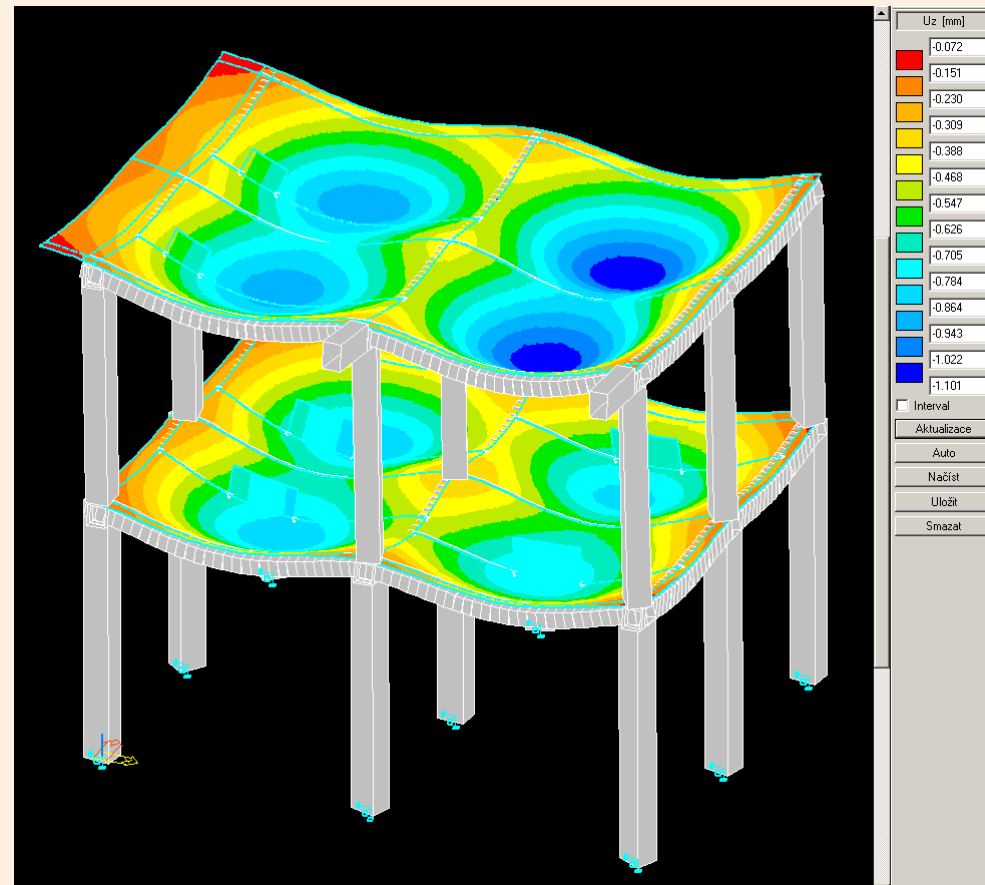




Nosné konstrukce II - AF01

1. přednáška

Navrhování betonových
prvků podle mezních stavů
použitelnosti



Posouzením mezních stavů použitelnosti se prokazují vlastnosti konstrukce z hlediska provozních potřeb uživatele objektu, vzhledu konstrukce a dalších konstrukcí na ni navazujících, ochrany výztuže v ní uložené atd. Nutnost posouzení této skupiny mezních stavů nabývá na významu zejména v poslední době, kdy jsou stále častěji používány kvalitní materiály (beton i ocel s vysokými pevnostmi), které umožňují navrhovat (z hlediska mezního stavu únosnosti) subtilní konstrukce.

Cílem posudku betonové konstrukce dle mezních stavů použitelnosti je zabránění takovým stavům konstrukce, při kterých by bylo omezeno (nebo znesnadněno) užívání objektu z hlediska

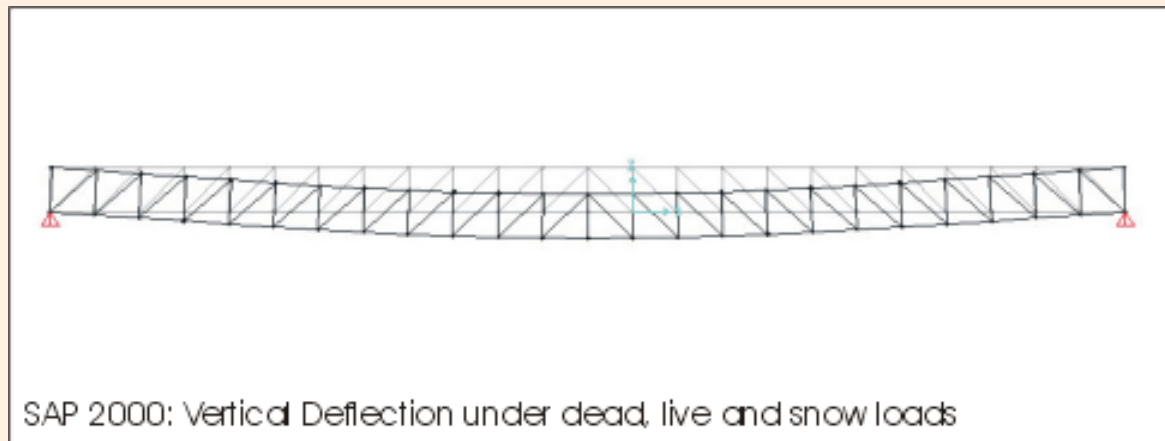
- nadměrných přetvoření a deformací konstrukce nebo jejich částí (mezní stav přetvoření),
- vzniku nebo rozevření trhlin, které vedou ke snížení životnosti konstrukce z důvodů možného oslabení výztuže korozí (mezní stav vzniku trhlin, mezní stav šířky trhlin).

Cílem posudku je zabránit takovým stavům konstrukce, při kterých je omezeno (znemožněno) užívání objektu z hlediska:

- nadměrných přetvoření a deformací konstrukce
- vzniku, nebo rozevření trhlin (které vedou ke snížení životnosti konstrukce z důvodů oslabení výztuže korozí), nepříznivě ovlivňují vzhled
- kmitání, které způsobuje nepohodu lidí, omezení funkčnosti

Dle EC2 jsou MSP:

- mezní stav omezení napětí z hlediska podmínek použitelnosti
- mezní stav trhlin
- mezní stav přetvoření
- jiné (např. vibrace)



Možné následky při nedodržení požadavků:

Konstrukční:

Stropy a svislé konstrukce

- uvolňování keramických dlažeb, špatná funkce oken a dveří, poruchy rozvodů (voda, kanalizace,...), poruchy výtahů

Střechy

- vytváření louží, poruchy krytin

Podhledy

- vlnění, deformace,...

Obvodový plášť

- porušení obkladů, zasklení, nětěsnost,...

Příčky

- trhliny, vybočení, drcení, opadávání obkladů

Možné následky při nedodržení požadavků:

Provozní:

- závady na technologickém zařízení, naklánění regálů,...

