

Prvky betonových konstrukcí

BL01 – 11 přednáška

■ Mezní stavy použitelnosti (MSP)

Použitelnost a trvanlivost

Obecně

Kombinace zatížení pro MSP

Stádia působení ŽB prvků

Mezní stav omezení napětí

Mezní stav trhlin

Mezní stav přetvoření

Použitelnost a trvanlivost

■ Všeobecně

Cíle posudku betonové konstrukce dle mezních stavů použitelnosti

- zabránění nadměrných přetvoření a deformací konstrukce nebo jejich částí (mezní stav přetvoření),
- zabránění vzniku nebo rozevření trhlin, které vedou ke snížení životnosti konstrukce z důvodů možného oslabení výztuže korozí (mezní stav vzniku trhlin, mezní stav šířky trhlin).

Obvyklé mezní stavy použitelnosti dle EC2

- a) mezní stav omezení napětí z hlediska podmínek použitelnosti,
- b) mezní stav trhlin,
- c) mezní stav přetvoření.

Použitelnost a trvanlivost

- Uvažované kombinace zatížení

- **charakteristická** (nevratné mezní stavy použitelnosti)

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

- **častá** (vrátne mezní stavy použitelnosti,)

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

- **kvazistálá** (kontrola mezních stavů použitelnosti týkajících se důsledků dlouhodobých účinků a vzhledu konstrukce)

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

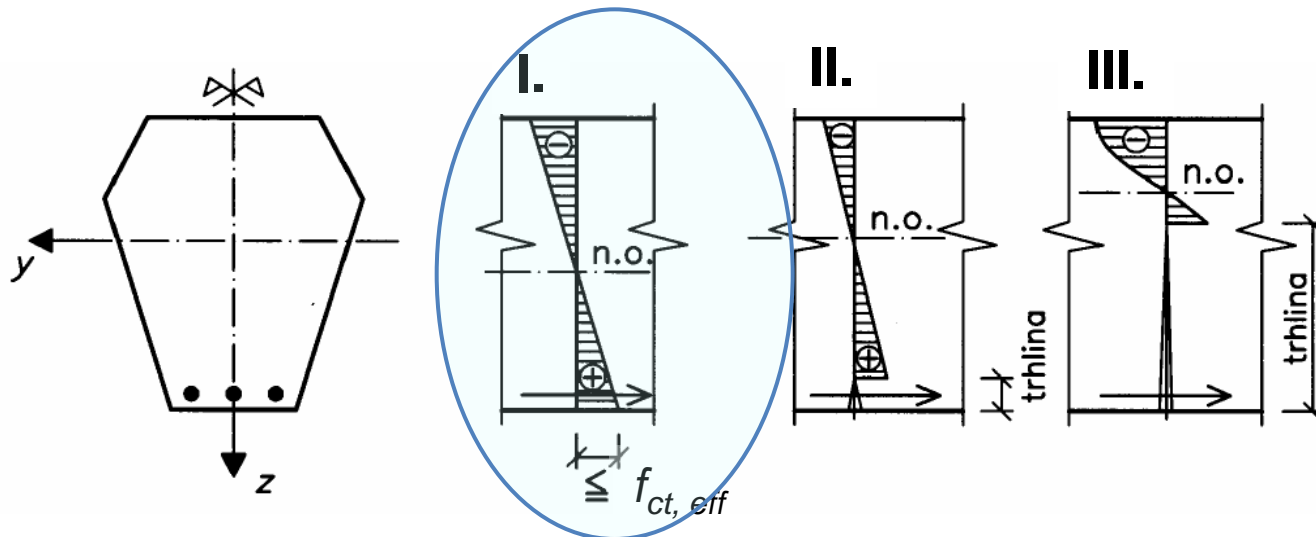
Pozn.: V mezních stavech použitelnosti uvažujeme zatížení bez součinitelů zatížení a dílčí součinitele vlastností materiálů γ_M považujeme rovny 1, pokud není uvedeno jinak v EN 1992 až EN 1999.

Použitelnost a trvanlivost

- Stádia působení železobetonových prvků

Stádium I

- počáteční fázi zatěžování - malá přetvoření a napětí v průřezu
- na přenášení zatížení se podílí celý průřez
- napětí v daném místě je přímo úměrné jeho vzdálenosti od neutrálné osy
- celý průřez působí pružně
- stadium I trvá až do okamžiku, kdy je v tažených vláknech dosaženo mezní hodnoty napětí pevnosti betonu v tahu → je dosažena mez vzniku trhlin.

