

3. cvičení – Návrh výztuže štíhlého sloupu rámové konstrukce

- Ve cvičení budeme pro zjednodušení řešit návrh a posouzení vybraného sloupu pouze pro jednu kombinaci zatížení, a to **KZS1** (stálé + užité plné). **Řešený sloup** vybere cvičící.
- **Řešený příklad výpočtu najdete ve skriptech, kapitola 11.**

Vliv geometrických imperfekcí

- Reálná konstrukce nikdy nemá ideální geometrii, kterou jsme uvažovali při výpočtu vnitřních sil pomocí softwaru. Odchytky v geometrii konstrukce, které způsobují přídavné namáhání, budou zohledněny formou **výstřednosti svislého zatížení** e_i . Pro ztužený železobetonový systém lze ve cvičení zjednodušeně uvažovat:

$$e_i = \frac{l_0}{400}$$

Účinnou délku sloupu l_0 ve cvičení uvažujeme na straně bezpečnosti jako 0,9násobek světlé výšky sloupu. Podrobně viz přednášky.

- **Ohybový moment od geometrické imperfekce** je:

$$M_{imp} = |N_{Ed}| \cdot e_i$$

kde N_{Ed} budeme uvažovat bezpečně jako max. hodnotu normálové síly na řešeném sloupu (KZS1) získanou z výpočetního softwaru.

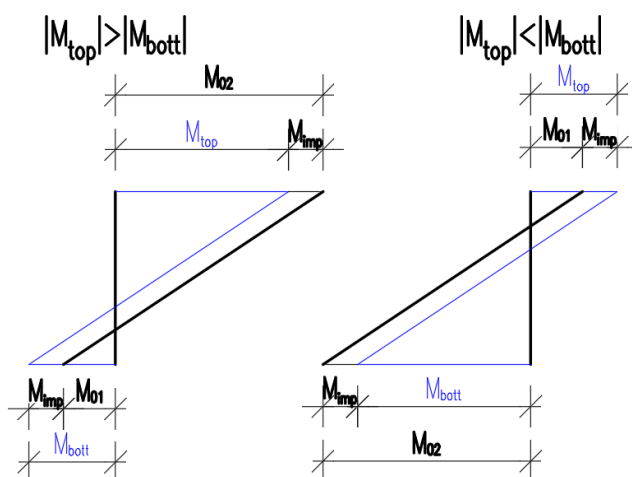
- **Ohybové momenty 1. řádu** zahrnující nepříznivé účinky geometrických imperfekcí lze následně vyjádřit vztahem:

$$\left. \begin{array}{l} M_{01} \\ M_{02} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} M_{top} + M_{imp} \\ M_{bott} + M_{imp} \end{array} \right.$$

M_{01} a M_{02} jsou momenty v hlavě a v patě sloupu.

M_{02} je ten z momentů, který je v absolutní hodnotě větší (tj. $|M_{02}| > |M_{01}|$).

Hodnoty momentů M_{01} , resp. M_{02} získáme tak, že k původně spočítaným momentům M_{top} a M_{bott} (momenty v hlavě a patě sloupu v KZS1 z výpočetního softwaru) přičteme moment od imperfekcí, a to **na stranu většího z koncových momentů M_{top} , M_{bott}** (viz obrázek na další straně).



Každý student ve svém úkolu povinně vykreslí obdobné schéma průběhu momentů 1. řádu po výšce sloupu v měřítku a s konkrétními hodnotami!

Štíhlost sloupu

- Štíhlost navrženého sloupu je:

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

kde i je poloměr setrvačnosti průřezu, $i = \sqrt{\frac{I}{A_c}}$, A_c je průřezová plocha sloupu, I je moment setrvačnosti průřezu ve vyšetřovaném směru. Pro obdélníkový průřez: $A_c = b \cdot h$ a $I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$, kde b je šířka a h výška průřezu sloupu (nikoliv výška sloupu).

