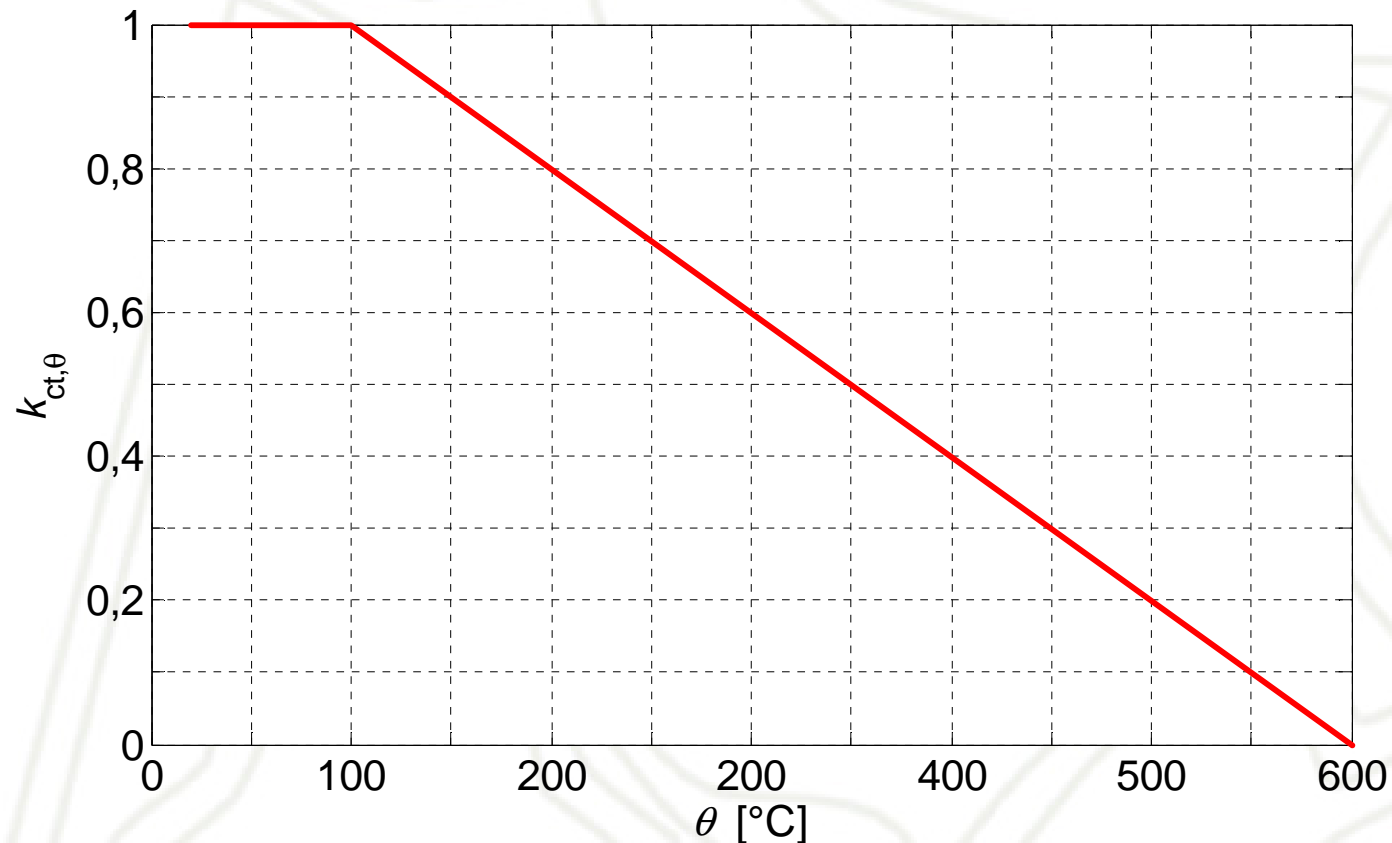
- Pevnost betonu v tahu se obvykle zanedbává.
- Pokud má být při použití zjednodušených nebo zpřesněných metod výpočtu požární odolnosti uvažována, lze ji stanovit pomocí redukčního součinitele $k_{ct,\theta}$

$$f_{ctk,\theta} = k_{ct,\theta} \cdot f_{ctk}$$

Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Součinitel $k_{ct,\theta}$ pro redukci charakteristické hodnoty pevnosti betonu v tahu při zvýšených teplotách [1,2]



Beton

Mechanické vlastnosti betonu

Shrnutí - Norma udává:

- Hodnoty pevností: $f_{ck,\theta}$ a $f_{ctk,\theta}$
(resp. jejich poměr k pevnostem při běžné teplotě)
- Velikosti přetvoření $\varepsilon_{c1,\theta}$ a $\varepsilon_{cu1,\theta}$
- Vztah popisující pracovní diagram betonu

$$\sigma_c(\varepsilon_c, \theta) = 3 \cdot \varepsilon_c \cdot f_{ck,\theta} / \left(\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right) \right)$$

Otázka do diskuse - Jak určíme modul pružnosti betonu?

