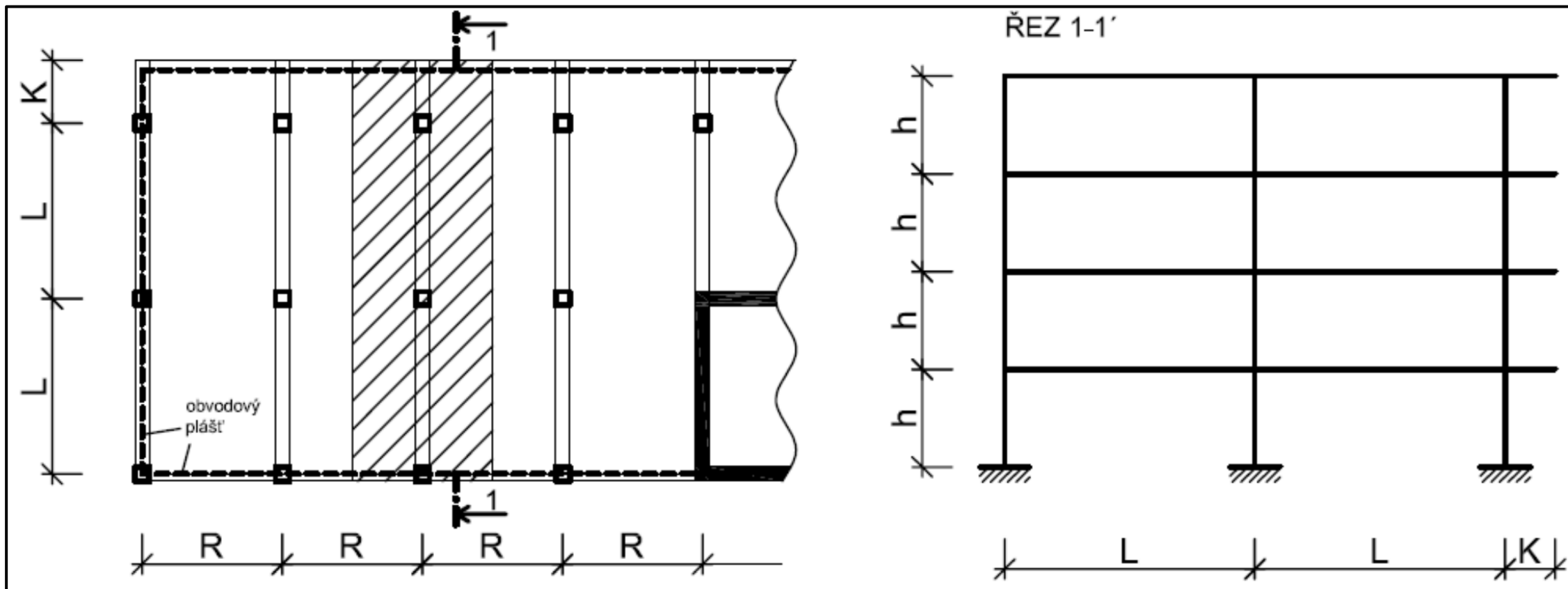




Železobetonová rámová konstrukce

Návrh výztuže a posouzení průřezů sloupu

Řešená konstrukce



Všechny kroky návrhu a posouzení

1. Návrh rozměrů a výpočet zatížení
2. Statický výpočet
 - a) Vnitřní síly pomocí SCIA 21
 - b) Redistribuce a redukce momentů
 - c) Návrh výztuže a posouzení průřezů příčle – ohyb a smyk
 - d) Návrh výztuže a posouzení průřezů sloupu – kombinace ohybu a tlaku (interakční diagram)**
3. Schéma vyztužení rámu
4. Výkres výztuže části rámu

