

BL 04 - Vodohospodářské betonové konstrukce – MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.

Ústav betonových a zděných konstrukcí

VUT FAST Brno

OSNOVA

1. Co je to mezní stav použitelnosti (MSP)?
2. Stádia působení betonových prvků.
3. Mezní stav omezení napětí.
4. Mezní stav trhlin.
5. Mezní stav přetvoření.

Zpracováno dle:

Dle EN 1992-1-1, EN 1992-3 a ČSN 73 1208.

CO TO JE MSP?

Anglicky: Serviceability limit states (SLS)

Mezní stavy, které se týkají:

- funkce konstrukce nebo nosných prvků za běžného užívání
- pohody osob
- vzhledu stavby

se musí klasifikovat jako mezní stavy použitelnosti. [1]

Rozlišují se: nevratné, vratné.

Ověřování má vycházet z kritérií týkajících se: nadměrných **deformací** (vzhled, pohoda, provozuschopnost); **kmitání** (způsobuje nepohodu, ovlivňuje funkčnost); **poškození** (vzhled, trvnalivost, provozuschopnost)

POZNÁMKA: [1] Podrobněji viz ČSN EN 1990 (kap. 3.4)

CO TO JE MSP?

V ČSN-EN-1992-1-1 [2] pojednává o mezních stavech:

- omezení napětí
- omezení trhlin
- omezení průhybů

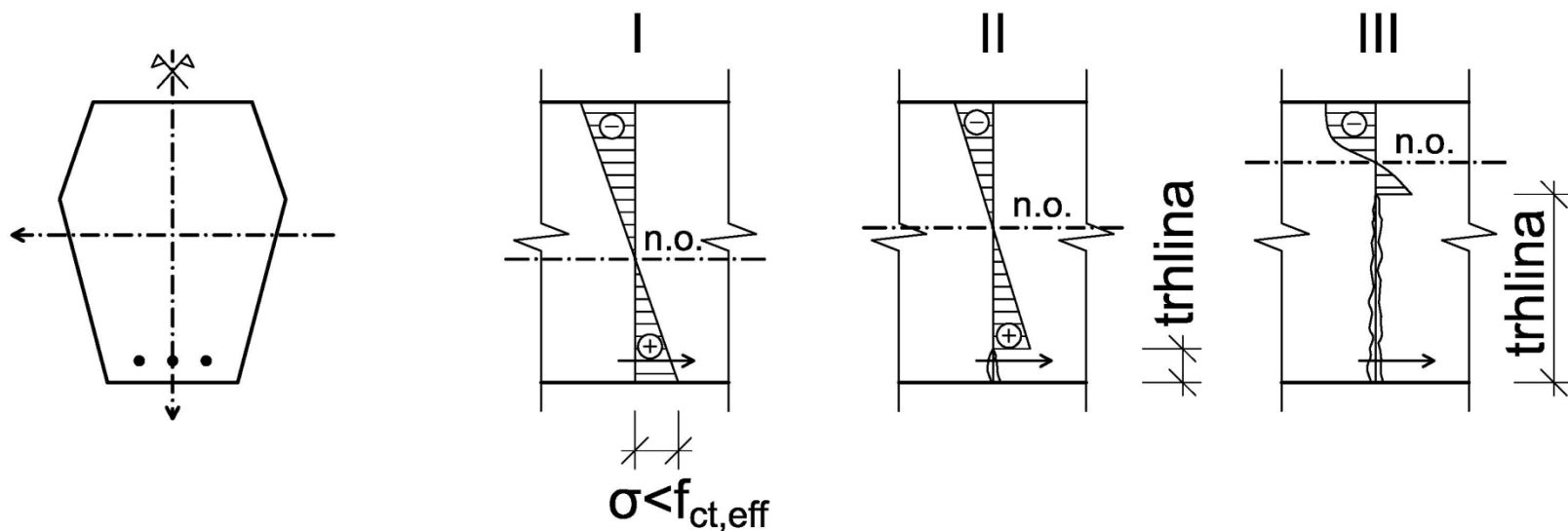
Další mezní stavy (jako jsou vibrace) mohou být důležité u zvláštních konstrukcí, ale nejsou obsaženy v ČSN - EN – 1992-1-1.

Při výpočtu napětí a průhybů mají být uvažovány průřezy **neporušené trhlinami**, pokud napětí v tahu za ohybu nepřekročí $f_{ct,eff}$. Při výpočtu šířek trhlin a tahového zpevnění se použije hodnota f_{ctm} , [3].

POZNÁMKA: [2], [3] Podrobněji viz ČSN EN 1992-1-1 (kap. 7.1)