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

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Teplotní poměrné přetvoření betonu

- Beton s křemičitým kamenivem

$$20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 700 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3$$

$$700 \text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = 14 \cdot 10^{-3}$$

- Beton s vápencovým kamenivem

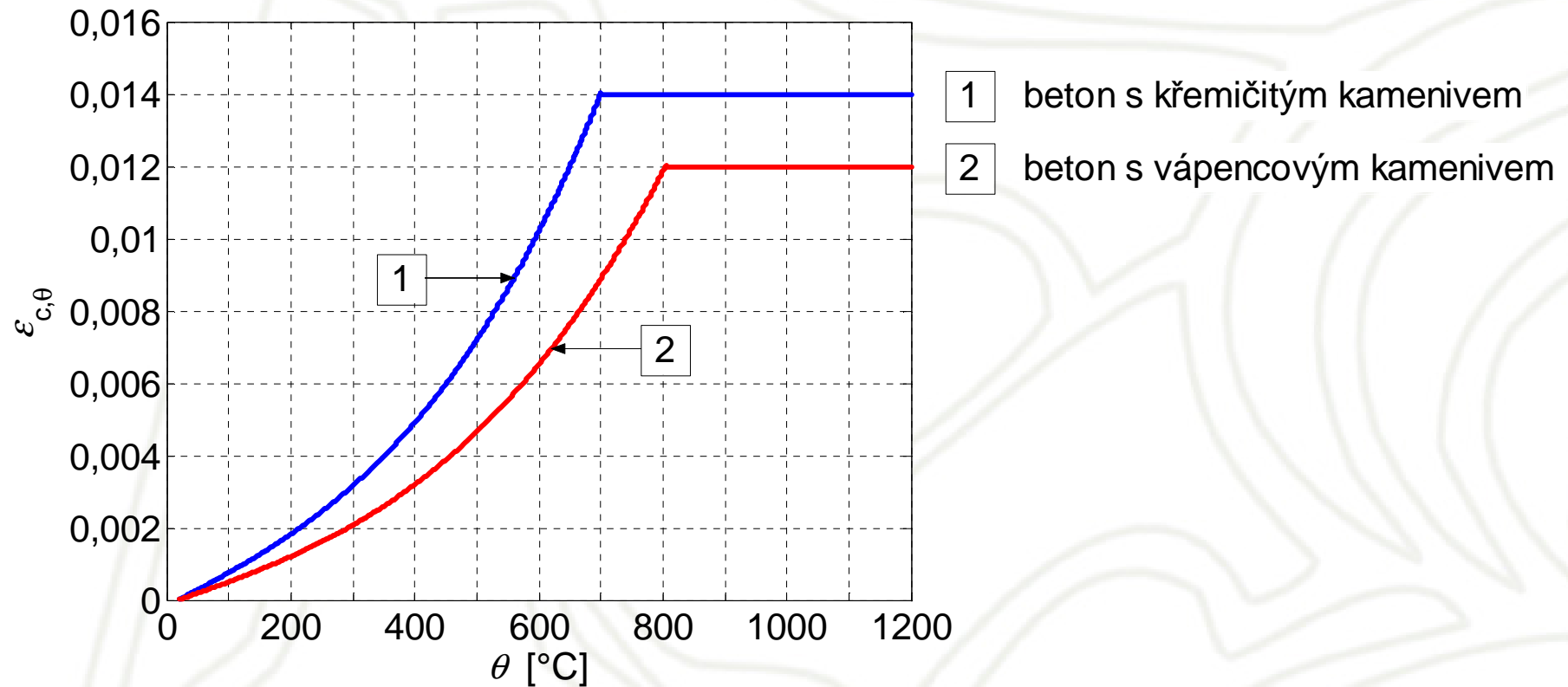
$$20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 805 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = -1,2 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3$$

$$805 \text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \varepsilon_{c,\theta} = 12 \cdot 10^{-3}$$

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Teplotní poměrné přetvoření betonu $\epsilon_{c,\theta}$ ve vztahu k délce při 20 °C [1,2]



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

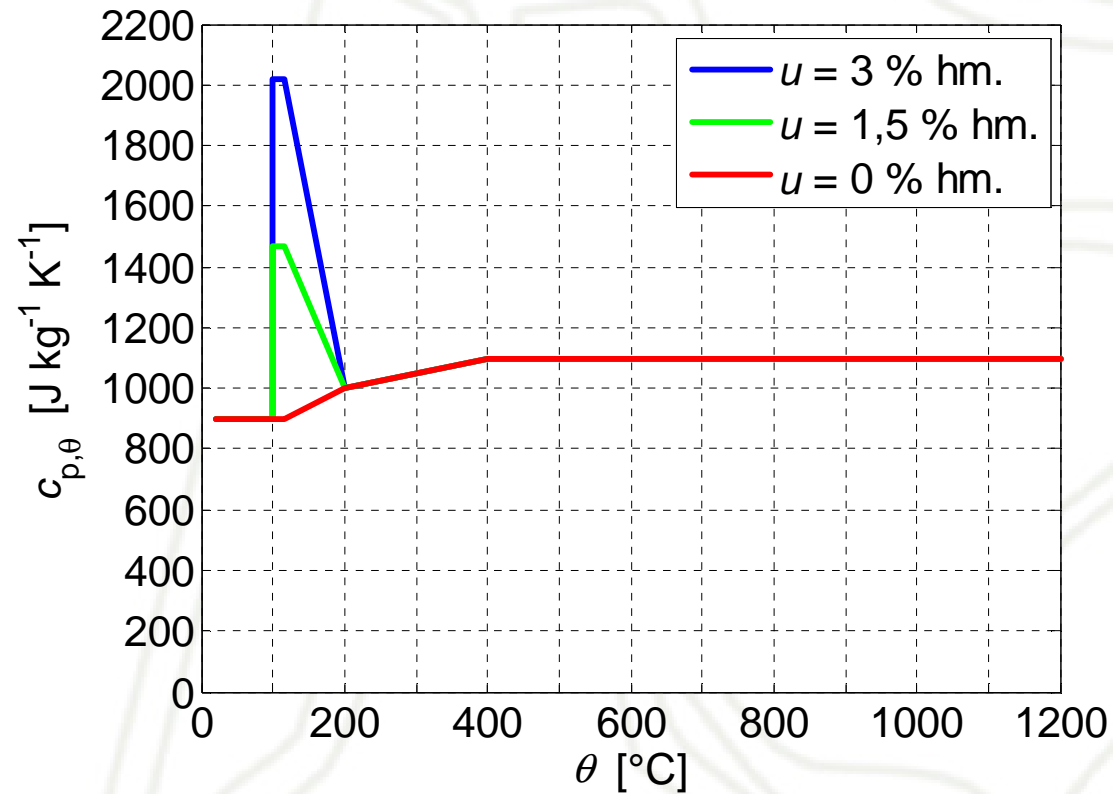
Měrná tepelná kapacita betonu

- Závisí na vlhkosti betonu.
- Norma udává hodnoty měrné tepelné kapacity pro beton s vlhkostí 0, 1,5 a 3 % hmotnosti betonu.
- To zjednodušeně umožňuje zohlednit vliv vlhkosti a jejího transportu, aniž by byl uvažován model sdruženého vedení tepla a vlhkosti.