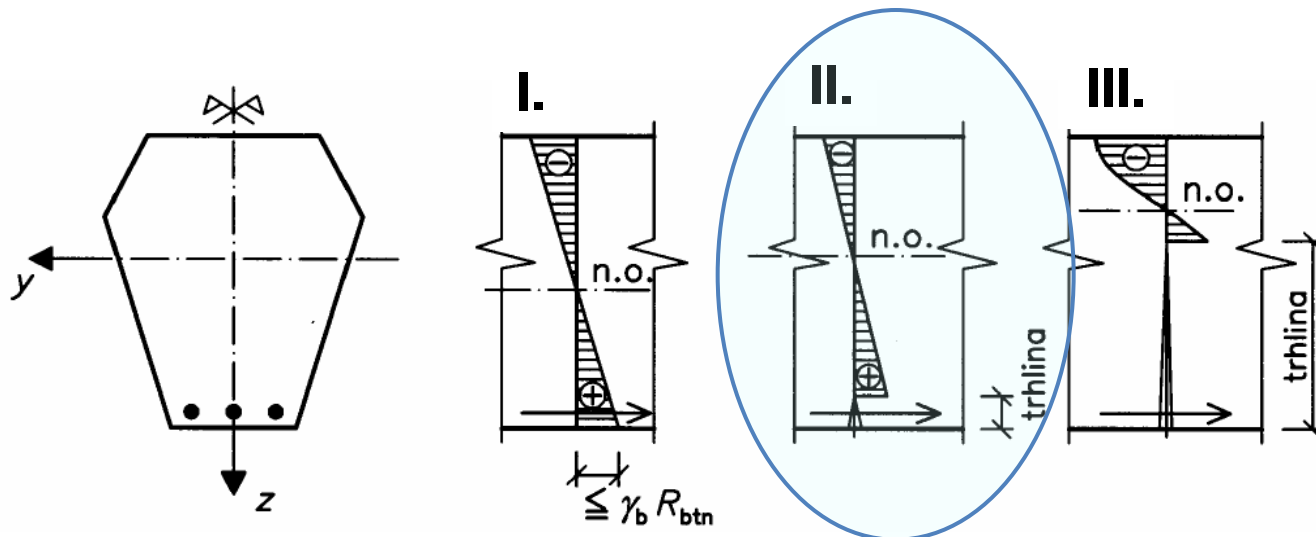


Použitelnost a trvanlivost

- Stádia působení železobetonových prvků

Stádium II

- počíná na mezi vzniku trhlin
- při rostoucím zatížení se trhlina v průřezu rozšiřuje a prohlubuje směrem k neutrálné ose
- stadium končí, když je trhlinou prostoupěna celá tažená část průřezu
- při prohlubování a rozevírání trhliny od rostoucího zatížení se neutrální osa posouvá blíže k tlačnému okraji průřezu

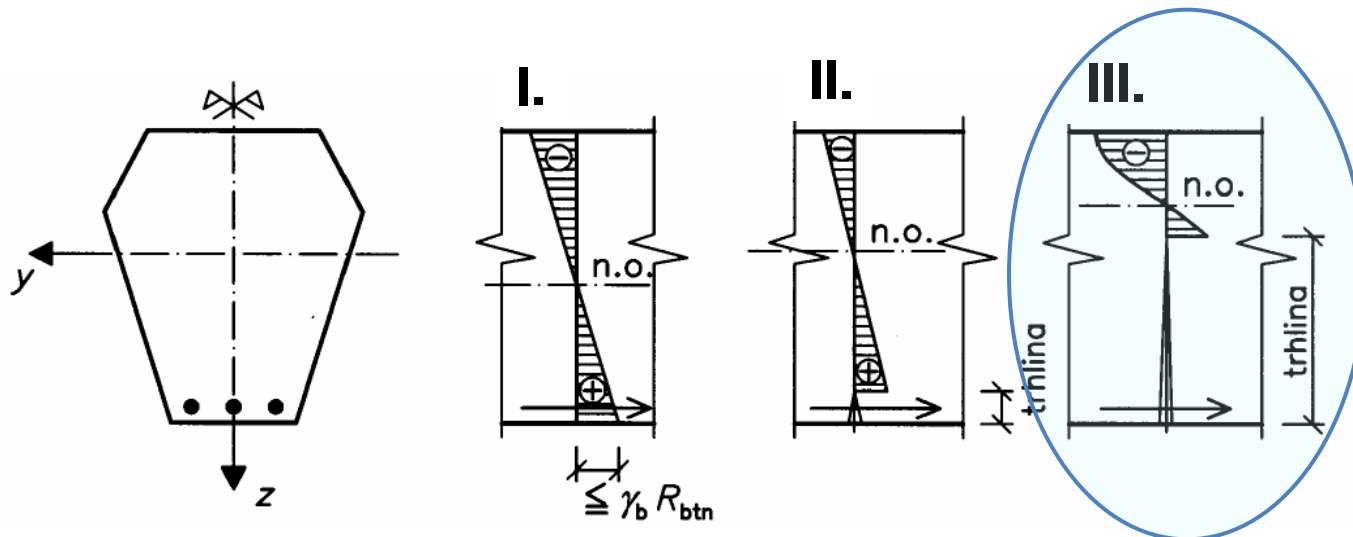


Použitelnost a trvanlivost

- Stádia působení železobetonových prvků

Stádium III

- při dalším zvětšování zatížení již dochází k postupnému zplastizování betonu v tlačené oblasti, trhlina v tažené oblasti se již neprohlubuje (nepostupuje blíže k neutrálné ose)
- neutrálná osa se neposouvá.