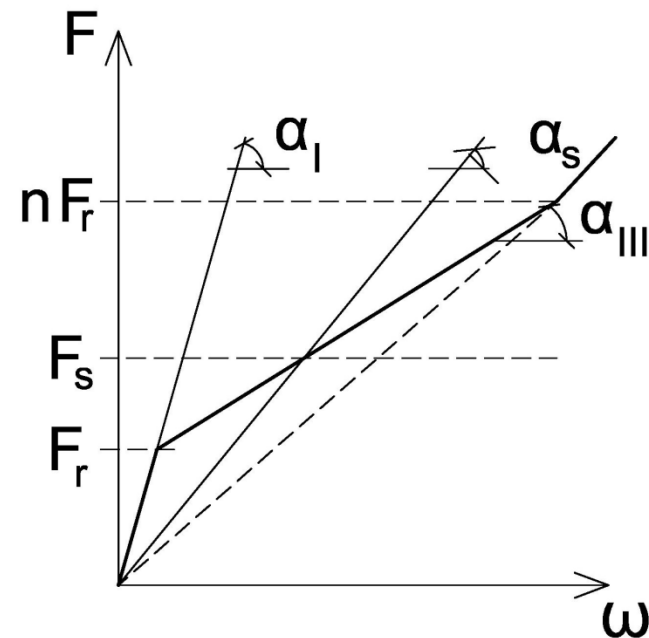
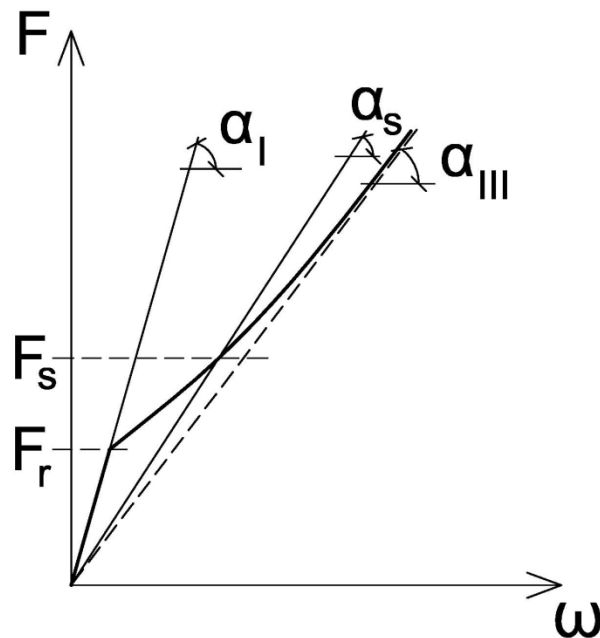
STÁDIA PŮSOBENÍ BETONOVÝCH PRVKŮ

1. Stadium I – průřez působí pružně
2. Stadium II – v tažené oblasti je průřez porušený trhlinou
3. Stadium III – průřez v tažené oblasti je zcela porušen trhlinou



STÁDIA PŮSOBENÍ BETONOVÝCH PRVKŮ

Tuhost průřezu v závislosti na mezi zatížením F a přetvoření ω ,
 F_r účinek na mezi vzniku trhlin



Mezní stav omezení napětí

1. Tlaková napětí v betonu

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

$$|\sigma_c| \leq k_1 \cdot f_{ck}$$

kde: f_{ck} je charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku,
 σ_c je napětí v betonu při charakteristické kombinaci,
 k_1 je součinitel, jehož hodnota podle doporučení v EC je $k_1=0,6$.

Lineární dotvarování lze uvažovat pokud napětí v betonu splňuje podmínku:

$$|\sigma_c| \leq k_2 \cdot f_{ck},$$

kde: σ_c je napětí v betonu při kvazi-stálou kombinaci,
 k_1 je součinitel, jehož hodnota podle doporučení v EC je $k_2=0,45$.

Mezní stav omezení napětí

2. Tahová napětí ve výztuži. Cílem je omezení nadměrného nepružného přetvoření oceli a zamezení vzniku trvale otevřených trhlin.

Pro charakteristickou kombinaci zatížení se kontrolují podmínky:

$$\sigma_s \leq k_3 \cdot f_{yk}$$

Je-li napětí vyvozeno vynuceným přetvořením, je možno použít podmínku:

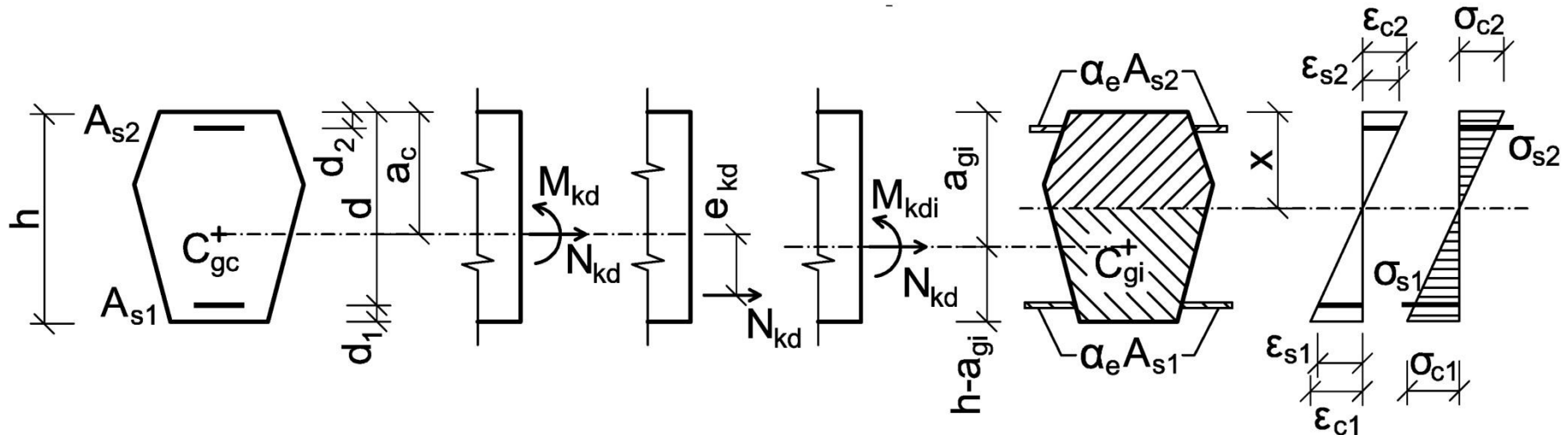
$$\sigma_s \leq k_4 \cdot f_{yk}$$

kde σ_s je napětí v oceli při charakteristické kombinaci,
 $k_{3,4}$ je součinitel, jehož hodnota podle doporučení v EC je $k_3=0,8$ a $k_4=1$,
 f_{yk} je charakteristická hodnota meze kluzu oceli.