- Provedeme výpočet limitní štíhlosti λ_{lim} podle vztahu:

$$\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} \leq 75, \text{ resp.}$$

$$\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} \leq 25, \text{ pokud } n \geq 0,41$$

A ... vliv dotvarování betonu, ve cvičení bezpečně uvažujeme $A = 0,7$

B ... vliv stupně vyztužení podélnou výztuží, ve cvičení bezpečně uvažujeme $B = 1,1$
Přesnější stanovení A a B viz přednášky a skripta, ve cvičení není nutné.

C ... vliv poměru ohybových momentů, $C = 1,7 - M_{01}/M_{02}$

o Do vztahu dosazujeme momenty M_{01} a M_{02} **se skutečnými znaménky**.

o Pokud však jsou momenty **převážně vyvozeny imperfekcemi** (M_{imp} je větší než M_{top} a M_{bott}), bereme automaticky nejnepříznivější hodnotu $C = 0,7!$

n ... poměrná normálová síla: $n = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$

- Posoudíme**, zda je štíhlost našeho sloupu menší než limitní štíhlost, tj. zda platí:

$$\lambda \leq \lambda_{lim}$$

- Pokud $\lambda \leq \lambda_{\text{lim}}$, klasifikujeme sloup jako **masivní** a posuzujeme ho na kombinaci normálové síly a momentu 1. řádu s vlivem imperfekcí.
- Pokud $\lambda > \lambda_{\text{lim}}$, je nutné posuzovat sloup jako **štíhlý**, tj. na kombinaci normálové síly a momentu zohledňujícího účinky 2. řádu.
- Pokud vám ve cvičení vyjde masivní sloup, cvičně přesto vyčíslete moment 2. řádu M_2 a sloup následně posuzujte s vlivem 2. řádu.

Odhad jmenovitého ohybového momentu 2. řádu

- Před posouzením sloupu je nutno navrhnout jeho výztuž. Pro návrh výztuže potřebujeme co nejpřesněji odhadnout velikost návrhového ohybového momentu s účinky 2. řádu M_{Ed} (viz dále). Přesnou hodnotu M_{Ed} v tuto chvíli stanovit neumíme, jelikož v této fázi výpočtu neznáme vyztužení sloupu. Odhad bude později zpřesněn při posouzení sloupu s navrženou výztuží.
- Účinky 2. řádu budou vypočteny metodou založenou na **jmenovité křivosti**
- **Jmenovitý ohybový moment 2. řádu M_2 :**

$$M_2 = |N_{Ed}| \cdot e_2$$

- **Výstřednost 2. řádu e_2 :**

$$e_2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{l_0^2}{c_{1/r}}$$

(1/r) ... křivost

l_0 ... účinná délka sloupu

$c_{1/r}$... součinitel závislý na rozdělení křivosti; pro jednotlivý prvek ve ztužené kci $c_{1/r} = 8$

- **Křivost (1/r)** spočteme jako:

$$\frac{1}{r} = k_r \cdot k_\varphi \cdot \frac{1}{r_0}$$

- Opravný součinitel závislejší na normálové síle k_r :

$$k_r = \frac{n_u - n}{n_u - n_{\text{bal}}} \leq 1$$

n_u ... poměrná normálová únosnost při dostředném tlaku daná vztahem: $n_u = 1 + \omega$

kde ω je mechanický stupeň vyztužení: $\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} = \rho_s \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$

ve cvičení v tomto kroku uvažujeme stupeň vyztužení ρ_s stejný jako v předběžném návrhu (1. cvičení). Po návrhu výztuže hodnotu ω zpřesníme. Alternativně lze již v tomto kroku přesněji stanovit ω dle vnitřních sil 1. řádu, jak je to provedeno v řešeném příkladu ve skriptech. To ale ve cvičení není nutné.