Použitelnost a trvanlivost

• Stádia působení železobetonových prvků

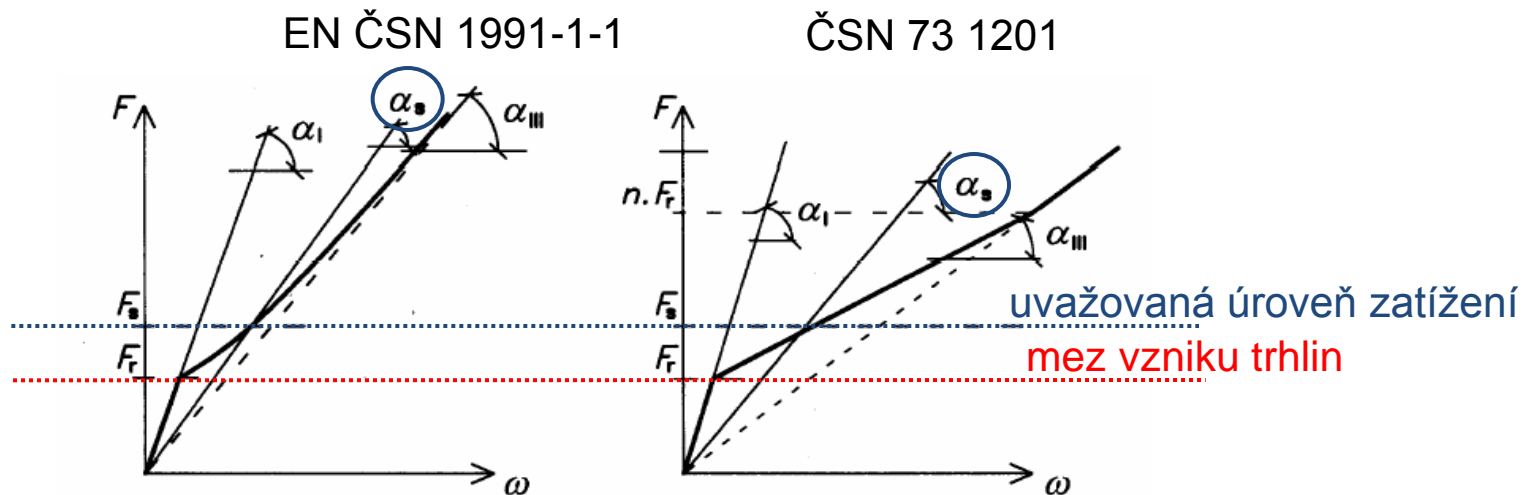
Tuhost průřezu je určena zejména :

- velikostí tlačené části průřezu → tlaková síla přenášená betonem,
- tahovou silou přenášenou výztuží,

Pozn.: Vliv taženého betonu na tuhost průřezu je zanedbatelný.

Zjednodušené předpoklady

- ve *stadiu I* působí celý průřez. Závislost mezi napětím a přetvořením je až do dosažení meze vzniku trhlin lineární,
- po překročení meze vzniku trhlin je tuhost průřezu závislá na hloubce trhliny (resp. na velikosti části betonového průřezu, která není porušena trhlinou).



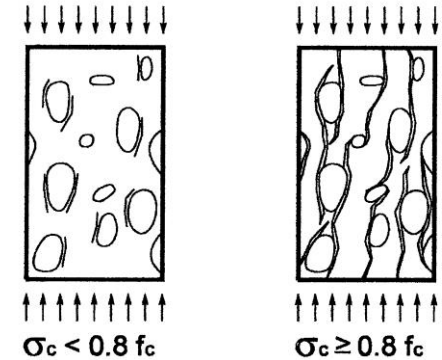
Mezní stav omezení napětí

- ***Omezení napětí se předepisuje pro***

a) **tlaková napětí v betonu**. Nadměrné hodnoty tlakových napětí v betonu mohou v provozním stavu na konstrukci vyvolat

- vznik podélných trhlin,
- rozvoj mikrotrhlin v betonu,
- vyšší hodnoty dotvarování.

Přitom tyto jevy mohou vést ke vzniku takových stavů, které znemožní používání konstrukce,



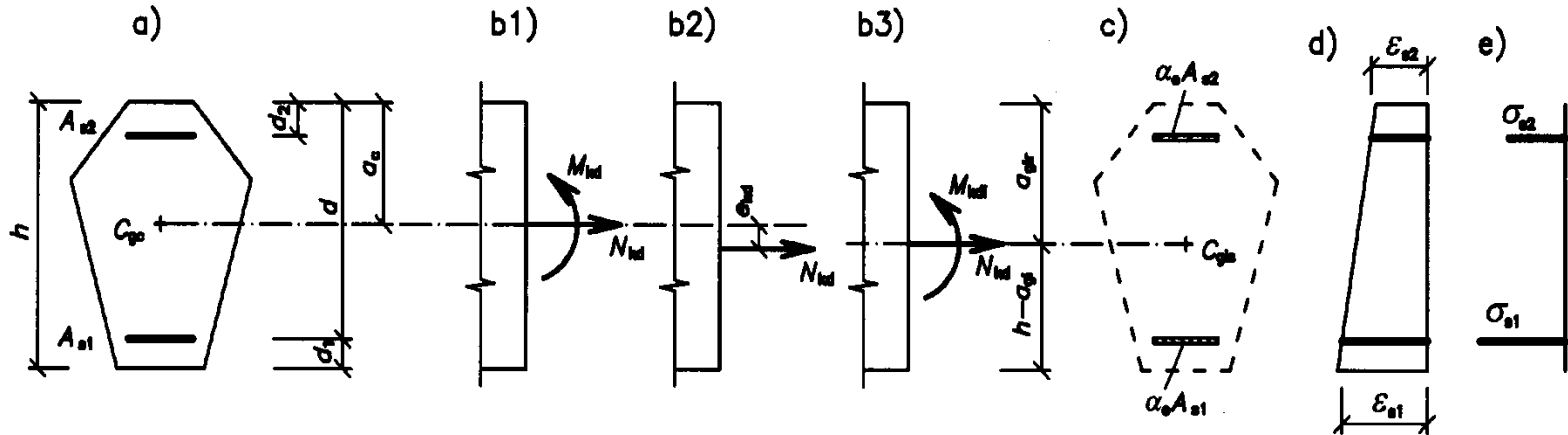
b) **tahová napětí ve výztuži**. Cílem *omezení napětí* ve výztuži je

- zamezení vzniku nadměrného nepružného přetvoření výztuže (a tím i celého prvku)
- zamezení vzniku širokých, trvale otevřených trhlin v betonu.