Fyziologické:

- znepokojení osob v daném prostoru

Vzhledové:

- znepokojení uživatelů, přetvoření svislých hran...

Chování konstrukcí za provozního stavu

Kombinace zatížení:

Charakteristická $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$ (nevratné MSP)

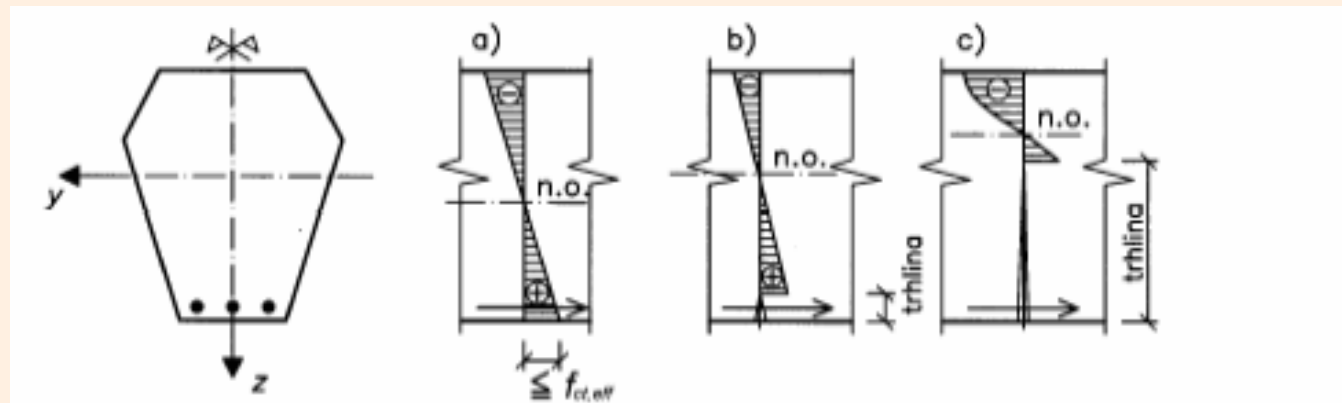
Častá $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$ (nevratné MSP)

Kvazistálá $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$ (MSP týkající se důsledků dlouhodobých účinků a vzhledu konstrukce)

- Neuplatňují se dílčí součinitelé zatížení jako v MSÚ ($\gamma_G, \gamma_Q \dots$)

Stadia působení betonových prvků

Stadium I – zatížení přenáší celý průřez, celý průřez (beton i výztuž) působí pružně, stadium trvá až do vzniku první trhliny, tuhost ovlivňuje celá tažená i tlačенá oblast betonu oceli.

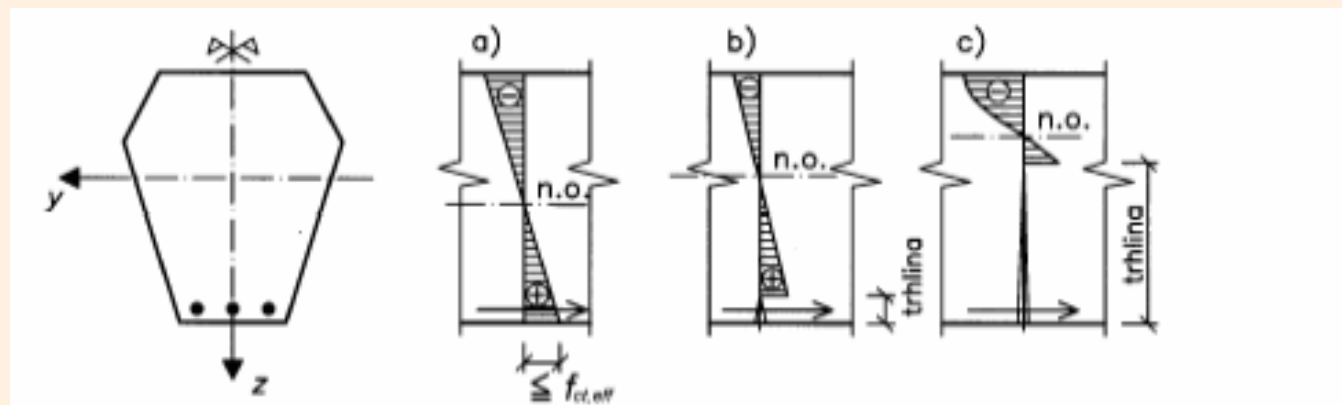


Stadia působení průřezu;

- a) stadium I - průřez působí pružně*
- b) stadium II - průřez v tažené části částečně narušený trhlinou*
- c) stadium III - průřez v tažené části je zcela porušen trhlinou*

Stadia působení betonových prvků

Stadium II – začíná na mezi vzniku trhlin. Při rostoucím zatížení se trhlina rozšiřuje a postupuje směrem k N.O., N.O. se posouvá k tlačnému okraji. Stadium končí, když je trhlina prostoupena celá tažená oblast s výjimkou malé tažené části v oblasti N.O. Tuhost průřezu ovlivňuje velikost tlačené oblasti, síla přenášená taženou výztuží a velikost tažené oblasti neporušené trhlinou.

