

V předkládaném materiálu jsou užity obrázky z následujících zdrojů:

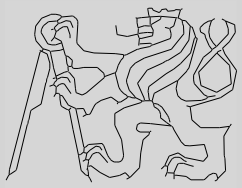
- Foglar a kol.: BEK3, vyjde 2011
- Procházka a kol.: Navrhování betonových konstrukcí 1, ČBS, 2010.
- Rukopisné materiály doc. Vaškové
- CEN: ČSN EN 1992-1-1, 2006.

MEZNÍ STAVY POUŽITELNOSTI

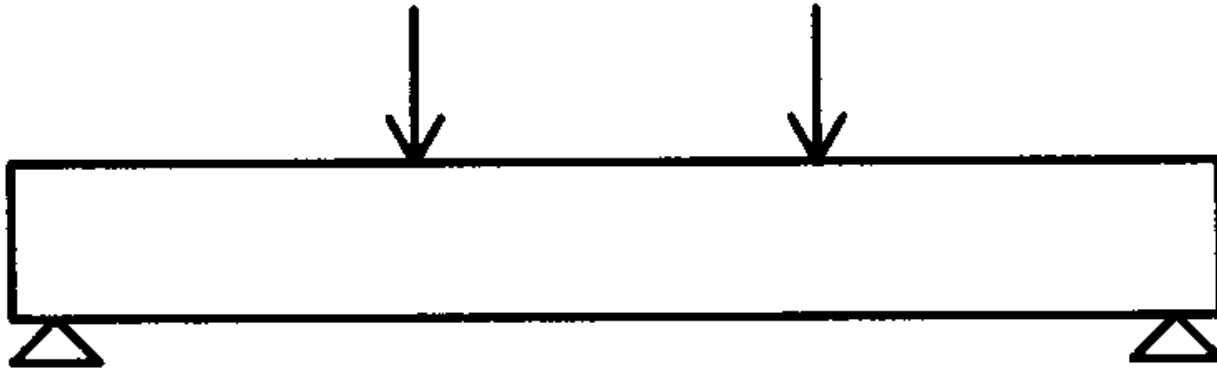
20/9/2011

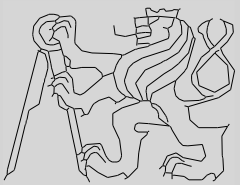
Marek Foglar

B727, Po 18:05-19:50

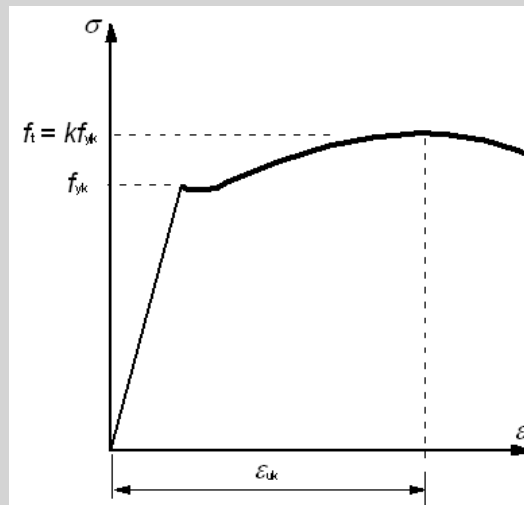
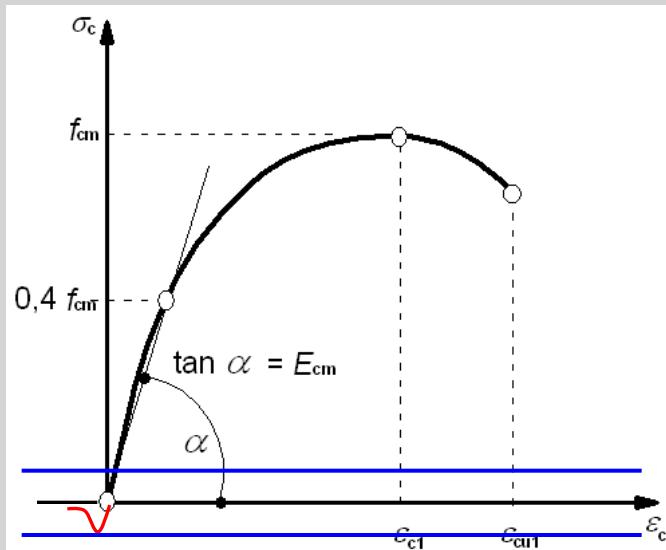
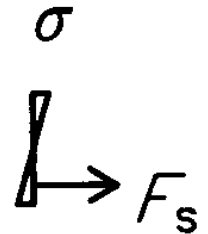
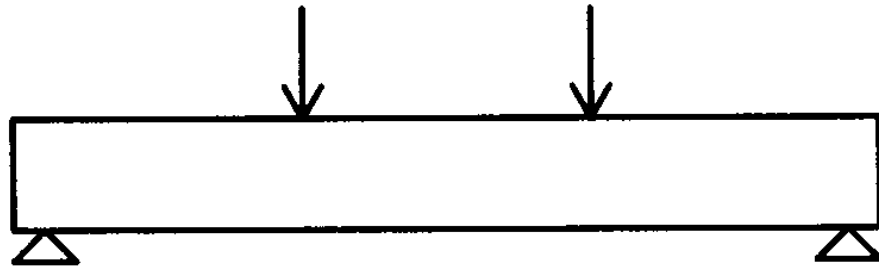


Stádia napjatosti ohýbaného nosníku

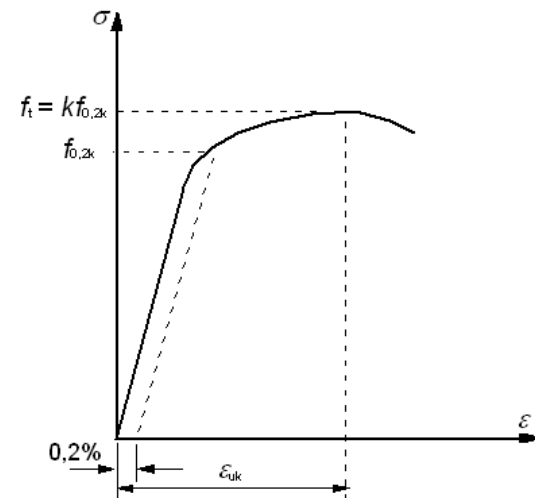




Stádia napjatosti ohýbaného nosníku



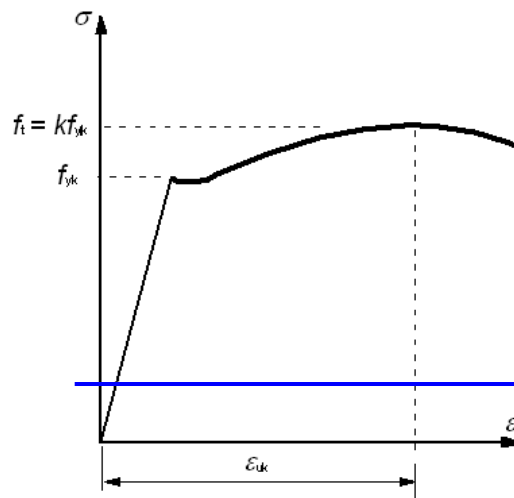
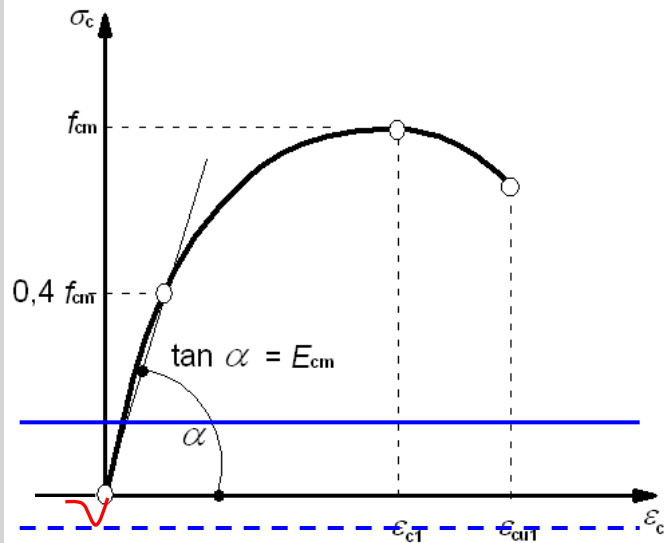
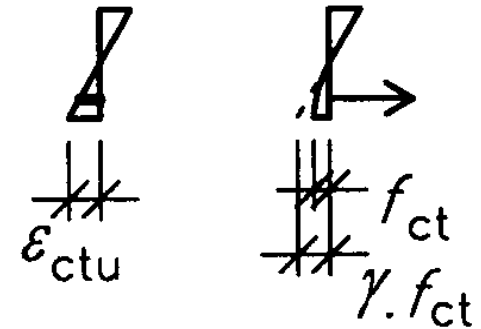
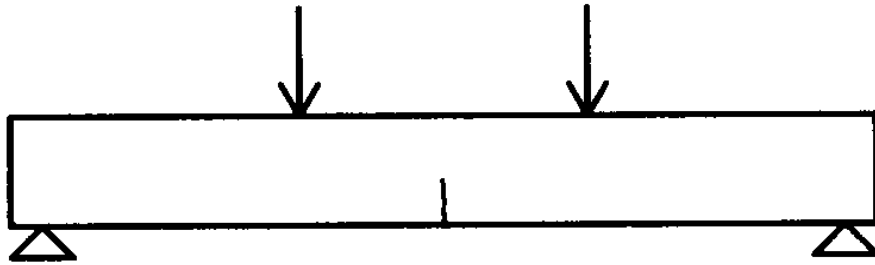
a) ocel za tepla válcovaná



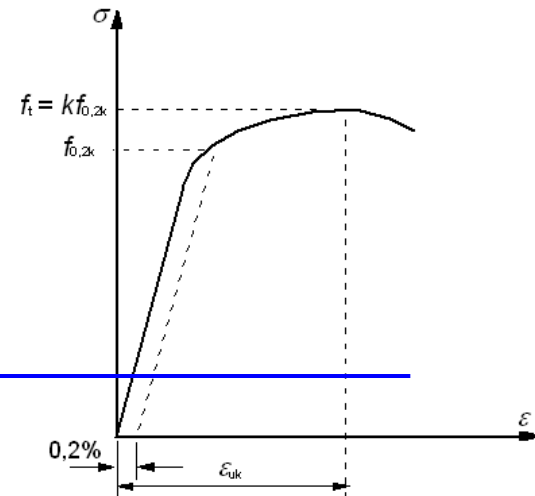
b) ocel za studena tvářená

před vznikem trhlin

Stádia napjatosti ohýbaného nosníku

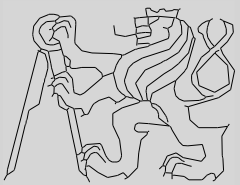


a) ocel za tepla válcovaná

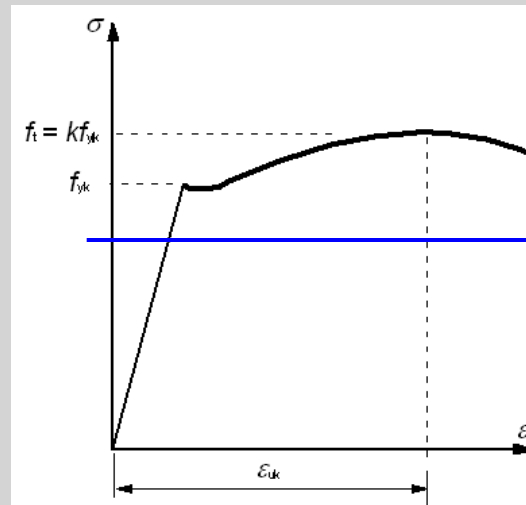
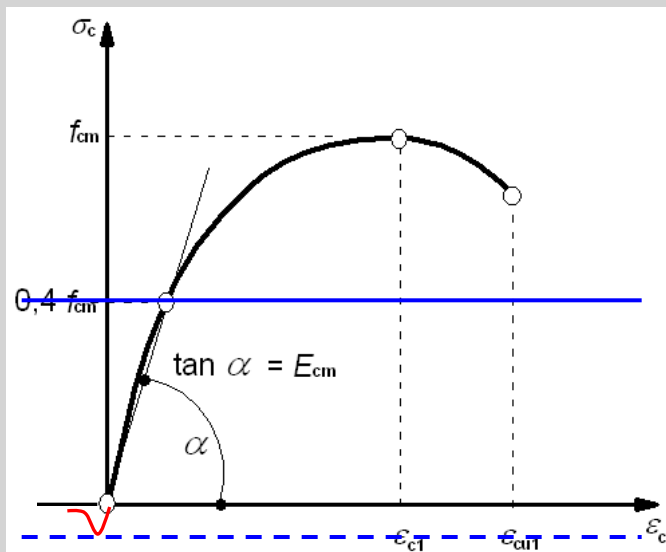
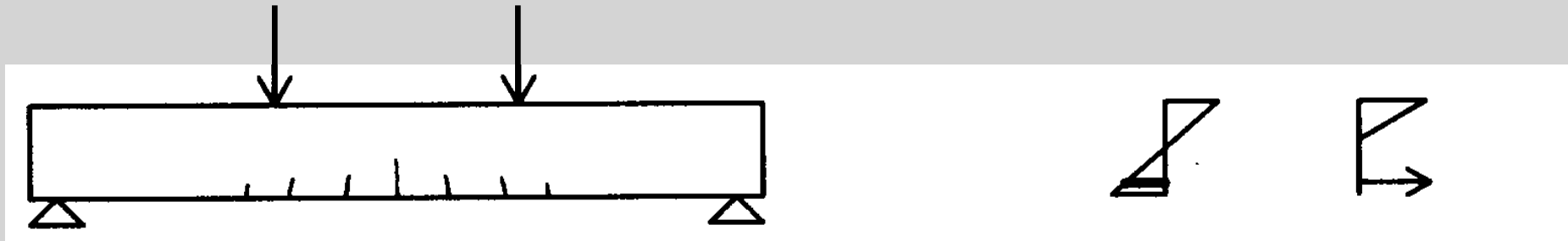


