

Předpjatý beton

Přednáška 1

Obsah

- Podstata předpjatého betonu, srovnání s železobetonem
- Statické působení předpjatého betonu
- Materiálové vlastnosti betonu
- Materiálové vlastnosti – betonářská a předpínací výztuž, výroba

■ Požadované znalosti

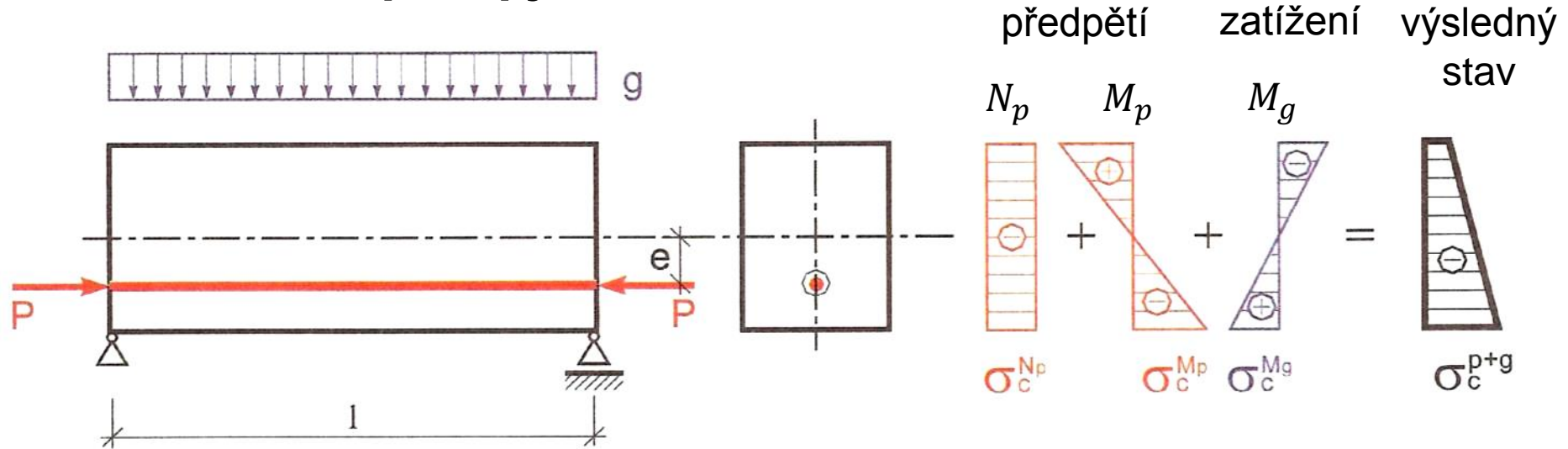
■ Základy z pružnosti

- výpočet normálových a tangenciálních napětí po výšce průřezu z dokonale lineárně pružného materiálu (podle teorie pružnosti)
- výpočet průřezových charakteristik

■ Základy statiky –

- výpočet a vykreslení vnitřních sil na staticky určitých konstrukcích
- dtto na staticky neurčitých konstrukcích, konkrétně silová metoda pro určení vnitřních sil staticky neurčitých nosníků

■ Podstata předpjatého betonu



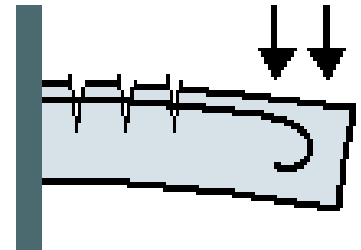
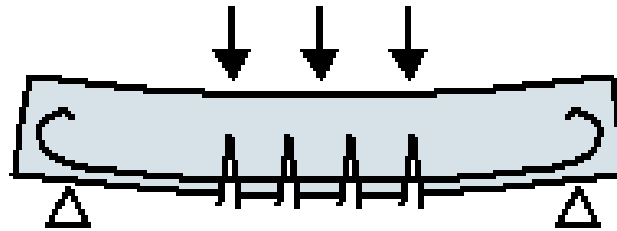
□ Železobeton:

- beton přenáší tlak
- tahy přenáší výztuž (malá pevnost betonu v tahu → vznik trhlin v betonu)

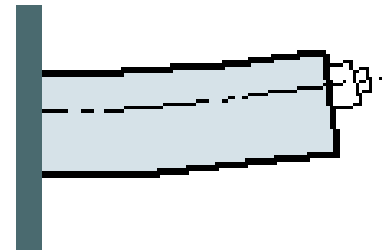
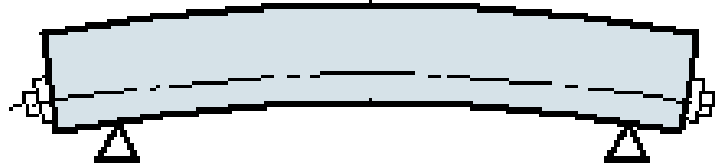
□ Předpjatý beton:

- Předpjatá výztuž vnáší do betonu přídavná tlaková napětí tak aby byly vyloučeny tahy → z předpjatého betonu se stává pružný materiál

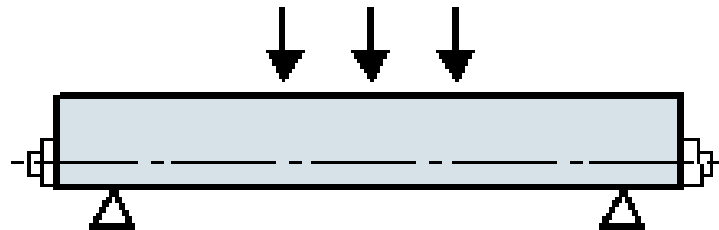
Železobeton
vznik trhlin vlivem zatížení



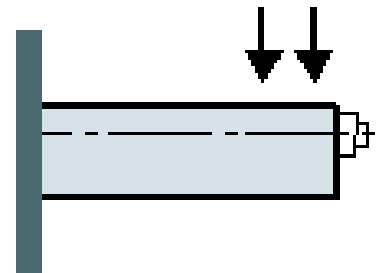
Dodatečně předpjatý
beton nezatížený



Dodatečně předpjatý
beton zatížený



prostý nosník



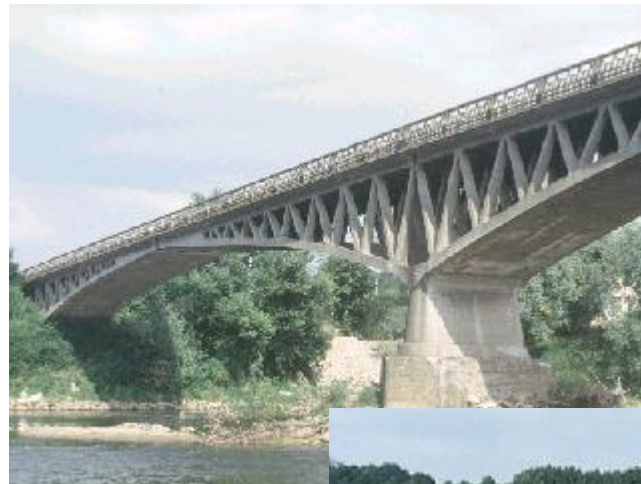
konzola

■ Vývoj předpjatého betonu

- Koncem 90 let 19 století – první pokusy v Kalifornii i v Německu
Výztuž nízké pevnosti (cca 300 MPa)
- 1928 – Francouz Eugen Freyssinet poprvé použil dráty o vysoké pevnosti (cca 1000 MPa)