Mezní stav omezení napětí

Modely průřezů pro výpočet napjatosti

- a) průřez bez trhliny (plně působící průřez v tahu i v tlaku),
- b) průřez s trhlinou a tlačnou částí,
- c) zcela trhlinou porušený průřez (průřez bez tlačené části).



Mezní stav omezení napětí

Průřez bez trhliny

Napětí v průřezu - horní vlákna

- dolní vlákna

$$\sigma_{c2} = \frac{N_{kd}}{A_i} - \frac{M_{kdi} \cdot a_{gi}}{I_i},$$

$$\sigma_{c1} = \frac{N_{kd}}{A_i} + \frac{M_{kdi} \cdot (h - a_{gi})}{I_i}.$$

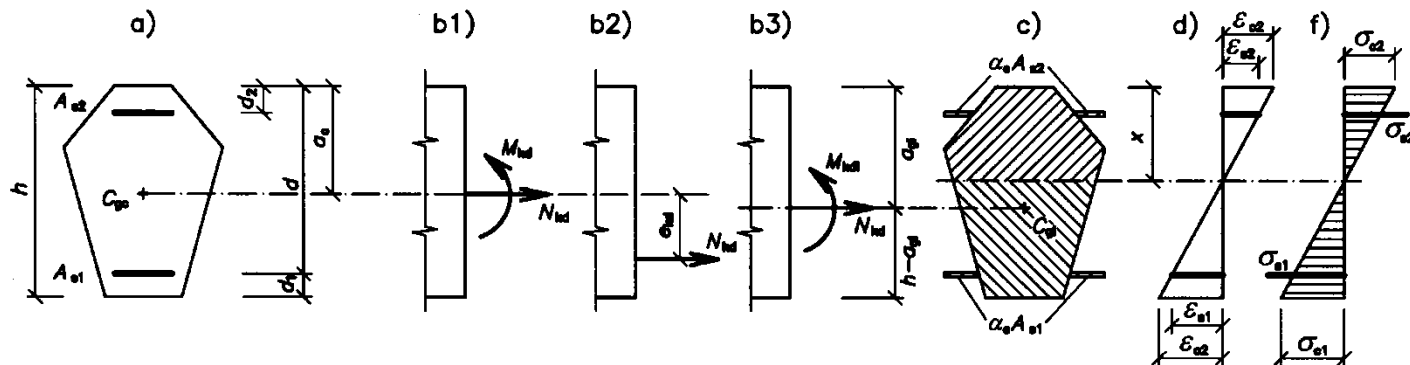
Podmínka napětí

$$\sigma_{c1} \leq f_{ct,eff} \text{ a } \sigma_{c2} \leq f_{ct,eff}$$

→ pak trhliny kolmé ke střednici prvku vyvozené

účinkem N_{kd} , M_{kdi} nevzniknou a výpočet napětí lze provést s charakteristikami

ideálního průřezu, tj. za předpokladu plně působícího průřezu v tahu i v tlaku



Mezní stav omezení napětí

Průřez s trhlinou a tlačnou částí

Pokud je napětí v průřezu

$$\sigma_{c1} > f_{ct,eff}$$

a

$$\sigma_{c2} < 0$$

resp.