Aktuální krok návrhu a posouzení

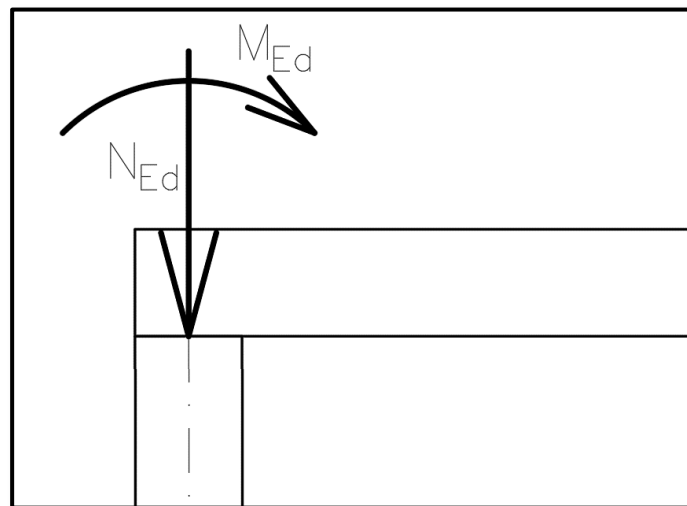
2. d) Statický výpočet – Návrh výztuže a posouzení průřezů sloupu – kombinace ohybu a tlaku (interakční diagram)

- 1) Určíme **vnitřní síly** ve sloupu.
- 2) Zjistíme, zda je sloup **štíhlý***.
- 3) **Zkontrolujeme vnitřní síly**.
- 4) **Navrhujeme výztuž**.
- 5) **Posoudíme průřez**.

Vnitřní síly ve sloupu

Zatížení sloupu

Z programu SCIA jsme získali **normálovou sílu** (N_{Ed}) a **ohybový moment** (M_{Ed}) působící na střednici sloupu. Tyto hodnoty jsou vypočítané **pro ideální konstrukci***.



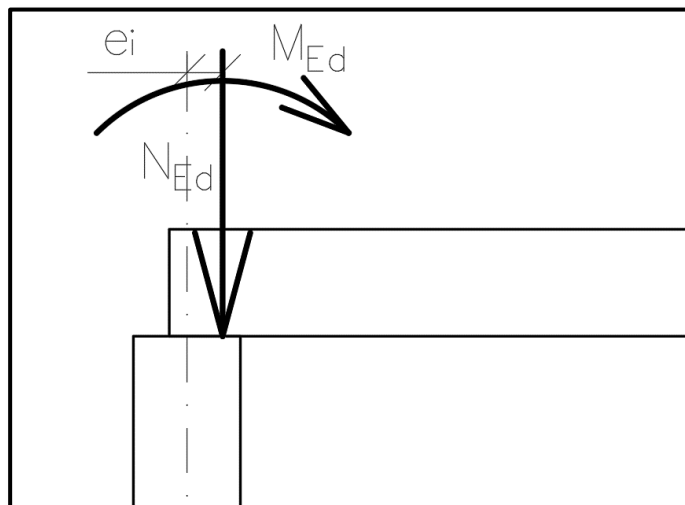
Zatížení sloupu

Ve skutečnosti však při výstavbě **vznikají různé geometrické odchylky***, které **způsobují přídatné ohybové namáhání**

$$M_{imp} = N_{Ed} e_i,$$

kde N_{Ed} je působící normálová síla,

e_i je výstřednost způsobená geometrickými odchylkami.



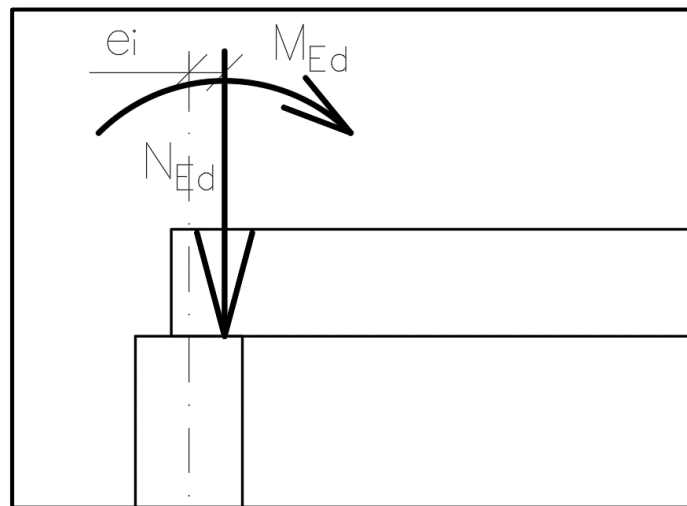
Zatížení sloupu

Ve skutečnosti však při výstavbě **vznikají různé geometrické odchylky***, které **způsobují přídatné ohybové namáhání**

$$M_{imp} = N_{Ed} e_i,$$

kde N_{Ed} je působící normálová síla,

e_i je výstřednost způsobená geometrickými odchylkami.