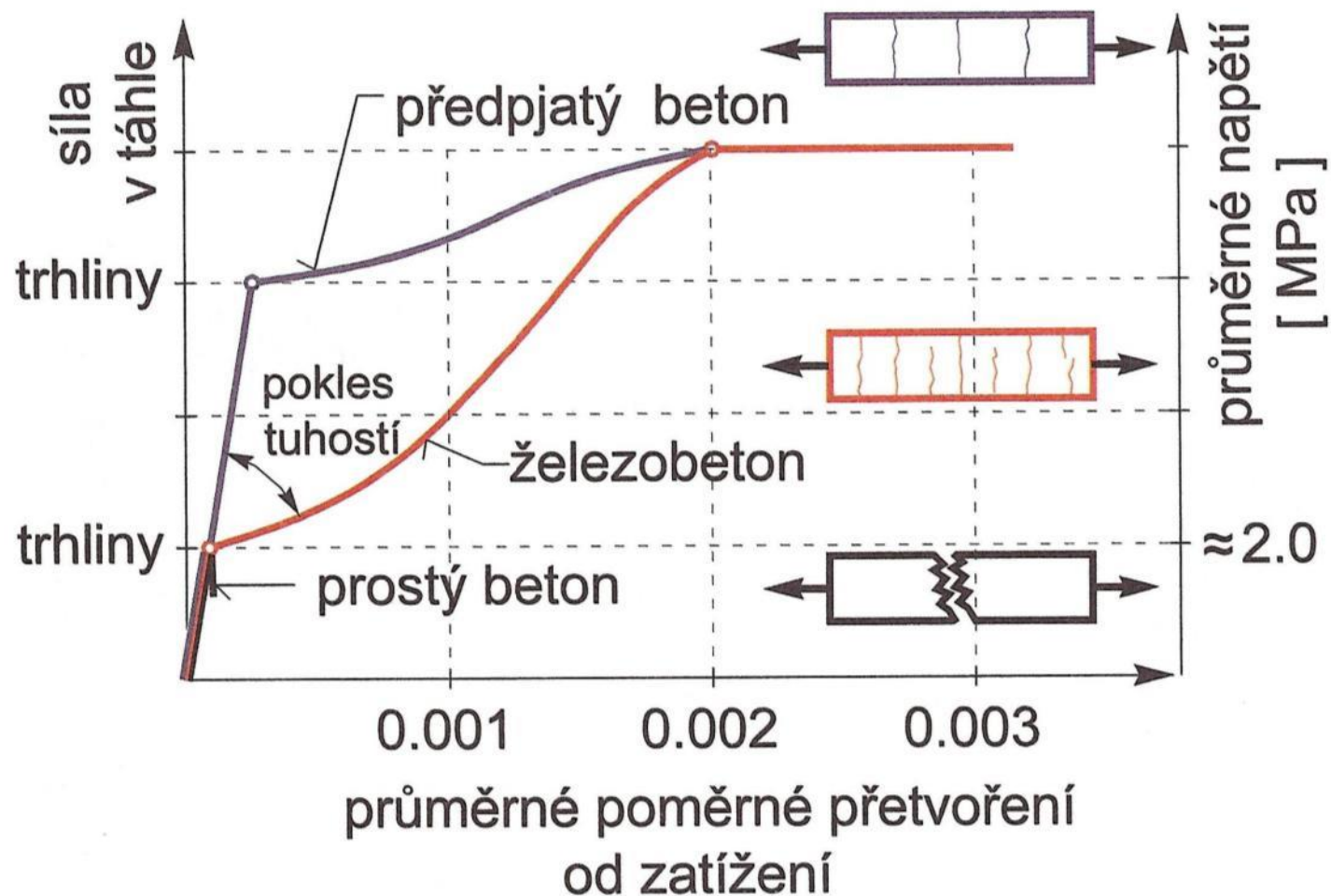


Eugene Freyssinet (1879-1962)



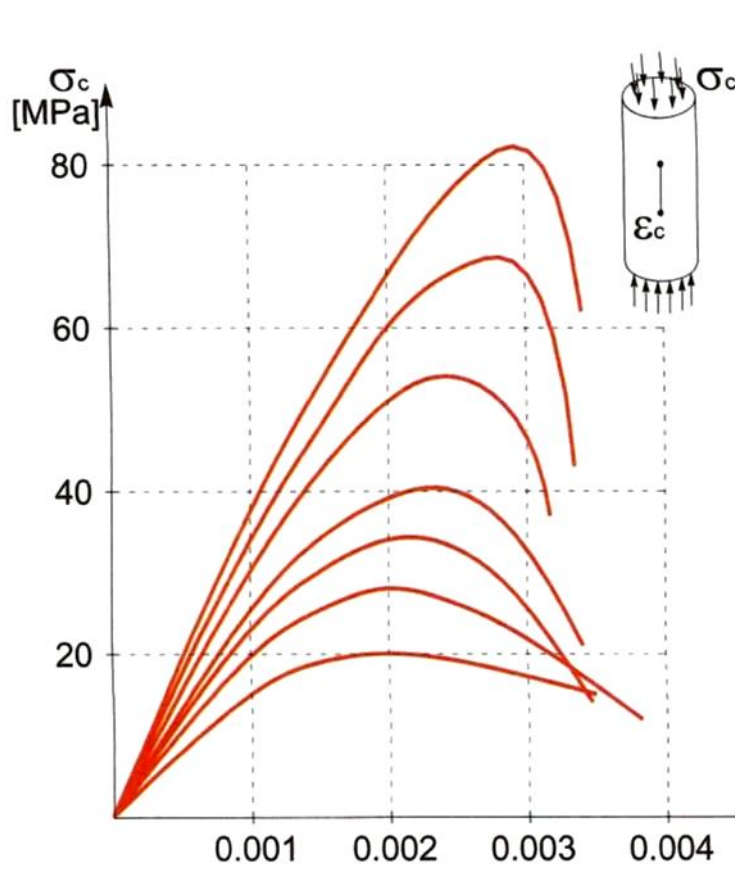
Boutiron Bridge is one of three similar bridges built by Freyssinet over the River Allier, near Vichy, in France, in the mid 1920s

■ Statické působení předpjatého betonu - táhlo



Odezva prvků vyztužených stejnou výztuží !!

- Materiálové vlastnosti betonu
- Pracovní diagram betonu



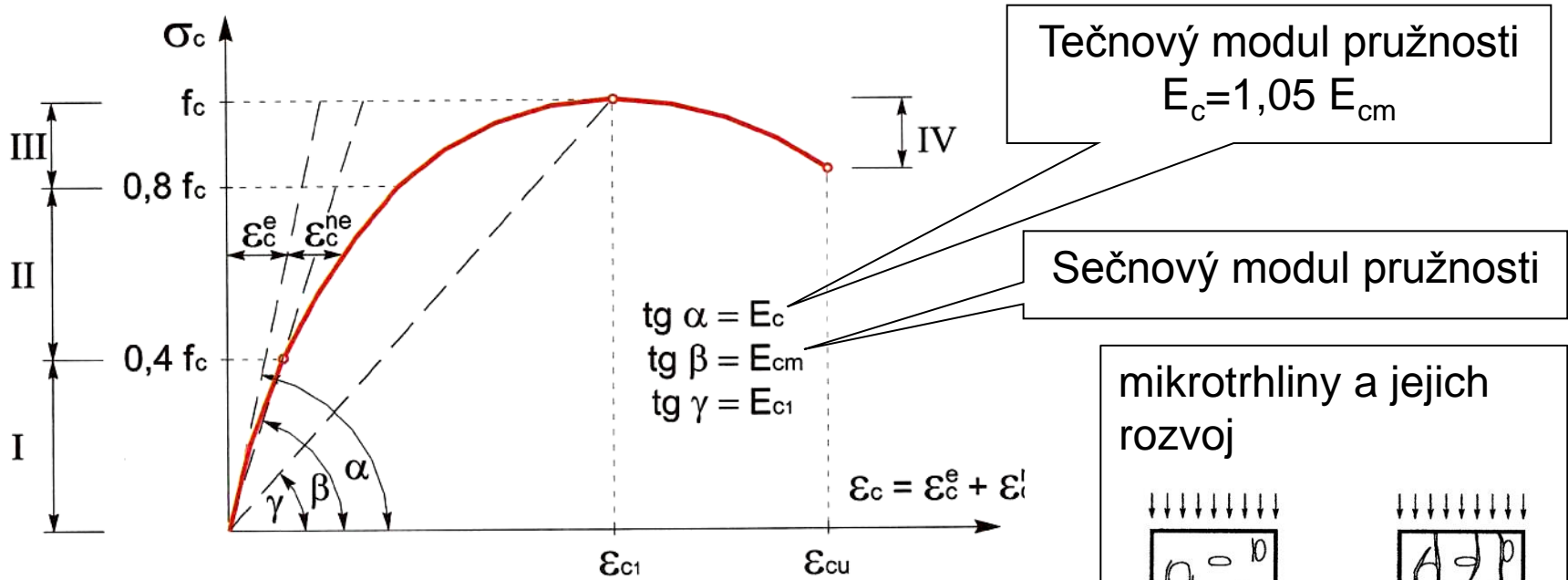
PB: 40 – 60 MPa
80 – 120 MPa (UHP concrete)