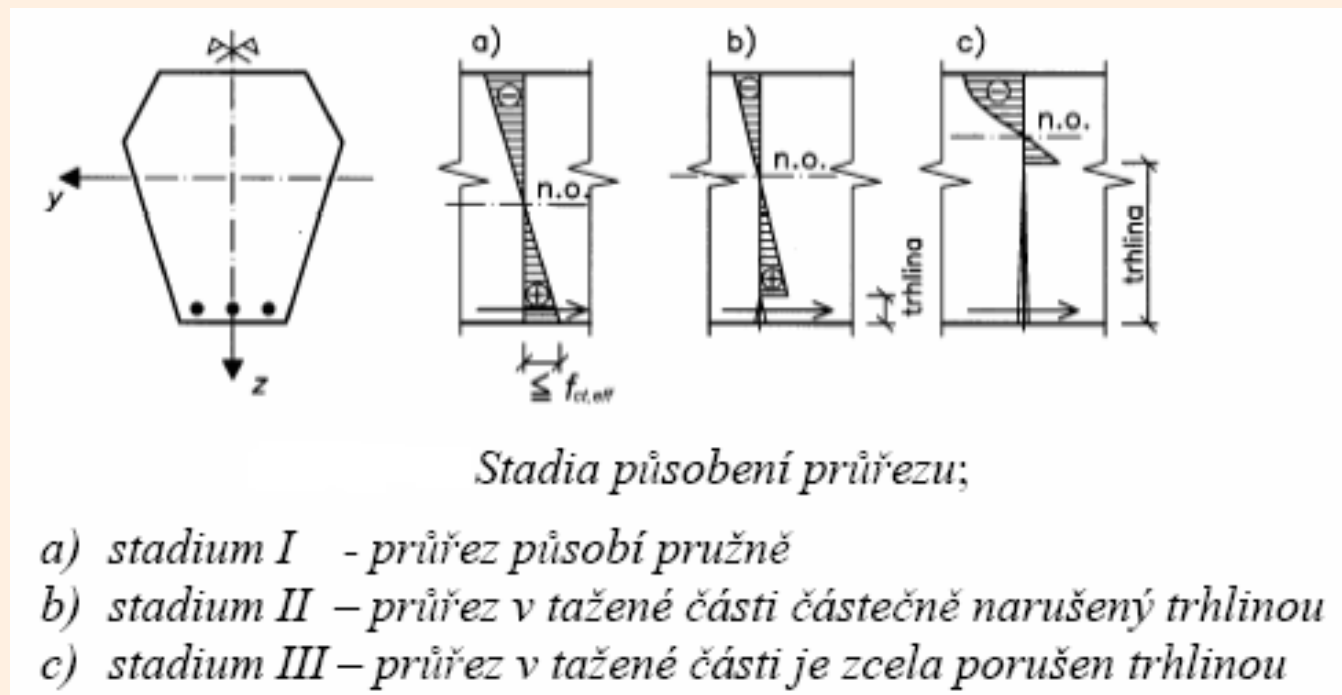


Stadia působení průřezu;

- a) stadium I - průřez působí pružně*
- b) stadium II - průřez v tažené části částečně narušený trhlinou*
- c) stadium III - průřez v tažené části je zcela porušen trhlinou*

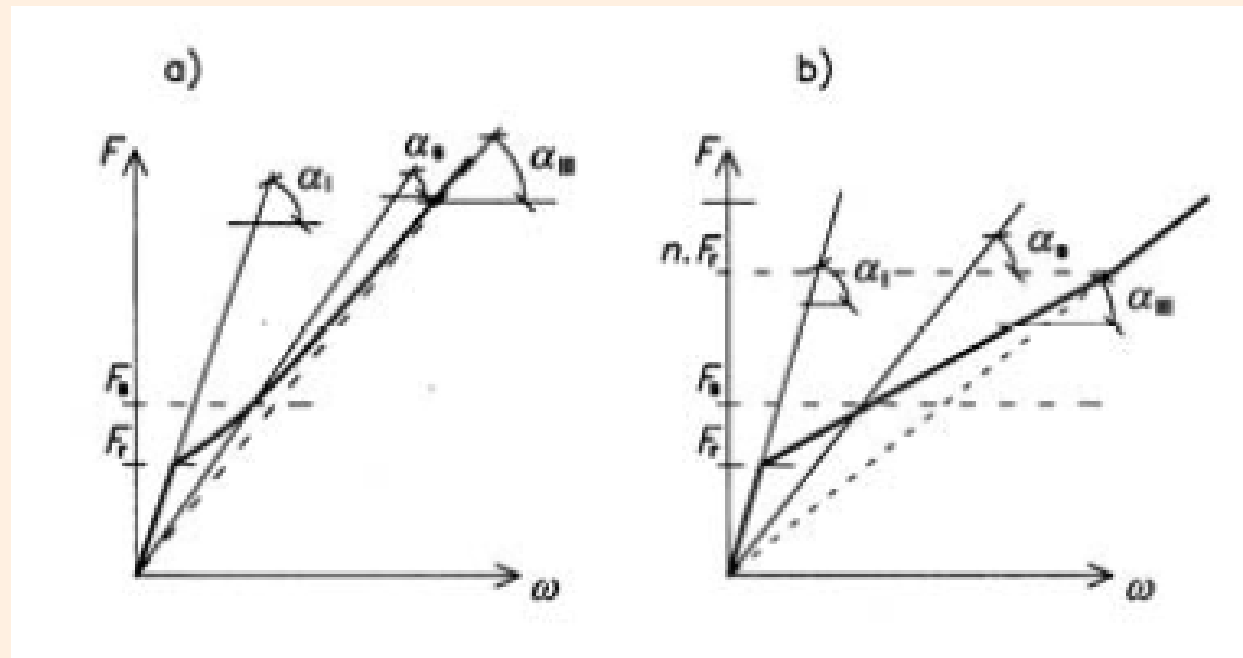
Stadia působení betonových prvků

Stadium III – při rostoucím zatížení postupně dochází ke zplastizování betonu v tlačené části průřezu, trhliny v tažené části průřezu se neprohlubuje. Tuhost průřezu je určena velikostí tlačené částí průřezu a velikostí síly v tažené výztuži, vliv tažené části betonu je zanedbatelný.



Ve výpočtech zjednodušeně předpokládáme:

- I stadium – působí celý průřez, závislost σ , ε je lineární
- po překročení meze vzniku trhlin tuhost závisí na hloubce trhliny



Kontrola použitelnosti prvků a konstrukcí

- závisí na okolním prostředí, ve kterém se konstrukce během životnosti nachází, obvykle jsou formulovány požadavky z hlediska vzniku, či šířky trhlin.
 - a) trhliny nesmějí vzniknout vůbec – prvek ve stadiu I
 - b) vznik trhlin se připouští a omezuje se jejich šířka – s tadium II a III
jde o relativně komplikovaný výpočet. Podle EC lze výpočet šířky trhlin nahradit ekvivalentními podmínkami
 - mezní stav omezení napětí v betonu a betonářské výztuži
 - určení minimální plochy výztuže v tažené oblasti
 - omezení plochy vyztuženého prutu, omezení vzdálenosti prutů

Další skupina kritérií, které jsou z hlediska MSP předepisovány tvoří mezní stavy přetvoření – průhyb, diferenční průhyb od celkového konkrétního zatížení nebo kombinace zatížení.