Geometrická imperfekce

Výstřednost od geometrické imperfekce určíme **pomocí vztahu**

$$e_i = \theta_i l_0 / 2,$$

kde $\theta_i = \theta_0 \alpha_h \alpha_m$, (úhel vychýlení od svislice)

kde $\theta_0 = 1/200$, (základní hodnota vychýlení)

$\alpha_h = \min \left(\max \left(2/3, \frac{2}{\sqrt{H}} \right), 1 \right)$, (redukční součinitel výšky podlaží)

kde H je výška sloupu (tj. výška podlaží),

$\alpha_m = \sqrt{0.5(1 + 1/m)}$, (redukční součinitel počtu prvků)

kde m je počet sloupů v jednom podlaží,

$l_0 = 0.8l$, (účinná (vzpěrná) délka sloupu*)

kde l je světlá výška sloupu.

Ohybový moment I. řádu

Pro návrh a posouzení sloupu budeme uvažovat, že **současně působí ohybový moment od zatížení M_{Ed} a ohybový moment od geometrické odchylky M_{imp}** . Tento moment se nazývá **ohybový moment I. řádu**

$$M_{Ed,I} = M_{Ed} + M_{imp}.$$

V našem případě **máme 3 kombinace zatěžovacích stavů (KZS) a musíme je všechny řešit.**

Ohybový moment I. řádu

Máme celkem **3 KZS** a **řešíme** vždy namáhání **v hlavě i patě** sloupu*.

		Hlava	Pata
KZS1			
KZS2			
KZS3			

Ohybový moment I. řádu

Z programu SCIA jsme získali **lineárně stanovené momenty od zatížení.**

		Hlava	Pata
KZS1	M_{Ed}	7	-17
KZS2	M_{Ed}	15	-9
KZS3	M_{Ed}	17	-25

Ohybový moment I. řádu

V hlavě i patě může **navíc** působit **moment od imperfekcí** $M_{imp} = N_{Ed}^* e_i$.

		Hlava	Pata
	$ M_{imp} $	8	10
KZS1	M_{Ed}	7	-17
KZS2	M_{Ed}	15	-9
KZS3	M_{Ed}	17	-25

Ohybový moment I. řádu

V hlavě i patě může **navíc** působit **moment od imperfekcí** $M_{imp} = N_{Ed}^* e_i$.

		Hlava	Pata
	$ M_{imp} $	8	10
KZS1	M_{Ed}	7	-17
KZS2	M_{Ed}	15	-9
KZS3	M_{Ed}	17	-25

* Správně bychom měli brát N_{Ed} dle dané KZS, ale pro zjednodušení (a bezpečně) bereme největší N_{Ed} (z KZS1).

Ohybový moment I. řádu

Tento moment od imperfekcí **může působit** jak **kladně**, tak **záporně**.

		Hlava	Pata
	$ M_{imp} $	8	10
KZS1	M_{Ed}	7	-17
	$M_{Ed} + M_{imp}$	15	-7
	$M_{Ed} - M_{imp}$	-1	-27
KZS2	M_{Ed}	15	-9
	$M_{Ed} + M_{imp}$	23	1
	$M_{Ed} - M_{imp}$	7	-19
KZS3	M_{Ed}	17	-25
	$M_{Ed} + M_{imp}$	25	-15
	$M_{Ed} - M_{imp}$	9	-35

Ohybový moment I. řádu

Pro návrh výztuže a posouzení průřezu **nás zajímají**, *které vnitřní síly?*

		Hlava	Pata
	$ M_{imp} $	8	10
KZS1	M_{Ed}	7	-17
	$M_{Ed} + M_{imp}$	15	-7
	$M_{Ed} - M_{imp}$	-1	-27
KZS2	M_{Ed}	15	-9
	$M_{Ed} + M_{imp}$	23	1
	$M_{Ed} - M_{imp}$	7	-19
KZS3	M_{Ed}	17	-25
	$M_{Ed} + M_{imp}$	25	-15
	$M_{Ed} - M_{imp}$	9	-35

Ohybový moment I. řádu

Pro návrh výztuže a posouzení průřezu nás zajímají **celkové maximální momenty** a **maximální momenty při největší normálové síle** v hlavě a v patě sloupu.