S rostoucí pevnosti:

- roste modul pružnosti
- výrazně zkracuje se plastické větve
→ **beton se stává křehčím**
- **nárůst pevnosti v tahu** není úměrný nárůstu pevnosti v tlaku

Ukázky skutečných pracovních diagramů betonu v tlaku při krátkodobém zatížení (konstantní rychlost zatěžování)

□ Pracovní diagram betonu (od krátkodobého zatížení)



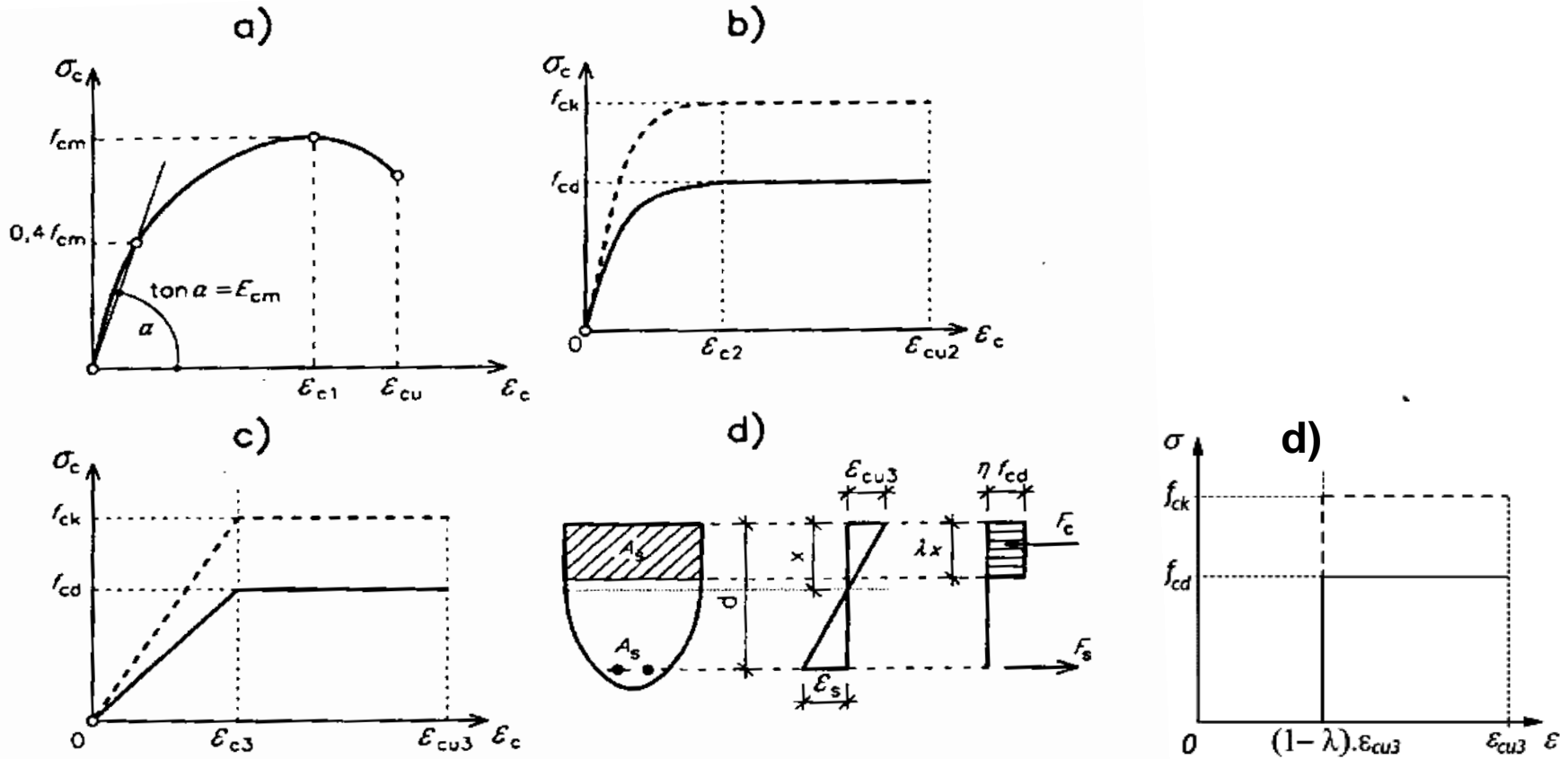
I – oblast lineárního chování betonu

II – fáze tvoření mikrotrhlin – kvazielastická oblast

III – nelineární podélné a příčné deformace → tvorba sloupečků

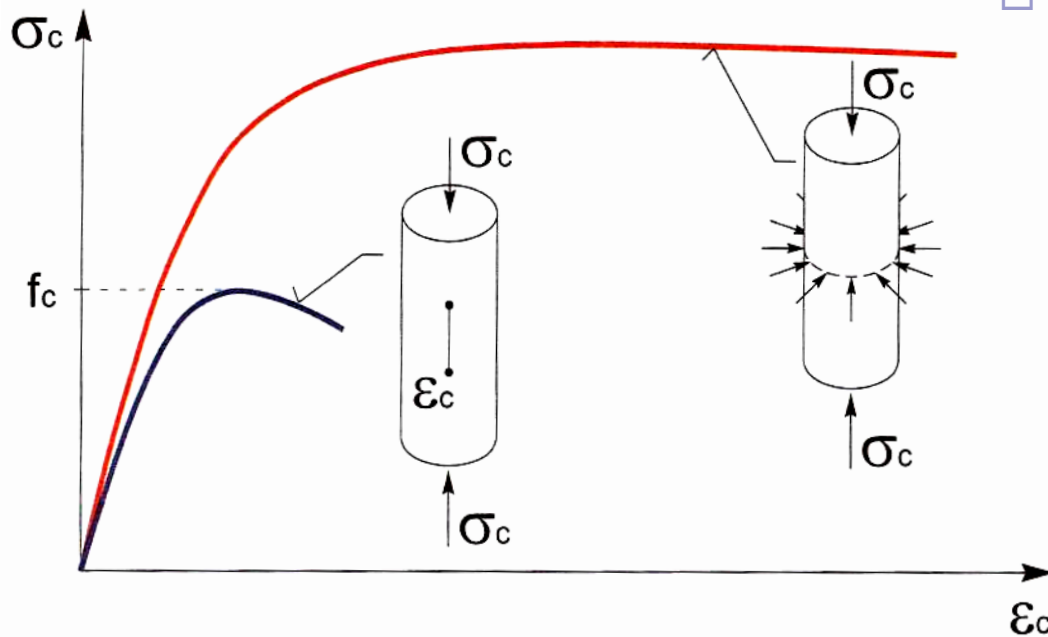
IV – tečení materiálu (jen v případě, že zatěžovací zařízení zajistí konstantní rychlost přetvoření)