Mezní stav omezení napětí

Podle EC2: tlaková napětí v betonu

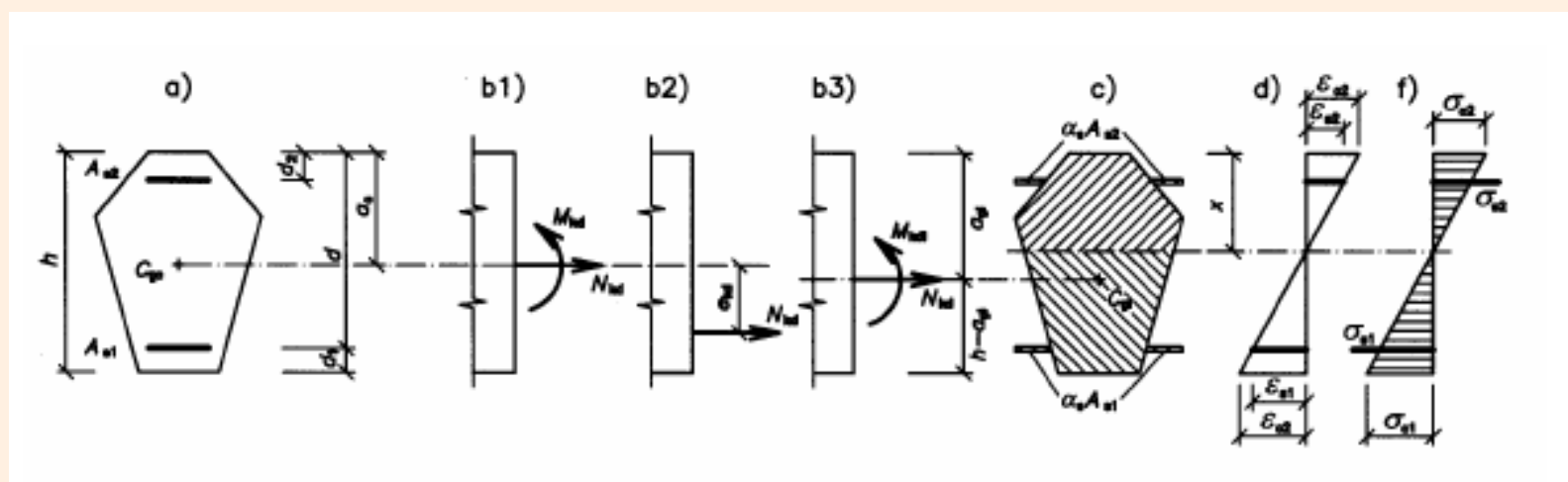
- omezení vzniku podélných trhlin, rozvoj mikrotrhlin, dotvarování (vyšší napětí – vyšší dotvarování) – Tyto jevy mohou vést ke vzniku takového stavu, který znemožní používání konstrukce.

tahová napětí ve výztuži

- je nutné zamezení nadměrného nepružného přetvoření výztuže, aby nevznikly široké, trvale otevřené trhliny v betonu

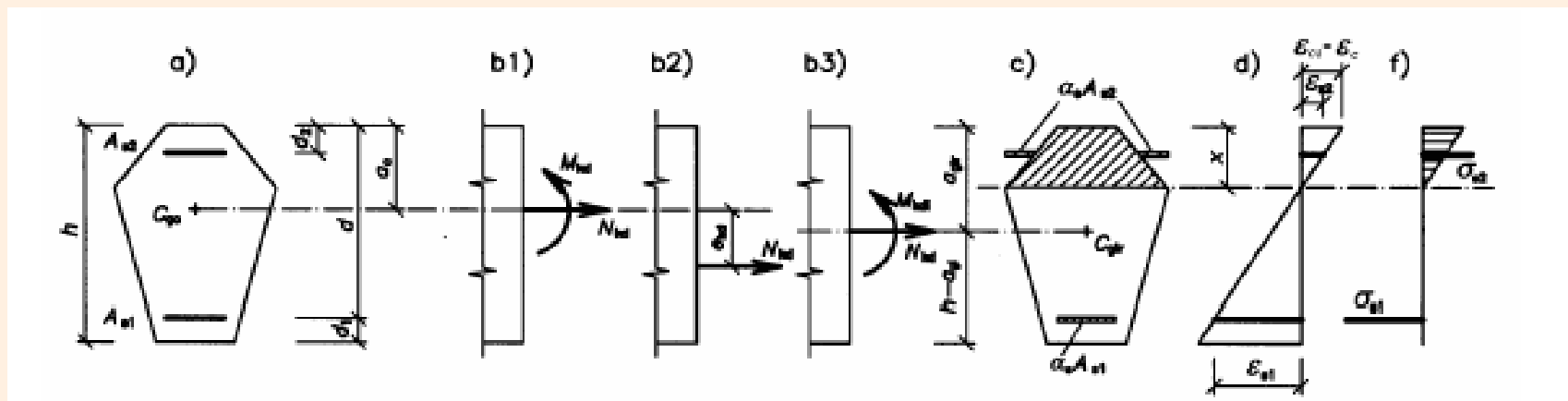
Modely průřezu pro výpočet napjatosti

1 – průřez bez trhliny – plně působí celý betonový průřez

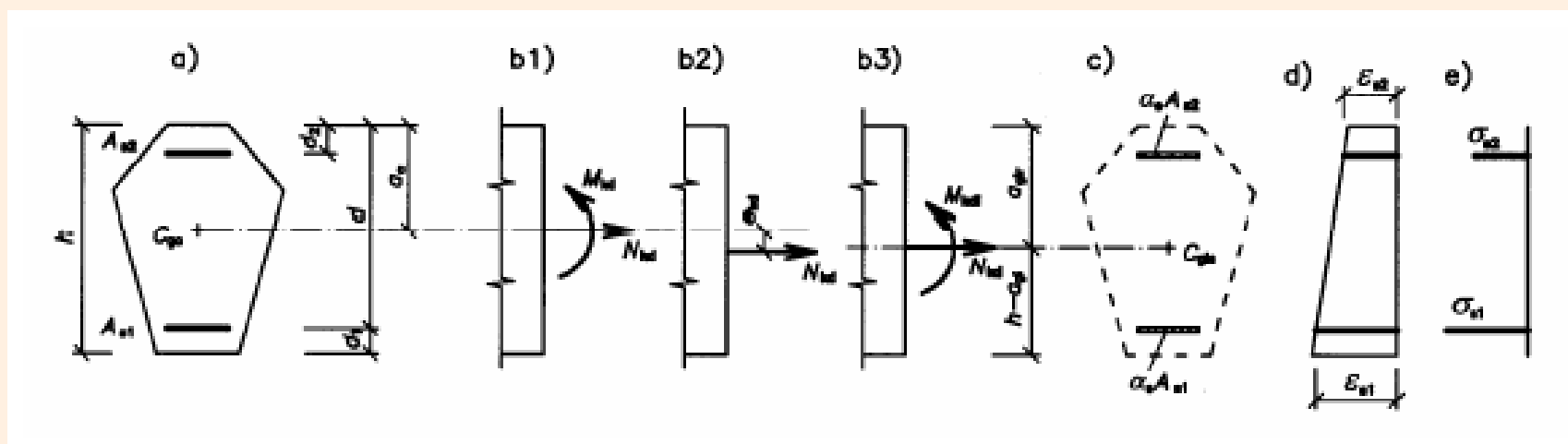


Modely průřezu pro výpočet napjatosti

2 – průřez s trhlinou a tlačnou částí



3 – celý betonový průřez je prostoupen trhlinou



Kritérium pro použití jednotlivých modelů je napětí v krajních vláknech => vždy začínáme výpočtem napjatosti na plně působícím průřezu betonu a výztuže.