b) ocel za studena tvářená

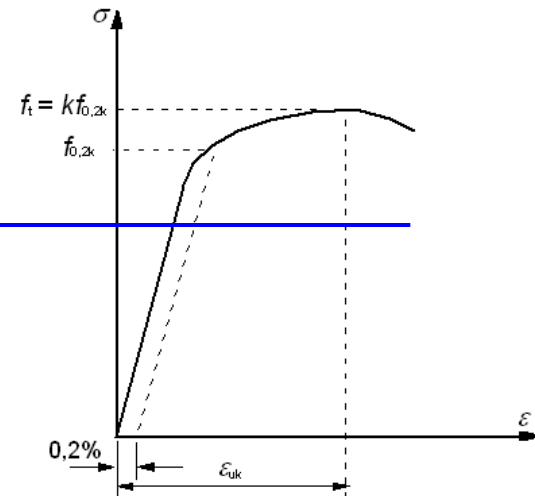
mez vzniku trhlin



Stádia napjatosti ohýbaného nosníku



a) ocel za tepla válcovaná



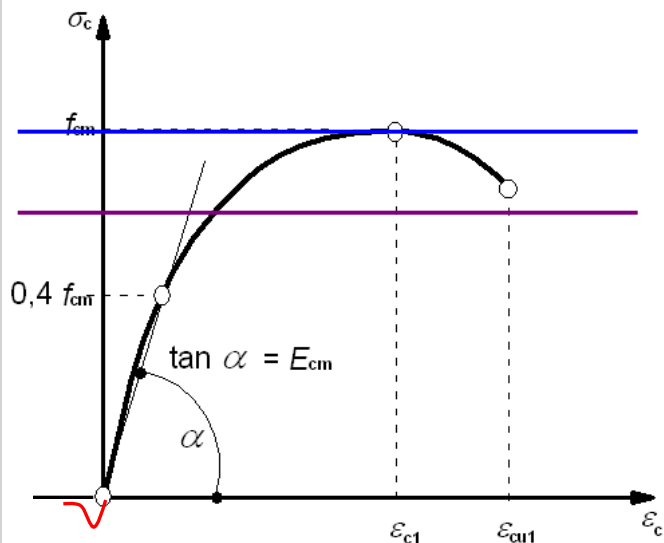
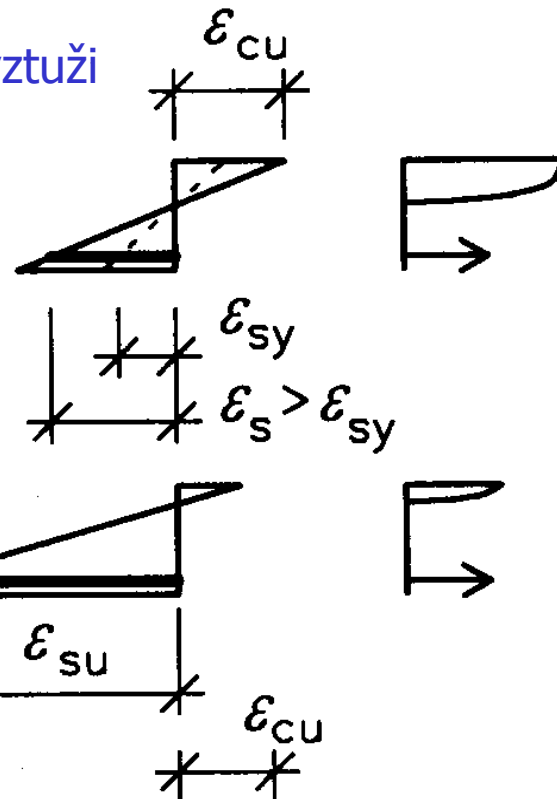
b) ocel za studena tvářená

po vzniku trhlin

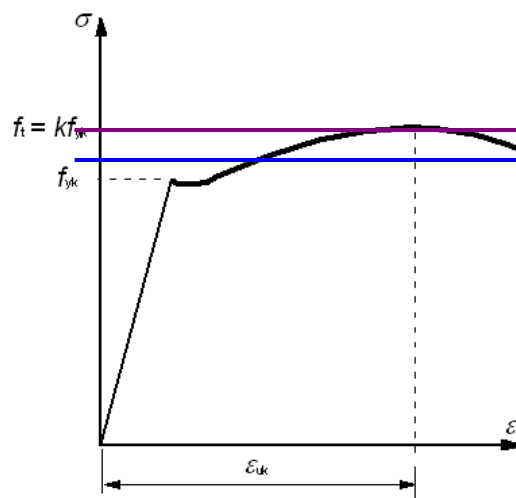
porušení drcením betonu po dosažení meze kluzu ve výztuži



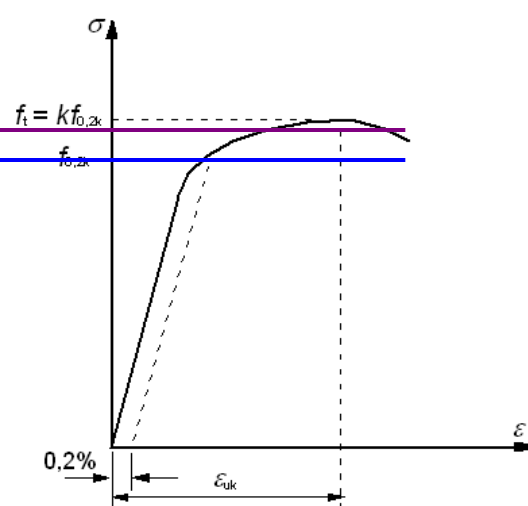
porušení nadměrným protažením výztuže



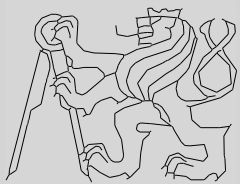
porušení kce



a) ocel za tepla válcovaná

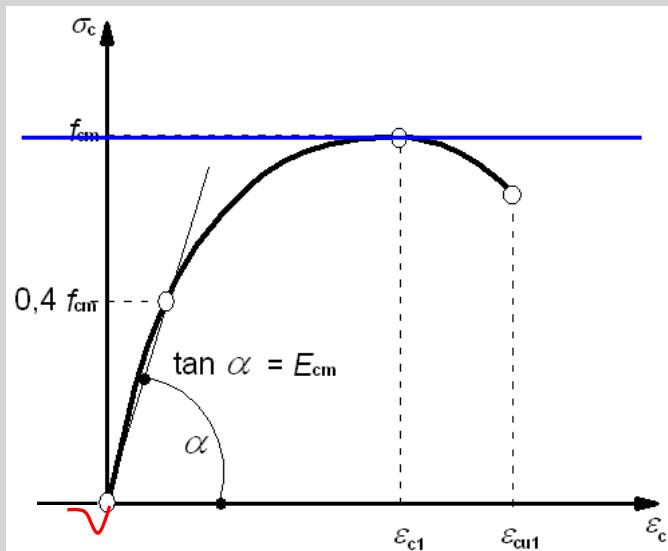
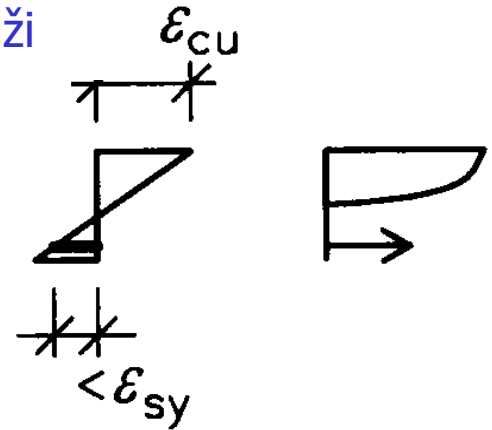
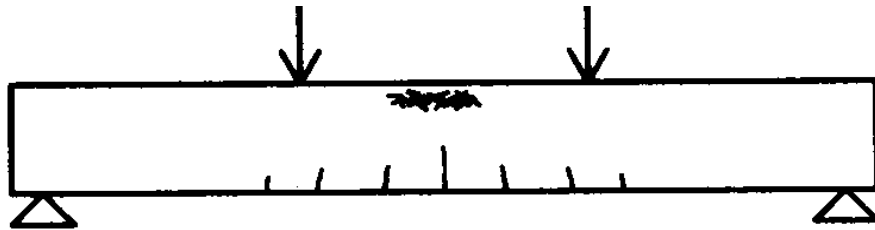


b) ocel za studena tvářená

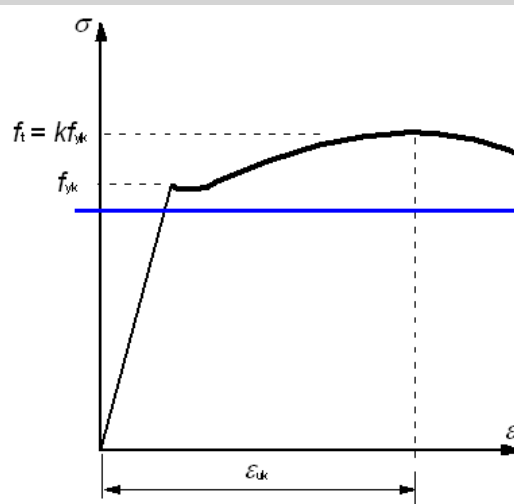


Stádia působení konstrukcí

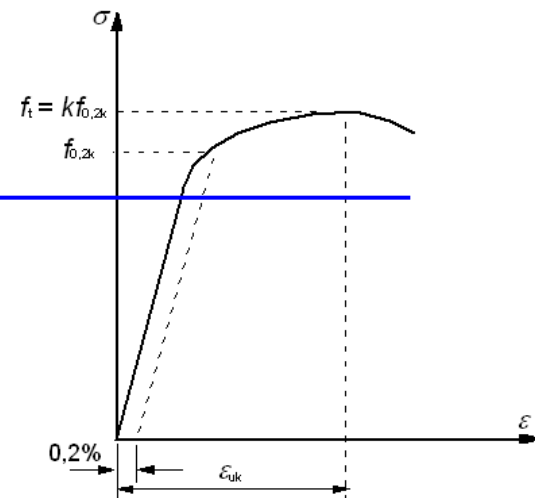
porušení drcením betonu bez dosažení meze kluzu ve výztuži



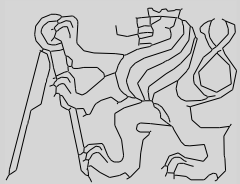
porušení kce



a) ocel za tepla válcovaná

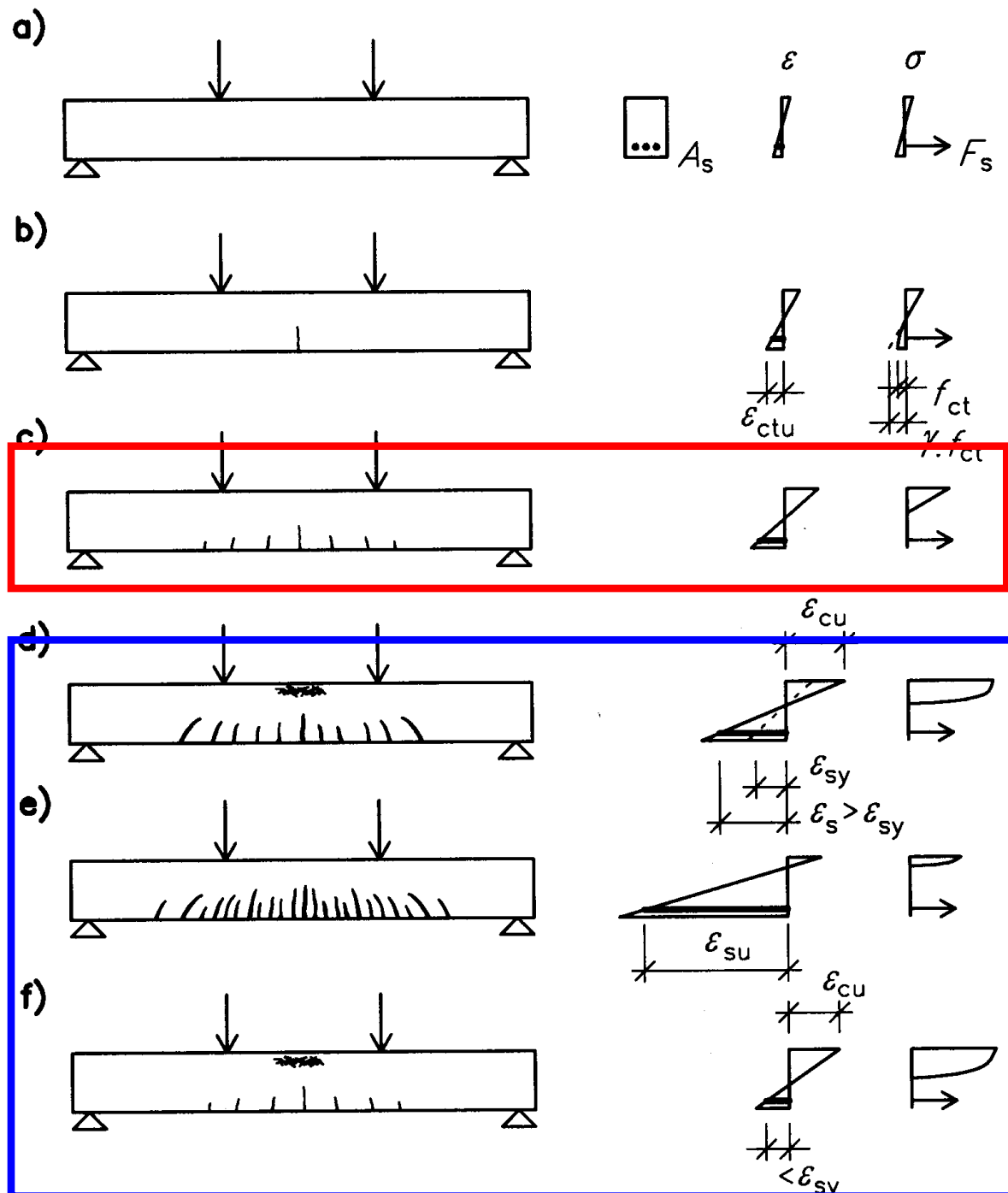


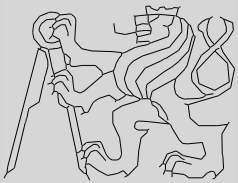
b) ocel za studena tvářená



MSP

MSÚ

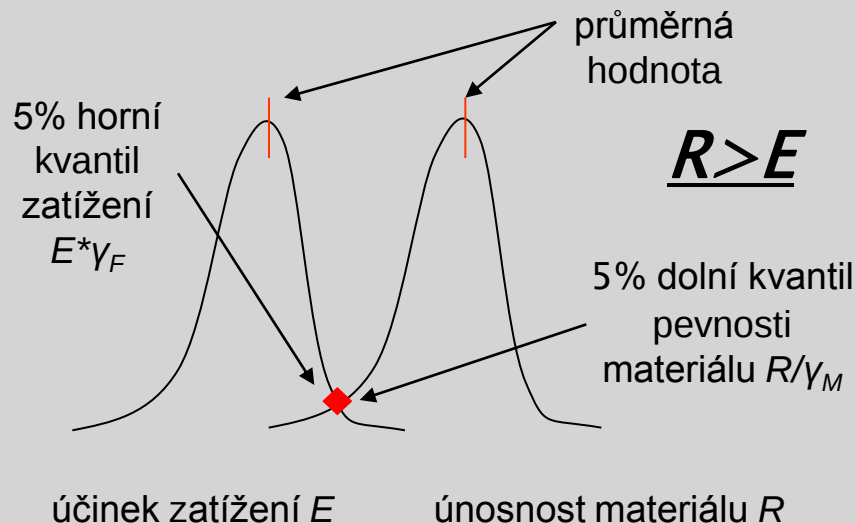




MSÚ vs. MSP

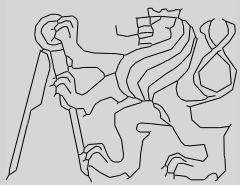
MSÚ

- Uvažuje součinitele spolehlivosti zatížení γ_F
- Uvažuje součinitele spolehlivosti materiálu γ_M
- Po jeho překročení dojde ke kolapsu konstrukce podrcením betonu, či přetržením výztuže



MSP

- Posuzují vlastnosti konstrukce vzhledem s přihlédnutím k provozu – použitelnost
- a k požadované životnosti – trvanlivost
- Prokazují tedy, že konstrukce bude schopna po dobu své životnosti plnit svojí funkci při běžné údržbě, za běžného užívání i při odpovídajícím vzhledu
- Po jejich překročení v žádném případě nedochází ke kolapsu konstrukce; může dojít ke snížení její trvanlivosti a použitelnosti
- Součinitele spolehlivosti materiálu a zatížení γ_M a γ_F uvažovány = 1



MSÚ

při těchto kombinacích

- Základní kombinace (6.10)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Méně příznivá z následujících (6.10a a 6.10b)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Kde:

„+“ je „kombinovaný s ...“

Σ je „kombinovaný účinek“

ξ je redukční součinitel pro nepříznivá stálá zatížení = 0,85

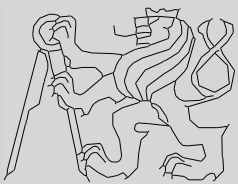
P je zatížení předpětím

$Q_{k,1}$ je charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení, ostatní jsou vedlejší

součinitel spolehlivosti stálého zatížení = 1,35

součinitel spolehlivosti hlavního proměnného zatížení = 1,5

součinitel spolehlivosti vedlejšího proměnného zatížení = 1,5



MSÚ

při těchto kombinacích (ČSN EN 1990)