■ Pracovní diagram betonu pro dimenzování



- a) Pracovní diagram betonu v tlaku pro výpočet účinků zatížení
 b) Návrhový parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu v tlaku
 c) Návrhový bilineární pracovní diagram betonu v tlaku
 d) Rovnoměrné rozdělení napětí v tlačené oblasti betonu – MSÚ

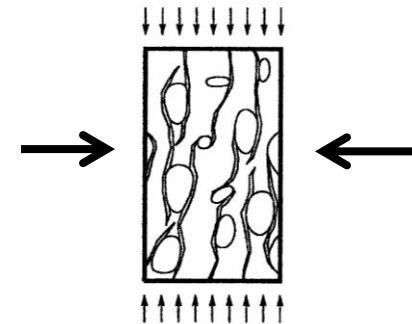
■ Trojosá napjatost



Účinek příčného tlaku na pracovní diagram betonu

□ Příčný tlak zvyšuje

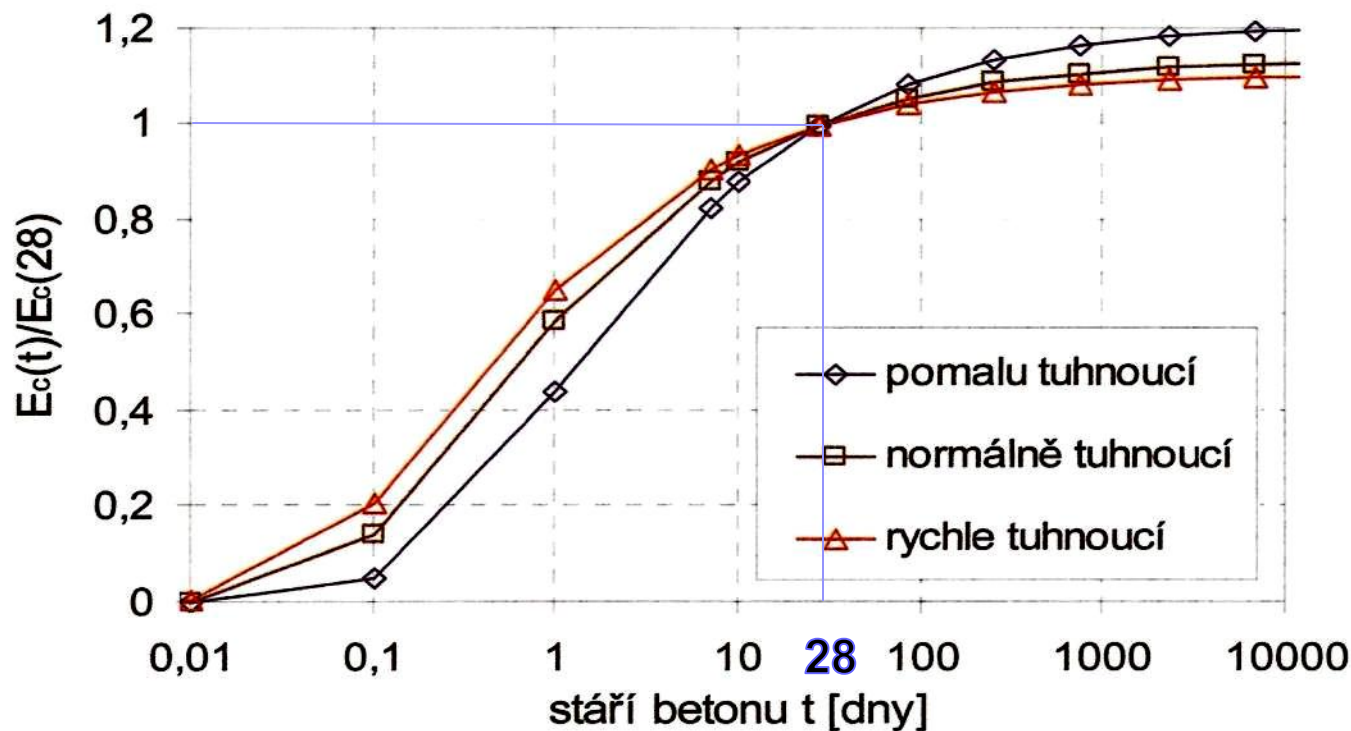
- pevnost betonu
- prodlužuje plastická část pracovního diagramu



Vyvození trojosé napjatosti:

- přímou aplikací příčného tlakového napětí
- **vhodně upravenou výztuží obepínající prvek**, která tak brání nadměrným deformacím (např. ovinutí, ...)

■ Stárnutí betonu



Vývoj modulu pružnosti v čase podle CEB-FIP, 1990

Ve 28 dnech stáří betonu je modul pružnosti cca 80% konečné hodnoty.
Pozn.: uváděné hodnoty modulu pružnosti jsou ve stáří 28 dní.

■ Dotvarování a smršťování betonu

■ Cementový gel obsahuje vodu

- chemicky vázanou
- v mikropórech
- kapilární

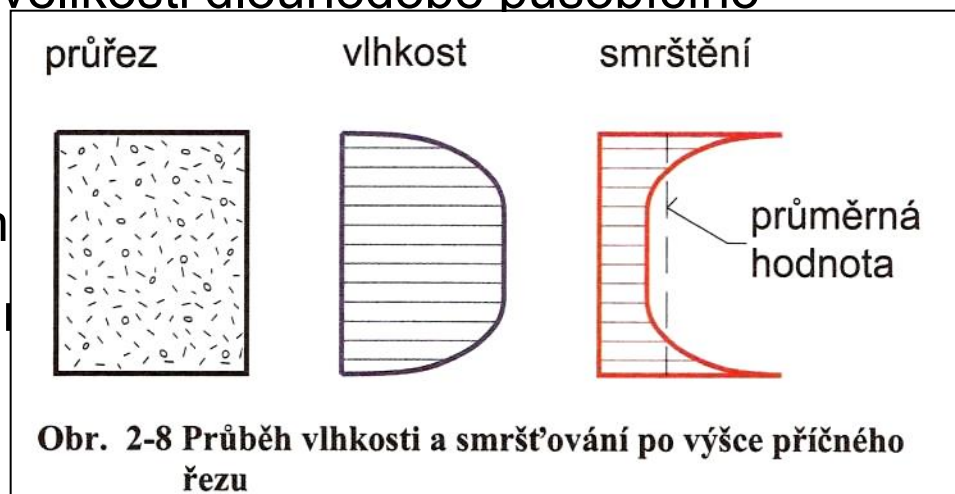
■ Dotvarování je změna mikrostruktury cementového gelu

účinkem **dlouhodobě působícího napětí** → v betonu je chemicky volná voda z mikropóru vytlačována do kapilár, odkud se odpařuje

- Lineární a nelineární podle velikosti dlouhodobě působícího napětí

■ Smršťování

- z vysýchání chem. nevázané vody
- autogenní (pokračující hydratace) vysokopevnostních betonů



■ Dotvarování a smršťování betonu

- Složky přetvoření

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c^e(t) + \varepsilon_c^{ne}(t) + \varepsilon_c^{ed}(t) + \varepsilon_c^{ne,d}(t) + \varepsilon_c^d(t) + \varepsilon_c^T(t) + \varepsilon_c^s(t)$$

$\varepsilon_c^e(t)$ **okamžité** pružné (vratné) poměrné přetvoření betonu

$\varepsilon_c^{ne}(t)$ **okamžité** nepružné (nevratné) poměrné přetvoření betonu