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Měrná tepelná kapacita betonu $c_{p,\theta}$ [1,2]



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Objemová hmotnost betonu

- Pokles je způsoben ztrátou volné i vázané vody.

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{pro } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(1 - 0,02 \cdot \frac{\theta - 115}{85} \right)$$

$$\text{pro } 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(0,98 - 0,03 \cdot \frac{\theta - 200}{200} \right)$$

$$\text{pro } 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

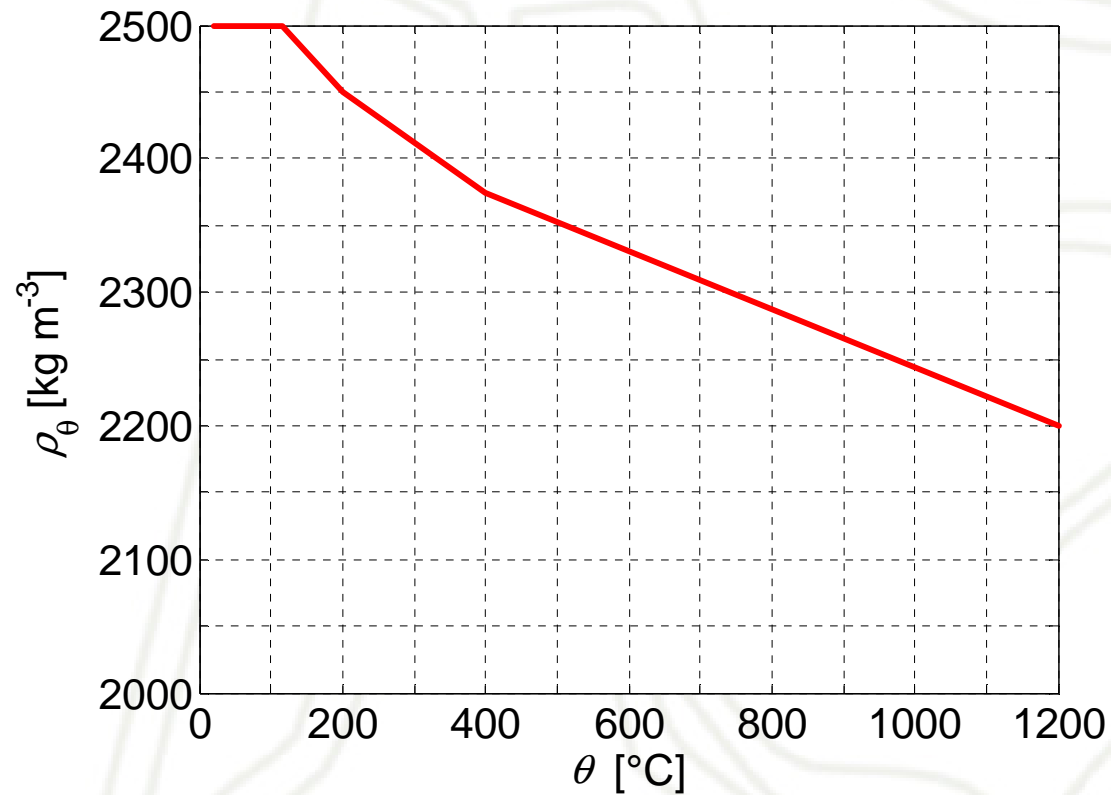
$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left(0,95 - 0,07 \cdot \frac{\theta - 400}{800} \right)$$

$$\text{pro } 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Objemová hmotnost betonu ρ_θ , $\rho_{20^\circ\text{C}} = 2500 \text{ kg m}^{-3}$ [1,2]



Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Tepelná vodivost betonu

- Horní mez

$$\lambda_{c,\theta} = 2 - 0,2451 \cdot \frac{\theta}{100} + 0,0107 \cdot \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$$