		Hlava	Pata
	$ M_{imp} $	8	10
KZS1	M_{Ed}	7	-17
	$M_{Ed} + M_{imp}$	15	-7
	$M_{Ed} - M_{imp}$	-1	-27
KZS2	M_{Ed}	15	-9
	$M_{Ed} + M_{imp}$	23	1
	$M_{Ed} - M_{imp}$	7	-19
KZS3	M_{Ed}	17	-25
	$M_{Ed} + M_{imp}$	25	-15
	$M_{Ed} - M_{imp}$	9	-35

Ověření štíhlosti sloupu

Ověření štíhlosti sloupu

Před návrhem a posouzením **musíme stanovit, zda je sloup štíhlý***, pomocí vztahu

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

kde λ je **štíhlost sloupu**,
 λ_{lim} je **limitní štíhlost**.

Ověření štíhlosti sloupu

Před návrhem a posouzením **musíme stanovit, zda je sloup štíhlý***, pomocí vztahu

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

kde λ je **štíhlost sloupu**,
 λ_{lim} je **limitní štíhlost**.

*Děláme to, protože když je sloup štíhlý, tak to znamená, že se při zatížení bude hodně deformovat. A tuto velkou deformaci musíme vzít v potaz při návrhu a posouzení – viz dále.

Štíhlost sloupu

Štíhlost sloupu je vlastnost navrženého sloupu a určí se pomocí vztahu

$$\lambda = \frac{l_0}{\sqrt{I/A_c}},$$

kde l_0 je vzpěrná délka sloupu (uvažujeme jako 0.8× světla výška sloupu),
 I je moment setrvačnosti ve vyšetřovaném směru (v rovině rámu),
 A_c je průřezová plocha sloupu.

Limitní štíhlost λ_{lim}

Limitní štíhlost je hodnota daná normou a určí se pomocí vztahu

$$\lambda_{lim} = \min\left(\frac{20ABC}{\sqrt{n}}, 75\right),$$

kde $n = N_{Ed}/(A_c f_{cd})$ (poměrná normálová síla),

kde A je vliv **dotvarování** betonu (bezpečně $A = 0.7$),

B je vliv **stupně vyztužení** podélnou výztuží (bezpečně $B = 1.1$),

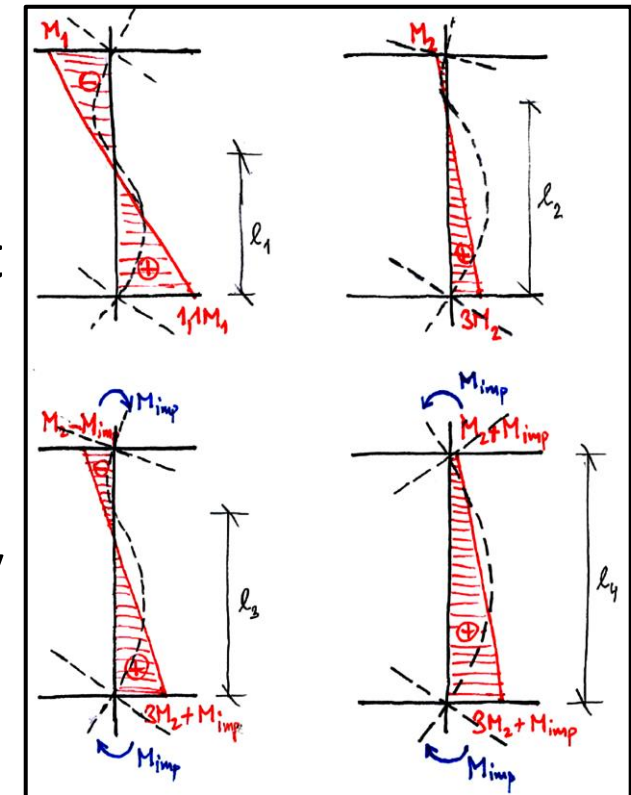
C je vliv **ohybových momentů** (viz dále),

Součinitel C – vliv ohybových momentů

Součinitel C se týká toho jak* působí momenty, a tudíž, jak se sloup deformuje.