- Základní kombinace (6.10)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

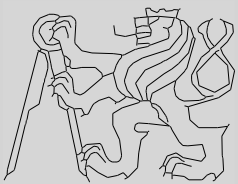
- Méně příznivá z následujících (6.10a a 6.10b)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- ψ_0 kombinační hodnota

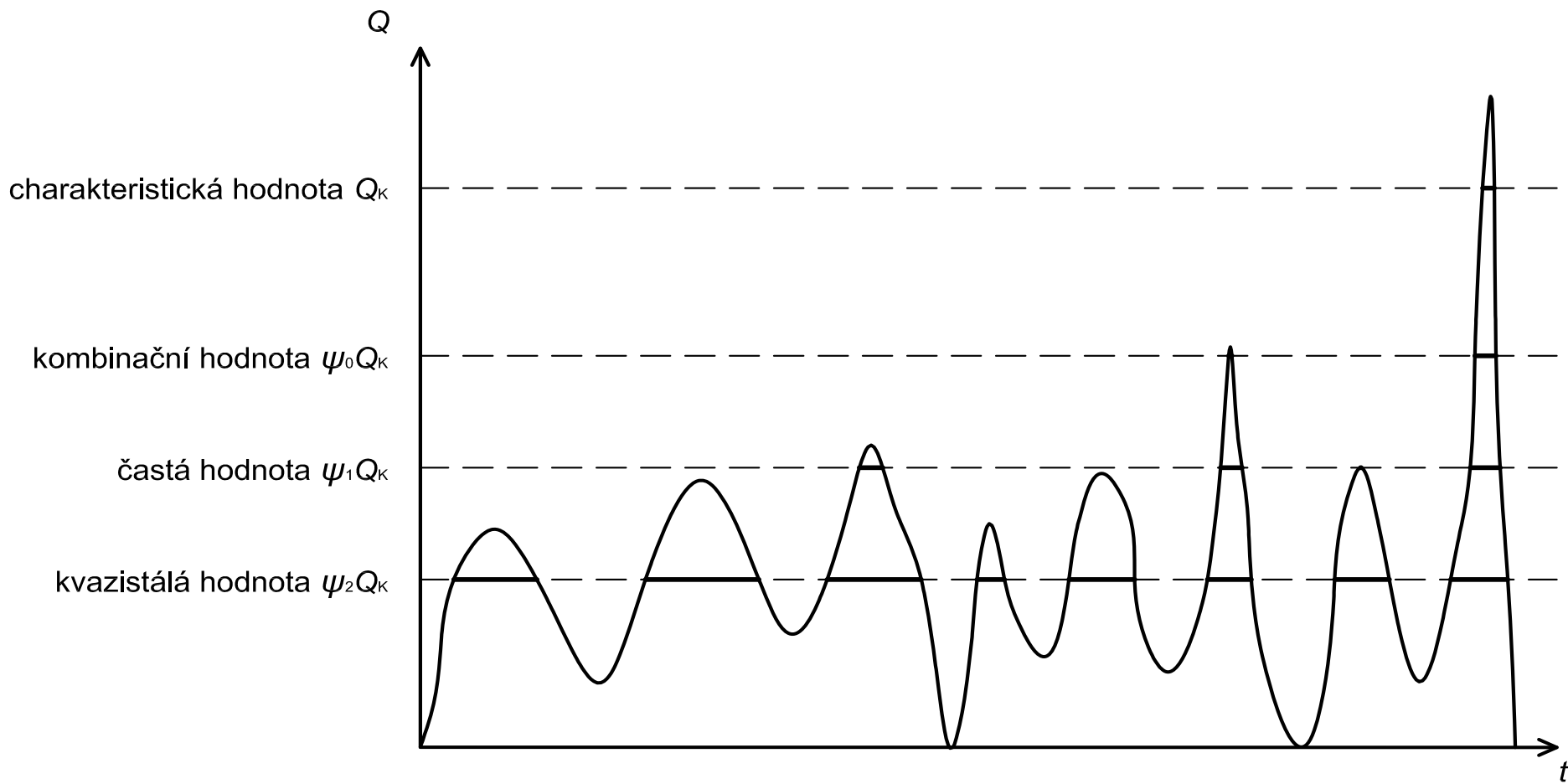
Zatížení	ψ_0
Kategorie užitných zatížení pro pozemní stavby:	
Kategorie A: obytné plochy	0,7
Kategorie B: kancelářské plochy	0,7
Kategorie C: shromažďovací plochy	0,7
Kategorie D: obchodní plochy	0,7
Kategorie E: skladovací plochy	1,0
Kategorie F: dopravní plochy, vozidla do 30kN	0,7
Kategorie G: dopravní plochy, vozidla od 30kN do 160kN	0,7
Kategorie H: střechy	0
Zatížení sněhem pro stavby v nadmořské výšce $H > 1000\text{m n. m.}$	0,7
Zatížení sněhem pro stavby v nadmořské výšce $H \leq 1000\text{m n. m.}$	0,5
Zatížení větrem	0,6
Zatížení teplotou	0,6

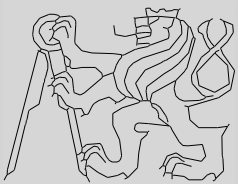


MSP

Rozdělení hodnot nahodilého zatížení při běžném provozu

- > musí se odrazit do kombinací zatížení





MSP

při těchto kombinacích

- Charakteristické – nevratné MSP

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

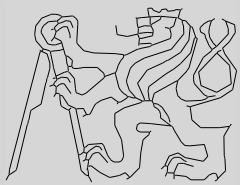
- Časté – vratné MSP

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Kvazistálé – dlouhodobé účinky a vzhled kce

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Zatížení	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Kategorie užitných zatížení pro pozemní stavby:			
Kategorie A: obytné plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: kancelářské plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie C: shromažďovací plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: obchodní plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: skladovací plochy	1,0	0,9	0,8
Kategorie F: dopravní plochy, vozidla do 30kN	0,7	0,7	0,6
Kategorie G: dopravní plochy, vozidla od 30kN do 160kN	0,7	0,5	0,3
Kategorie H: střechy	0	0	0
Zatížení sněhem pro stavby v nadmořské výšce $H > 1000\text{m n. m.}$	0,7	0,5	0,2
Zatížení sněhem pro stavby v nadmořské výšce $H \leq 1000\text{m n. m.}$	0,5	0,2	0
Zatížení větrem	0,6	0,2	0
Zatížení teplotou	0,6	0,5	0

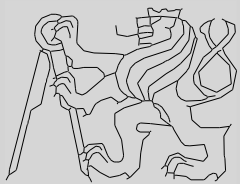


Kritéria posudků MSP

- **Poškození** – ovlivnění vzhledu, trvanlivosti a provozuschopnosti konstrukce
- **Vznik nebo rozevření trhlin** – snížení užitných vlastností konstrukce (nepropustnost, koroze výztuže)
- **Deformace konstrukce** – ovlivnění vzhledu, pohodu uživatelů
- **Kmitání konstrukce** – nepohodlí uživatelů konstrukce, případně ohrožení jejich zdraví; omezení funkčnosti konstrukce

Trvanlivost konstrukce je zajištěna:

- Krytím výztuže
 - Konstrukčními úpravami
 - Kvalitativní požadavky na materiály
- => požadavky obsažené v normách a souvisejících předpisech

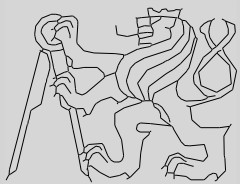


Trvanlivost betonových konstrukcí

Třídy prostředí podle ČSN EN 206-1

- X0 – bez nebezpečí koroze nebo napadení
- XC – koroze karbonatací
- XD – koroze chloridy
- XS – koroze vyvolaná chloridy z mořské vody
- XF – působení mrazu a rozmrazování
- XA – chemická koroze
- XM – mechanická koroze

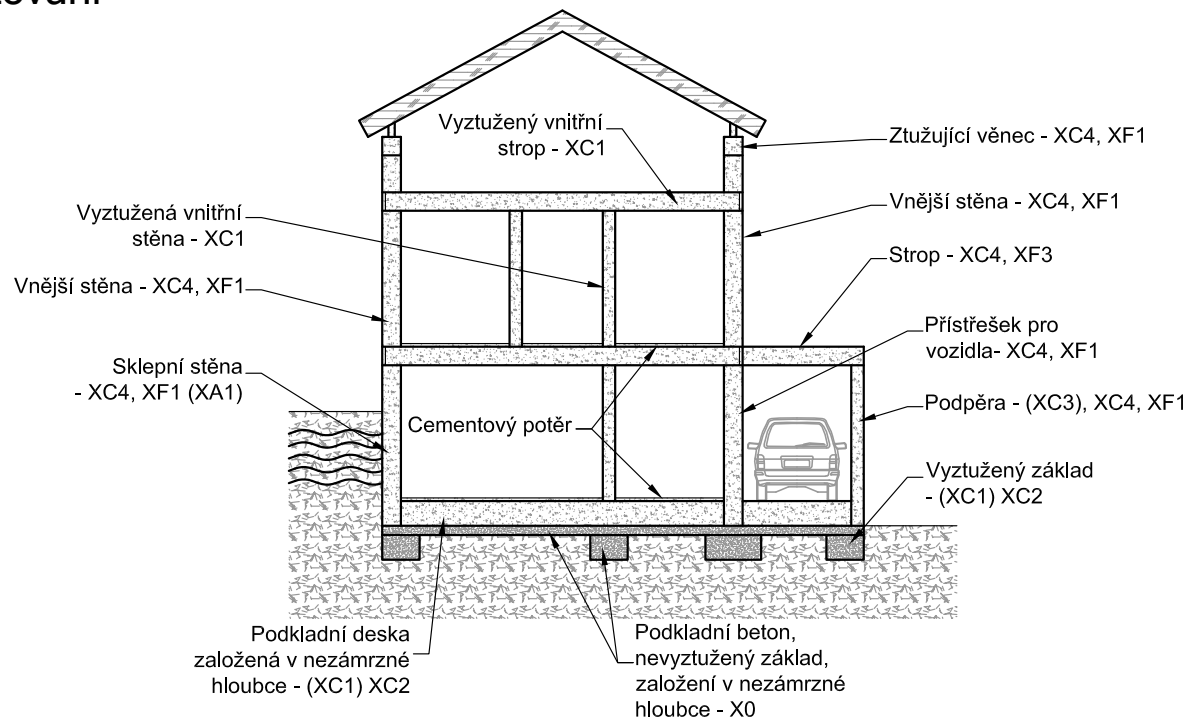
Označení stupně	Popis prostředí	Informativní příklady výskytu stupně prostředí
1 Bez nebezpečí koroze nebo napadení		
X0	pro beton bez výztuže nebo zabudovaných kovových vložek: všechny vlivy s výjimkou střídavého působení mrazu a rozmrazování, ohrusu nebo chemicky agresivního prostředí pro beton s výztuží nebo zabudovanými kovovými vložkami: velmi suché	beton uvnitř budov s velmi nízkou vlhkostí vzduchu,
2 Koroze vyvolaná karbonatací		
XC1	suché nebo stále mokré	beton uvnitř budov s nízkou vlhkostí vzduchu; beton trvale ponořený ve vodě
XC2	mokré, občas suché	povrchy betonů vystavených dlouhodobému působení vody; většina základů
XC3	středně vlhké	beton uvnitř budov se střední nebo vysokou vlhkostí vzduchu; venkovní beton chráněný proti dešti
XC4	střídavě mokré a suché	povrchy betonů ve styku s vodou, které nejsou zahrnuty ve stupni vlivu prostředí XC2
3 Koroze vyvolaná chloridy		
XD1	středně vlhké	povrchy betonů vystavených chloridům rozptýleným ve vzduchu
XD2	mokré, občas suché	plavecké bazény; betonové prvky vystavené působení průmyslových vod obsahujících chloridy
XD3	střídavě mokré a suché	části mostů vystavených postřikům obsahujícím chloridy; vozovky; betonové povrchy parkovišť
4 Koroze vyvolaná chloridy z mořské vody		
XS1	vystavení slanému vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou	konstrukce blízko mořského pobřeží nebo na pobřeží
XS2	trvale ponoření do vody	části námořních konstrukcí
XS3	omývání a ostříkávání přílivem	části námořních konstrukcí
5 Působení mrazu a rozmrazování		
XF1	středně nasycené vodou bez rozmrazovacích prostředků	svíslé betonové povrchy vystavené dešti a mrazu
XF2	středně nasycené vodou s rozmrazovacími prostředky	svíslé betonové povrchy konstrukcí pozemních komunikací vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům rozptýleným ve vzduchu
XF3	značně nasycené vodou bez rozmrazovacích prostředků	vodorovné betonové povrchy vystavené dešti a mrazu
XF4	značně nasycené vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou	vozovky a mostovky vystavené rozmrazovacím prostředkům; betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostředky nebo mrazu; omývané části námořních konstrukcí vystavených mrazu
6 Chemická koroze		
XA1	slabě agresivní chemické prostředí podle EN 206-1, tabulka 2	přírodní zemina s podzemní vodou – pro piloty a základové konstrukce.
XA2	středně agresivní chemické prostředí podle EN 206-1, tabulka 2	přírodní zemina s podzemní vodou – pro piloty a základové konstrukce.
XA3	vysoce agresivní chemické prostředí podle EN 206-1, tabulka 2	přírodní zemina s podzemní vodou – pro piloty a základové konstrukce.