- Dolní mez

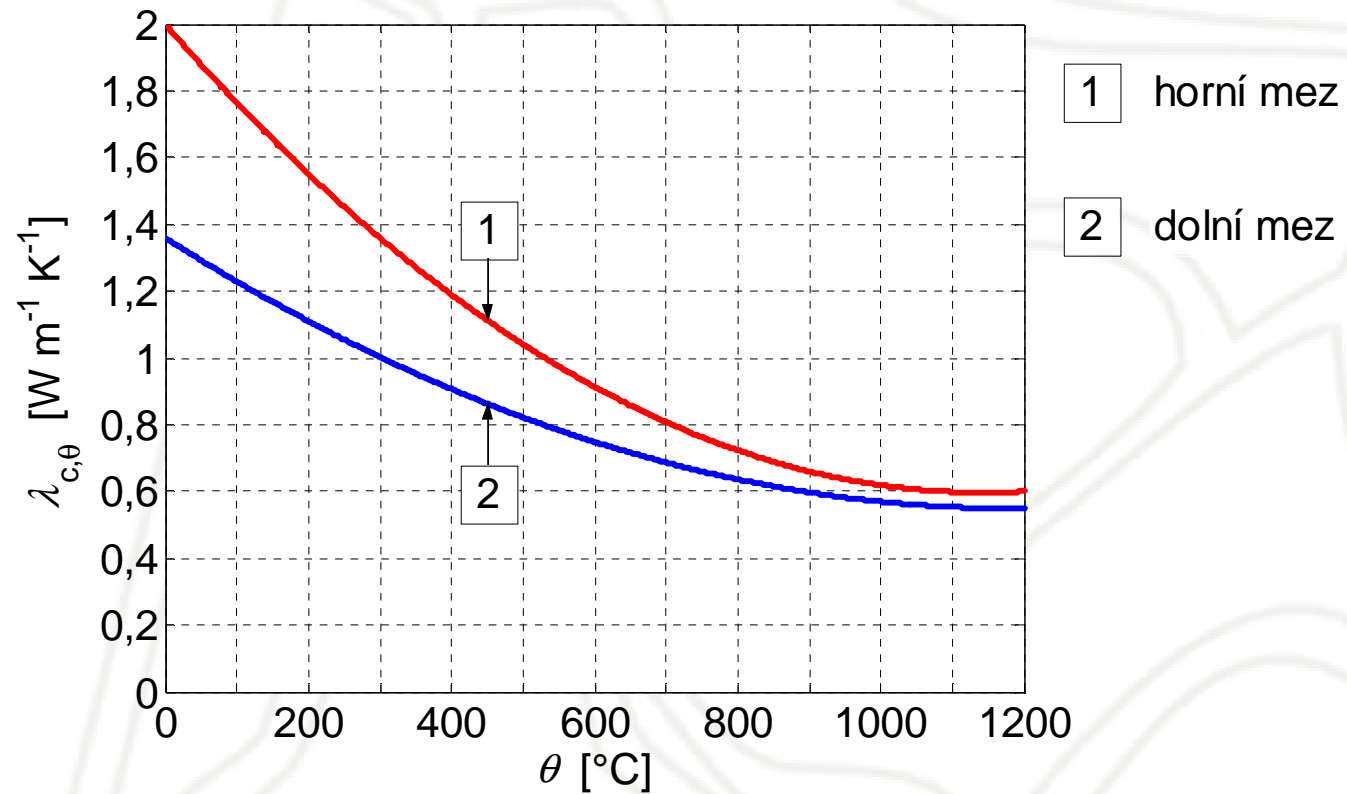
$$\lambda_{c,\theta} = 1,36 - 0,136 \cdot \frac{\theta}{100} + 0,0057 \cdot \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$$

$$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$$

Beton

Teplotní a fyzikální vlastnosti betonu

Tepelná vodivost betonu $\lambda_{c,\theta}$ [1,2]



Výztuž

- Vliv zvýšených teplot na strukturu oceli a na změnu jejích vlastností - viz předměty katedry 134.
- Norma ČSN EN 1992-1-2 rozlišuje vlastnosti betonářské a předpínací výztuže.
- Zde se budeme zabývat pouze výztuží betonářskou. Pro předpínací výztuž se index „s“ v označení jednotlivých veličin (pevnost, přetvoření, ...) nahradí indexem „p“.

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

Lze určit z pracovního diagramu charakterizovaného

- sklonem v lineárně pružné oblasti $E_{s,\theta}$
- charakteristickou hodnotou meze úměrnosti $f_{spk,\theta}$
- maximálním napětím $f_{syk,\theta}$
- poměrnými přetvořeními $\square \varepsilon_{s,\theta}$
(index „_“ vyjadřuje „p“, „y“, „t“, „u“)
- vztahy popisujícími jednotlivé oblasti diagramu
(vztahy - viz skripta [1] nebo norma [2])