n ... poměrná normálová síla (viz štíhlost)

n_{bal} ... hodnota n při maximální momentové únosnosti; použít hodnotu 0,4

- Součinitel zohledňující dotvarování k_φ :

$$k_\varphi = 1 + \beta_{fck} \cdot \varphi_{\text{eff},b} \geq 1$$

$\varphi_{\text{eff},b}$... efektivní součinitel dotvarování, ve cvičení uvažujte $\varphi_{\text{ef}} = 1,5 \div 1,8$ (podrobněji viz přednášky a pokročilejší kurzy betonových konstrukcí)

$$\beta_{fck} = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda}{150}$$

- Základní křivost ($1/r_0$):

$$\frac{1}{r_0} = \frac{2\varepsilon_{yd}}{d - d_1}$$

ε_{yd} ... návrhová hodnota poměrného přetvoření oceli na mezi kluzu; pro ocel B 500 B:
 $\varepsilon_{yd} = 2,175 \cdot 10^{-3}$

d ... staticky účinná výška průřezu; v tuto chvíli odhadneme profil podélné výztuže jako 16 až 25 mm, profil třmíneků jako 8 mm a krycí vrstvu přebereme z 1. cvičení.

d_1 ... vzdálenost těžiště tažené výztuže od povrchu průřezu, $d_1 = h - d$

Odhad návrhového ohybového momentu s účinky 2. řádu

- Návrhový ohybový moment včetně vlivu 2. řádu:

$$M_{Ed} = \max \left(|M_{02}|; M_{0Ed} + M_2; |M_{01}| + |0,5M_2| + |2M_{imp}|; |N_{Ed}| \cdot \max \left(\frac{h}{30}; 20 \text{ mm} \right) \right)$$

Sčítance třetího členu je potřeba "složit" (sečíst nebo odečíst) s ohledem na to, zda působí na stejném či opačném povrchu prvku. Dejte pozor, abyste ve výsledku neměli M_{imp} započtený 3x na téže straně!

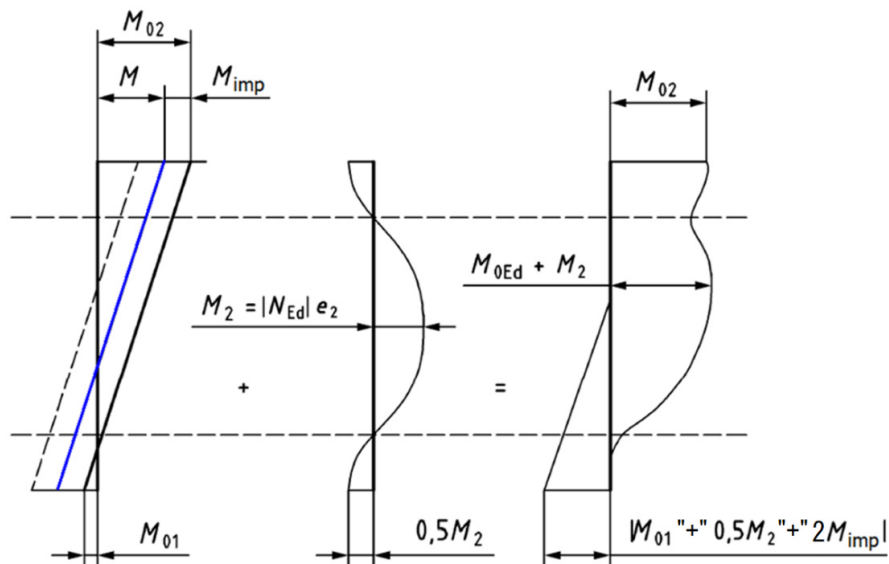


Schéma průběhu momentů na sloupu. Vlevo momenty prvního řádu, uprostřed momenty druhého řádu, vpravo obálka momentů s vlivem 2. řádu pro sloup umístěný ve ztužené konstrukci.

M_{0Ed} ... ekvivalentní hodnota momentu prvního řádu uvnitř výšky sloupu:

$$M_{0Ed} = C_m \cdot |M_{02}|$$

$$C_m = 0,6 + 0,4 \cdot r_m \geq 0,4$$

$r_m = 1,0$ pokud $|M_{02}| < 0,05 \cdot |N_{Ed}| \cdot h$, jinak $r_m = M_{01}/M_{02}$. Do tohoto vztahu se momenty M_{01} a M_{02} dosazují se skutečnými znaménky.