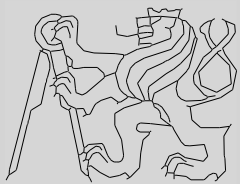


Trvanlivost betonových konstrukcí

Třídy prostředí podle ČSN EN 206-1

- X0 – bez nebezpečí koroze nebo napadení
- XC – koroze karbonatací
- XD – koroze chloridy
- XS – koroze vyvolaná chloridy z mořské vody
- XF – působení mrazu a rozmrazování
- XA – chemická koroze
- XM – mechanická koroze

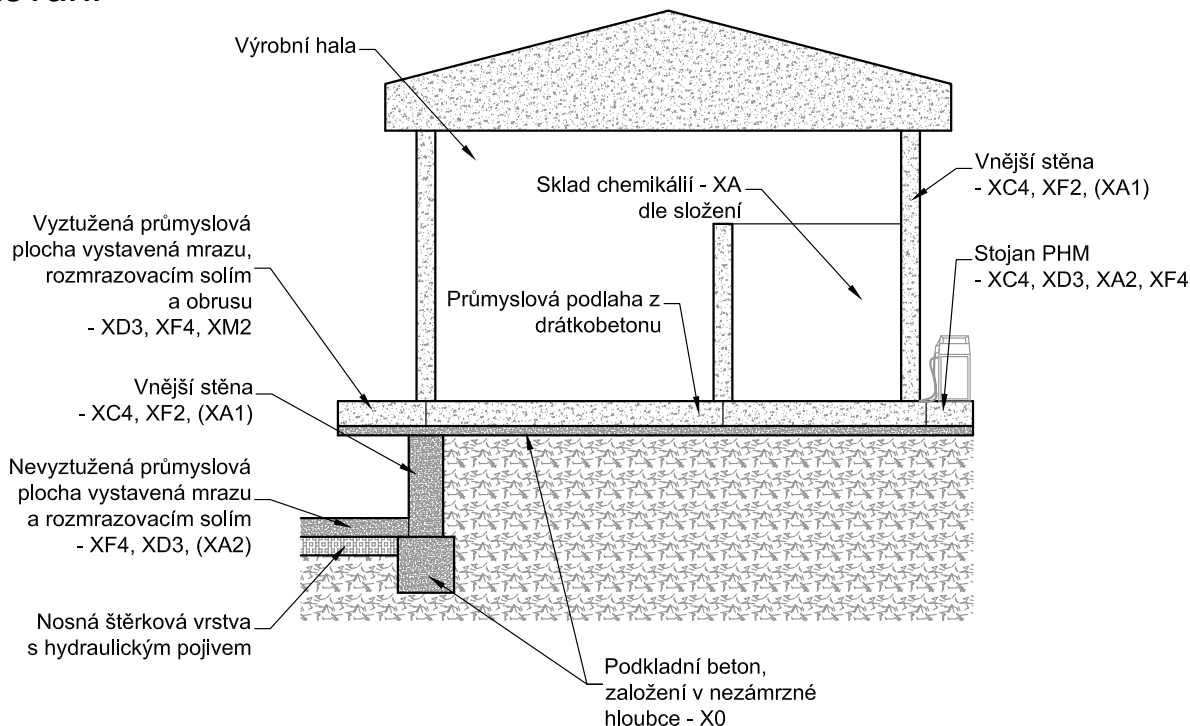


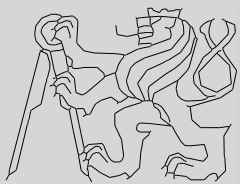


Trvanlivost betonových konstrukcí

Třídy prostředí podle ČSN EN 206-1

- X0 – bez nebezpečí koroze nebo napadení
- XC – koroze karbonatů
- XD – koroze chloridy
- XS – koroze vyvolaná chloridy z mořské vody
- XF – působení mrazu a rozmrazování
- XA – chemická koroze
- XM – mechanická koroze

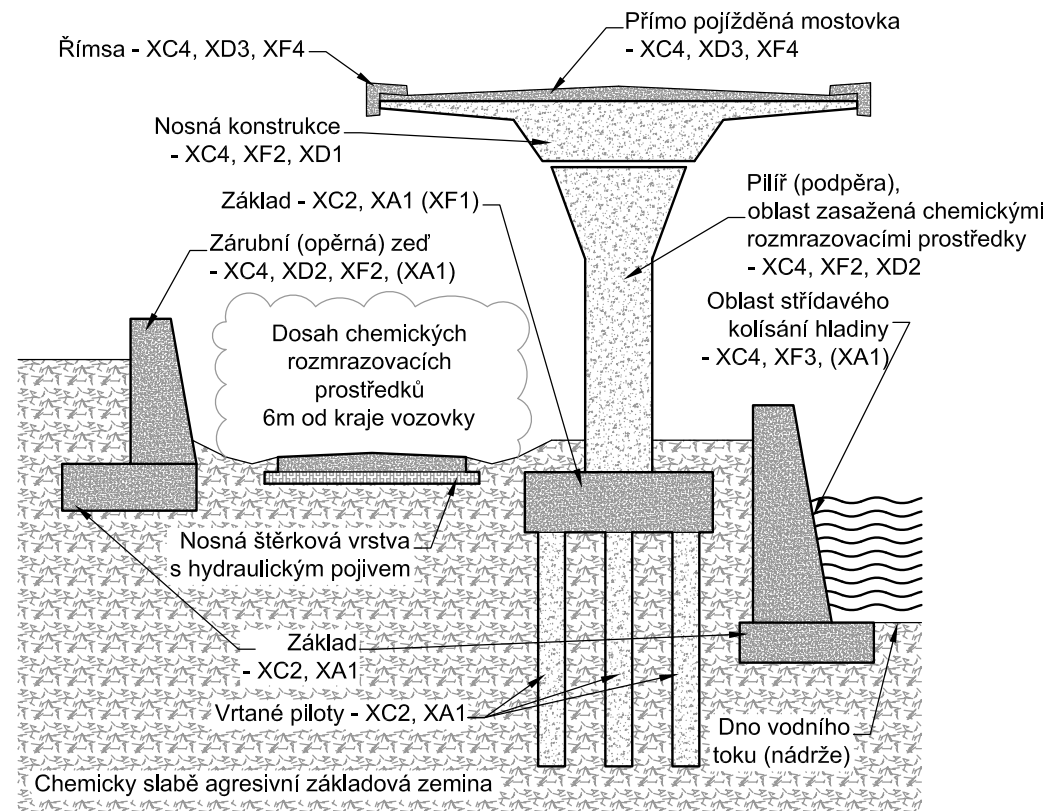


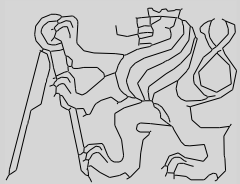


Trvanlivost betonových konstrukcí

Třídy prostředí podle ČSN EN 206-1

- X0 – bez nebezpečí koroze nebo napadení
- XC – koroze karbonatací
- XD – koroze chloridy
- XS – koroze vyvolaná chloridy z mořské vody
- XF – působení mrazu a rozmrazování
- XA – chemická koroze
- XM – mechanická koroze





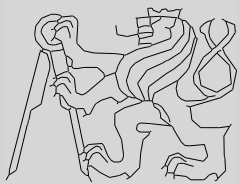
Trvanlivost betonových konstrukcí

Indikativní třídy pevnosti pro danou třídu prostředí

Stupně vlivu prostředí podle Tab. 1										
Koroze										
	koroze vyvolaná karbonatací				koroze vyvolaná chloridy			koroze vyvolaná chloridy z mořské vody		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Indikativní pevnostní třída	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Poškození betonu										
	bez rizika	střídané působení mrazu a rozmrzávání					chemické napadení			
	X0	XF1	XF2		XF3		XA1	XA2		XA3
Indikativní pevnostní třída	C12/15	C30/37	C25/30		C30/37		C30/37		C35/45	

Třídy prostředí podle ČSN EN 206-1

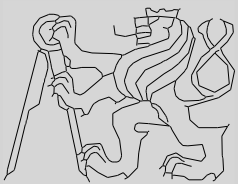
- X0 – bez nebezpečí koroze nebo napadení
- XC – koroze karbonatací
- XD – koroze chloridy
- XS – koroze vyvolaná chloridy z mořské vody
- XF – působení mrazu a rozmrazování
- XA – chemická koroze
- XM – mechanická koroze



Trvanlivost betonových konstrukcí

Doporučení maximální šířka trhliny je závislá na prostředí

Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		dekomprese
POZNÁMKA 1 Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka trhliny vliv na trvanlivost a uvedená hodnota má zajistit přijatelný vzhled. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, lze uvedenou hodnotu zvětšit. POZNÁMKA 2 Pro tyto stupně vlivu prostředí má být kromě toho posouzena dekomprese při kvazi-stálé kombinaci zatížení.		



Trvanlivost betonových konstrukcí

Stanovení krytí betonářské výztuže

Hodnota krytí betonářské výztuže je hodnota tzv. minimální betonové krycí vrstvy c_{min} , která ještě musí být pro další užití zvýšena o návrhový přírůstek na odchylku Δc_{dev} (10mm pro monolitické konstrukce, 0-5mm pro prefabrikáty). Výsledná hodnota, tzv. nominální krycí vrstva, se pak vypočte jako:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

a zohlední se ve statickém výpočtu a popíše na výkresech výztuže, jak již bylo řečeno výše.

V případě obecného postupu podle ČSN EN 1992-1-1 se hodnota c_{min} stanoví jako větší z hodnot:

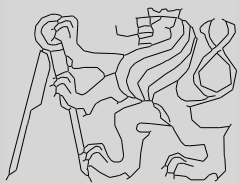
$$c_{min} = \max \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\}$$

kde	$c_{min,b}$	je	minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti;
	$c_{min,dur}$		minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí;
	$\Delta c_{dur,\gamma}$		přídavná hodnota z hlediska spolehlivosti prvku;
	$\Delta c_{dur,st}$		redukce minimální krycí vrstvy při použití nerezové oceli;
	$\Delta c_{dur,add}$		redukce minimální krycí vrstvy při použití přídavné ochrany.



Hodnota minimální krycí vrstvy betonářské výztuže v běžném betonu se z hlediska podmínek prostředí a třídy konstrukce udává hodnotou $c_{\min, \text{dur}}$. Ta se stanoví podle doporučené třídy konstrukce S4 pro návrhovou životnost 50let (pro mosty se podle ustanovení ČSN EN 1990 požaduje životnost 100let), pro směrnou pevnost betonu z hlediska trvanlivosti a doporučené úpravy třídy konstrukce. Po úpravě třídy konstrukce se výsledná hodnota minimální krycí vrstvy pro betonářskou výztuž z hlediska podmínek prostředí $c_{\min, \text{dur}}$ stanoví z další tabulky.

[illegible]



Trvanlivost betonových konstrukcí

Stanovení krytí betonářské výztuže

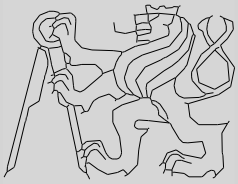
Hodnoty minimální krycí vrstvy pro betonářskou výztuž $c_{\min,b}$ požadované z hlediska trvanlivosti

$c_{\min,dur}$ (mm) požadované z hlediska podmínek prostředí							
Třída konstrukce	Stupeň vlivu prostředí podle Tab. 1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Hodnoty minimální krycí vrstvy pro předpínací výztuž $c_{\min,dur}$ požadované z hlediska trvanlivosti

$c_{\min,dur}$ (mm) požadované z hlediska podmínek prostředí							
Třída konstrukce	Stupeň vlivu prostředí podle tabulky 1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

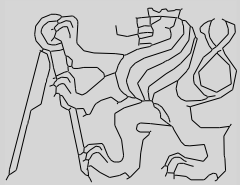
Postup je uveden
v pomůcce na
webu....



MSP

Obvykle řešené MSP

- Mezní stav omezení napětí
- Mezní stav vzniku trhlin, mezní stav šířky trhlin
- Mezní stav přetvoření
- Mezní stav kmitání



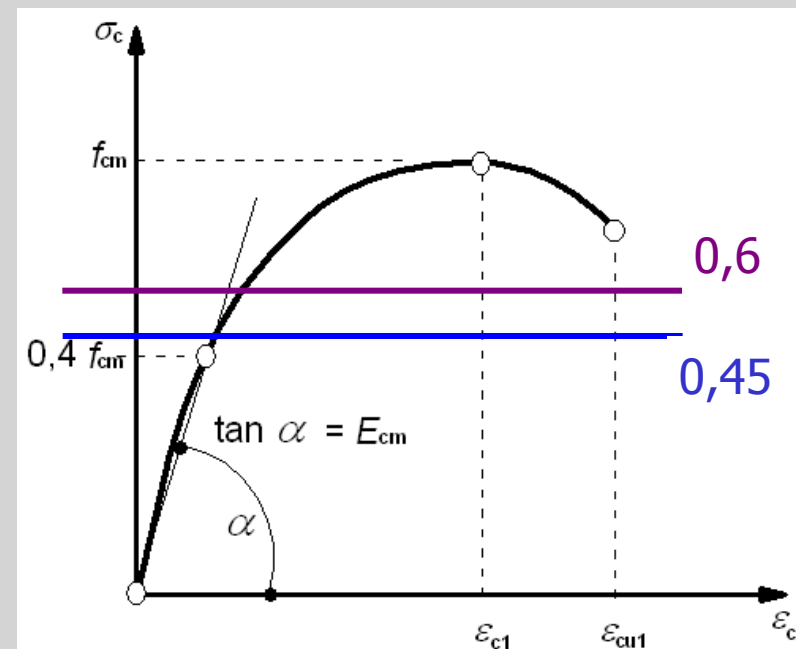
Mezní stav omezení napětí

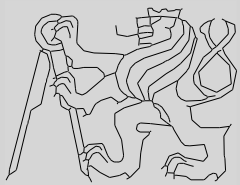
- Omezení tlakových napětí v betonu při charakteristické kombinaci zatížení

$$|\sigma_c| \leq 0,6 f_{ck} ,$$

Možné uvažovat lineární dotvarování
při kvazi-stálé kombinaci zatížení

$$|\sigma_c| \leq 0,45 f_{ck} ,$$

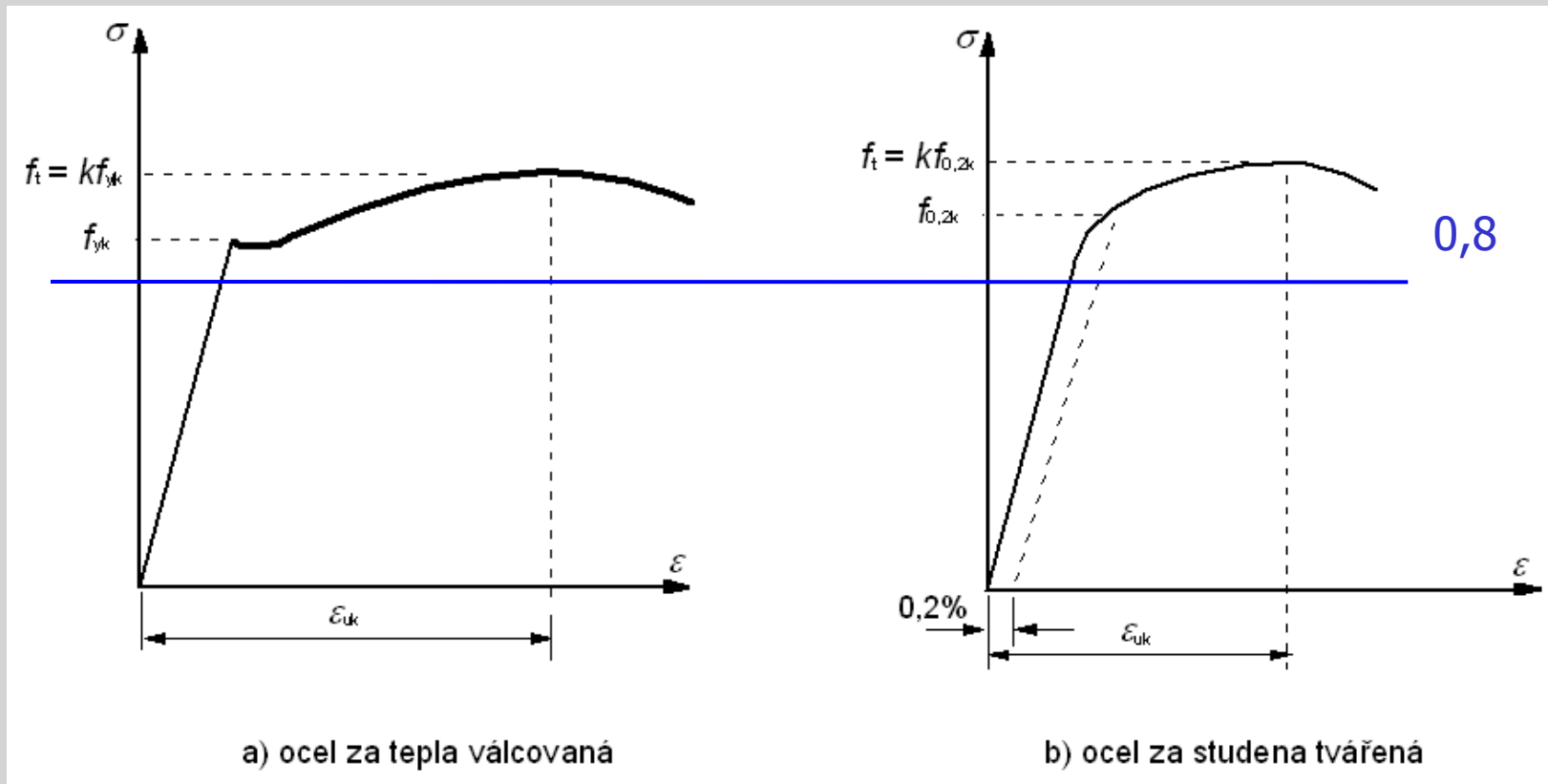


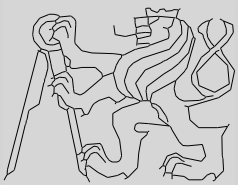


Mezní stav omezení napětí

- Omezení tahových napětí ve výztuži při charakteristické kombinaci zatížení

$$\sigma_s \leq 0,8 f_{yk} ;$$





Mezní stav omezení napětí

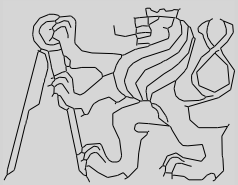
Pokud tlaková napětí v betonu překročí tyto hodnoty dojde k:

- Vzniku podélných trhlin
- Rozvoji mikrotrhlin v betonu
- Vyšším hodnotám dotvarování (vyšší nárůst průhybů)

Pokud tahová napětí ve výztuži překročí tyto hodnoty dojde k:

- Ke vzniku nadměrného nepružného přetvoření výztuže
- Ke vzniku širokých trvale otevřených trhlin v betonu

=> Snížení trvanlivosti a použitelnosti konstrukce



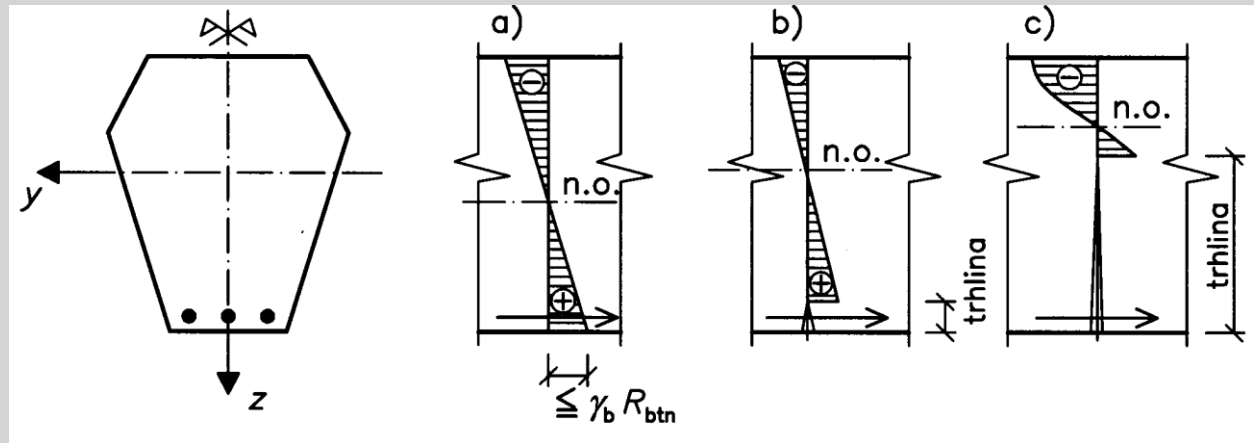
Mezní stav omezení napětí

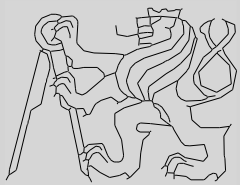
Kdy dojde v průřezu k vzniku trhlin?

- Když při příslušné kombinaci zatížení největší tahové napětí průřezu bez trhliny překročí efektivní hodnotu pevnosti betonu v tahu

$$\sigma_c > f_{ct,eff}$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm}$$





Mezní stav omezení napětí

Průřez bez trhliny

- Plné působení betonového průřezu a pružné chování betonu i výztuže v tahu i tlaku
- Budou vypočítány charakteristiky tzv. ideálního průřezu, plocha výztuže bude převedena na plochu betonu podle poměru

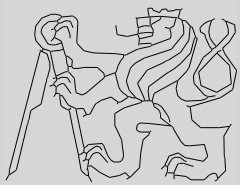
$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

Třídy pevnosti betonu

f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42

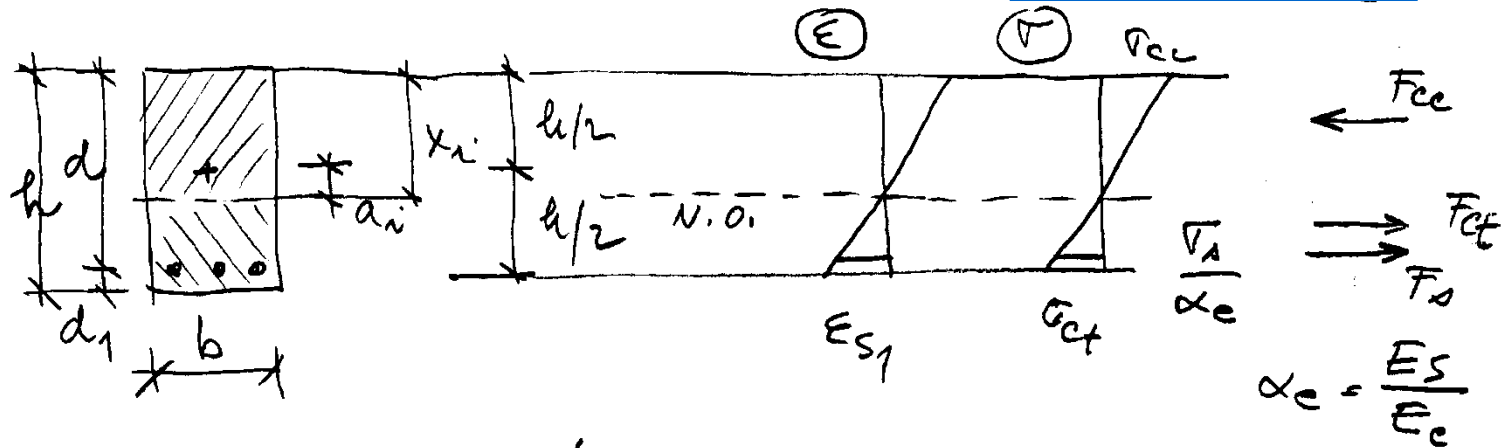
E_s — modul pružnosti betonářské výztuže ($E_s = 200$ GPa)

E_{cm} — střední hodnota sečnového modulu pružnosti betonu



Mezní stav omezení napětí

1) IDEÁLNÍ PRŮŘEZ – BEZ TRHLIN



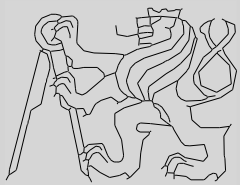
SOUČTOVÁ VÝMINKA

$$F_{cc} = F_{st} + F_s$$

$$\frac{1}{2} b \cdot x_i \cdot \sigma_{cc} = \frac{1}{2} b \cdot (h - x_i) \sigma_{ct} + A_s \cdot \sigma_s$$

$$\text{kde: } \sigma_{cc} = \sigma_{ct} \cdot \frac{x_i}{h - x_i}$$

$$\sigma_s = \alpha_e \cdot \sigma_{ct} \cdot \frac{d - x_i}{h - x_i}$$



$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_i \cdot \sigma_{et} \cdot \frac{x_i}{h-x_i} = \frac{1}{2} b (h-x_i) \sigma_{et} + \alpha_e A_s \cdot \sigma_{et} \cdot \frac{d-x_i}{h-x_i}$$

STATICKÉ
MOMENTY

$$\underbrace{\frac{1}{2} b \cdot x_i^2}_{S_{cc}} = \underbrace{\frac{1}{2} b (h-x_i)^2}_{S_{ct}} + \underbrace{\alpha_e A_s (d-x_i)}_{S_s}$$

=> NEUTRÁLNÍ OSA $\equiv$ TĚŽIŠŤOVÁ OSA IDEÁL. PR.

SPOČTI $x_i \Rightarrow a_i$ (= VZDALENOST TĚŽIŠŤE
DET. PRŮŘEZU A
TĚŽIŠŤE IDEÁL. PRŮŘEZU)

$$x_r = \frac{\frac{1}{2} b h^2 + \alpha_e A_s d}{b h + \alpha_e A_s}$$

$$\sigma_{cc} = \frac{M}{y_i} \cdot x_i$$

$$\sigma_{et} = \frac{M}{y_i} \cdot (h-x_i)$$

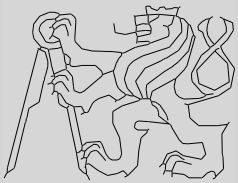
VZNIK TRHLIN:

$$\sigma_{et} = f_{ct} \Rightarrow M = M_{cr}$$

MOMENT SETRVAČNOSTI IDEÁLNÍHO PRŮŘEZU
K TĚŽIŠŤI IDEÁL. PRŮŘEZU

$$y_i = \frac{1}{12} b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot a_i^2 + \alpha_e A_s (d-x_i)^2$$

SPRAVŮNĚVÍ $(\alpha_e - 1)$



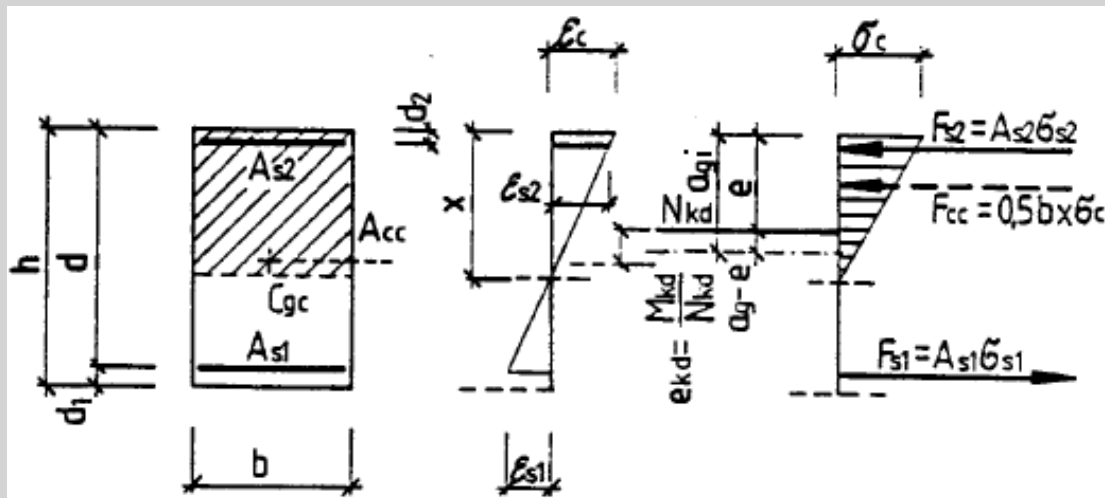
Mezní stav omezení napětí

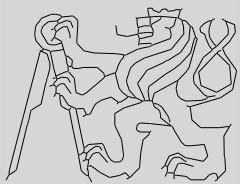
Kdy se uvažuje průřez s trhlinou?

- Pokud napětí v krajních tažených vláknech betonového průřezu vypočtené na plně působícím průřezu podle předchozích vztahů je větší než efektivní hodnota pevnosti betonu v tahu

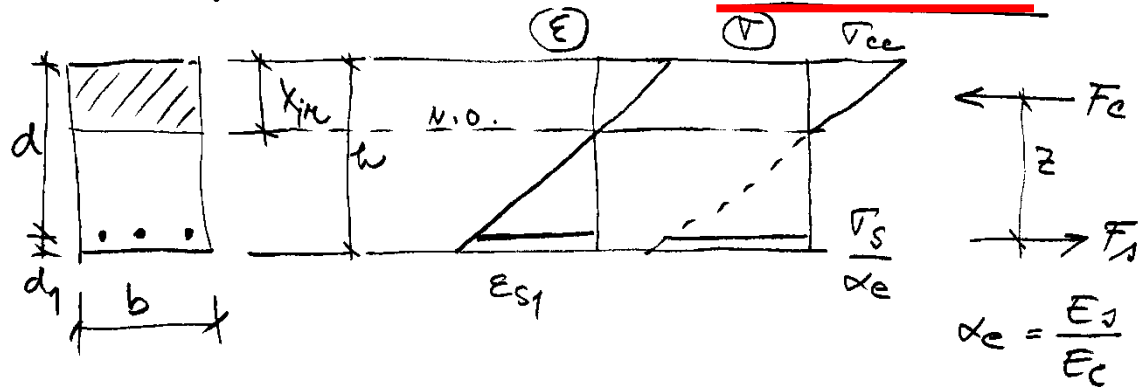
$$\sigma_c > f_{ct,eff}$$

- V tažené oblasti beton nepůsobí, napětí v tlačené části průřezu a ve výztuži je úměrné rovinnému přetvoření průřezu





2) IDEÁLNÍ PRŮŘEZ S TRHLINOU



VÝPOČET x_{ir} Z ROVNOSTI STATICKÝCH MOMENTŮ

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_{ir}^2 = \alpha_e \cdot A_s (d - x_{ir})$$

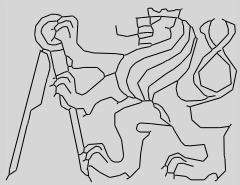
$$x_{ir} = \frac{\alpha_e A_s}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2bd}{\alpha_e A_s}} \right)$$

$$z = d - \frac{x_{ir}}{3}$$

$$y_{ir} = \frac{1}{3} b \cdot x_{ir}^3 + \alpha_e \cdot A_s (d - x_{ir})^2$$

$$\sigma_c = \frac{M}{y_{ir}} \cdot x_{ir}$$

$$\sigma_s = \frac{M}{z \cdot A_s}$$



$$\frac{b \cdot x \cdot x/2 + n \cdot A_a \cdot d}{b \cdot x + n \cdot A_a} = x$$

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x^2 + n \cdot A_a \cdot d = b \cdot x^2 + n \cdot A_a \cdot x$$

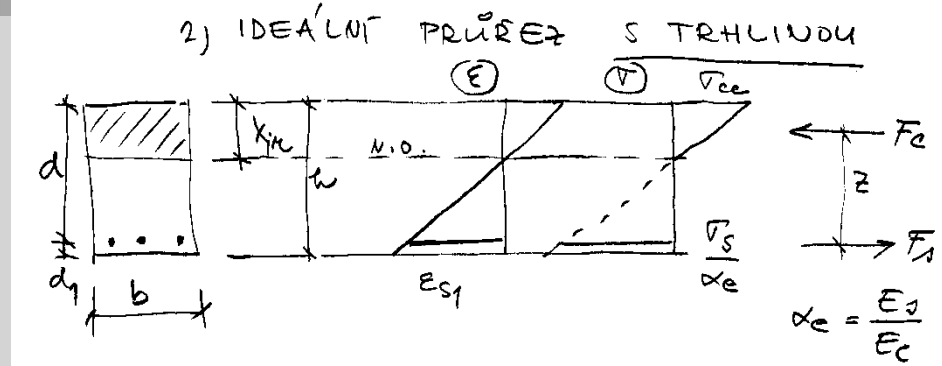
$$0 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot x^2 + n \cdot A_a \cdot x - n \cdot A_a \cdot d$$

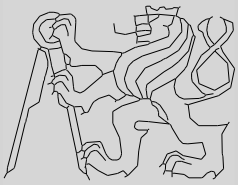
$$\Rightarrow x = \frac{\alpha_e A_s}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2bd}{\alpha_e A_s}} \right)$$

$$I_{ir} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot x^3 + b \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2} \right)^2 + n \cdot A_a \cdot (d - x)^2$$

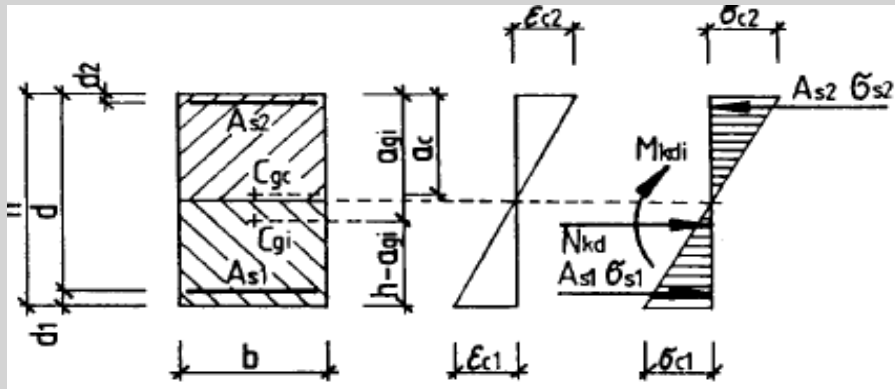
$$I_{ir} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot x^3 + \frac{1}{4} \cdot b \cdot x^3 + n \cdot A_a \cdot (d - x)^2$$

$$I_{ir} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + n \cdot A_a \cdot (d - x)^2$$