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

- Poměrná přetvoření $\varepsilon_{s,\theta}$

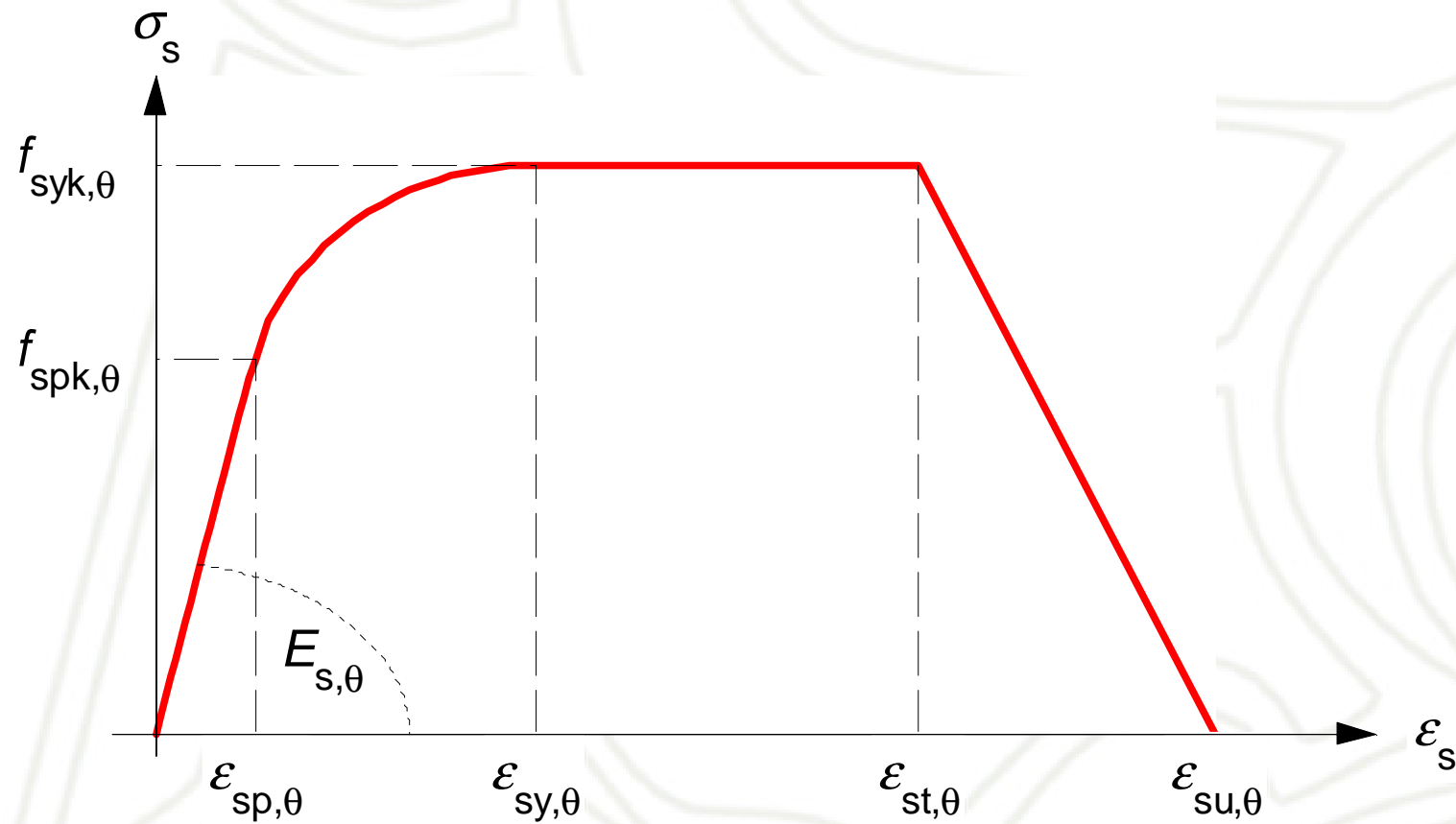
	$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon_{sy,\theta}$	$\varepsilon_{st,\theta}$	$\varepsilon_{su,\theta}$
Výztuž třídy A	$f_{spk,\theta}/E_{s,\theta}$	0,02	0,05	0,10
Výztuž třídy B a C	$f_{spk,\theta}/E_{s,\theta}$	0,02	0,15	0,20
Třídy tažnosti výztuže A, B, C jsou definovány v normě ČSN EN 1992-1-1.				

- Ostatní parametry pracovního diagramu betonářské výztuže jsou v normě udány ve dvou třídách - N a X.
- V ČR se běžně uvažuje třída N.

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

Model pracovního diagramu betonářské výztuže při zvýšených teplotách [1-2]



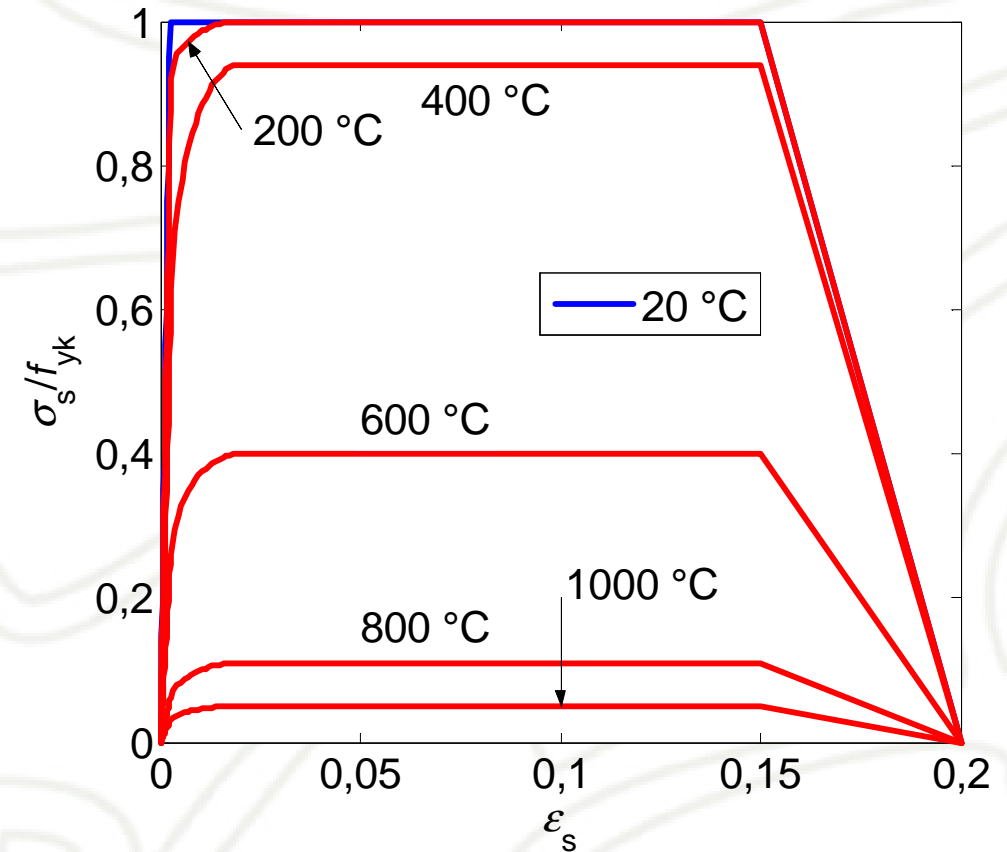
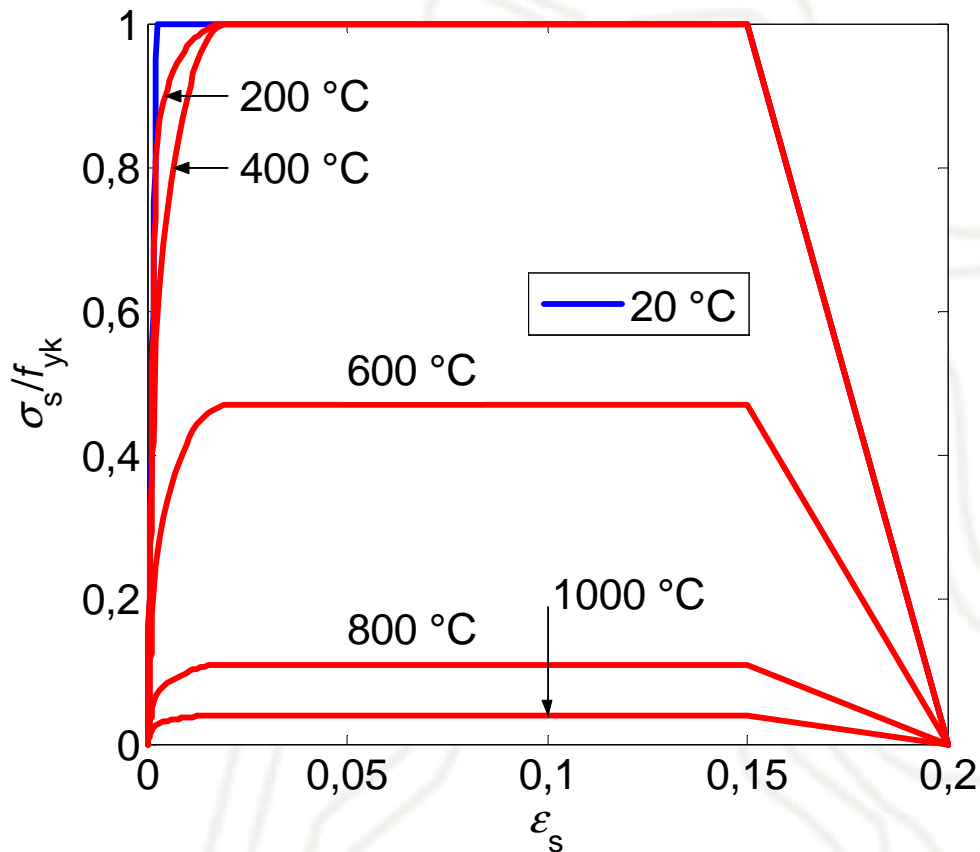
Třída N hodnot parametrů pracovního diagramu betonářské výztuže při zvýšených teplotách [1-2]