Návrh podélné výztuže sloupu

- Výztuž navrhne dvěma způsoby:

a) Z **nomogramu** (viz NNKB, nomogramy viz web) stanovíme hodnotu mechanického stupně vyztužení ω . Hodnoty b a h jsou šířka a výška průřezu. M_{Ed} je návrhová hodnota momentu včetně účinků 2. řádu.

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} \quad \nu = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} \quad \xrightarrow{\text{nomogram}} \quad \omega \in \langle 0; 1 \rangle$$

- Pokud vyjde z nomogramu hodnota ω menší než 0, **navrhnete konstrukční výztuž 4 \emptyset 12 mm**. Pokud vyjde hodnota ω větší než 1, **je potřeba zvětšit průřez**.
- Potřebná plocha výztuže ve sloupu je:

$$A_{s,req,1} = \frac{\omega \cdot A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

b) Z předpokladu **dostředného tlaku**:

$$A_{s,req,2} = \frac{N_{Ed} - 0,8 \cdot A_c \cdot f_{cd}}{\sigma_s} \quad \sigma_s = 400 \text{ MPa}$$

- Pro návrh uvažujte **větší ze spočtených hodnot**: $A_{s,req} = \max(A_{s,req,1}; A_{s,req,2})$. Navrhujte symetrické vyztužení sloupů.
- Plocha navržené výztuže zároveň musí splnit **konstrukční zásady** (pro výpočet světlé vzdálenosti profilů c_s uvažujte $D_{upper} = D_{max} = 22 \text{ mm}$):

$$A_{s,prov} \geq A_{s,min} = \max\left(0,1 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}; 0,002 \cdot A_c\right)$$

$$A_{s,prov} \leq A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c$$

$$\emptyset_s \geq 12 \text{ mm}$$

$$c_s \geq c_{s,min} = \max(\emptyset; D_{upper} + 5 \text{ mm}; 20 \text{ mm})$$

- Navrhne profil a počet prutů výztuže. V rámečku bude zřetelně napsáno:
„NÁVRH: $n \times \emptyset_s$ ($A_{s,prov} = \dots \text{ mm}^2$)“, tedy např.:

NÁVRH: 6 \emptyset 16 mm ($A_{s,prov} = 1206 \text{ mm}^2$)
--

Posouzení sloupu s navrženou výztuží

- Protože již známe skutečné vyztužení sloupu, je možno přesně spočítat mechanický stupeň vyztužení ω (za A_s dosadíme navrženou plochu výztuže $A_{s,prov}$):

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

- Zpřesníme dříve odhadnutou hodnotu n_u (poměrná normálová únosnost při dostředném tlaku):

$$n_u = 1 + \omega$$

- Spočteme skutečnou hodnotu součinitele k_r (opravný součinitel závisící na normálové síle):

$$k_r = \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1$$

- Spočteme skutečnou hodnotu křivosti:

$$\frac{1}{r} = k_r \cdot k_\phi \cdot \frac{1}{r_0}$$

- Spočteme skutečnou hodnotu deformace 2. řádu:

$$e_2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{l_0^2}{c_{1/r}}$$

- Spočteme skutečnou hodnotu momentu 2. řádu M_2 :