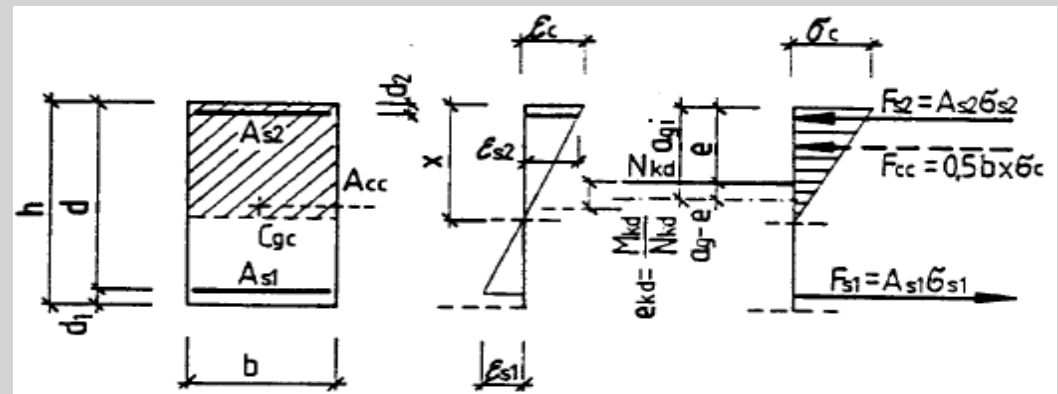


Shrnutí průřez s/bez trnliny

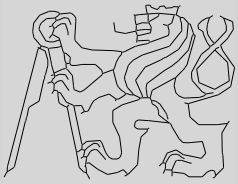


$$A_1 = A_c + \alpha_e (A_{s1} + A_{s2}),$$

$$I_i = I_c + A_c (a_{gi} - a_c)^2 + \alpha_e [A_{s1} (d - a_{gi})^2 + A_{s2} (a_{gi} - d_2)^2]$$



$$I_{ir} = \frac{1}{3} b x^3 + \alpha_e [A_{s1} (d - x)^2 + A_{s2} (x - d_2)^2]$$

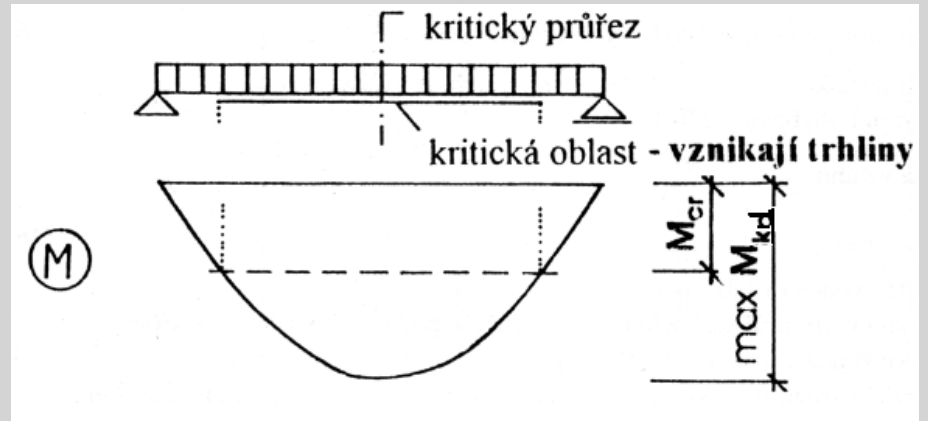


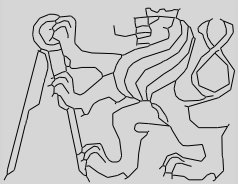
Mezní stav trhlin

- Ohybový moment při vzniku trhlin

$$\frac{M_{cr}}{I_i} \cdot (h - x_i) = \sigma_{ct} = f_{ct,eff} = f_{ctm}$$

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{I_i}{(h - x_i)}$$





Mezní stav trhlin

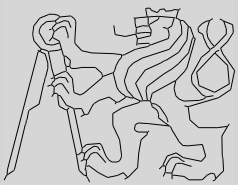
- Přípustná šířka trhliny podle stupně vlivu prostředí

$$w_k \leq w_{max}$$

Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		dekomprese

POZNÁMKA 1 Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka trhliny vliv na trvanlivost a uvedená hodnota má zajistit přijatelný vzhled. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, lze uvedenou hodnotu zvětšit.

POZNÁMKA 2 Pro tyto stupně vlivu prostředí má být kromě toho posouzena dekomprese při kvazi-stálé kombinaci zatížení.



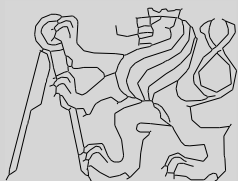
Mezní stav trhlin

Omezení trhlin bez přímého výpočtu šířky trhlin

- Minimálním množstvím výztuže soudržné s betonem ve všech tažených průřezech

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

$\sigma_s = f_{yk}$ či napětí ve výztuži bezprostředně po vzniku trhliny



Mezní stav trhlin

Omezení trhlin bez přímého výpočtu šířky trhlin

- Bud' maximální průměry výztuže pro omezení šířky trhlin

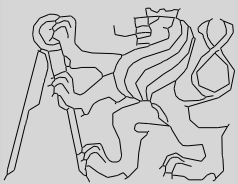
Napětí ve výztuži ² [MPa]	Maximální průměr prutu [mm]		
	$w_k = 0.4 \text{ mm}$	$w_k = 0.3 \text{ mm}$	$w_k = 0.2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

POZNÁMKA 1. Hodnoty v tabulce vycházejí z následujících předpokladů:

$c = 25\text{mm}$; $f_{ct,eff} = 2,9\text{MPa}$; $h_{cr} = 0,5$; $(h-d) = 0,1h$; $k_1 = 0,8$;

$k_2 = 0,5$; $k_c = 0,4$; $k = 1,0$; $k_t = 0,4$ and $k' = 1,0$

2. Při odpovídající kombinaci účinků zatížení

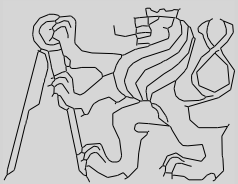


Mezní stav trhlin

Omezení trhlin bez přímého výpočtu šířky trhlin

- Nebo maximální vzdálenost mezi pruty pro omezení šířky trhlin

Napětí ve výztuži ² [MPa]	Maximální vzdálenost prutů [mm]		
	$w_k=0,4$ mm	$w_k=0,3$ mm	$w_k=0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

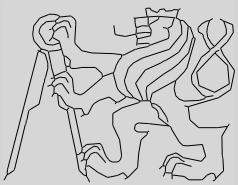


Mezní stav trhlin

Nebezpečí vzniku širokých trhlin

- Při změnách rozměrů a tvaru průřezu
- Blízko soustředěných zatížení
- V místech ukončení výztužných vložek
- Na koncích styků s přesahem





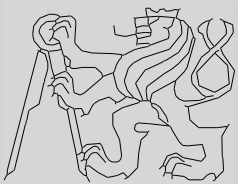
Mezní stav trhlin

Výpočet šířky trhlin

- Složitý výpočet, výsledek je „nejistý“
- Přesnou šířku trhliny ani pro zajištění trvanlivosti znát nepotřebuji

$W_k = S_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ vzdálenost trhlin, ε výztuže a betonu mezi trhlinami

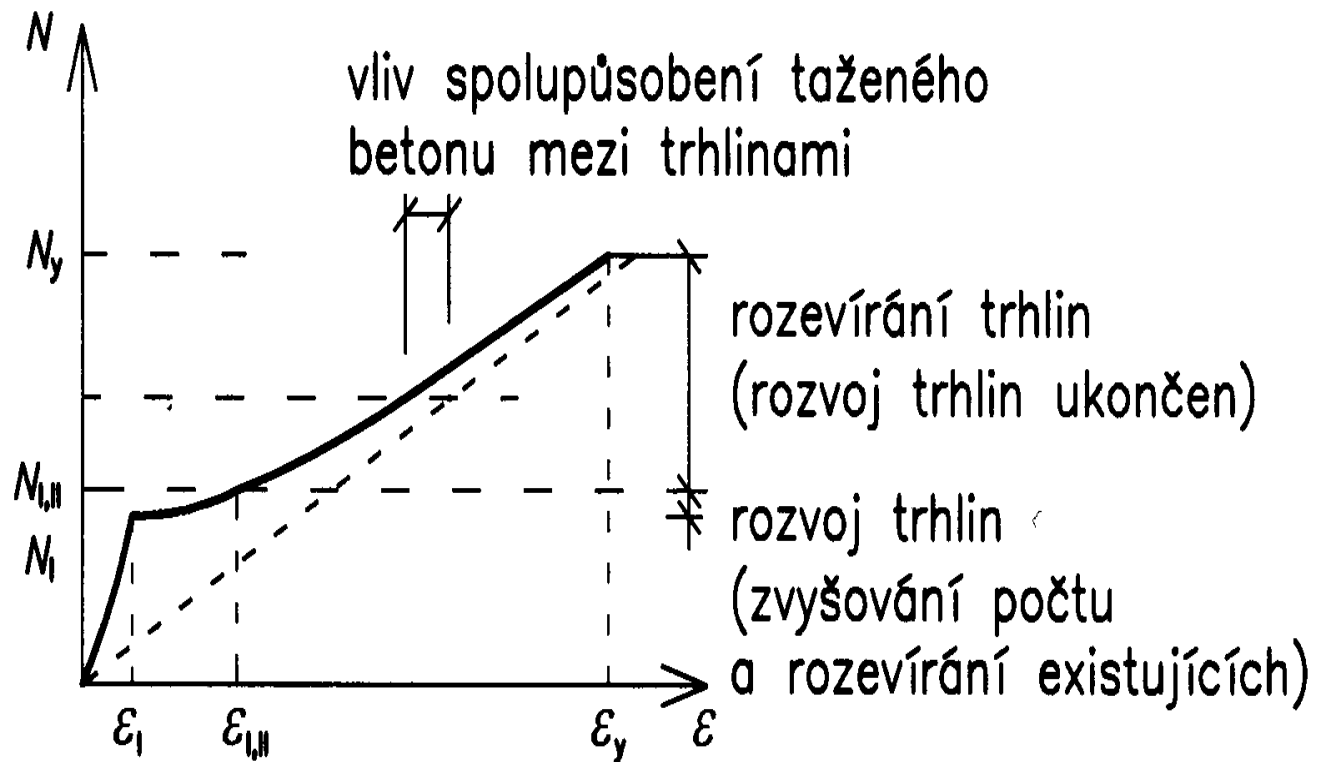
$$w_k = \left(k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \right) \frac{1}{E_s} \left[\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \left(1 + \alpha_E \rho_{p,eff} \right) \right]$$

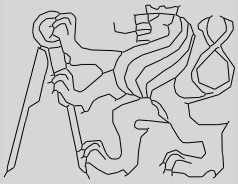


Mezní stav trhlin

Závislost mezi působícím zatížením a poměrným přetvořením výztuže

- Do vyčerpání pevnosti betonu v tahu působí celý ŽB průřez
- První trhliny vzniknou po dosažení tahové síly $N_I = A_i * f_{ctm}$

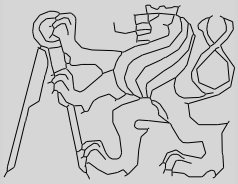




Mezní stav trhlin

Závislost mezi působícím zatížením a poměrným přetvořením výztuže

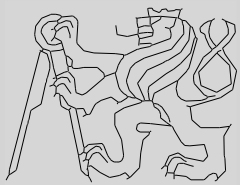
- V místě trhliny už neplatí rovnost mezi ϵ betonu a oceli, mimo ní ano
- Vzdálenost mezi primárními trhlinami je velká



Mezní stav trhlin

Závislost mezi působícím zatížením a poměrným přetvořením výztuže

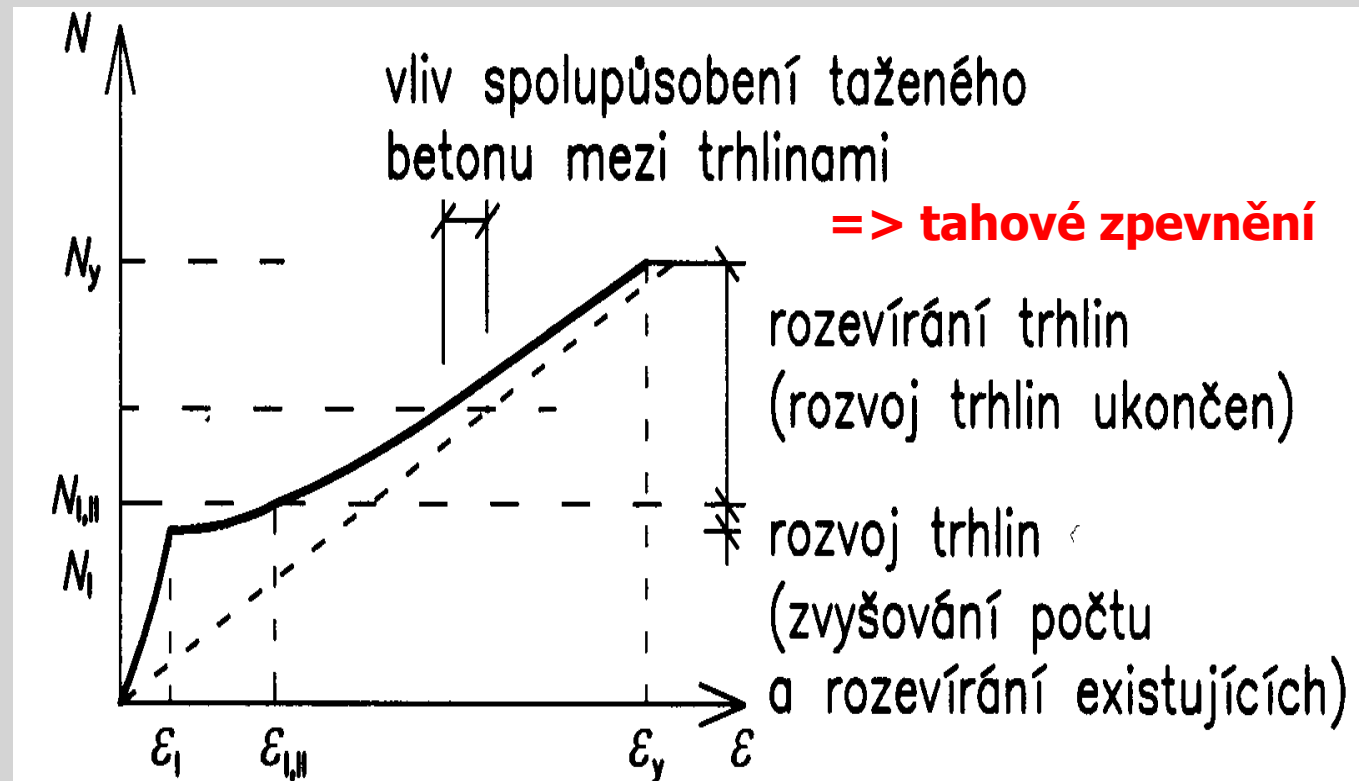
- Krátce po vzniku primárních trhlin se začínají rozvíjet trhliny sekundární
- Rozvoj trhlin je ukončen v bodě $(N_{I,II}, \varepsilon_{I,II})$

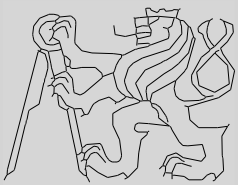


Mezní stav omezení napětí

Závislost mezi působícím zatížením a poměrným přetvořením výztuže

- Při dalším zvyšování zatížení dochází ke zvyšování napětí ve výztuži
- Spolupůsobení betonu mezi trhlinami se zmenšuje
- Napětí a síla ve výztuži stoupá až k její mezi kluzu (N_y, ε_y)



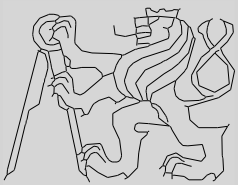


Mezní stav přetvoření

Mezní přetvoření

- Velké deformace vyvolávají v uživateli pocit nebezpečí
- Poškozují strojní zařízení (rovinnosti podlah, jeřábových drah, apod.)
- Nenosné části konstrukce (příčky, opláštění, obklady, omítky) jsou schopny přenášet deformace jen do určitého rozsahu

=> je nutné stanovit orientační hodnoty mezních průhybů pro zajištění dostatečné funkčnosti staveb



Mezní stav přetvoření

Mezní přetvoření

a) Při požadavcích na vzhled a obecnou použitelnost:

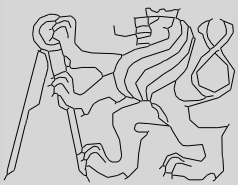
Průhyb od kvazi-stálého zatížení $\leq 1/250$ rozpětí

Průhyb se stanoví ve vztahu k podporám.