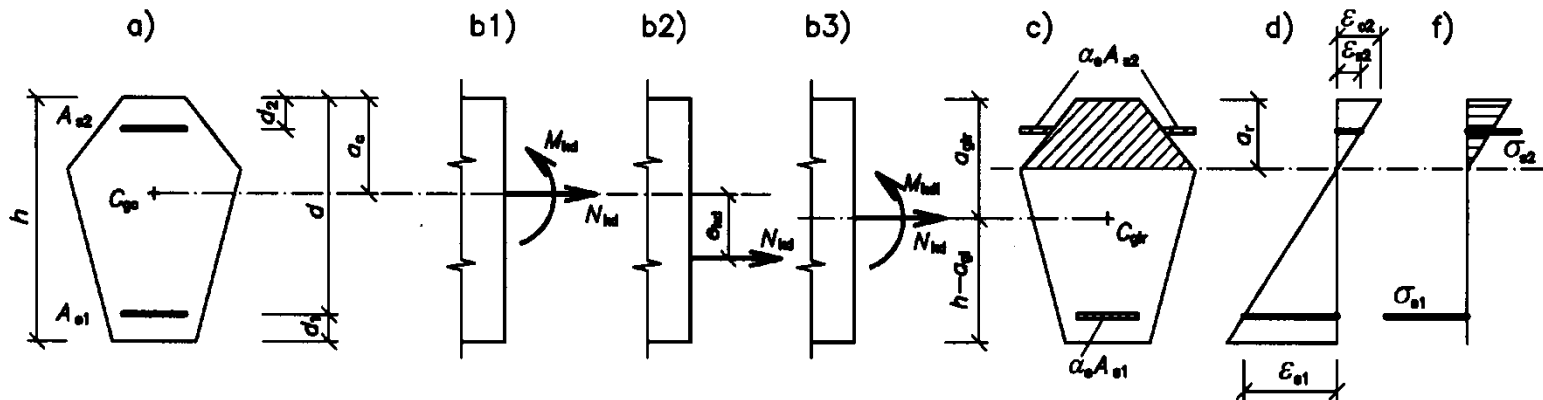
$$\sigma_{c2} > f_{ct,eff}$$

a

$$\sigma_{c1} < 0$$

- vzniknou trhliny

- existuje i tlačená část

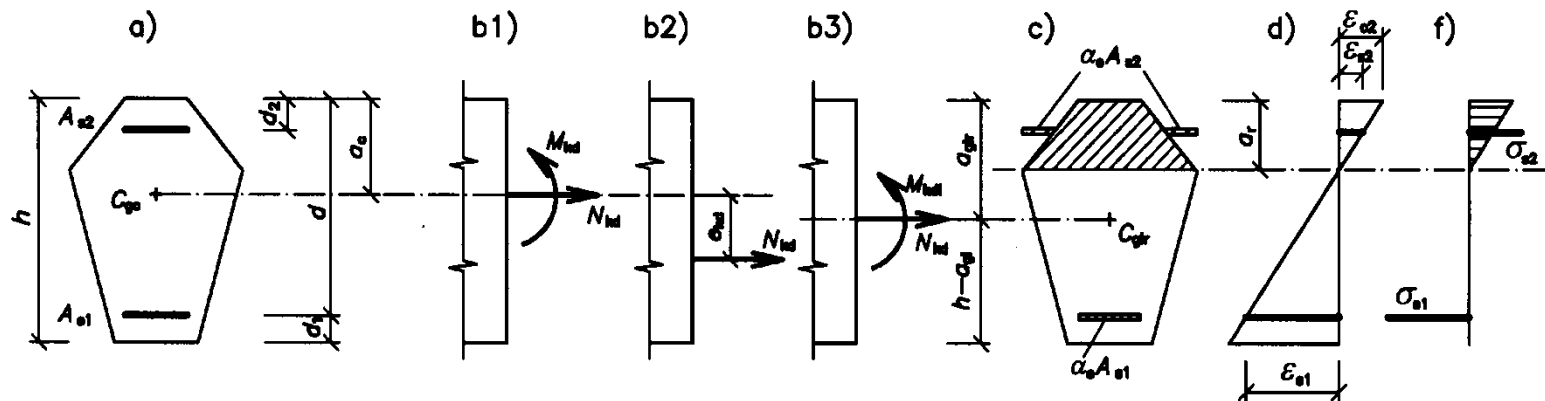


Mezní stav omezení napětí

Průřez s trhlinou a tlačnou částí

- pro výpočet napětí se určí charakteristiky průřezu za předpokladu, že

- a) v tažené části průřezu beton v tahu nepůsobí, tj. je prostoupen trhlinou,
- b) poměrné přetvoření průřezu po výšce je lineární,
- c) napětí v tlačené části betonového průřezu a ve výztuži (tažené i tlačené) je přímo úměrné přetvoření průřezu v daném místě; konstantou úměrnosti je modul pružnosti daného materiálu.



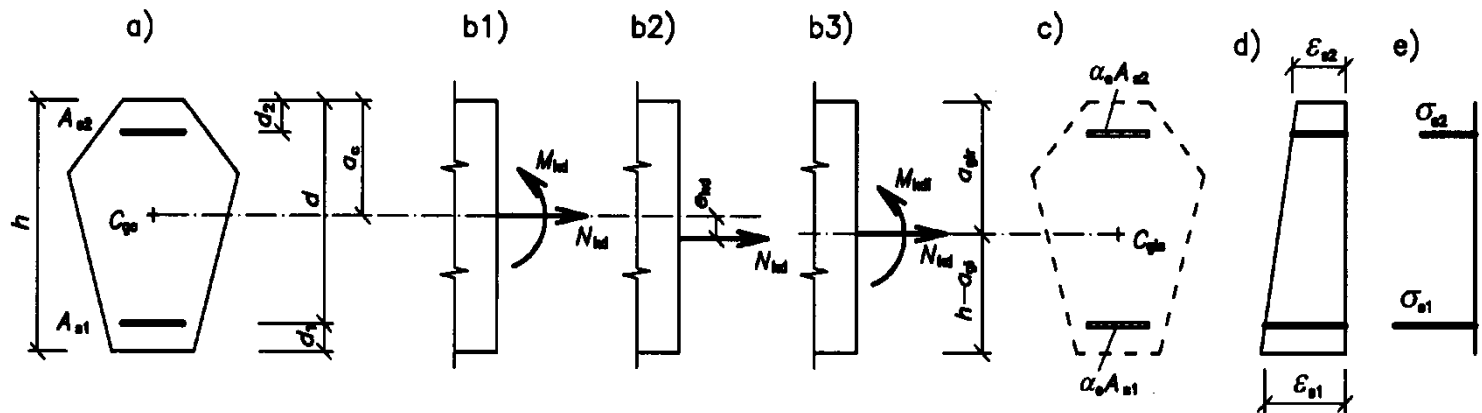
Mezní stav omezení napětí

Trhlinou zcela porušený průřez

Pokud na obou okrajích taženého průřezu platí

$$\sigma_{c1} > f_{ct,eff} \quad a \quad \sigma_{c2} > f_{ct,eff}$$

- průřez je po celé výšce prostoupen trhlinou
- namáhání mimostředním tahem s malou výstředností