Teplota θ [°C]	$f_{syk,\theta}/f_{yk}$		$f_{spk,\theta}/f_{yk}$		$E_{s,\theta}/E_s$	
	Výztuž válcovaná za tepla	Výztuž tvářená za studena	Výztuž válcovaná za tepla	Výztuž tvářená za studena	Výztuž válcovaná za tepla	Výztuž tvářená za studena
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

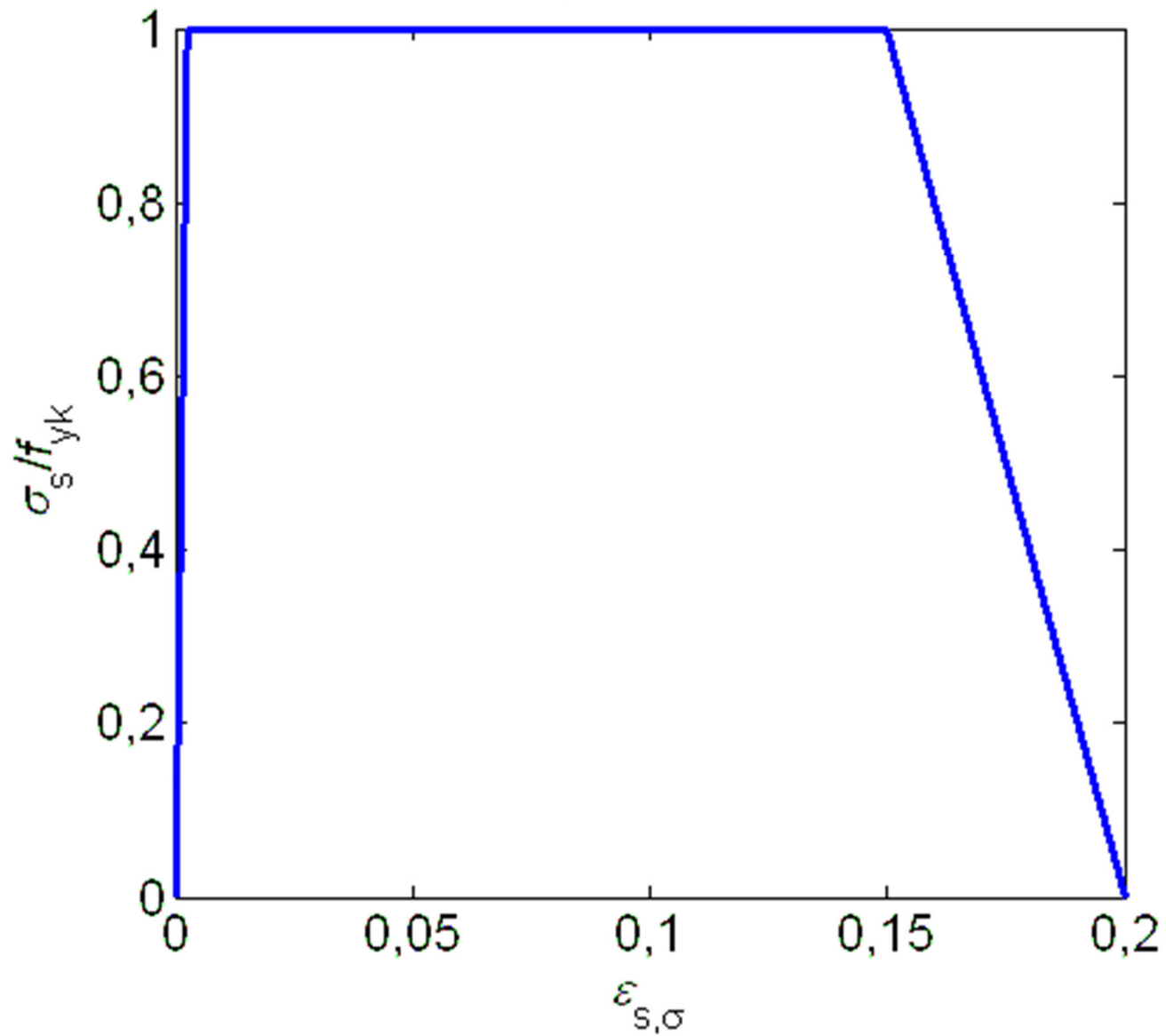
Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