Pokud jsou **momenty převážně** vyvozeny **imperfekcemi** ($M_{imp} > M_{Ed}$), bereme rovnou nejpřísnější možnost **$C = 0.7$** .

V případě, kdy **momenty nejsou převážně** vyvozeny **imperfekcemi** ($M_{imp} \leq M_{Ed}$) viz dále.



Součinitel C – vliv ohybových momentů

I v případě, kdy **momenty nejsou převážně** vyvozeny **imperfekcemi** ($M_{imp} \leq M_{Ed}$), můžeme **nejprve pro jednoduchost** zvolit **nejnepříznivější** variantu $C = 0.7$ a vyzkoušet, zda s touto hodnotou sloup vyhovuje na štíhlost ($\lambda \leq \lambda_{lim}$).

Pokud s $C = 0.7$ sloup nevyhoví, pak je třeba **součinitel C stanovit přesněji**

$$C = 1.7 - M_{01}/M_{02},$$

kde M_{01} a M_{02} jsou ohybové momenty I. řádu v hlavě a v patě sloupu, kde M_{02} je ten moment, který je v absolutní hodnotě větší.

Součinitel C – vliv ohybových momentů

Pokud stanovujeme součinitel C pomocí vztahu

$$C = 1.7 - M_{01}/M_{02},$$

pak **musíme poměr M_{01}/M_{02} stanovit pro všechny kombinace momentů M_{01} a M_{02} a vybereme tu nejnepříznivější hodnotu – tj. *kterou?***

		Hlava	Pata	M_{01}/M_{02}
$ M_{imp} $		8	10	
KZS1	M_{Ed}	7	-17	-0.412
	$M_{Ed} + M_{imp}$	15	-7	-0.467
	$M_{Ed} - M_{imp}$	-1	-27	0.037
KZS2	M_{Ed}	15	-9	-0.600
	$M_{Ed} + M_{imp}$	23	1	0.043
	$M_{Ed} - M_{imp}$	7	-19	-0.368
KZS3	M_{Ed}	17	-25	-0.680
	$M_{Ed} + M_{imp}$	25	-15	-0.600
	$M_{Ed} - M_{imp}$	9	-35	-0.257

Součinitel C – vliv ohybových momentů

Pokud stanovujeme součinitel C pomocí vztahu

$$C = 1.7 - M_{01}/M_{02},$$

pak **musíme poměr M_{01}/M_{02} stanovit pro všechny kombinace momentů M_{01} a M_{02} a vybereme tu nejnepříznivější hodnotu – tj. co největší hodnotu.**

		Hlava	Pata	M_{01}/M_{02}
$ M_{imp} $		8	10	
KZS1	M_{Ed}	7	-17	-0.412
	$M_{Ed} + M_{imp}$	15	-7	-0.467
	$M_{Ed} - M_{imp}$	-1	-27	0.037
KZS2	M_{Ed}	15	-9	-0.600
	$M_{Ed} + M_{imp}$	23	1	0.043
	$M_{Ed} - M_{imp}$	7	-19	-0.368
KZS3	M_{Ed}	17	-25	-0.680
	$M_{Ed} + M_{imp}$	25	-15	-0.600
	$M_{Ed} - M_{imp}$	9	-35	-0.257