$\varepsilon_c^{ed}(t)$ **zpožděné** pružné poměrné přetvoření betonu

$\varepsilon_c^{ne,d}(t)$ **zpožděné** nepružné poměrné přetvoření betonu

$\varepsilon_c^d(t)$ **zpožděné** nepružné poměrné přetvoření betonu, realizující se zpožděně, ale v krátkém časovém intervalu po zatížení

$\varepsilon_c^T(t)$ poměrné přetvoření betonu od teplotních změn

$\varepsilon_c^s(t)$ poměrné přetvoření betonu od smršťování betonu

$\varepsilon_c^c(t)$
dotvarování

$\varepsilon_c^m(t)$
přetvoření
mechanická

$\varepsilon_c^{nm}(t)$
přetvoření
nemechanická

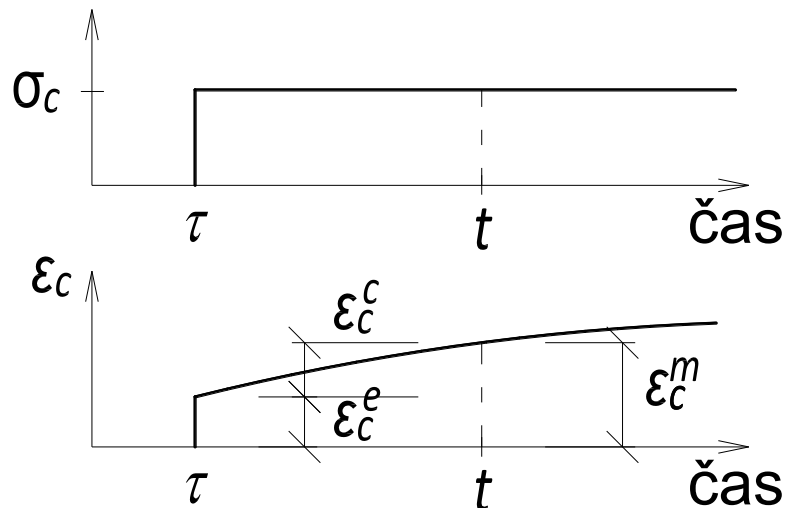
■ Dotvarování a smršťování betonu

- Výpočet přetvoření betonu při konstantním zatížení
- dlouhodobé zatížení v platnosti Hookova zákona – lineární pracovní diagram, $\varepsilon_c^{ne} = 0$

■ Funkce poddajnosti $\varepsilon_c^m(t, \tau) = \sigma_c \cdot J(t, \tau)$

■ Součinitel dotvarování $\varepsilon_c^e(t, \tau) = \varepsilon_c^e \cdot \varphi(t, \tau)$

■ Míra dotvarování $\varepsilon_c^e(t, \tau) = \sigma_c \cdot C(t, \tau)$

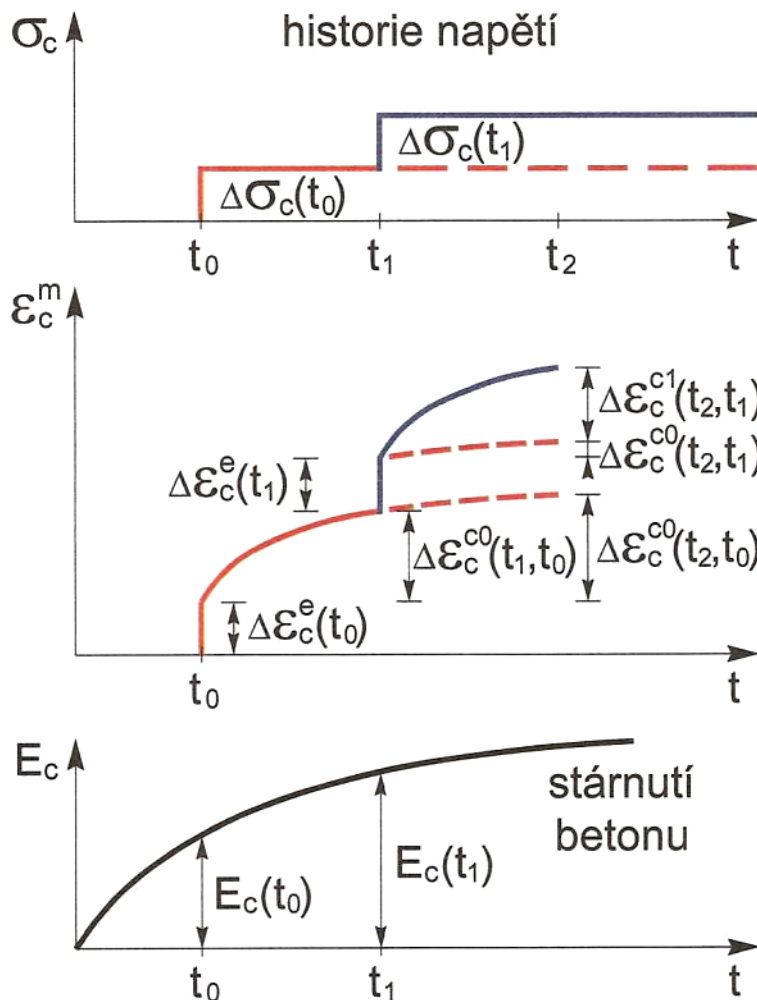


$$\varepsilon_c^e = \frac{\sigma_c}{E_c(\tau)} \Rightarrow C(t, \tau) = \frac{\varphi(t, \tau)}{E_c(\tau)}$$

$$J(t, \tau) = \frac{1 + \varphi(t, \tau)}{E_c(\tau)} = \frac{1}{E_c(\tau)} + C(t, \tau)$$

■ Dotvarování a smršťování betonu

- Výpočet přetvoření betonu při napětí, které se mění skokem

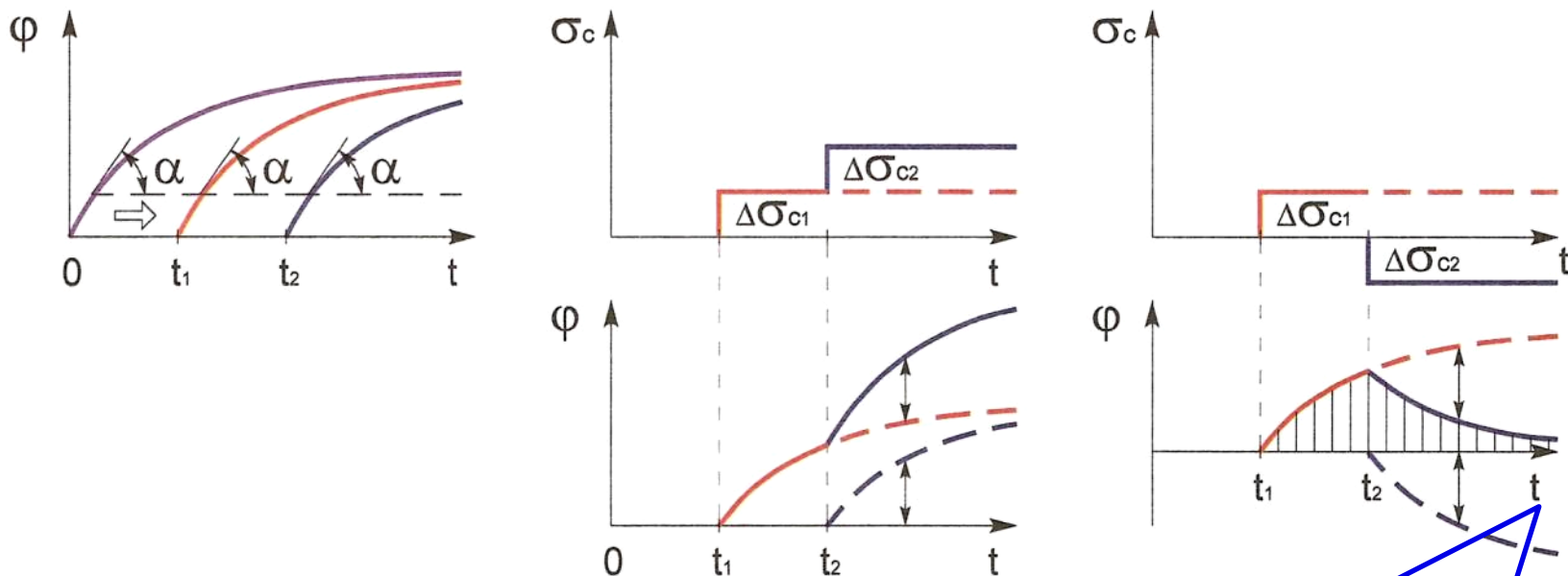


$$\varepsilon_c^m(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_c(t_i)}{E_c(t_i)} [1 + \varphi(t, t_i)]$$