$$M_2 = |N_{Ed}| \cdot e_2$$

- Spočteme skutečný návrhový moment M_{Ed} (dlouhý vztah na straně 4). Každý student ve svém úkolu **povinně vykreslí schéma průběhu momentů s vlivem 2. řádu na sloupu** (viz obrázek na straně 4 nebo řešení příklad ve skriptech).
- Sloup s výztuží posoudíme pomocí **interakčního diagramu** (viz NNKB). Možno použít software (např. InDiOn, FIN EC, SCIA Concrete Section, interakční diagram vytvořený v Excelu, aj.).
 - InDiOn (autoři Holan, Štefan): <http://people.fsv.cvut.cz/~holanjak/software/indion>
 - FIN EC: Demoverze: https://www.fine.cz/ke-stazeni/stazeni/41/cs/finecdemo_cs/
Studentská licence: <https://www.fine.cz/akademicke-licence/studentska-licence/zadost/>
⇒ objednávkový formulář, potvrzení o studiu, výpis z KOSu + vratná záloha za klíč
 - SCIA Concrete Section - funkční pro zkušební licenci:
(<https://www.scia.net/cs/forms/zadost-o-zkusebni-licenci-scia-engineer>),
ke stažení zde: <https://www.scia.net/cs/support/downloads/scia-concrete-section-0>
- Do diagramu vyneseme kombinaci momentu M_{Ed} s vlivem 2. řádu a normálové síly N_{Ed} z KZS1. Pokud bod leží uvnitř diagramu, sloup vyhoví.
- Pokud sloup nevyhoví, **nemusíte přepočítávat a překreslovat interakční diagram**. Při konzultaci se pouze domluvte na úpravě vyztužení.

Skica výztuže sloupu

- Na A4, možno v ruce nebo v CADu

Třmínky ve sloupu

- Profil zvolíme (6 – 10 mm) tak, aby byl alespoň ¼ profilu svislé výztuže sloupu.
- Ve **střední části sloupu** se osová vzdálenost třmínků určí podle vztahu:

$$s_1 \leq \min(20\phi ; b; h; 300 \text{ mm})$$

kde ϕ je profil podélné výztuže, nikoliv profil třmínků!

- V **oblasti stykování výztuže přesahem a v oblasti max (b; h) nad a pod trámem** je nutno třmínky zahustit na vzdálenost $s_2 = 0,6 \cdot s_1$ (b, h jsou rozměry průřezu sloupu).

Přesahová délka

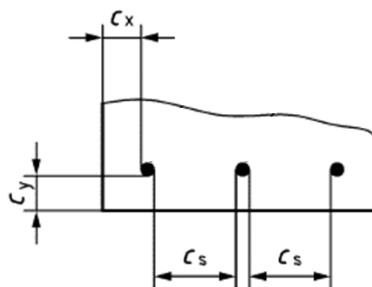
- Postup výpočtu viz NNKB nebo skripta, příklad 2. Použijeme výpočet s využitím obecného vztahu.
- Přesahová délka se spočte z **kotevní délky** l_{bd} :

$$l_{bd} = k_{lb} \cdot k_{cp} \cdot \phi \cdot \left(\frac{\sigma_{sd}}{435}\right)^{n_\sigma} \cdot \left(\frac{25}{f_{ck}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\phi}{20}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1,5\phi}{c_d}\right)^{\frac{1}{2}} \geq 10\phi$$

- $k_{lb} = 50$ (trvalá návrhová situace); $k_{cp} = 1,0$ (dobré podmínky soudržnosti); $n_\sigma = 1,5$ (konstanta);
- Napětí ve výztuži σ_{sd} se stanoví ze vztahu:

$$\sigma_{sd} = f_{yd} \cdot \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}}$$

- Efektivní krytí prutů $c_d = \min(0,5c_s; c_x; c_y)$ – viz obrázek níže. Předpokládáme, že pruty budou opatřeny krepováním a stykovány ve dvou řadách. Není tedy třeba redukovat c_s jako při stykování v jedné řadě, které je typické u desek.



- Přesahová délka l_{sd} :

$$l_{sd} = 1,2l_{bd} \geq 15\phi$$

- V případě konstrukčního vyztužení sloupu ($A_{s,req} = 0$) vychází přesahová délka velmi malá ($15 \cdot 12 = 180 \text{ mm}$). V tom případě je potřeba pro návrh stykování zohlednit i výšku armokoše a vliv technologie výstavby (stabilitní zajištění navázaného armokoše) \Rightarrow **doporučená přesahová délka min. 500 mm.**