teorie navíc

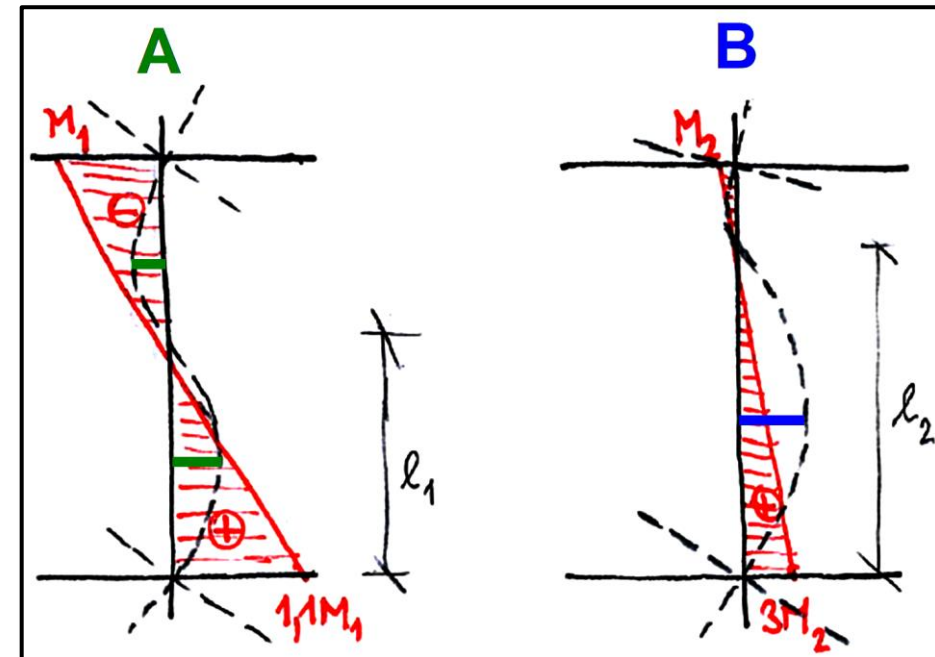
Součinitel C – vliv ohybových momentů

Řešíme poměr momentů (a ne jejich hodnoty), protože riziko vybočení sloupu nesouvisí s velikostí momentů, ale právě s jejich poměrem.

Příklad:

V případě **A** jsou sice **velké momenty**, ale jsou přibližně **stejně velké a každý na jiné straně**, takže z hlediska deformace sloup se jejich účinek „vyruší“ a **sloup vybočuje málo**.

V případě **B** jsou **momenty menší**, ale protože je **jeden výrazně menší než ten druhý**, tak se jejich účinek „nevyruší“ a **sloup vybočuje hodně**.



Ověření štíhlosti sloupu

Po stanovení štíhlosti sloupu λ a limitní štíhlosti λ_{lim} můžeme posoudit podmínku

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

Pokud **podmínka vyhoví**, znamená to, že **sloup je masivní a můžeme pokračovat dál** s kombinací vnitřních sil $N_{Ed} + M_{Ed,I}$.

Pokud podmínka nevyhoví – viz další slide.

Ověření štíhlosti sloupu – moment 2. řádu

Pokud **podmínka** $\lambda \leq \lambda_{lim}$ **nevyhoví**, znamená to, že **sloup je štíhlý** a **musíme vypočítat moment II. řádu**, který přičteme* k momentu I. řádu

$$M_{Ed,I+II} = M_{Ed,I} + M_2.$$

Pro výpočet momentu II. řádu v této úloze můžete použít výpočetní pomůcku

<http://people.fsv.cvut.cz/~holanjak/software/moment2radu/krivost.xlsx>

Ve výpočtu pak dál pokračujeme s kombinací vnitřních sil $N_{Ed} + M_{Ed,I+II}$.

Ověření štíhlosti sloupu – moment 2. řádu

Při uvažování vlivu momentu 2. řádu bychom správně měli nejprve stanovit **ekvivalentní moment**

$$M_{0e} = \max(0.6M_{02} + 0.4M_{01}; 0.4M_{02}),$$

kde M_{01} a M_{02} jsou momenty 1. řádu* v hlavě a patě sloupu, kde platí $|M_{02}| \geq |M_{01}|$.