1) Ideální průřez

- skládá se z betonové části průřezu
- skládá se z $\alpha_c = E_s/E_{mc}$ násobku plochy výztuže

plocha IP

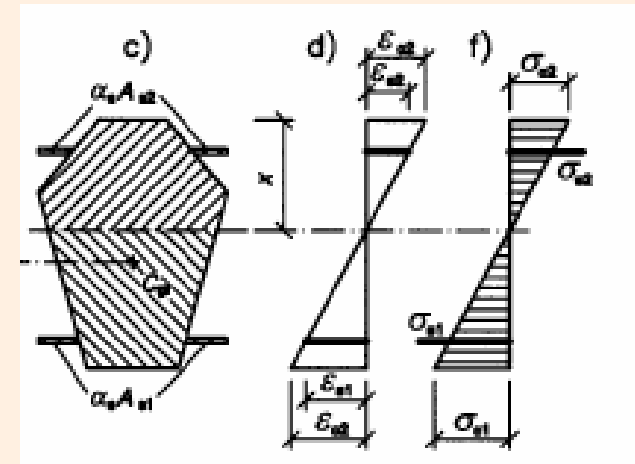
$$A_i = A_{cc} + \alpha_e (A_{s1} + A_{s2})$$

těžiště IP

$$a_{gi} = [A_{cc} a_c + \alpha_c (A_{s1} d + A_{s2} d_2)] / A_c$$

moment setrvačnosti IP

$$I_i = I_{cc} + A_{cc} (a_{gi} - a_c)^2 + \alpha_c [A_{s1} (d - a_{gi})^2 + A_{s2} (a_{gi} - d_2)^2]$$



Na průřez působí zatížení N_{kd} a M_{kd} v těžišti betonového průřezu c_{gc} provedeme transformaci tohoto zatížení k těžišti ideálního průřezu $c_{gi} \Rightarrow N_{kdi}, M_{kdi}$

Napětí v krajních vláknech spočítáme podle zásad teorie pružnosti:

napětí v krajích vláknech: - horní vlákna:

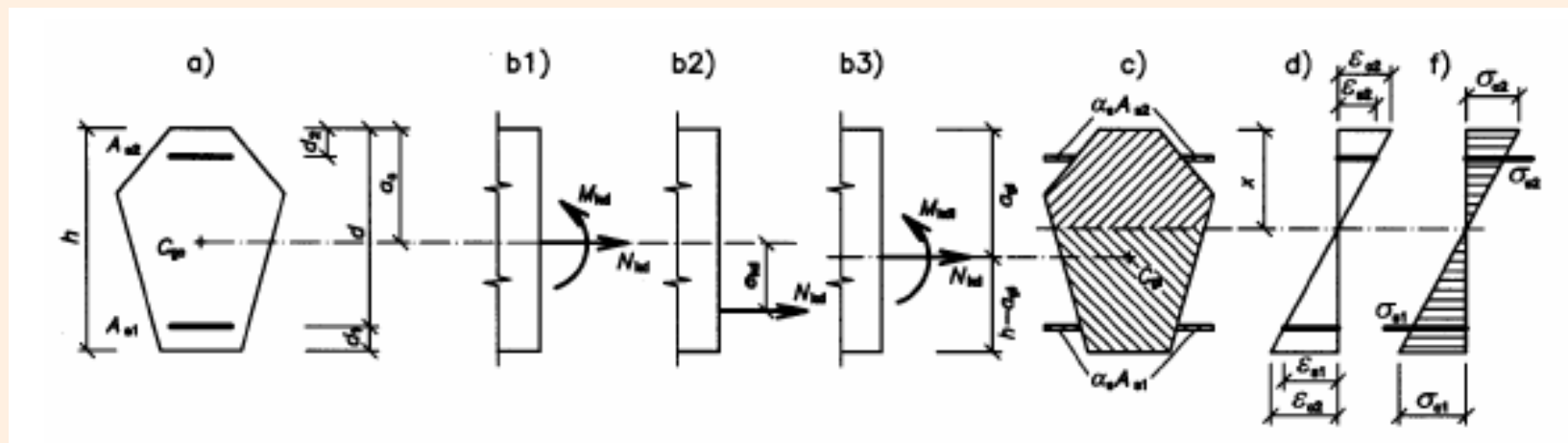
$$\sigma_{c2} = \frac{N_{kd}}{A_i} - \frac{M_{kdi} \cdot a_{gi}}{I_i}$$

- dolní vlákna:

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

Trhliny kolmo ke střednici nevzniknou, je-li splněno:

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



Průřez s trhlinou a tlačnou částí

$$\sigma_{c1} > f_{ct,eff} \quad a \quad \sigma_{c2} < 0$$

$$\sigma_{c2} > f_{ct,eff} \quad a \quad \sigma_{c1} < 0$$

Pevnost betonu v tahu $f_{ct,eff}$ je uvažována hodnotou f_{ctm} (což je střední hodnota pevnosti betonu v tahu), resp. $f_{ctm,fl} = \max\{f_{ctm} \cdot (1,6 - h/1000); f_{ctm}\}$

V průřezu vzniknou trhliny a vznikne i tlačná část.

Charakteristiky ideálního průřezu s trhlinou určíme za předpokladu:

V průřezu vzniknou trhliny a vznikne i tlačná část.

Charakteristiky ideálního průřezu s trhlinou určíme za předpokladu:

- (p1) v tažené části průřezu beton v tahu nepůsobí, tj. průřez je prostoupen trhlinou,
- (p2) poměrné přetvoření průřezu po výšce je lineární,
- (p3) napětí v tlačené části betonového průřezu a ve výztuži (tažené i tlačené) je přímo úměrné přetvoření průřezu v daném místě.

Pokud uvažujeme železobetonový obdélníkový průřez

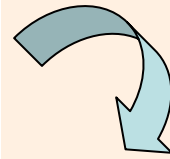
Pro obdélníkový železobetonový průřez namáhaný pouze ohybovým momentem M_{kd}
je možno sestavit pouze podmínku rovnováhy

$$F_{s1} + F_{s2} + F_{cc} = 0$$

Po úpravách získáme

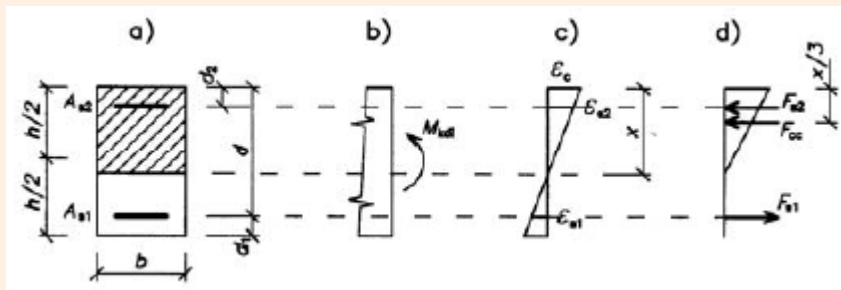
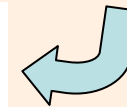
rovnici pro výpočet výšky x tlačené části průřezu

$$x^2 + \frac{2\alpha_e}{b} (A_{s1} + A_{s2})x - \frac{2\alpha_e}{b} (A_{s1}d + A_{s2}d_2) = 0,$$



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

$$\sigma_c = -\frac{M_{kd}}{I_i}x$$



Trhlinou zcela porušený průřez (tzv. mimostředný tah s malou výstředností)

Pokud na obou okrajích taženého průřezu platí

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

je průřez po celé výšce prostoupen trhlinou. Jedná se o namáhání mimostředným tahem s malou výstředností a ideální průřez pro výpočet napětí ve výztuži je tvořen pouze výztuží.