Mezní stav omezení napětí

Modely průřezu pro výpočet napjatosti

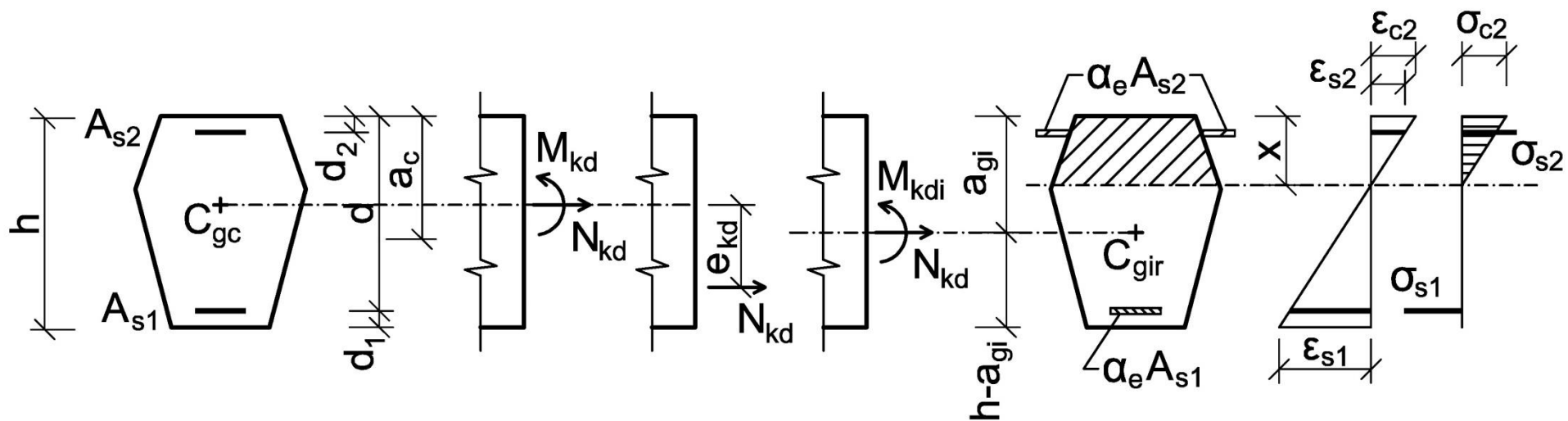
a) Průřez bez trhlin



Mezní stav omezení napětí

Modely průřezu pro výpočet napjatosti

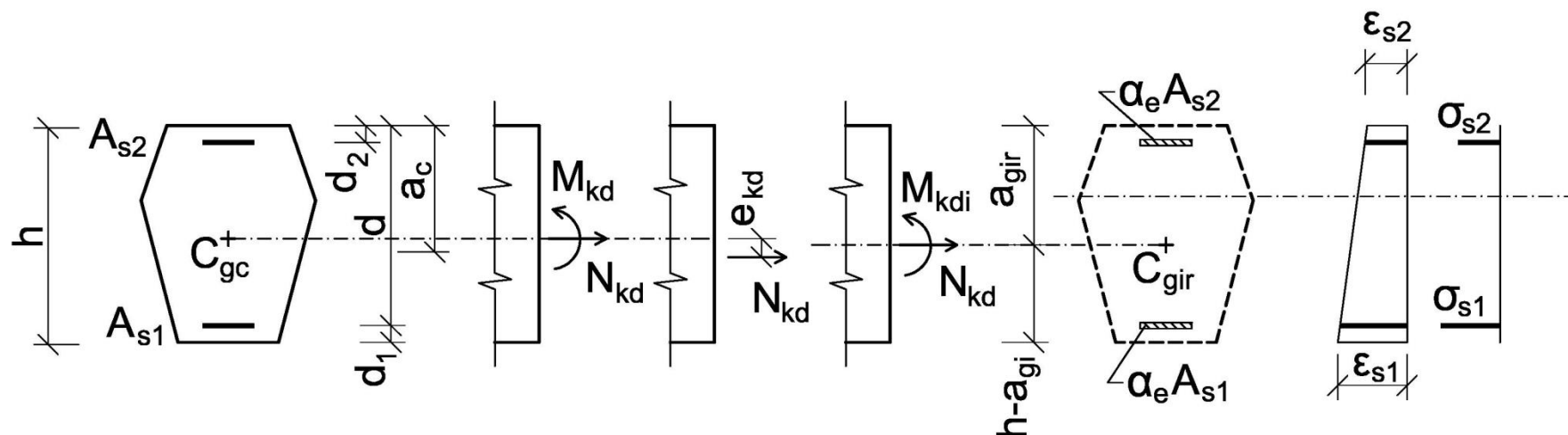
b) Průřez s trhlinou a tlačnou oblastí



Mezní stav omezení napětí

Modely průřezu pro výpočet napjatosti

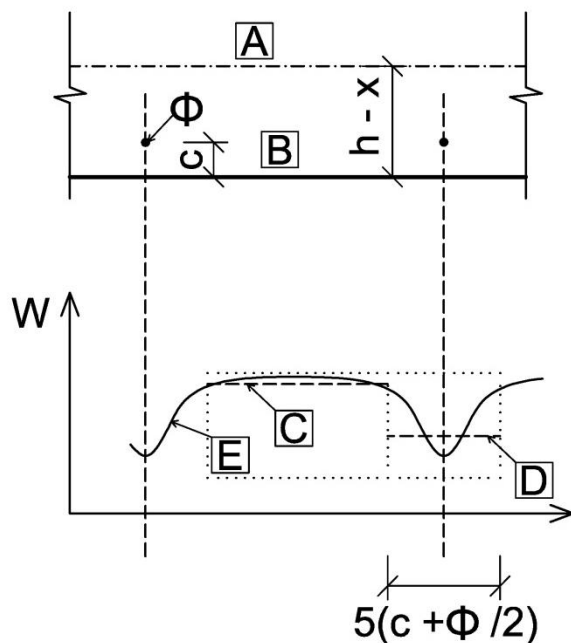
c) Zcela trhlinou porušený průřez



Mezní stav trhlin - omezení trhlin

V případě dlouhodobě rozevřených trhlin – limitující vliv na trvanlivost konstrukce

Trhliny jsou obvyklé u železobetonových konstrukcí namáhaných ohybem, smykem, kroucením, nebo tahem vyvozeným buď z přímého zatížení, nebo z omezení vynucených nebo vnesených přetvoření.