Obr. 2-9 Princip superpozice přetvoření jednoose namáhaného elementu

■ Dotvarování a smršťování betonu

- Reologické modely – **teorie zpožděné pružnosti** (teorie následnosti) (Boltzmann 1876)



$$\varphi(t, \tau) = \varphi(t - \tau) = \varphi_{\infty} (1 - e^{-B(t-\tau)})$$

φ_{∞} koeficient dotvarování pro $t \rightarrow \infty$

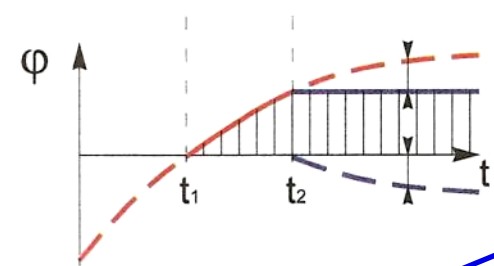
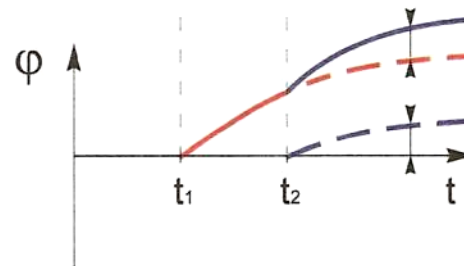
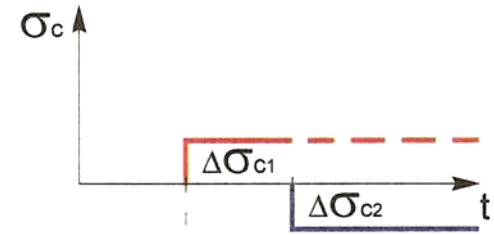
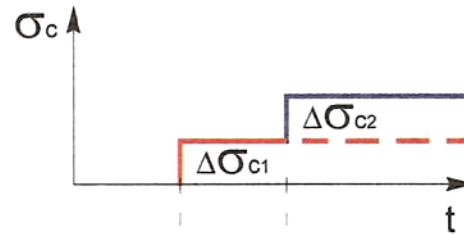
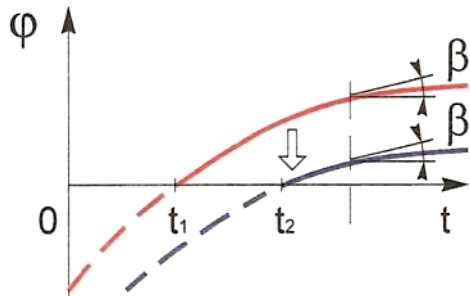
B konstanta

Po odtížení v čase $t \rightarrow \infty$
 dochází k úplné
 návratnosti deformace

$$\varepsilon_c^c(t) = \varepsilon_c^{ed}(t)$$

■ Dotvarování a smršťování betonu

- Reologické modely – **teorie stárnutí** (Dischinger 30. léta min. století)



$$\varphi(t, \tau) = \varphi(t) - \varphi(\tau) \text{ kde}$$

$$\varphi(x) = \varphi_{\infty} (1 - e^{-Bx}) \text{ pro } x = t, \quad x = \tau$$

φ_{∞} koeficient dotvarování pro $t \rightarrow \infty$

B konstanta (Dischinger $\rightarrow B=1$, později $B=1,6$ až 2)

Zanedbává se vratná část přetvoření

$$\varepsilon_c^c(t) = \varepsilon_c^{ne,d}(t)$$

■ Dotvarování a smršťování betonu

□ Reologické modely – **kombinované teorie**

- Součinné – (ACI committee 209, CEB-FIB 1990, **EN 1992-1-1**, ČSN 73 1201, 1987 –zpřesněný model)

$$\varphi(t, \tau) = f_0(t) \cdot f(t - \tau)$$

- Součtové – (DIN 1045, 1988, CEB-FIB, 1978)

$$\varphi(t, \tau) = f_d(t - \tau) + [f_f(t) - f_f(\tau)]$$

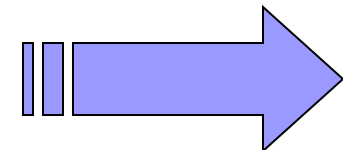
■ Betonářská výztuž

Použití

- Konstrukční výztuž
- Nosná – třmínky, vyztužení kotevní oblasti

Nízkouhlíkaté (obsah C 0,24%), legované, za tepla válcované a dále

- Nezpracované (legovací přísady)
- Zpracované **řízeným ochlazováním** (prudké ochlazení – zakalení povrchu – žíhání a popouštění žhavým jádrem \Rightarrow odstranění reziduálních napětí \Rightarrow zvýšení tažnosti a zlepšení svařitelnosti)
- Zpracované **tvářením za studena** (válcování, natahování, kroucení) dojde
 - k protažení drátu a vznik plastického přetvoření ε_s^{ne}
 - k příčné kontrakci – zmenšení průřezové plochy
 - snížení tažnosti