Lze použít nadvýšení $\leq 1/250$ rozpětí.

b) Při požadavcích průhyby po zabudování prvku:

**Průhyb po zabudování prvku
od kvazi-stálého zatížení $\leq 1/500$ rozpětí**



Mezní stav přetvoření

Vymezující ohybové štíhlosti

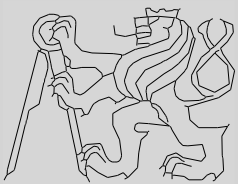
- Při splnění podmínky vymezující ohybové štíhlosti se nepředpokládá, že by průhyby překročily limitní hodnoty

$$\frac{l}{d} \leq \lambda_d$$

$$\lambda_d = K_{c1} K_{c2} K_{c3} \lambda_{d,tab} ,$$

- K_{c1} součinitel tvaru průřezu, =0,8 štíhlé T průřezy, =1 statní případy
- K_{c2} součinitel rozpětí, = 7// pro $l > 7,0$ m, = 1,0 pro $l \leq 7,0$ m
- K_{c2} součinitel napětí tahové výztuže v extrémním průřezu při časté kombinaci

$$K_{c3} = \frac{310}{\sigma_s} \doteq \frac{500}{f_{yk}} \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}}$$



Mezní stav přetvoření

Vymezuující ohybové štíhlosti

součinitel zohledňující
nosný systém

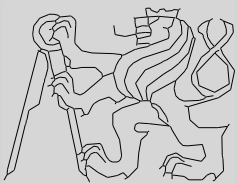
$$\lambda_{d,tab} = \begin{cases} K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_o}{\rho} + 3,2 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_o}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] & \text{pro } \rho \leq \rho_o \\ K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_o}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho'}{\rho_o} \right] & \text{pro } \rho > \rho_o \end{cases}$$

stupeň vyztužení

Nosná soustava	K	Silně namáhaný beton $\rho = 1,5\%$	Slabě namáhaný beton $\rho = 0,5\%$
prostě podepřený nosník, prostě podepřená deska nosná v jednom nebo ve dvou směrech	1,0	14	20
krajní pole spojitého nosníku nebo spojitě desky nosné v jednom směru nebo desky nosné ve dvou směrech spojitě v delší straně	1,3	18	26
vnitřní pole nosníku nebo desky nosné v jednom směru nebo desky nosné ve dvou směrech	1,5	20	30
deska lokálně podepřená (rozhoduje delší rozpětí)	1,2	17	24
konzola	0,4	6	8

POZNÁMKA U desek nosných ve dvou směrech se má posouzení provést pro kratší rozpětí. U desek lokálně podepřených se při posouzení má uvažovat delší rozpětí.

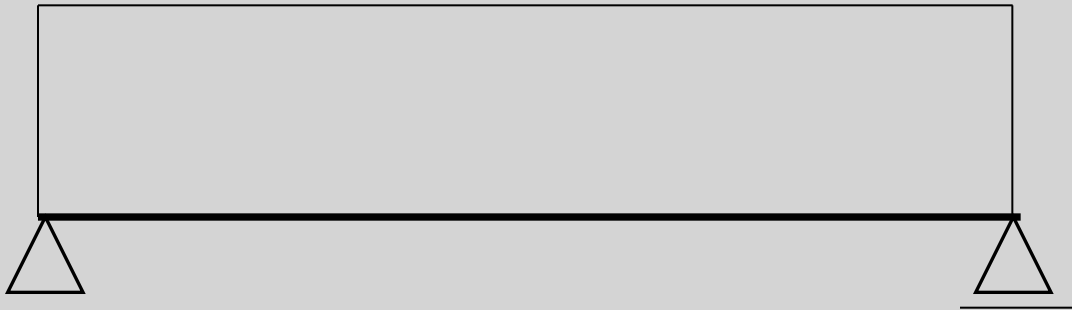
	Pevnostní třída betonu						
$\rho \%$	12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	40/50	50/60
0,5	14,6	15,8	17,0	18,5	20,5	25,8	32,0
1,5	12,2	12,6	13,0	13,5	14,0	15,0	16,0



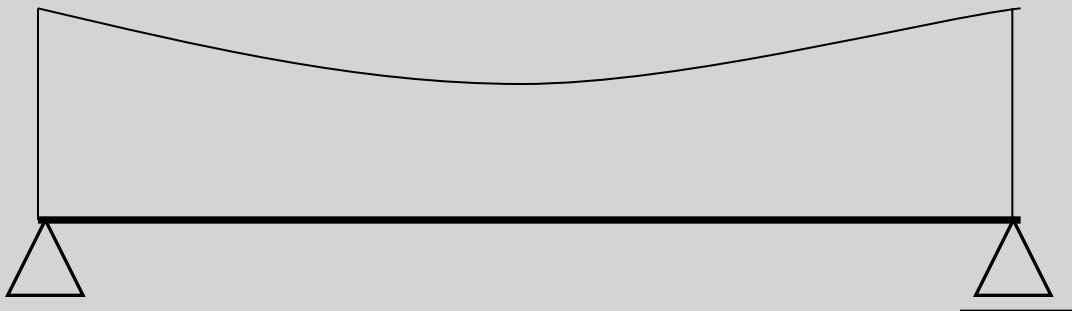
Mezní stav přetvoření

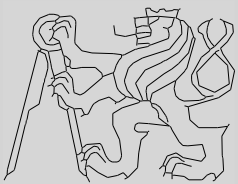
Výpočet přetvoření

- Průběh ohybové tuhosti před vznikem trhlin



- Průběh ohybové tuhosti po vzniku trhlin

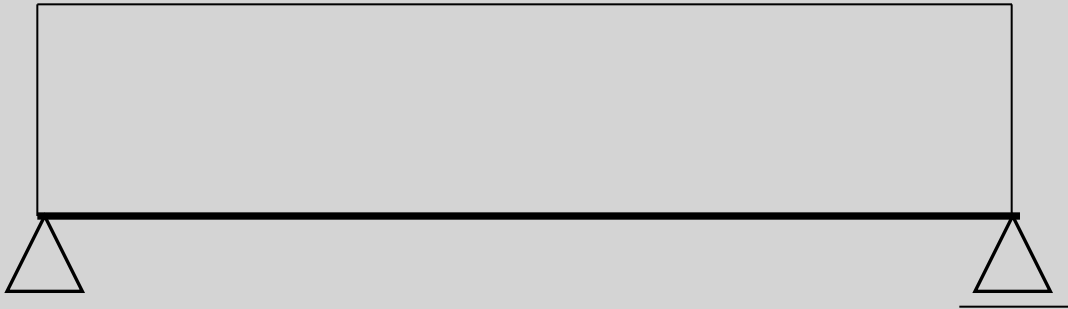




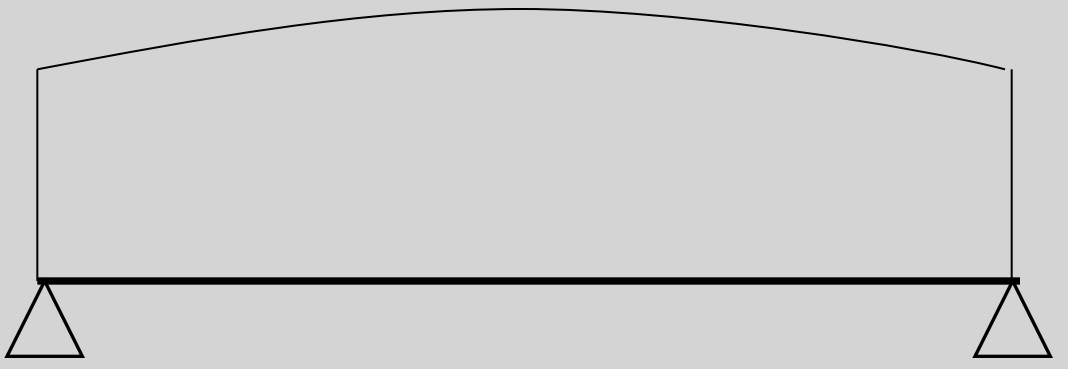
Mezní stav přetvoření

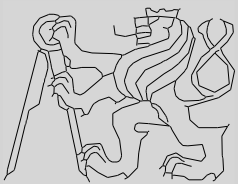
Výpočet přetvoření

- Průběh ohybové poddajnosti před vznikem trhlin



- Průběh ohybové poddajnosti po vzniku trhlin



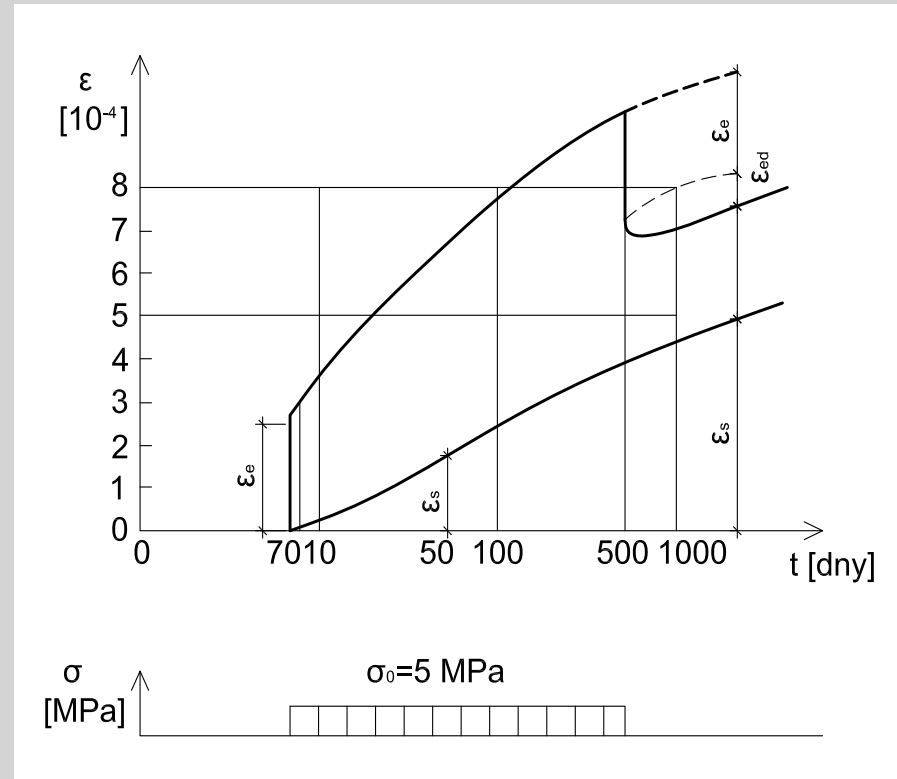
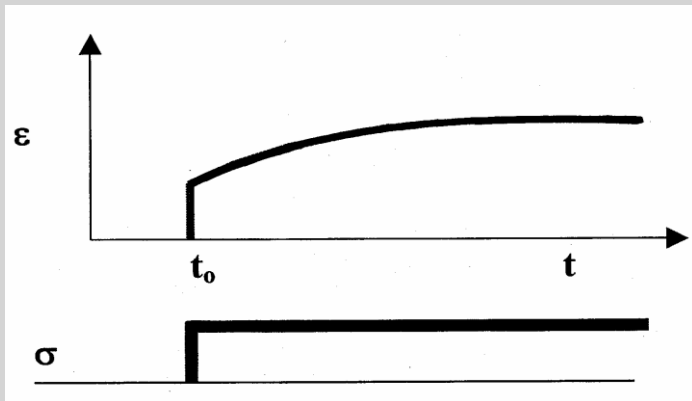


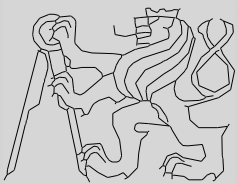
Mezní stav omezení napětí

Vliv délky trvání zatížení na přetvoření betonových konstrukcí

- Při delší době zatížení betonu dochází k nárůstu průhybů
- K nárůstům průhybů dochází i po odtížení

=> dotvarování betonu





Mezní stav omezení napětí

Faktory ovlivňující dotvarování a smršťování betonu

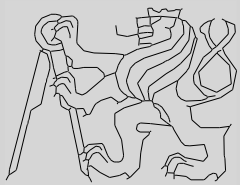
- Množství a druh cementu a jemnost jeho mletí
- Vodní součinitel
- Zrnitost kameniva
- Hutnost betonu
- Vlhkost prostředí
- Rozměry prvků
- Doba ošetřování
- Stáří betonu při prvním zatížení t_0

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}}$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