A neutrální osa

B povrch taženého betonu

C předpokládaná vzdálenost trhlin daná vztahem (7.14)

D předpokládaná vzdálenost trhlin daná vztahem (7.11)

E skutečná šířka trhliny

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Doporučená šířka trhlin, viz EC tab. 7.1

Doporučené hodnoty $w_{\max}$ [mm]

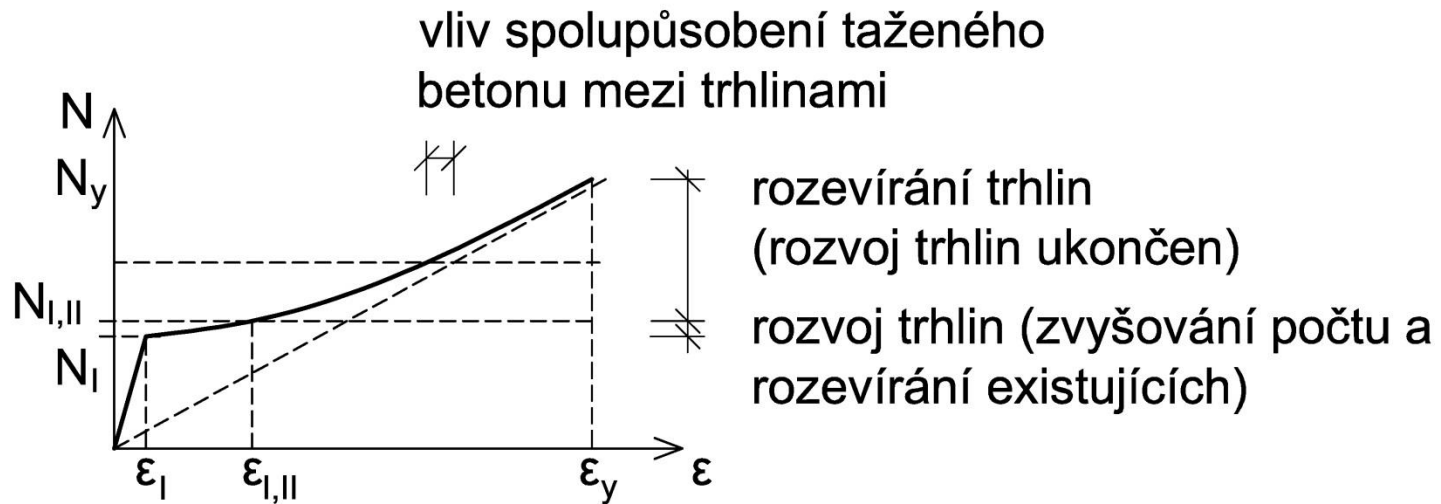
Stupeň vlivu prostředí	ŽB prvky a prvky předpjaté s nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté s soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹⁾	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²⁾
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Dekomprese