Omezení tlakových napětí v betonu

Pokud tlaková napětí v betonu překročí určitou kritickou hodnotu, mohou v betonové konstrukci vzniknout podélné trhliny, které mohou vést ke snížení trvanlivosti konstrukce. Pokud se neučiní jiná opatření (např. zvětšení krycí vrstvy podélné tlačené výztuže nebo omezení příčných přetvoření příčnou výztuží) je vhodné u konstrukcích nacházejících se zejména v třídách prostředí XD, XF a XS splnit podmínku

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

kde f_{ck} je charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku,

σ_c je napětí betonu v tlaku při charakteristické kombinaci zatížení,

k_1 je součinitel, jehož doporučená hodnota je 0,6.

Lineární dotvarování betonu lze uvažovat, pokud napětí betonu v tlaku splňuje podmínku

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

kde napětí σ_c je stanoveno pro charakteristickou kombinaci zatížení,

k_2 je součinitel, jehož doporučená hodnota je 0,45.

Omezení napětí ve výztuži

Tahové napětí ve výztuži se omezuje proto, aby v důsledku trvalých nepružných poměrných přetvoření výztuže nevznikaly v prvcích široké, trvale otevřené trhliny nebo nadměrná přetvoření.

Pro charakteristickou kombinaci zatížení se kontrolují podmínky

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

je-li napětí ve výztuži vyvozeno vynuceným přetvořením, je možno použít podmínku

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

kde napětí σ_s je stanoveno pro charakteristickou kombinaci zatížení,
 k_3 a k_4 jsou součinitele, jejichž doporučené hodnoty jsou 0,8 a 1,0,
 f_{yk} je charakteristická hodnota meze kluzu betonářské výztuže.

Střední hodnota napětí v předpínací výztuži má splňovat podmínku

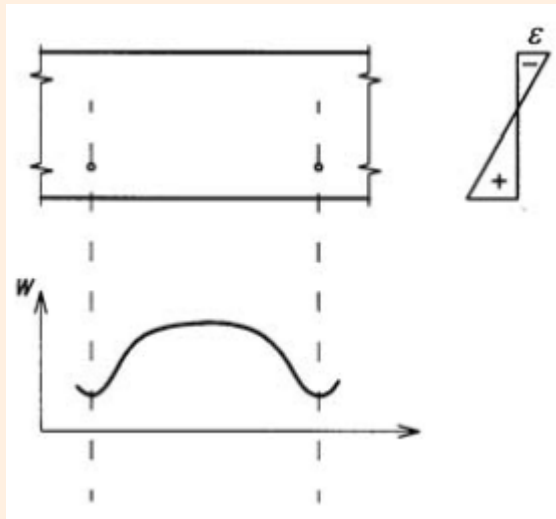
$$\sigma_p \leq k_5 f_{pk} ;$$

kde napětí σ_p je stanoveno pro charakteristickou kombinaci zatížení,
 k_5 je součinitel, jehož doporučená hodnota je 0,75,
 f_{pk} je charakteristická hodnota tahové pevnosti předpínací výztuže.

Mezní stav trhlin

Trhliny v betonových konstrukcích mohou mít limitující vliv na trvanlivost a životnost konstrukce, zejména v případech trhlin širokých a dlouhodobě rozevřených.

Trhliny v železobetonových konstrukcích namáhaných ohybem, smykem, kroucením, tahem jsou většinou nevyhnutelné (tedy jsou v betonových konstrukcích obvyklé).



Šířka trhliny v závislosti na vzdálenosti od výztužných prutů

EN 1992-1-1 vychází z filosofie, že

- není možné přesně stanovit šířku trhliny (zejména s ohledem na rozptyl tahové pevnosti betonu a soudržnost výztuže s betonem) pomocí jednoduchých vztahů,
- znalost přesné šířky trhliny není pro trvanlivost betonové konstrukce významná,

a proto norma považuje za účelnější stanovit zásady uspořádání výztuže pro zamezení vzniku širokých trhlin než komplikovaně stanovit šířku trhliny výpočtem.

Cílem návrhu konstrukce z hlediska mezního stavu šířky trhlin je zajistit, aby trhliny nezhoršily použitelnost a trvanlivost konstrukce. Posouzení lze provést dvěma způsoby:

- přímým výpočtem šířky trhlin a kontrolou podmínky spolehlivosti, která vyjadřuje, že šířka trhliny nepřestoupí předepsanou, resp. dohodnutou hodnotu,
- dodržením jistých doporučení (konstrukčních zásad). Konstrukční zásady pro dostatečné vyztužení průřezu, velikost profilů a vzdálenost vložek jsou formulovány tak, že jejich důsledkem je zajištění dostatečné spolehlivosti konstrukce dle mezního stavu šířky trhlin. Přitom se šířka trhlin nepočítá.

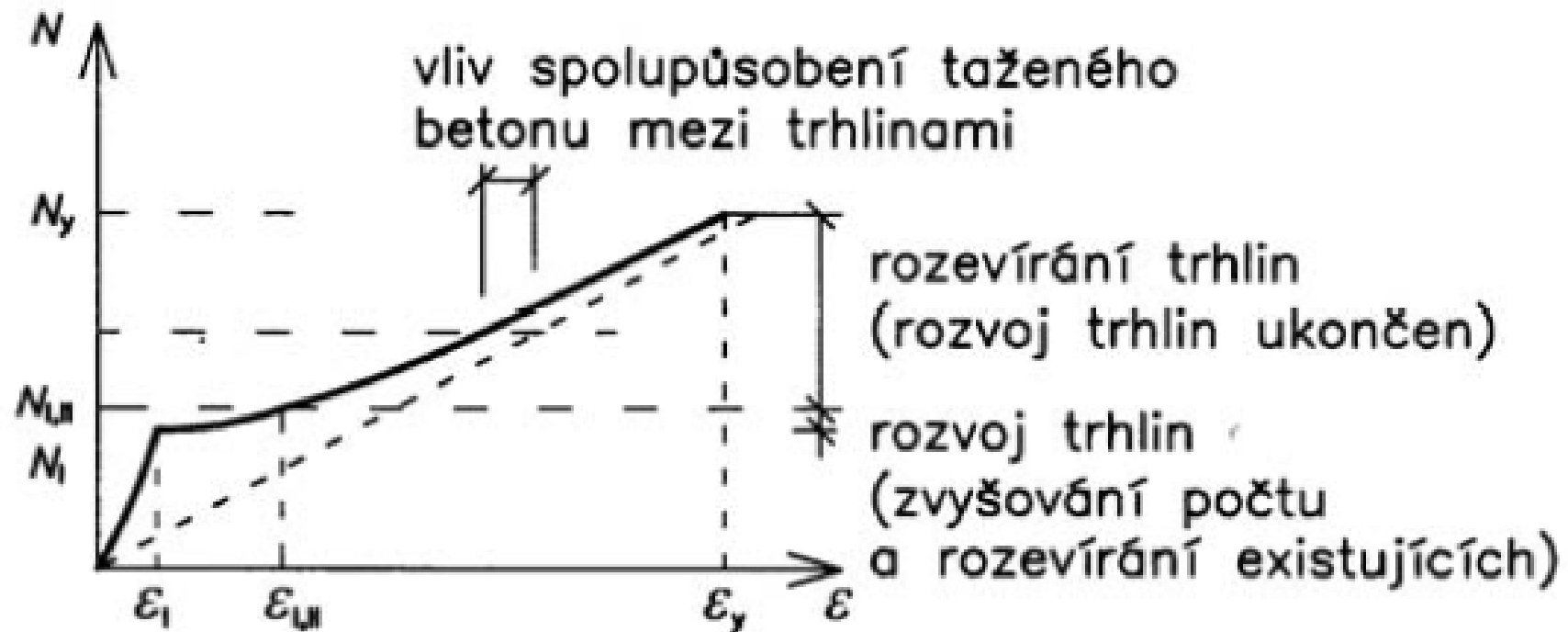
Doporučená šířka trhliny w_{max} [mm]