$\varphi(\infty, t_0)$

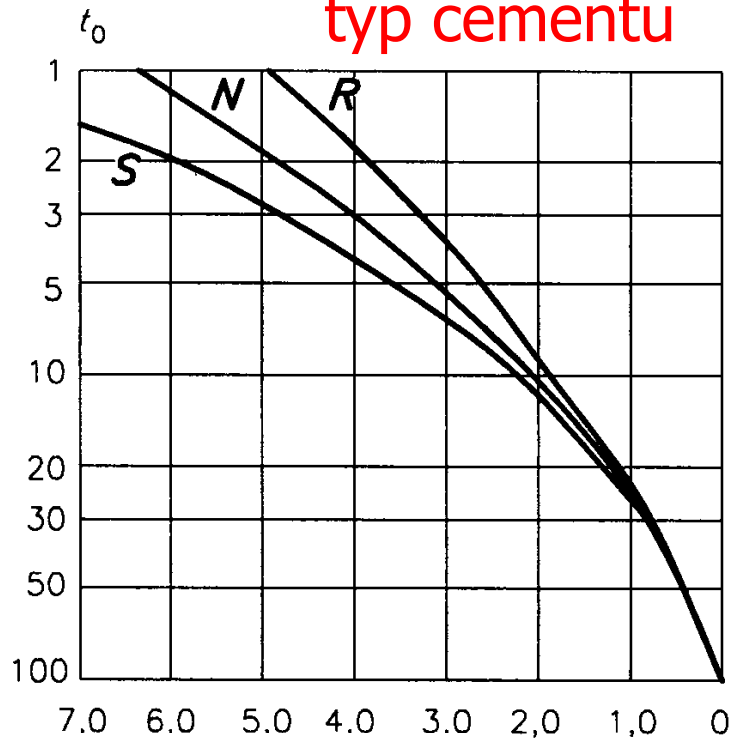
– součinitel dotvarování betonu



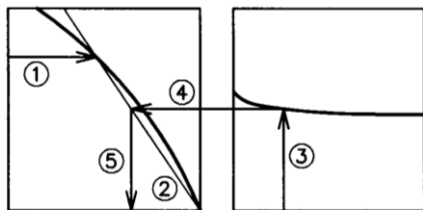
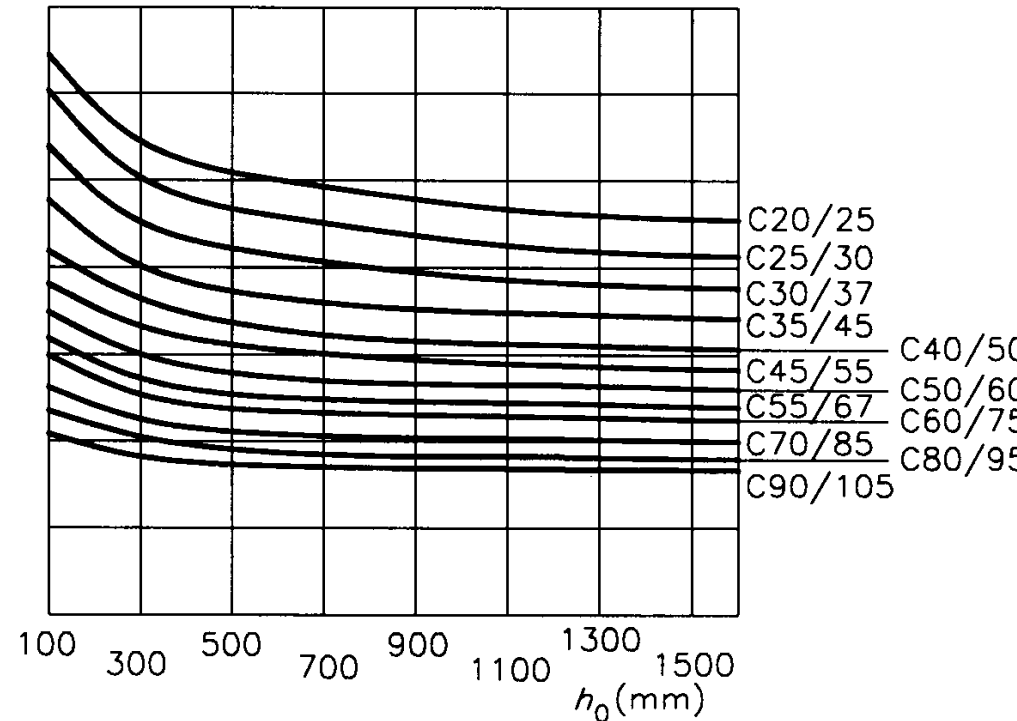
Mezní stav omezení napětí

a) vnitřní prostředí – RH=50%

typ cementu



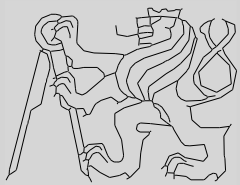
tř. betonu



$$h_0 = 2A_c / u$$

$\varphi(\infty, t_0)$

– součinitel dotvarování betonu



Mezní stav přetvoření

Výpočet přetvoření

- Ohybová poddajnost průřezu bez trhliny
- Ohybová poddajnost průřezu s trhlinou
- Míra spolupůsobení betonu mezi trhlinami (tahové zpevnění průřezu)

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$

β součinitel vliv doby trvání nebo opakování zatížení

= 1 jednorázové krátkodobé zatížení

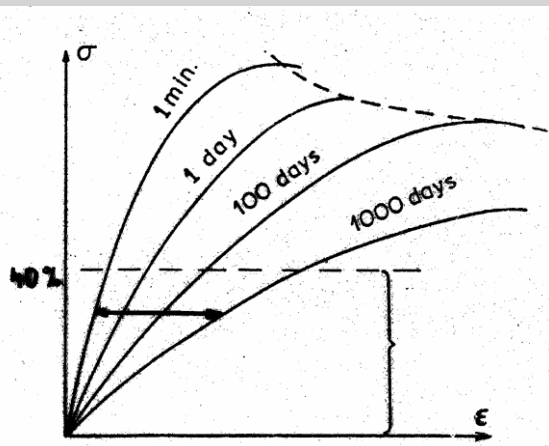
= 0,5 dlouhodobé zatížení,

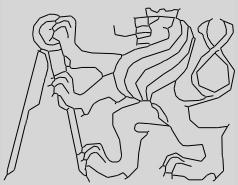
mnohonásobně opakované zatížení

σ_{sr}/σ_s lze při prostém ohybu nahradit M_{cr}/M_{kd}

$$C_I = \frac{1}{E_{c,eff} I_i}$$

$$C_{II} = \frac{1}{E_{c,eff} I_{ir}}$$





Mezní stav omezení napětí

Výpočet přetvoření

- Křivost od přímého zatížení

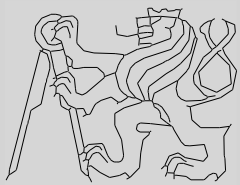
$$\frac{1}{r_m} = M_{kd} [(1 - \varsigma) C_I + \varsigma C_{II}]$$

KŘIVOST

$$\mathbf{1/r = M \cdot C}$$

- Křivost od smršťování
(nebude ve cvičení uvažován)

$$\left(\frac{1}{r_{cs}} \right) = -\varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I}$$



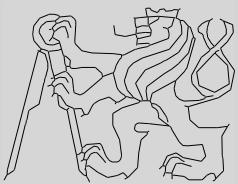
Mezní stav omezení napětí

Výpočet přetvoření

- Průhyb ve středu rozpětí bez vlivu smršťování

$$f_s = k l^2 \frac{1}{r_m}$$

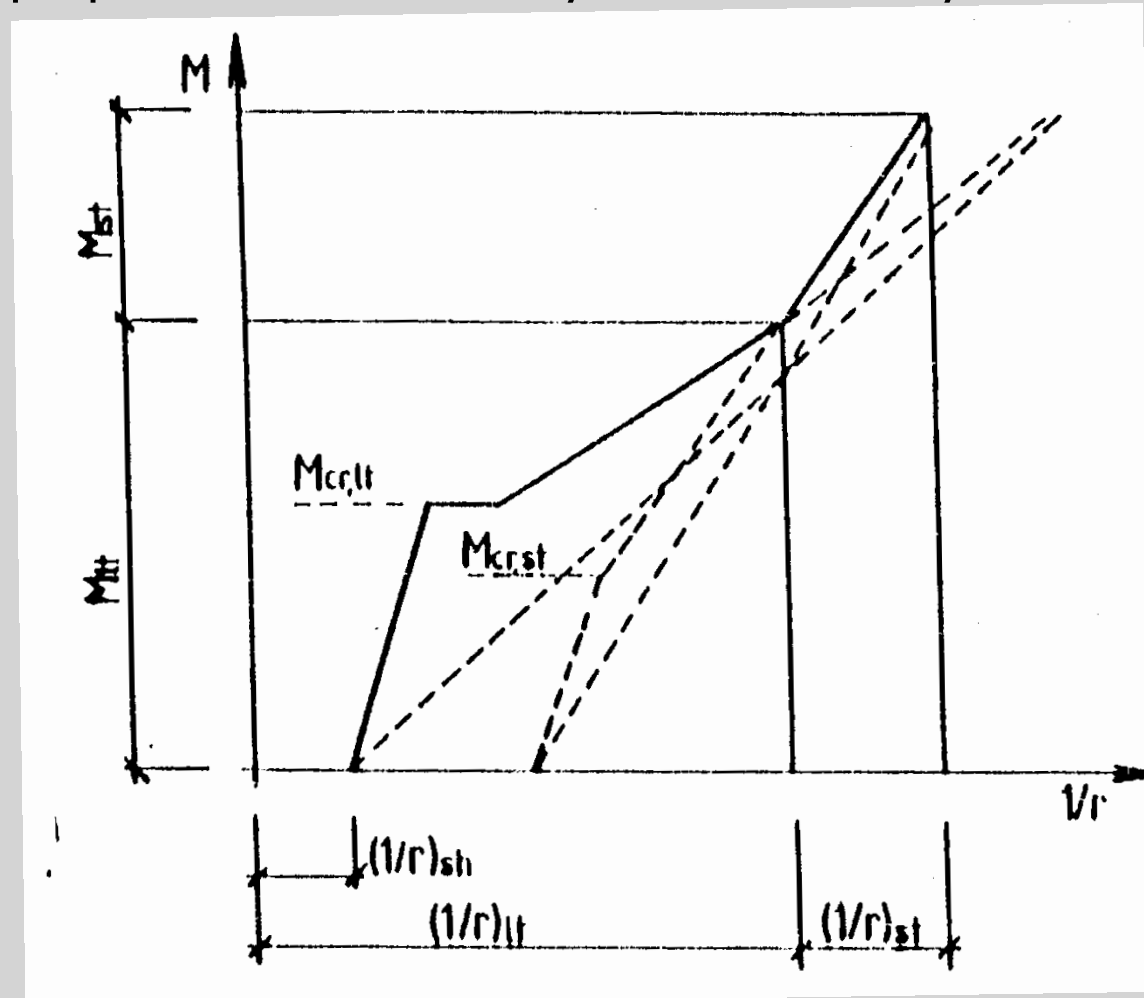
i	Schéma	Průběh momentů	k
	1	2	3
1			0,125
2		 $M = F_V \cdot (1 - dl) \cdot dl$	$(3 - 4 \alpha^2) / (48 (1 - \alpha))$
3			0,0625
4		 $M = F_V \cdot dl$	$0,125 - \alpha^2 / 6$
5		 $M = \frac{f l^2}{8}$	5/48
6		 $M = \frac{f l^2}{15.6}$	0,102
7		 $k = 5/48 (1 - 0,1\beta)$ $\beta = M_A + M_B / M_F$	
8		 $M = -F_V \cdot dl$	$k = \alpha (3 - \alpha) / 6$
9		 $M = \frac{f dl^2 l^2}{2}$	$k = \alpha (4 - \alpha) / 12$
10		 $k = 0,083 (1 - \beta / 4)$ $\beta = M_A + M_B / M_F$	
11		 $M = \frac{f l^2}{24} (3 - 4dl)$	$1/80 (5 - 4 \alpha^2)^2 / (3 - 4 \alpha^2)$

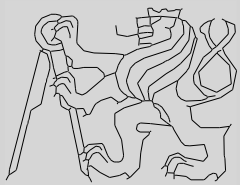


Mezní stav omezení napětí

Výpočet přetvoření

- Výsledná křivost při působení dlouhodobých a krátkodobých zatížení



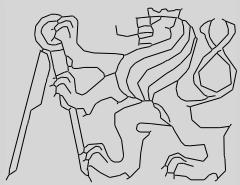


Postup řešení ve cvičení

MSÚ – stanovení krytí, návrh výztuže, posudek, spočítat využití

MSP $\psi_2 = 0,3$ $\psi_1 = 0,5$ $\psi_0 = 0,7$

- Připravit si kvazi-stálou a charakteristickou kombinaci zatížení
- Ideální charakteristiky průřezu bez trhliny krátkodobé, M_{cr} pro častou kombinaci zatížení, pokud menší jak M od časté kombinace, vzniknou trhliny, výpočet ideálních charakteristik s trhlinou; výpočet ohybové poddajnosti
- Ideální charakteristiky průřezu s trhlinou a s trhlinou, krátkodobé, výpočet ohybové poddajnosti
=> výpočet průhybu pro kvazi-stálou kombinaci zatížení, posudek
- Tento samý výpočet pro dlouhodobé zatížení, vliv dotvarování, jiné α_e
=> výpočet průhybu pro kvazi-stálou kombinaci zatížení, posudek, porovnání
- Pro charakteristickou kombinaci, dlouhodobé působení, ověřit mezní stav omezení napětí a omezení trhin bez jejich přímého výpočtu



?? Postup výpočtu ??

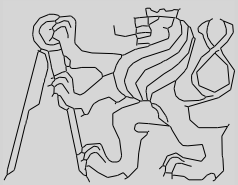
- Sestavit si kombinace:

- Charakteristická – nevratné MSP
- Kvazi-stálá – dlouhodobé účinky

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

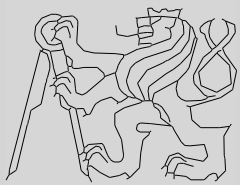
- Krátkodobé účinky zatížení

- Výpočet id. průřezu bez trhlin, poddajnost
- Ověření, zda vzniknou trhliny – jedná se o nevratný stav – musím použít častou kombinaci zatížení
- Pokud trhliny vznikly, počítám charakteristiky id. průřezu s trhlinami, poddajnost, atd.
- Pro výpočet průhybu užiji moment od kvazi-stálé kombinace zatížení, do rozdělovacího součinitele ponechám ζ od časté kombinace



?? Postup výpočtu ??

- Dlouhodobé účinky zatížení
 - Nutno zohlednit vliv dotvarování betonu, součinitel dotvarování φ uvažovat pro reálné časy vnesení zatížení $t_0 = 14$ až 28 dní
 - Výpočet id. průřezu bez trhlin, poddajnost
 - Ověření, zda vzniknou trhliny – jedná se o nevratný stav – musím použít častou kombinaci zatížení
 - Pokud trhliny vznikly, počítám charakteristiky id. průřezu s trhlinami, poddajnost, atd.
 - Pro výpočet průhybu užiji moment od kvazi-stálé kombinace zatížení, do rozdělovacího součinitele ponechám ζ od časté kombinace
- **Nakonec porovnáám průhyby krátkodobého a dlouhodobého působení, pokud nevyjde, navrhnu opatření, aby vyšel a pokusím se je kvantifikovat**



?? Postup výpočtu ??

- Následuje výpočet MS omezení napětí
 - Ověřím beton i ocel při charakteristické kombinaci zatížení
- Dále MS šířky trhlin
 - Ověřím podmínku minimální průřezové plochy výztuže, napětí ve výztuži uvažuji rovnou mezi kluzu výztuže
 - Ověřím maximální průměr prutu pro omezení šířky trhlin, $w_r =$ viz níže
 - Ověřím maximální vzdálenost prutů pro omezení šířky trhlin, $w_r =$ podle zadaného stupně agresivity prostředí

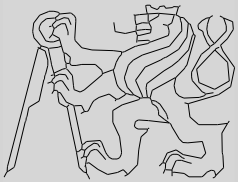
Napětí ve výztuži ² [MPa]	Maximální vzdálenost prutů [mm]		
	$w_k=0,4$ mm	$w_k=0,3$ mm	$w_k=0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Napětí ve výztuži ² [MPa]	Maximální průměr prutu [mm]		
	$w_k=0,4$ mm	$w_k=0,3$ mm	$w_k=0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

POZNÁMKA 1. Hodnoty v tabulce vycházejí z následujících předpokladů:
 $c = 25\text{mm}$; $f_{ct,eff} = 2,9\text{MPa}$; $h_{ct} = 0,5$; $(h-d) = 0,1h$; $k_1 = 0,8$;
 $k_2 = 0,5$; $k_3 = 0,4$; $k = 1,0$; $k_1 = 0,4$ and $k' = 1,0$

2. Při odpovídající kombinaci účinků zatížení

- Podle výsledků rozhodnu o opatřeních
- Prověřím využití výztuže MSP vs. MSU



?? Postup výpočtu ??

- Pár poznámek k postupu výpočtu:
 - Postup předepsaný ve cvičení se může odlišovat od postupu předepsaného v EN 1992-1-1
 - Odchytky jsou záměrně předepsány, aby zlepšili pochopení celé problematiky
 - Zpravidla se jedná o zhoršení vlivu, drobné úpravy, apod.
 - Tedy aby si student zafixoval, že MSP není radno podceňovat a posudek na ně je plnohodnotnou součástí statického výpočtu