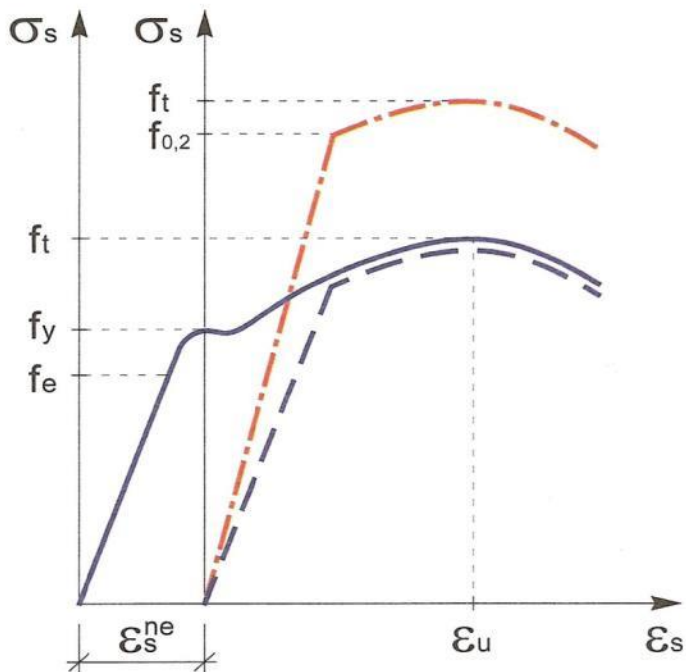


■ Skutečný pracovní diagram betonářské oceli

Ocel tvářená za studena

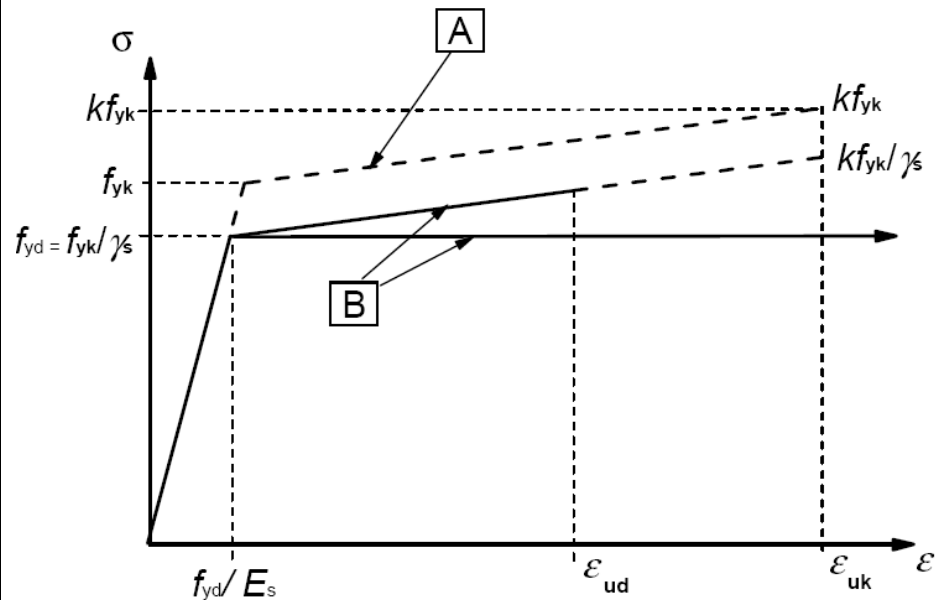
— — — vztaženo k původní průřezové ploše

- · - · - vztaženo k zmenšené průřezové ploše



■ Pracovní diagramy betonářské oceli pro dimenzování

- idealizovaný
- návrhový
 - pružno plastický
 - pružno plastický se zpevněním



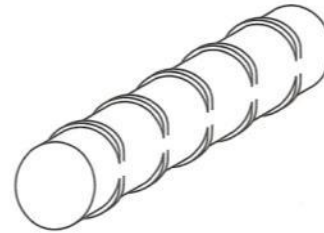
■ Předpínací výztuž

- z předpínací oceli
 - (z nekovových materiálů, zejména CFRP – pevnost 3500 – 7000 MPa, modul pružnosti 230-650 GPa)
-

- hlavní nosná výztuž
- požadovaných vlastností (zejména vysoká pevnost) se dosahuje
 - chemickým složením
 - speciálními výrobními postupy
- **základní materiál** – nelegované nebo nízkolegované oceli, obsah uhlíku 0,9 %, ocel válcovaná za tepla

□ tyče

- legovaná ocel (válcovaná za tepla)
mez kluzu až 800 MPa
pevnost v tahu až 1000 MPa



- **hladké nebo žebírkované** - profil 12 - 75 mm, délky 6 - 30 m, žebírka vytvářejí závit pro usnadnění kotvení a napojování
- větší profily zušlechťovány ohřevem na 1000 °C s prudkým ochlazením (zakalení), snížení křehkostí a vnitřního pnutí popouštěním (zahříváním a podržením teploty na 450-650°C po určité době)

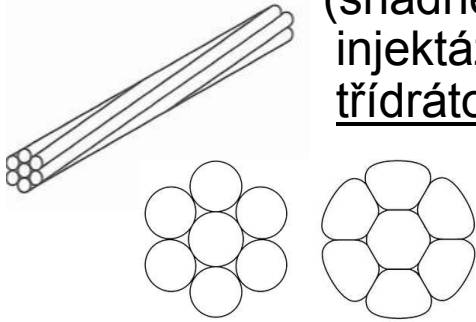
□ dráty

■ patentovaný

- nízkolegovaná ocel válcovaná za tepla s vysokým obsahem uhlíku
- zahřátí na 800-900°C a pozvolné ochlazování (homogenizuje se) - **patentování**
- upravování tažením za studena
 - zvýšení pevnosti (1500-1800 MPa)
 - zvýšení meze 0,2 na 75% pevnosti
 - snížení tažnosti
 - vnitřní pnutí
- plynulý tvar pracovního diagramu bez vyznačené meze kluzu
- průměry 3 – 10 mm, hladké nebo s vtisky

} **nepopouštěný**

- **lana** - sedmidrátová – centrální přímý drát + šroubovicově ovinuto 6 drátů (snadnější předpínání většího počtu drátů naráz, lepší soudržnost s injektážní maltou nebo betonem)
třídrátové spletnice



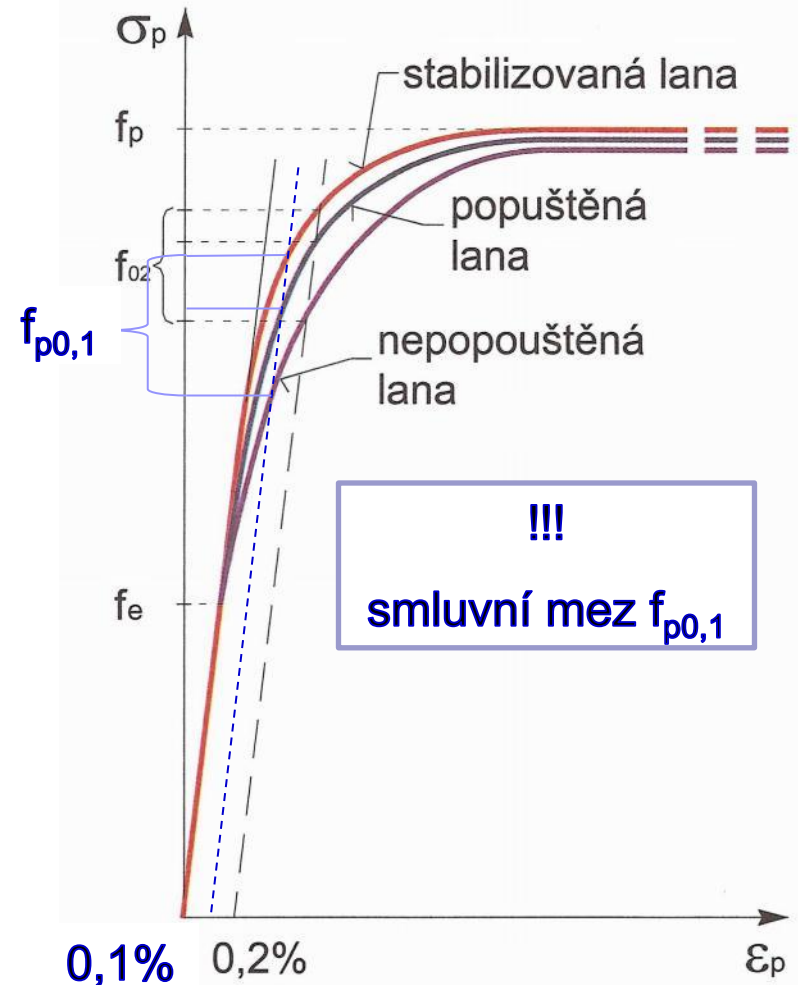
Vnitřní pnutí lze odstranit:

- **popouštění**

- zahřátí na 350 – 400°C a pomalé ochlazování
- zvýšení meze úměrnosti
- zvýšení meze 0,2 - **85%** pevnosti
- redukce relaxace výztuže

- **stabilizování** = popouštění + vnášení tahového napětí způsobujícího protažení až 1%