Třída prostředí	železobetonové, předpjaté s nesoudržnou výztuží	předpjaté se soudržnou výztuží
	kvazistálá kombinace zatížení	častá kombinace zatížení
XO, XC1	0,4 ^{*)}	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ^{**)}
XD1, XD2, XS1 až XS3	0,3	dekomprese ^{***)}

^{*)} V prostředí XO a XC1 nemá šířka trhlin vliv na trvanlivost konstrukce; tato limitní hodnota zajišťuje přijatelný vzhled. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, není nutno šířku kontrolovat

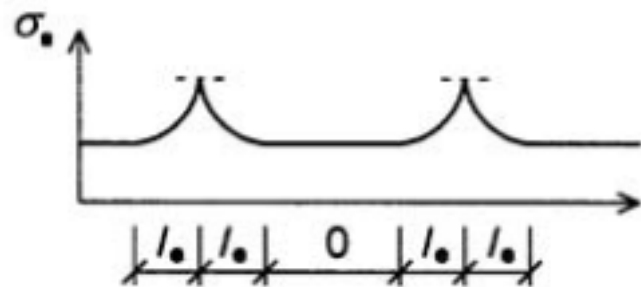
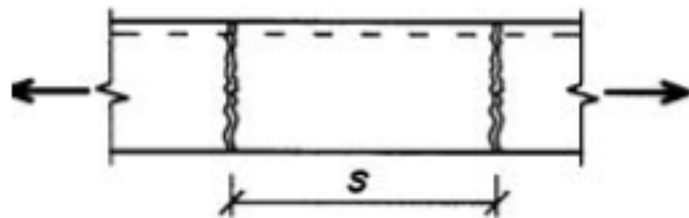
^{**)} V těchto třídách prostředí může být zaveden požadavek dekomprese pro kvazistálou kombinaci

^{***)} Dekompresí je označován požadavek, že veškerá soudržná předpínací výztuž leží min. 25 mm v tlačené části betonu

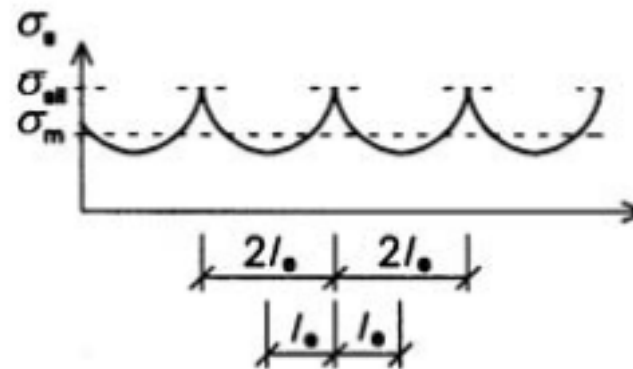
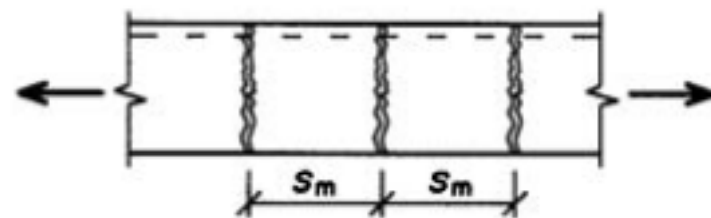


Poměrné přetvoření výztuže u centricky taženého prutu

a)



b)



Centricky tažený symetrický železobetonový prvek
 a) stav po vzniku primárních trhlin
 b) stadium ukončeného rozvoje trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu

Cílem omezení šířky trhlin je zajištění takového stavu konstrukce, aby nedošlo v důsledku existence trhlin k omezení životnosti a trvanlivosti konstrukce, resp. ke zhoršení jejího estetického působení. Přitom u železobetonových konstrukcí namáhaných ohybem, tahem, smykem nebo kroucením nelze bez zvláštních opatření zabránit vzniku trhlin. Šířku trhlin lze míru omezit dodržáním určitého minimálního množství výztuže, která je soudržná s betonem. Přitom je nutno kontrolovat průměr prutů výztuže a jejich vzdálenost.

Určení nejmenší průřezové plochy betonářské výztuže

Kontrola průměru výztuže

Napětí ve výztuži σ_s [MPa]	Maximální průměr prutu ϕ_s^* [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	-

Maximální průměry prutů pro zajištění dostatečné spolehlivosti konstrukce z hlediska šířky trhlin w_k

Kontrola vzdálenosti prutů výztuže

Napětí ve výztuži σ_s [MPa]	Maximální vzdálenost výztuže s [mm] ₁		
	$w_k = 0,4$ 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	-

Maximální vzdálenost prutů pro zajištění dostatečné spolehlivosti konstrukce z hlediska šířky trhlin

Postup při kontrole trhlin bez přímého výpočtu

Pokud provádíme posouzení konstrukce z hlediska šířky trhlin bez jejího přímého výpočtu, je možno postupovat podle následujících bodů

- (1) u železobetonových nebo předepjatých desek a u prvků namáhaných ohybem bez významných osových sil, není nutno provádět žádné posouzení, pokud výška desky nepřekročí 200 mm a pokud byly dodrženy konstrukční zásady týkající se vzdálenosti výztužných prutů apod.
- (2) pokud je dodrženo minimální množství výztuže dle vztahu a budou-li dodrženy následující zásady, trhliny nebudou ovlivňovat spolehlivost a použitelnost konstrukce.
 - a) Pokud jsou trhliny převážně vyvolány vynucenými přetvořeními, stačí provést kontrolu maximálního průměru výztuže. Přitom σ_s je hodnota napětí ve výztuži určená bezprostředně po vzniku trhliny.
 - b) Jsou-li trhliny vyvolány převážně zatížením, kontroluje se jak maximální průměr výztuže, tak i maximální vzdálenost výztuže. Napětí ve výztuži σ_s je určeno od uvažované kombinace zatížení na trhlínami porušeném průřezu.