Pracovní diagramy betonářské výztuže třídy N a třídy tažnosti B [1]:
výztuž válcovaná za tepla výztuž tvářená za studena



$\theta_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

- Poměr $f_{syk,\theta}/f_{yk}$, uvedený v tabulce normy (viz snímek 31) označujeme $k_{s,\theta}$ - součinitel pro redukci charakteristické hodnoty meze kluzu betonářské výztuže.
- Platí:
$$f_{syk,\theta} = k_{s,\theta} \cdot f_{yk}$$
- Hodnoty $k_{s,\theta}$ z tabulky platí pro tahovou výztuž třídy N, pro kterou platí $\varepsilon_{s,fi} \geq 2 \%$.
- Pro tlakovou výztuž ve sloupech a tlačných oblastech trámů a desek se hodnoty součinitele $k_{s,\theta}$ určí ze vztahů:

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

$$k_{s,\theta} = 1,0$$

pro $20\text{ °C} \leq \theta \leq 100\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,7 - 0,3 \cdot \frac{\theta - 400}{300}$$

pro $100\text{ °C} < \theta \leq 400\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,57 - 0,13 \cdot \frac{\theta - 500}{100}$$

pro $400\text{ °C} < \theta \leq 500\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,1 - 0,47 \cdot \frac{\theta - 700}{200}$$

pro $500\text{ °C} < \theta \leq 700\text{ °C}$

$$k_{s,\theta} = 0,1 \cdot \frac{1200 - \theta}{500}$$

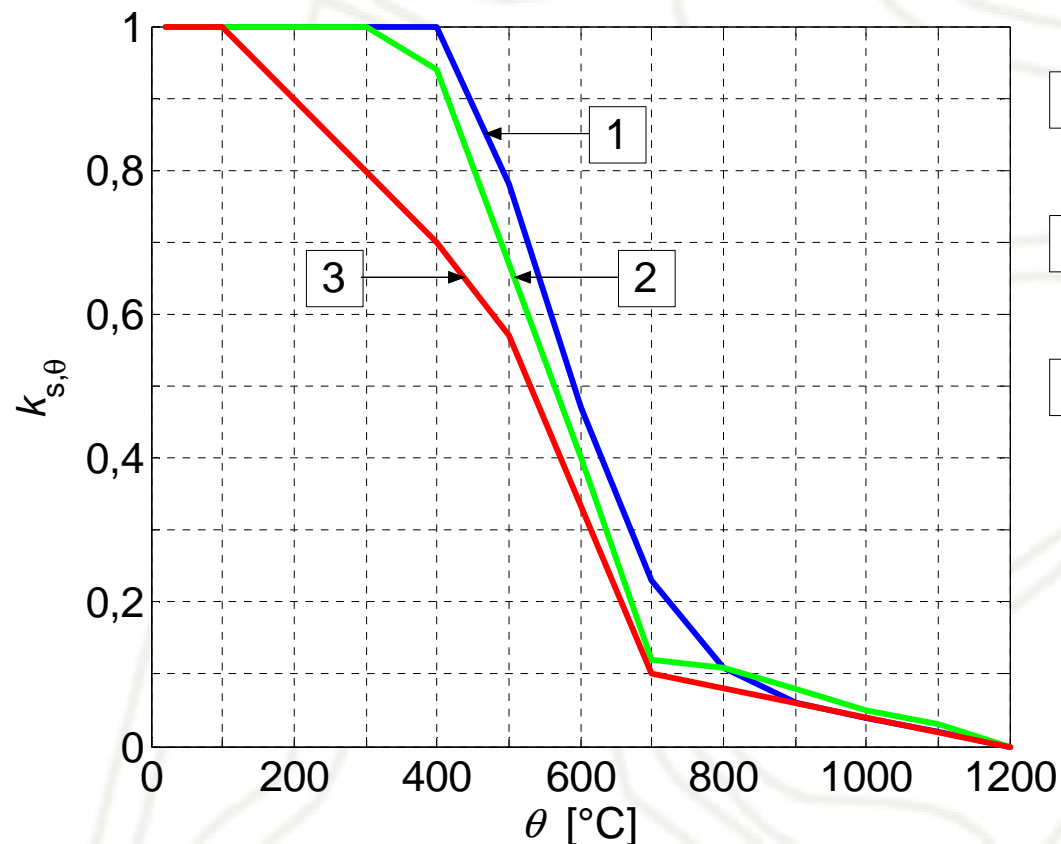
pro $700\text{ °C} < \theta \leq 1200\text{ °C}$

- Vztahy platí pro výztuž třídy N se smluvní mezí kluzu 0,2, lze je použít také pro tahovou výztuž, kde $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$.