Mezní stav omezení napětí

■ Omezení tlakových napětí v betonu

- pro konstrukce nacházející se v třídách prostředí XD, XF a XS, a charakteristickou kombinaci zatížení

$$|\sigma_c| \leq k_1 f_{ck} \quad k_1 \dots \text{doporučená hodnota je 0,6}$$

- lineární dotvarování betonu lze uvažovat, pokud pro kvazistálou kombinaci zatížení

$$|\sigma_c| \leq k_2 f_{ck} \quad k_2 \dots \text{doporučená hodnota je 0,45}$$

■ Omezení napětí ve výztuži

- pro charakteristickou kombinaci zatížení

$$\sigma_s \leq k_3 f_{yk} \quad k_3 \dots \text{doporučená hodnota je 0,8}$$

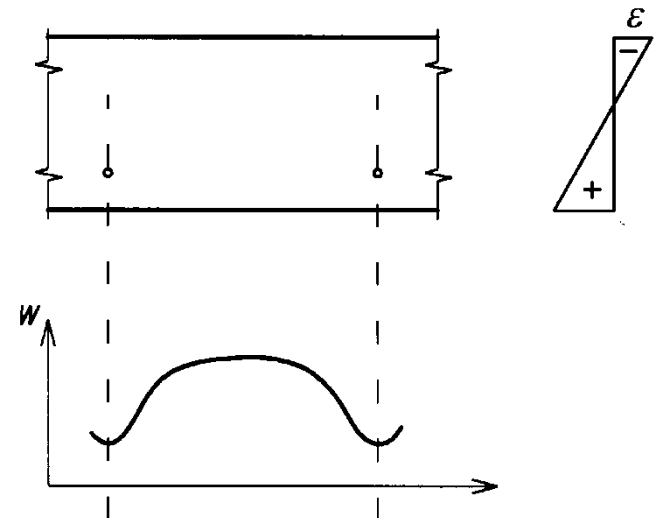
- je-li napětí ve výztuži vyvozeno vynuceným přetvořením

$$\sigma_s \leq k_4 f_{yk} \quad k_4 \dots \text{doporučená hodnota je 1,0}$$

Mezní stav trhlin

■ Trhliny

- mají limitující vliv na trvanlivost a životnost konstrukce
- šířka trhlin závisí na
 - pevnosti betonu v tahu,
 - na soudržnosti výztuže a betonu,
 - na krytí (tj. na tloušťce krycí vrstvy),
 - na uspořádání výztuže
 - na rozměrech prvku a na jeho namáhání.
- šířka trhliny w na povrchu betonu se mění v závislosti na vzdálenosti místa s trhlinou od výztužných prutů



Mezní stav trhlin

Filosofie EN 1992-1-1

- není možné přesně stanovit šířku trhliny pomocí jednoduchých vztahů,
- znalost přesné šířky trhliny není pro trvanlivost betonové konstrukce významná

Cíl návrhu z hlediska mezního stavu šířky trhlin

- zajistit, že trhliny nezhorší použitelnost a trvanlivost konstrukce

Posouzení z hlediska mezního stavu šířky trhlin

- přímým výpočtem šířky trhlin a kontrolou podmínky spolehlivosti,
- dodržením jistých doporučení (konstrukčních zásad). Přitom se šířka trhlin nepočítá.

Mezní stav trhlin

Doporučené hodnoty w_{\max} (mm)

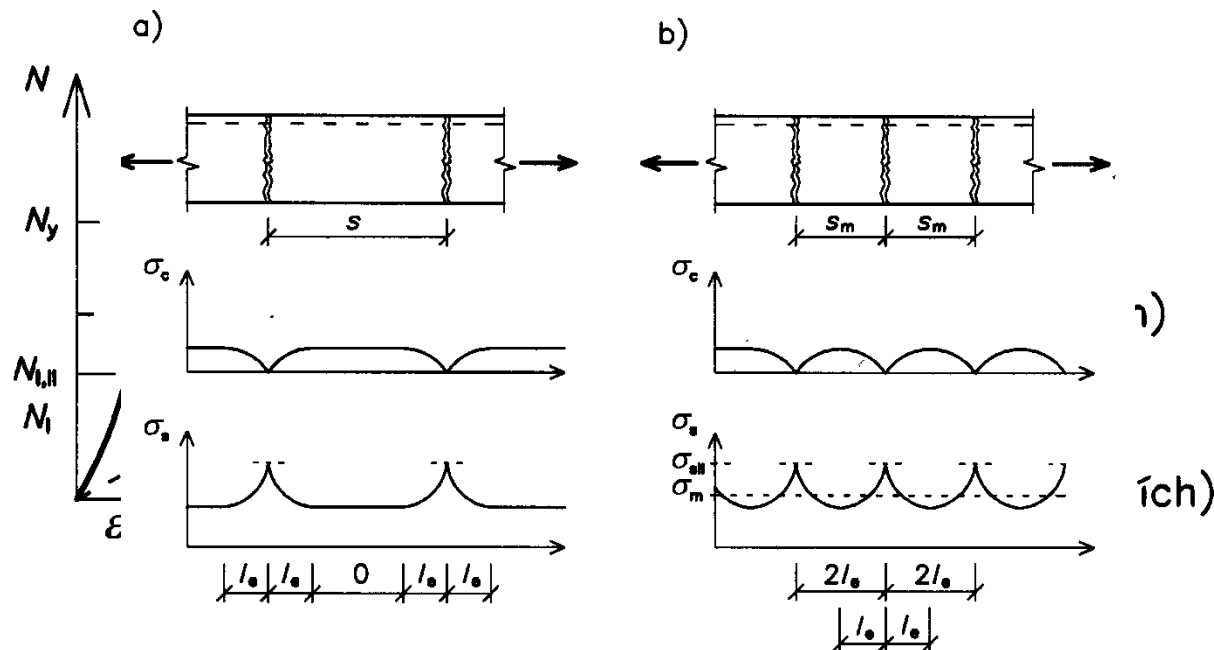
Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹⁾	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²⁾
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Dekomprese
<p>1) Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka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