Nebezpečí vzniku širokých trhlin je zejména v průřezech, kde dochází k náhlým změnám napjatosti, tj. v průřezech (a v jejich blízkosti), kde

- působí koncentrované zatížení (osamělá břemena),
- je výztuž stykována,
- jsou velká napětí v soudržnosti,
- dochází k náhlé změně rozměrů průřezu.

Mezní stav přetvoření

Přetvoření prvku nebo konstrukce musí být takové, aby nepříznivě neovlivňovalo funkčnost konstrukce, provozní požadavky v objektu ani vzhled konstrukce..

Mezní hodnoty přetvoření mají brát v úvahu druh povrchu, funkci konstrukce, její povrchové úpravy (omítky, podhledy, atd.), příčky a způsob jejich upevnění atd.. V EC2 jsou uvedeny jen orientační hodnoty mezních přetvoření:

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. Ostatní omezení by měla být uvažována v závislosti na náchylnosti k porušení připojených prvků. Toto kritérium je formulováno s ohledem na možné poškození připojených částí konstrukce.

Ověření mezního stavu přetvoření může být provedeno

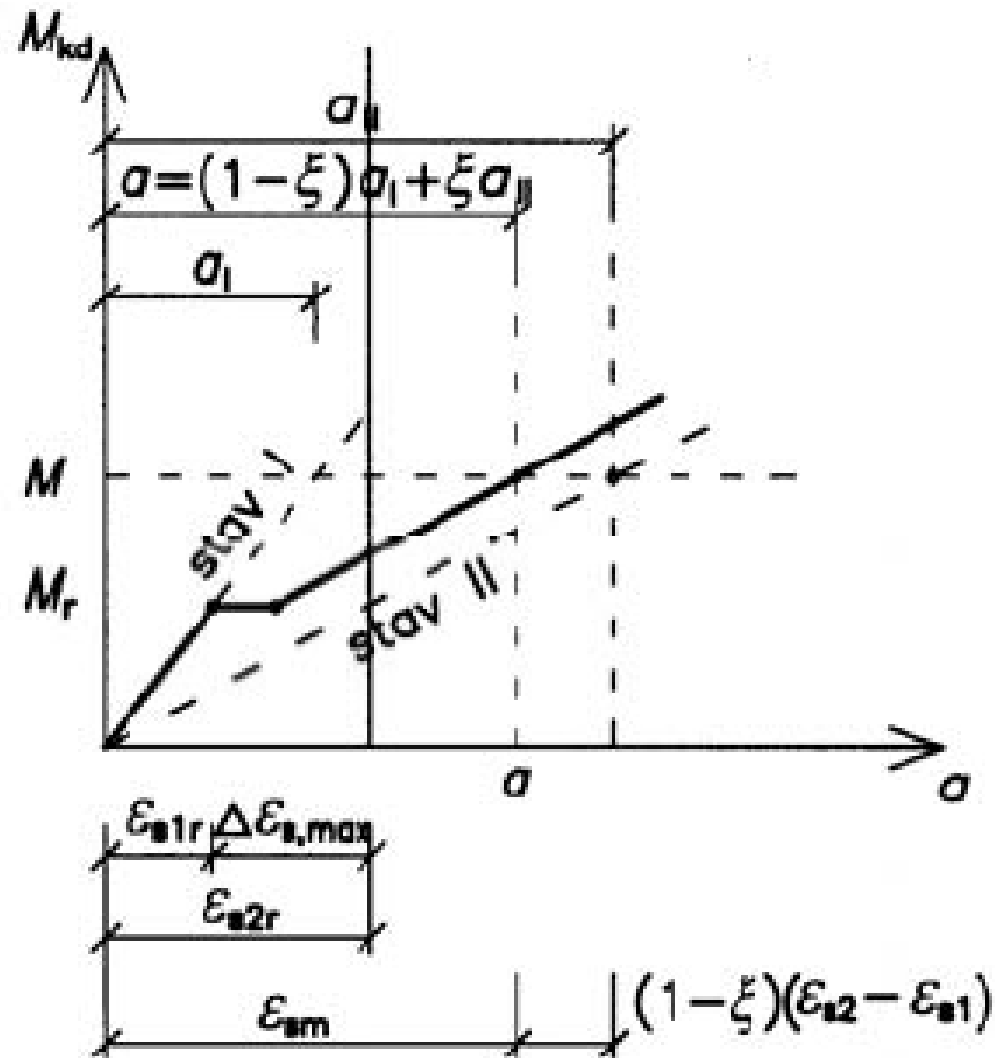
- a) bez výpočtu přetvoření. Používají se jednodušší metody založené např. na ověření štíhlosti prvku,
- b) výpočtem přetvoření a srovnáním vypočtených hodnot s přípustnými limitními hodnotami.

Výpočet přetvoření

Při výpočtu přetvoření je nutno uvažovat

- takové zatěžovací kombinace, které jsou přiměřené posuzované situaci,
- výstižné chování konstrukce při příslušném zatížení (tj. v případě, že vzniknou trhliny v konstrukci, je nutno respektovat jejich vliv na tuhost konstrukce).

Model dle EN 1992-1-1



Závislost mezi ohybovým momentem M_{kd} a přetvořením

EN 1992-1-1 zavádí pro převážně ohýbané prvky ve kterých vzniknou trhliny model, který umožňuje predikci chování ve tvaru

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

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

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

β je součinitel vyjadřující vliv doby nebo opakování zatížení ($\beta = 1,0$ pro jednorázové krátkodobé zatížení; $\beta = 0,5$ pro dlouhodobě působící nebo opakovaná zatížení).

kde σ_{sr} je napětí ve výztuži při dosažení meze trhlin vypočtené za předpokladu, že beton v tahu nepůsobí;

Do deformací je nutno vzít v úvahu i následující:

Vliv dotvarování

Celkové deformace, které zahrnují i vliv deformací vyvolaných dotvarováním betonu mohou být vypočteny použitím efektivního modulu pružností betonu

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

kde $\varphi(\infty, t_o)$ je součinitel dotvarování.

Vliv dotvarování smršťování

Křivost od smršťování $1/r_{cs}$ je možno stanovit ze vztahu

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

kde je ε_{cs} poměrné přetvoření betonu vyvolané smršťováním, $\alpha = E_s / E_{c,eff}$,

S statický moment průřezové plochy výztuže k těžišti průřezu,

I moment setrvačnosti průřezu.

Pokud se očekává vznik trhlin určí se poměr S/I dle vztahu

$$\frac{S}{I} = \frac{S_{II}}{I_{II}} \xi + \frac{S_I}{I_I} (1 - \xi),$$