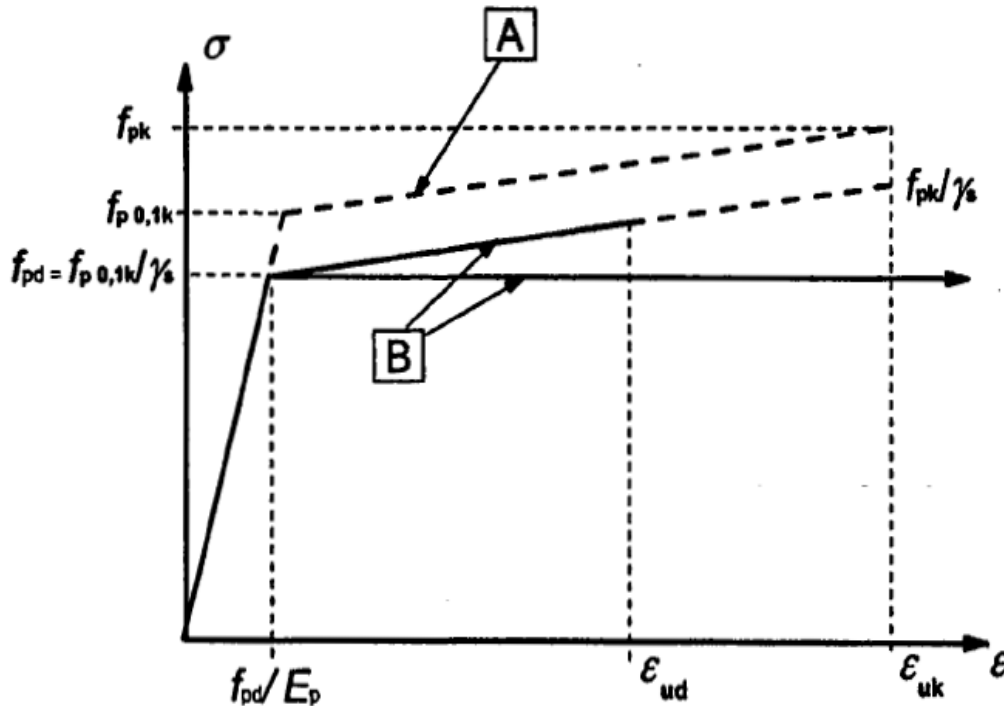
- zvýšení meze 0,2 - **90%** pevnosti
- redukce relaxace až o 70 %
⇒ **lana s nízkou relexací**



□ Pracovní diagramy pro dimenzování

□ A – idealizovaný

□ B – návrhový



EC2

- návrhová hodnota napětí v předpínací oceli

$$f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_s$$

- poměrné přetvoření - doporučená hodnota

$$\epsilon_{ud} = 0,9 \epsilon_{uk}$$

- nejsou-li známy přesnější hodnoty

$$\epsilon_{ud} = 0,02$$

$$f_{p0,1k} / f_{pk} = 0,9$$

- moduly pružnosti

□ tyče a dráty - 205 GPa

□ lana – 195 GPa

■ Normy:

- prEN 10138-1 Prestressing steels – Part 1: General Requirements
- prEN 10138-2 Prestressing steels – Part 2: Wire
- prEN 10138-3 Prestressing steels – Part 3: Strand
- prEN 10138-4 Prestressing steels – Part 4: Bars

■ Značení předpínacích ocelí

- EN 10138-2 Y 1770 C 5,0 I Cold drawn wire Indented
- EN 10138-3 Y 1860 S 7 16,5 A Strand
- EN 10138-4 Y 1030 H 26 R Hot rolled bar Ribbed



Charakteristická pevnost

Table 2 — Dimensions and properties of strands

Class	Steel designation		Nominal °				Specified			
	Steel name	Steel Number	Diameter <i>d</i> Mm	Tensile strength <i>R_m^{b,f}</i> MPa	Cross-sectional area ° <i>S_n</i> mm ²	Mass ° <i>M</i> g/m	Permitted deviation on nominal mass %	Characteristic value of maximum force <i>F_m</i> kN	Maximum value of maximum force <i>F_{m, max}</i> kN	Characteristic value of 0,1 % proof force ° <i>F_{p0,1}</i> kN
A	Y1960S3	1.1361	5.2	1960	13.6	106	+2	26.7	30.5	22.9
	Y1860S3	1.1360	6.5	1860	21.1	165	±2	39.2	44.9	33.8
			6.8		23.4	183		43.5	49.8	37.4
			7.5		29.0	226		54.0	61.7	46.4
			7.0		30	234		56	65	48
	Y1860S7	1.1366	9.0	1860	50	390	±2	93	106	80
			11.0		75	586		140	160	120
			12.5		93	726		173	198	149
			13.0		100	781		186	213	160
			15.2		140	1095		260	298	224
			16.0		150	1170		279	319	240
			18.0		200	1560		354	403	304
	Y1770S7	1.1365	15.2	770	140	1095	±2	248	282	213
			16.0		150	1170		265	302	228
			18.0		200	1560		354	403	304
18.0			200		1560	354		403	304	



∅



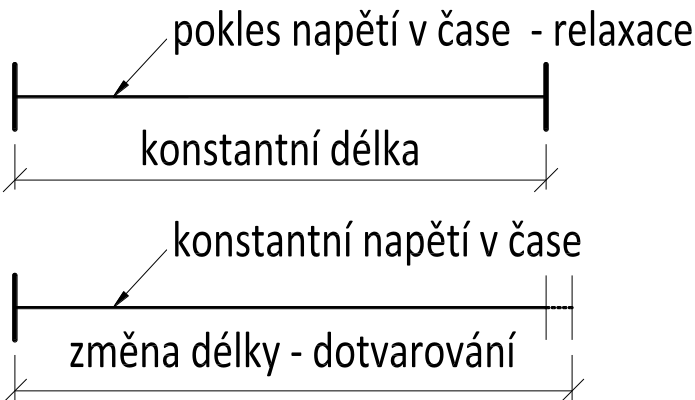
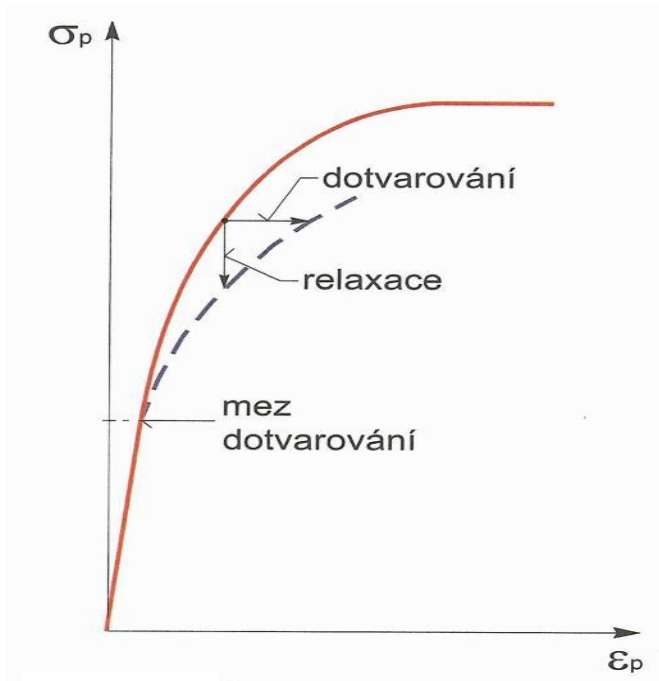
f_{pk}



A_p

$$f_{p0,1k} = F_{p0,1} / A_p$$

■ Relaxace předpínací výztuže – časově závislý jev



■ třídy relaxačního chování - podle ρ_{1000}

(ztráta relaxací 1000 hodin po napnutí při průměrné teplotě 20°C pro počáteční napětí 0,7 f_p)

- **třída 1** – dráty nebo lana s normální relaxací (patentované dráty)
 $\rho_{1000} = 8\%$
- **třída 2** – dráty nebo lana s nízkou relaxací (popouštěná a stabilizovaná lana)
 $\rho_{1000} = 2,5\%$
- **třída 3** – za tepla válcované a upravené tyče
 $\rho_{1000} = 3\%$
- podle certifikátu