Mezní stav trhlin

Vznik a šířka trhliny

Centricky tažený prut při vzrůstající tahové síle

- trhliny nevzniknou až do dosažení pevnosti betonu v tahu - *Stádium I*
- po dosažení tahové síly $N_I = A_i f_{ctm}$ vzniknou primární trhliny
- rozvoje trhlin je ukončena v bodě $(N_{I,II}; \varepsilon_{I,II})$
- zvyšuje se napjatost a přetvoření výztuže až do meze kluzu výztuže (N_y, ε_y)



Mezní stav trhlin

Charakteristická šířka trhliny w_k

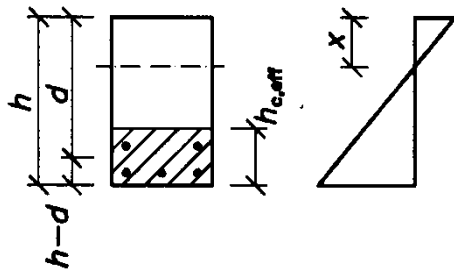
$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}),$$

kde EN 1992-1-1 umožňuje použít

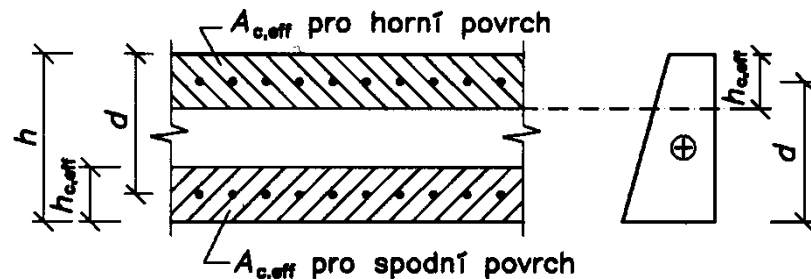
$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{1}{E_s} \left[\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) \right];$$

pro $\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1^2 A_p) / A_{c,eff}$ a $h_{c,eff} = \min\{2,5(h-d), (h-x)/3, h/2\}$,

a)



b)



a) nosník (nosníková deska, deska) b) tažený prvek

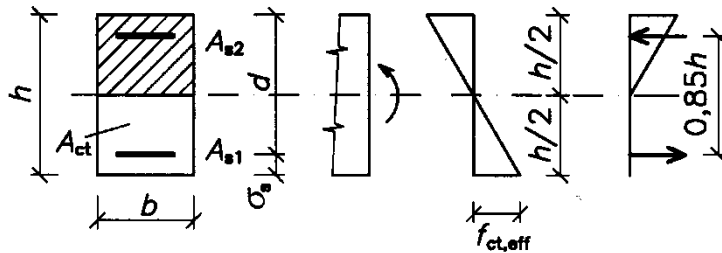
Mezní stav trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu

a) určení nejmenší průřezové plochy betonářské výztuže

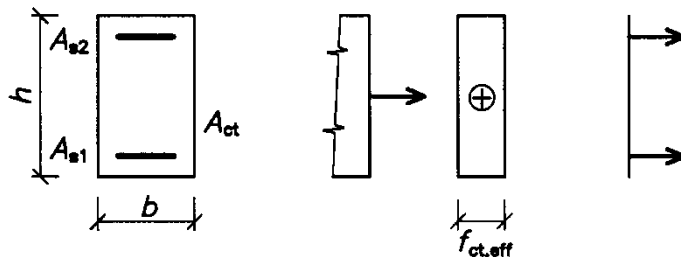
$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s$$

a)



a) namáhání ohybovým momentem,

b)



b) namáhání dostředným tahem

Mezní stav trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu

b) kontrola průměru výztuže

- dle EN 1992-1-1 je možno ϕ_s^* v Tab. 9.3 upravit		Maximální průměr prutu ϕ_s^* [mm]		
σ_s [MPa]		$w_k = 0,4$ mm	$w_k = 0,3$ mm	$w_k = 0,2$ mm
$\phi = \phi_s = \sigma$	$\frac{f_{ct,eff}}{2,9} \frac{k_e h_{er}}{(n-d)} \phi_s^*$ pro namáhání ohybem,	40	32	25
	200	32	25	16
	240	20	16	12
	$\frac{f_{ct,eff}}{2,9} \frac{k_e h_{cr}}{(n-d)} \phi_s^*$ namáhání tahem s malou excentricitou	16	12	8
	240	12	10	6
	360	10	8	5
	400	8	6	4
	450	6	5	-

Mezní stav trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu

c) kontrola vzdálenosti prutů výztuže

- EC2 metrická tabulka maximálních vzdáleností prutů – Tab. 9.4.

$$\rho_h = \pi \phi^2 / (4sh)$$

Napětí ve výztuži σ_s [MPa]	Minimální vzdálenost výztuže s [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 přetvoření

Kritéria použitelnosti

a) kritérium obecné použitelnosti

- průhyb při **kvazistálém zatížení** nemá překročit **1/250** vzdálenosti podpor. Pro omezení průhybu může být použito nadvýšení; velikost nadvýšení bednění by neměla překročit 1/250 rozpětí.

b) kritérium průhybu po zabudování prvku.

- průhyb **po zabudování** (provedení) prvku by neměl přestoupit hodnotu **1/500** rozpětí při **kvazistálé kombinaci zatížení**.