Výztuž

Mechanické vlastnosti výztuže

Součinitel $k_{s,\theta}$ pro redukci charakteristické hodnoty meze kluzu (f_{yk}) tahové a tlakové výztuže třídy N [1,2]

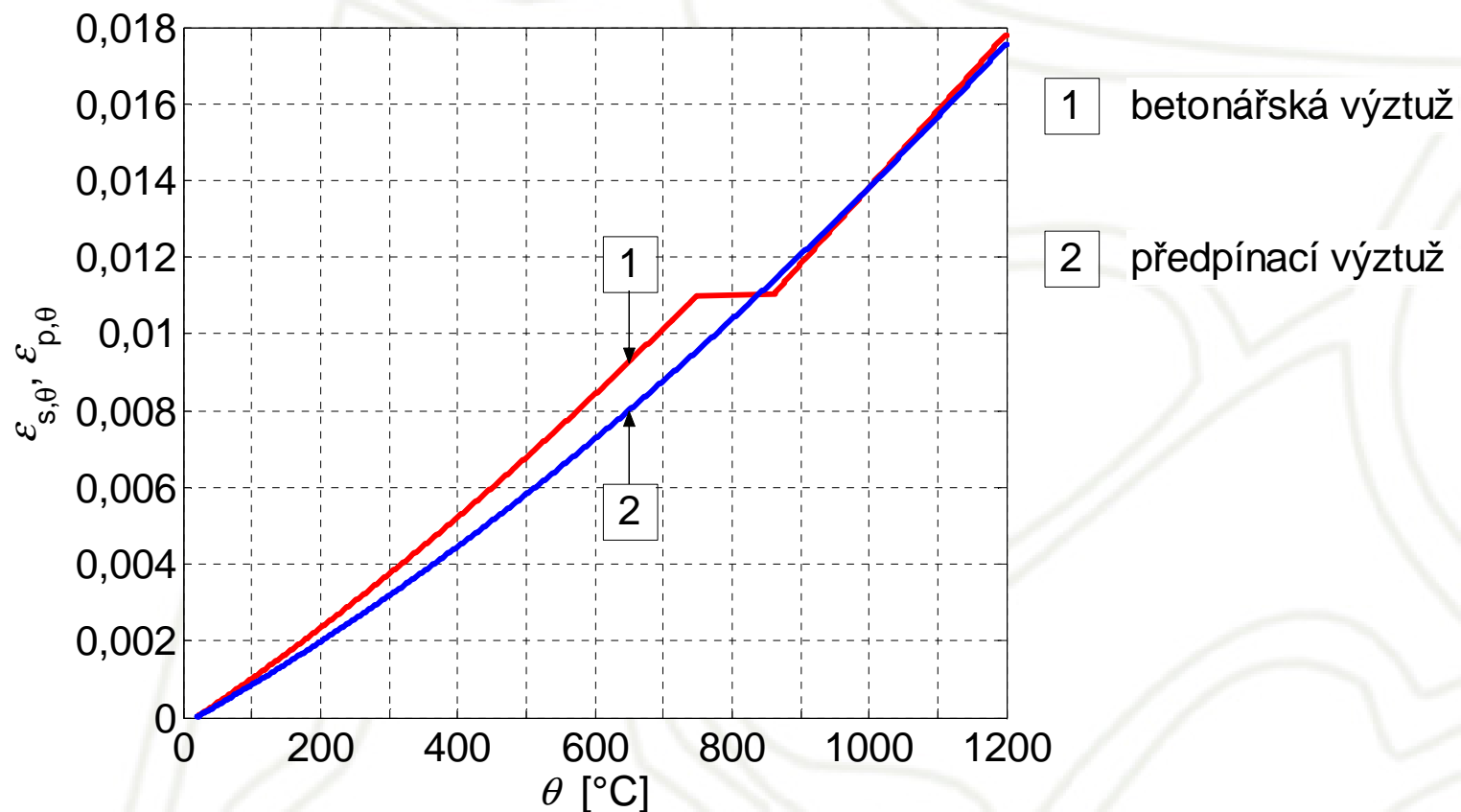


- 1 tahová výztuž válcovaná za tepla při poměrném přetvoření $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$
- 2 tahová výztuž tvářená za studena při poměrném přetvoření $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$
- 3 tlaková a tahová výztuž při poměrném přetvoření $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$

Výztuž

Teplotní a fyzikální vlastnosti výztuže

Norma udává pouze vztahy vyjadřující teplotní závislost teplotního poměrného přetvoření výztuže.



A faint, light-colored line drawing of a person in a suit, possibly a scientist or researcher, holding a large circular object. The drawing is composed of simple, clean lines and is positioned in the background of the slide.

Děkuji za pozornost!

Seznam použitých zdrojů

- [1] Procházka, J. a kol. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [2] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2006.
- [3] Beneš, M. Změny struktury betonu vlivem hydratačních a dehydratačních procesů za vysokých teplot [online]. Praha: CIDEAS, 2006. Poslední aktualizace. 16. 11. 2006. URL <http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/4tlv/TL07CZ_3225-5.pdf>.
- [4] Fire Design of Concrete Structures - Material, Structures and Modelling (Bulletin 38). Lausanne: fib, 2007
- [5] Khoury, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. Prog. Struct. Engng Mater. 2 (2000), 429-447.
- [6] Kupilík, V. Stavební konstrukce z požárního hlediska. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2006. 272 s. ISBN 80-247-1329-2.
- [7] Zadražil, T. - Vodák, F. - Klokočnicková, H. Změny struktury a pevnosti betonu vyvolané teplotním namáháním. Stavební obzor, 2005, roč. 14, č. 5, s. 141-143. ISSN 1210-4027.

© Radek Štefan, Jaroslav Procházka 2011-2016

Poslední úprava: 26.10.2016

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!