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

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

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

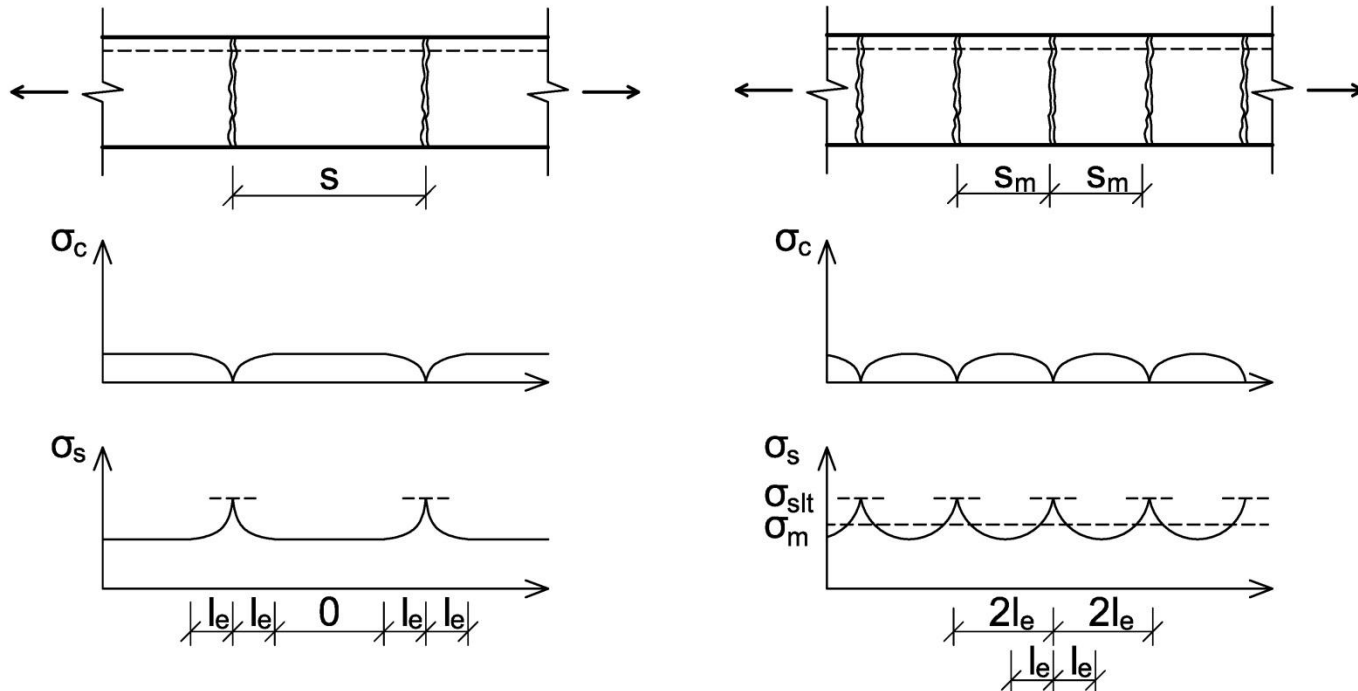
Vznik a šířka trhlin



Poměrné přetvoření výztuže u centricky taženého prutu

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Centricky tažený ŽB prvek



a) Stav po vzniku primárních trhlin

b) Stadium ukončeného rozvoje trhlin

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Charakteristická šířka trhlin (čl. 7.3.4) $w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$

kde:

$s_{r,max}$ maximální vzdálenost trhlin,

ε_{sm} průměrná hodnota poměrného přetvoření výztuže,

ε_{cm} průměrná hodnota poměrného přetvoření betonu mezi trhlinami.

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

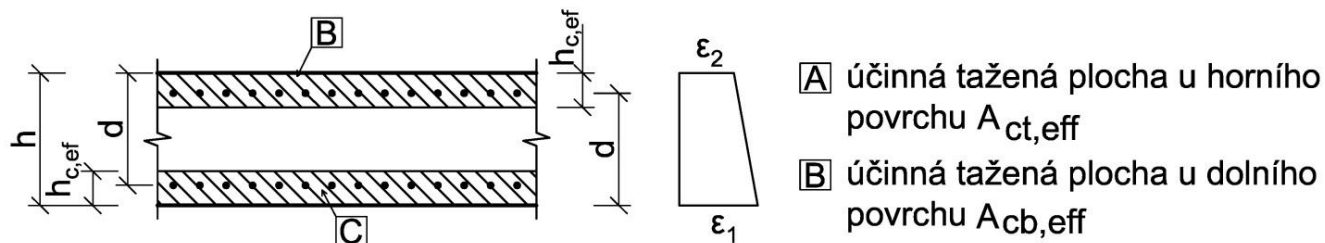
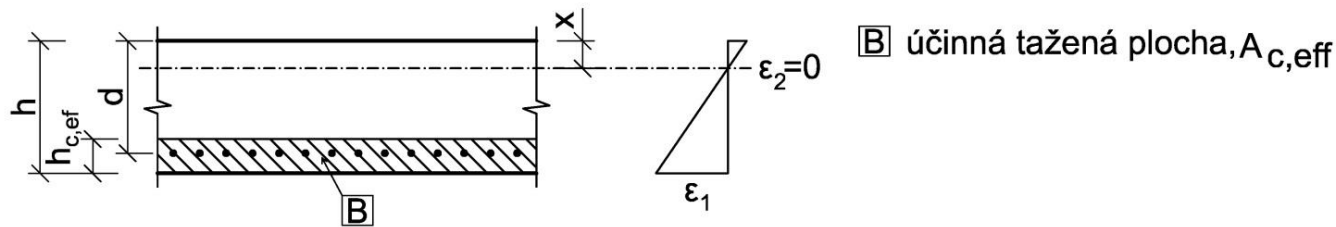
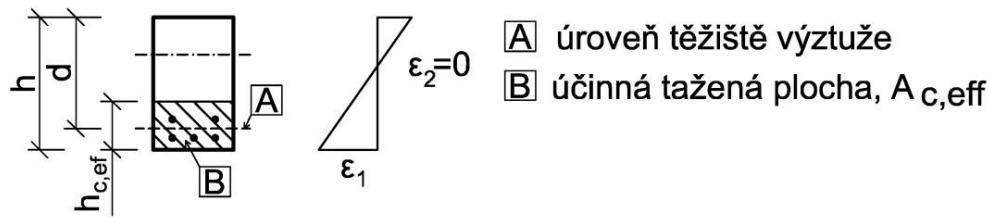
$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

kde:

- σ_s je napětí v tahové výztuži stanovené v průřezu porušeném trhlinou,
- α_e poměr E_s/E_{cm} ,
- $\rho_{p,eff}$ $(A_s + \xi_1^2 A_p')/A_{c,eff}$,
- A_p' je plocha předem nebo dodatečně napínané výztuže ležící v ploše $A_{c,eff}$,
- $A_{c,eff}$ účinná plocha taženého betonu obklopující betonářskou nebo předpínací výztuž o výšce $h_{c,ef}$, kde $h_{c,ef}$ je menší z hodnot $2,5(h - d)$, popř. $(h - x)/3$ nebo $h/2$,
- ξ_1 upravený poměr pevnosti v soudržnosti: $\xi_1 = \sqrt{\xi \cdot \frac{\phi_s}{\phi_p}}$,
- k_t součinitel závisící na době trvání zatížení:
 $k_t = 0,6$ pro krátkodobé zatížení,
 $k_t = 0,4$ pro dlouhodobé zatížení.

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Efektivní tažená plocha betonu $A_{c,eff}$



Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Maximální vzdálenost $S_{r,max}$

Pokud, kde soudržná výztuž je umístěna v dostatečné blízkosti středu tažené oblasti. Tedy vzdálenost $\leq 5(c+\phi/2)$

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

kde	ϕ	je průměr prutu
	c	krycí vrstva podélné výztuže
	k_1	součinitel, kterým se zohledňují vlastnosti soudržné výztuže: = 0,8 pro pruty s velkou soudržností = 1,6 pro pruty s hladkým povrchem (např. předpínací vložky)
	k_2	součinitel, kterým se zohledňuje rozdělení poměrného přetvoření: = 0,5 pro ohyb; = 1,0 pro prostý tah.

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Maximální vzdálenost $s_{r,max}$

Pokud, vzdálenost soudržné výztuže překročí $5(c+\phi/2)$ nebo pokud soudržná výztuž není v tažené oblasti, lze horní mez šířky trhlin stanovit za předpokladu maximální vzdálenosti trhlin:

$$s_{r,max} = 1,3 (h - x)$$

U prvků vyztužených ve dvou vzájemně kolmých směrech, kde je úhel mezi směrem hlavního napětí a směrem výztuže podstatný ($>15^\circ$), lze vzdálenost trhlin $s_{r,max}$ stanovit z následujícího vztahu:

$$s_{r,max} = \frac{1}{\frac{\cos \theta}{s_{r,max,y}} + \frac{\sin \theta}{s_{r,max,z}}}$$

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu:

Cílem omezení šířky trhlin je zajištění takového stavu konstrukce, aby nedošlo v důsledku existence trhlin k snížení životnosti.

Toho lze docílit dodržením určitého minimálního množství výztuže. Dále je nutné kontrolovat průměr prutů výztuže a jejich vzálenost.

Určení nejmenší průřezové plochy betonářské výztuže:

Vychází z podmínky rovnosti tahové síly přenášené betonem těsně před vznikem trhlin a tahové síly přenášené výztuží těsně po vzniku trhlin.

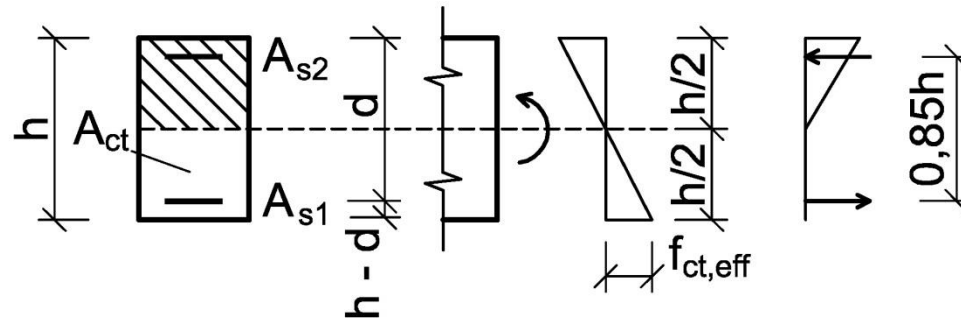
Pro obdelníkový průřez namáhaný:

- ohybovým momentem $A_s \cdot \sigma_s = 0,4 \cdot A_{ct} \cdot f_{ct,eff}$
- dostředným tahem: $A_s \cdot \sigma_s = A_{ct} \cdot f_{ct,eff}$

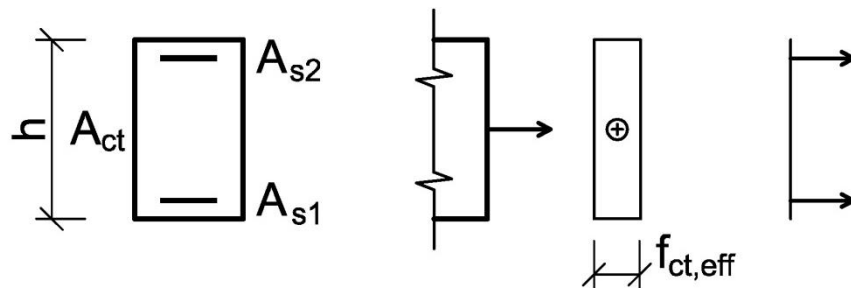
Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Pro obdelníkový průřez namáhaný:

- ohybovým momentem $A_s \cdot \sigma_s = 0,4 \cdot A_{ct} \cdot f_{ct,eff}$



- dostředným tahem: $A_s \cdot \sigma_s = A_{ct} \cdot f_{ct,eff}$



Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Minimální průřezová plocha výztuže (čl. 7.3.2):

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

kde:

- $A_{s,min}$ je minimální průřezová plocha betonářské výztuže v tažené oblasti průřezu
- A_{ct} plocha betonu v tažené oblasti průřezu. Tažená oblast je ta část plochy průřezu, která je podle výpočtu těsně před vznikem první trhliny namáhána tahem.
- σ_s absolutní hodnota největšího napětí, které se připouští ve výztuži bezprostředně po vzniku trhliny,
- $f_{ct,eff}$ průměrná hodnota pevnosti betonu v tahu v okamžiku prvního očekávaného vzniku trhlin,
 $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ nebo nižší, ($f_{ctm}(t)$), jestliže vznik trhlin je předpokládán dříve než za 28 dní),
- k součinitel vyjadřující účinek nerovnoměrného rozdělení vnitřních rovnovážných napětí vedoucích ke zmenšení sil vyplývajících z omezení přetvoření:
 $k = 1,0$ pro stěny komorových průřezů a T- průřezů s $h \leq 300$ mm,
 $k = 0,65$ pro stěny komorových průřezů a T- průřezů s $h \geq 800$ mm.

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Minimální průřezová plocha výztuže:

$$A_{S,min} \sigma_S = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

kde:

k_c součinitel, kterým se zohledňuje rozdělení napětí v průřezu bezprostředně před vznikem trhlin a změna ramene vnitřních sil:

pro prostý tah $k_c = 1,0$,

pro ohyb nebo kombinaci ohybu s normálovými silami:

- pro obdélníkové průřezy, stěny komorových průřezů a T- průřezů

$$k_c = 0,4 \cdot \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \left(\frac{h}{h^*} \right) f_{ct,eff}} \right] \leq 1,$$

- pro přilehlé desky komorových průřezů nebo T- průřezů

$$k_c = 0,9 \frac{F_{cr}}{A_{ct} f_{ct,eff}} \geq 0,5 .$$

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Minimální průřezová plocha výztuže:

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

kde:

σ_c je průměrná hodnota napětí v betonu působící na uvažovanou část průřezu: $\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh}$,

N_{Ed} je osová síla v mezním stavu použitelnosti působící na uvažovanou část průřezu. N_{Ed} má být stanovena při uvažování charakteristických hodnot předpětí a normálových sil při uvažované kombinaci zatížení

h^* $h^* = h$ pro $h < 1,0$ m

$h^* = 1,0$ m pro $h \geq 1,0$ m,

k_1 součinitel, kterým se zohledňují účinky normálových sil na rozdělení napětí:

$k_1 = 1,5$ pokud N_{Ed} je tlaková síla,

$k_1 = \frac{2h^*}{3h}$ pokud N_{Ed} je tahová síla,

F_{cr} absolutní hodnota tahové síly v přilehlé desce bezprostředně před vznikem trhlin vyvozených momentem na mezi vzniku trhlin vypočteným s použitím hodnoty $f_{ct,eff}$.

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu:

U železobetonových nebo přepjatých desek pozemních staveb, namáhaných ohybem bez významného osového tahu, nejsou zapotřebí žádná zvláštní opatření pro omezení šířky trhlin, pokud celková tloušťka nepřekročí 200 mm a jsou dodržena konstrukční uspořádání prvků, [4].

Pravidla uvedená pro výpočet šířky trhlin mohou být pro zjednodušení uvedena ve formě tabulky při omezení průměru prutů nebo jejich vzdáleností, [5]

POZNÁMKA: [4] Podrobněji viz ČSN EN 1992-1-1 (kap. 9.3)

[5] Podrobněji viz ČSN EN 1992-1-1 (tab. 7.2. a 7.3)

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Maximální průměry prutů ϕ^* s pro omezení šířky trhlin:

Maximální průměry prutů ϕ_s pro omezení šířky trhlin ¹⁾

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	-
1) Hodnoty v tabulce vycházejí z následujících předpokladů: $c = 25$ mm; $f_{ct,eff} = 2,9$ MPa; $h_{cr} = 0,5$; $(h-d) = 0,1h$; $k_1 = 0,8$; $k_2 = 0,5$; $k_c = 0,4$; $k = 1,0$; $k_t = 0,4$ a $k' = 1,0$			
2) Při odpovídající kombinaci zatížení.			

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Maximální vzdálenost prutů pro omezení šířky trhlin:

Maximální vzdálenost prutů pro omezení šířky trhliny¹⁾

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

Poznámky jsou vysvětleny v tabulce 7.2N

Mezní stav trhlin - omezení trhlin

Maximální vzdálenost prutů pro omezení šířky trhlin:

Maximální průměr prutů se má upravit následovně

Ohyb (alespoň část průřezu je tlačena):

$$\phi_s = \phi_s^* \left(\frac{f_{ct,eff}}{2,9} \right) \frac{k_c h_{cr}}{2 \cdot (h-d)}$$

Tah (rovnoměrný prostý tah)

$$\phi_s = \phi_s^* \left(\frac{f_{ct,eff}}{2,9} \right) \frac{h_{cr}}{(8 \cdot (h-d))}$$

kde:

ϕ_s je maximální upravený průměr prutu,

ϕ_s^* maximální průměr prutu uvedený v tabulce,

h celková výška průřezu,

h_{cr} výška tlačené oblasti bezprostředně před vznikem trhliny při uvažování charakteristických hodnot předpětí a osových sil při kvazi-stálé kombinaci zatížení,

d účinná výška průřezu vztažená k těžišti krajní vrstvy výztuže.