Mezní stav přetvoření

Ověření ohybové štíhlosti

$\frac{l}{d} \leq \lambda_d \rightarrow$ jsou splněna kritéria obecné použitelnosti a průhybu
 \rightarrow od výpočtu přetvoření lze upustit

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

Součinitelé : Tvar průřezu
Rozpětí
Napětí tahové výztuže při časté kombinaci

Vymezující ohybové štíhlosti $\lambda_{d,tab}$ a součinitele K

Nosná konstrukce	K	$\rho = 1,5\%$	$\rho = 0,5\%$
Prostě podepřený nosník, prostě podepřená deska (nosná v jednom a ve dvou směrech)	1,0	14	20
Krajní pole spojitého nosníku nebo desky nosné v jednom směru, krajní pole desky nosné ve dvou směrech, spojitě ve směru kratšího rozpětí	1,3	18	26
Vnitřní pole spojitého nosníku nebo desky nosné v jednom nebo ve dvou směrech	1,5	20	30
Deska lokálně podepřená	1,2	17	24
Konzola	0,4	6	8

$$\rho = \frac{A_{s,req}}{b \cdot d}$$

Mezní stav přetvoření

Závislost mezi napětím a přetvořením u betonových prvků

- průměrné poměrné tahové přetvoření $\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \Delta\varepsilon_s$

kde $\Delta\varepsilon_s = \Delta\varepsilon_{s,\max} \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}}$, (\leftarrow ověřeno experimenty)

- pak dle obrázku

$$\Delta\varepsilon_{s,\max} = \varepsilon_{s2r} - \varepsilon_{s1r} ;$$

$$\varepsilon_{s2r} / \varepsilon_{s2} = \sigma_{sr} / \sigma_{s2} ,$$

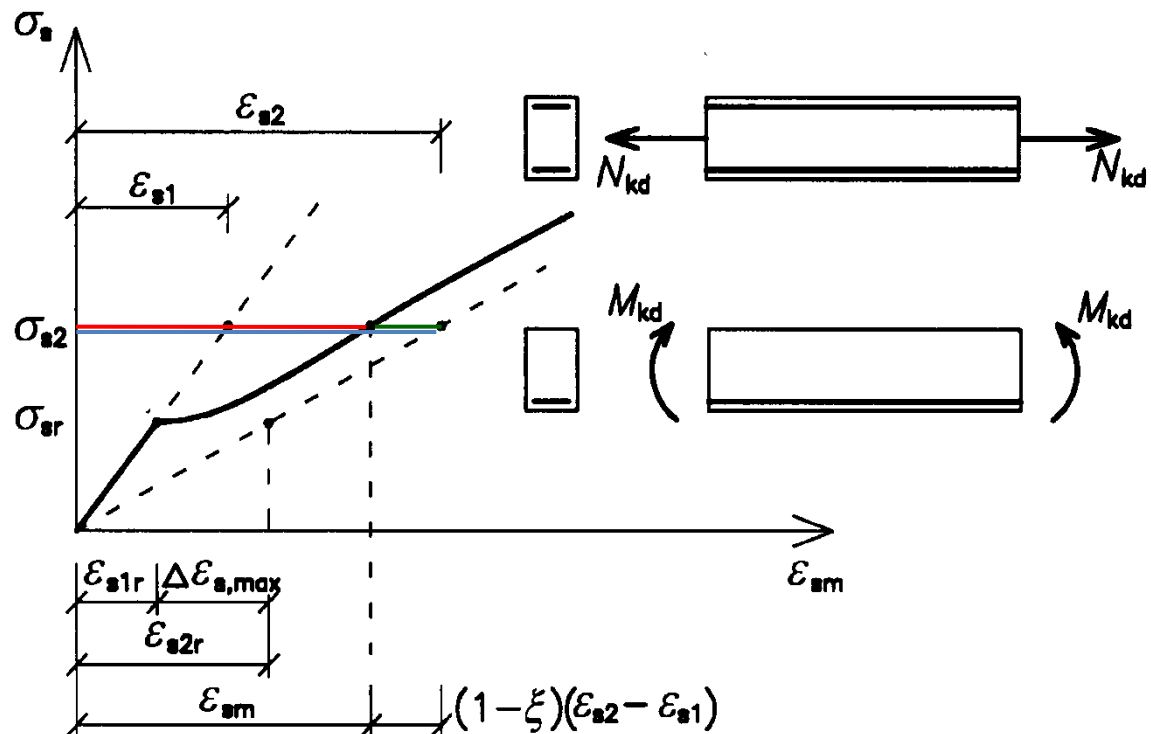
$$\varepsilon_{s1r} / \varepsilon_{s1} = \sigma_{sr} / \sigma_{s2} ,$$

- po úpravě a dosazení

$$\varepsilon_{sm} = \xi \cdot \varepsilon_{s2} + (1 - \xi) \varepsilon_{s1} ,$$

kde

$$\xi = 1 - (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2 .$$



Mezní stav přetvoření

Model dle EN 1992-1-1

$$\alpha = \xi \alpha_{II} + (1 - \xi) \alpha_I$$

- α - hledaná deformační veličina (např. poměrné přetvoření, pootočení nebo křivost),
- α_I - hodnota deformační veličiny stanovená za předpokladu plně působícího trhlinami neporušeného průřezu
- α_{II} - hodnota deformační veličiny stanovená za předpokladu trhlinami plně porušené konstrukce,
- ξ - je součinitel vystihující tahové zpevnění

$$\xi = 1 - \beta (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2$$

β ...součinitel doby trvání zatížení

$$\frac{1}{r_{cs}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I}$$