Mezní stav přetvoření - omezení průhybu

Obecné předpoklady:

Deformace prvku nebo konstrukce nesmí nepříznivě ovlivnit jejich řádnou funkčnost nebo vzhled.

Deformace nemají překročit hodnoty, kterým mohou být vystaveny jiné prvky napojené na konstrukci, jako jsou příčky, zasklení, obklady, technická zařízení budov nebo povrchové úpravy.

Vzhled a obecná použitelnost konstrukce mohou být ohroženy, pokud vypočtený průhyb nosníku, desky nebo konzoly **při kvazi-stálém zatížení překročí hodnotu $1/250$ rozpětí.**

Průhyby, které mohou poškodit přilehlé části konstrukcí, mají být omezeny. Obvykle vyhovující mezní hodnota průhybu po zabudování prvku **od kvazi-stálé kombinace zatížení je $1/500$ rozpětí.**

Mezní stav přetvoření může být ověřován

- buď omezením poměru rozpětí/výška
- nebo porovnáním vypočteného průhybu s mezní hodnotou.

Mezní stav přetvoření - omezení průhybu

Případy, kdy lze od výpočtů upustit:

Obvykle není třeba průhyby určovat výpočtem, pokud lze stanovit jednoduchá pravidla, např. omezení poměru rozpětí k účinné výšce, která zajistí, že nadměrné průhyby za běžných okolností nevzniknou.

Mezní poměr rozpětí k účinné výšce může být stanoven ze vztahů:

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{pokud } \rho \leq \rho_0$$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{pokud } \rho > \rho_0$$

Mezní stav přetvoření - omezení průhybu

Případy, kdy lze od výpočtů upustit:

kde:

l/d je mezní poměr rozpětí k účinné výšce,

K součinitel, kterým se zohledňují různé nosné systémy,

ρ_0 referenční stupeň vyztužení $\rho_0 = 10^{-3} \sqrt{f_{ck}}$,

ρ požadovaný stupeň vyztužení tahovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve vetknutí) na ohybový moment vyvozený návrhovým zatížením,

ρ' požadovaný stupeň vyztužení tlakovou výztuží ve středu rozpětí (u konzoly ve vetknutí) na ohybový moment vyvozený návrhovým zatížením,

f_{ck} v jednotkách MPa.

POZNÁMKA: Podrobněji viz ČSN EN 1992-1-1 (čl. 7.4.2)

Mezní stav přetvoření - omezení průhybu

Případy, kdy lze od výpočtů upustit:

Základní poměry rozpětí k účinné výšce železobetonových prvků bez osového tahu

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	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 Uvedené hodnoty lze považovat obecně za konzervativní; výpočtem lze často prokázat, že jsou možné štihlejší prvky

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.

POZNÁMKA Uvedené mezní hodnoty pro lokálně podepřené desky, odpovídají mírnějšímu omezení, než je průhyb uprostřed pole $1/250$ rozpětí vztažený ke sloupům. Zkušenosti ukazují, že toto omezení je vyhovující.

Mezní stav přetvoření - omezení průhybu

Posouzení průhybu výpočtem

Pokud je výpočet deformací nutný, musí se deformace vypočítat při zatěžovacích podmínkách odpovídajících účelu posouzení.

Použitá výpočetní metoda musí vystihovat skutečné chování konstrukce při působení příslušných zatížení s přesností odpovídající účelu výpočtu.

Pro prvky namáhané převážně ohybem je odpovídající předpoklad chování vyjádřen vztahem:

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

kde:

- α je uvažovaná přetvárná veličina, např. poměrné přetvoření, křivost nebo pootočení,
- α_I, α_{II} jsou hodnoty parametru vypočteného pro stav bez trhlin a s plně rozvinutými trhlinami,
- ξ rozdělovací součinitel (kterým se umožňuje zohlednit tahové zpevnění průřezu) daný vztahem: $\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$
 $\xi = 0$ pro průřezy bez trhlin,

Mezní stav přetvoření - omezení průhybu

Posouzení průhybu výpočtem

kde:

β je součinitel, kterým se zohledňuje vliv doby trvání nebo opakování zatížení na průměrnou hodnotu poměrného přetvoření:

= 1,0 při jednorázovém krátkodobě působícím zatížení,

= 0,5 při dlouhodobě působícím nebo mnohonásobně opakovaném zatížení,

σ_s napětí v tahové výztuži vypočtené pro průřez s trhlinami,

σ_{sr} napětí v tahové výztuži vypočtené pro průřez s trhlinami při zatížení způsobujícím vznik prvních trhlin.

Mezní stav přetvoření - omezení průhybu

Posouzení průhybu výpočtem

Při dlouhodobých zatíženích vyvolávajících dotvarování lze celkovou deformaci včetně dotvarování stanovit použitím účinného modulu pružnosti betonu podle vztahu:

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

kde:

$\varphi(\infty, t_0)$ je součinitel dotvarování pro příslušné zatížení a časový interval.

Křivost od smršťování lze stanovit ze vztahu

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

kde:

$1/r_{cs}$ je křivost od smršťování,

ε_{sc} poměrné přetvoření od celkového smršťování S statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu,

I moment setrvačnosti průřezu,

α_e účinný poměr modulů pružnosti.

Děkuji za pozornost.