Moment včetně vlivu 2. řádu pak určíme jako

$$M_{Ed,I+II} = \max(M_{02}; M_{0e} + M_2; M_{01} + 0.5M_2; N_{Ed}e_0).$$

V tomto úkolu si však vystačíme s výše uvedeným $M_{Ed,I+II} = M_{Ed,I} + M_2$.

Kontrola vnitřních sil

Kontrola vnitřních sil

Norma předepisuje, že vždy musíme uvažovat **minimální výstřednost síly**

$$e_0 = \max(h/30 ; 20 \text{ mm}),$$

kde h je výška průřezu (tj. šířka sloupu ve směru rámu).

Pokud je skutečná výstřednost $e = M_{Ed,I}/N_{Ed}$ (případně $e = M_{Ed,I+II}/N_{Ed}$) menší než minimální výstřednost, je nutné jako ohybový moment uvažovat hodnotu

$$M_{Ed,0} = e_0 N_{Ed}$$

kde N_{Ed} je působící normálová síla z programu SCIA.

Kontrola vnitřních sil

Pro návrh výztuže a posouzení průřezu tedy použijeme

- normálovou sílu z programu SCIA N_{Ed} ,
- ohybový moment prvního řádu $M_{Ed,I}$, nebo v případě štíhlých sloupů moment prvního i druhého řádu $M_{Ed,I+II}$, nebo minimální ohybový moment $M_{Ed,0}$.

Návrh výztuže sloupu

Návrh výztuže sloupu

Návrh výztuže můžeme udělat jakkoliv*. Rozumný návrh můžeme udělat *jakými způsoby?*

Návrh výztuže sloupu

Návrh výztuže můžeme udělat jakkoliv*. Rozumný návrh můžeme udělat následujícími způsoby:

- **iterační** metodou pomocí vlastního **Excelu** pro posouzení průřezu,
- z předpokladu **dostředného tlaku**.

Více viz výklad k NNKB:

- <http://people.fsv.cvut.cz/~holanjak/vyuka/NNKB/prezentace/cv10.pdf>
- <https://www.youtube.com/watch?v=JNjqNe7w1aE>

* Protože norma nám nijak neudává, jak má být proveden návrh, ale pouze to, že posouzení musí vyhovět.

Návrh výztuže sloupu

Navržená výztuž musí splňovat konstrukční zásady

$$A_{s,min} \leq A_{s,prov} \leq A_{s,max},$$

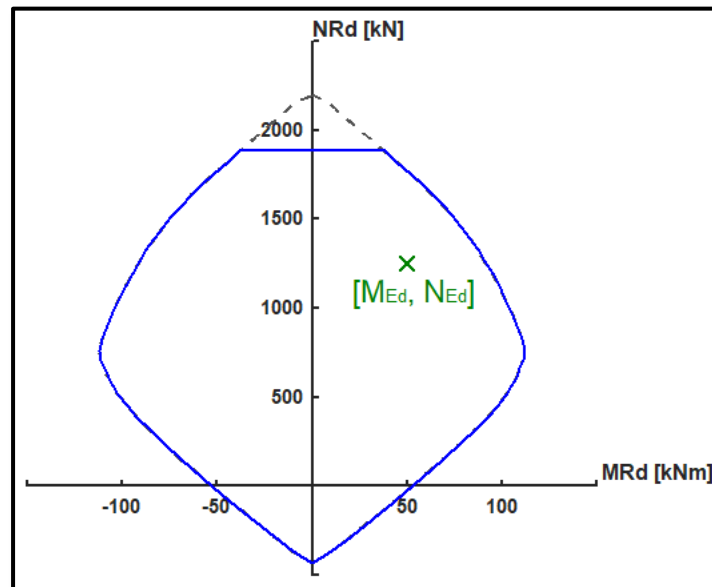
$$\max\left(0.1 \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}; 0.002A_c\right) \leq A_{s,prov} \leq 0.04A_c,$$

kde N_{Ed} je maximální normálová síla působící ve sloupu,
 A_c je průřezová plocha sloupu.

Posouzení průřezů sloupu

Posouzení průřezů sloupu

Posouzení průřezu sloupu* děláme **pomocí interakčního diagramu[†]**.
Nejprve sestojíme interakčního diagram průřezu a následně do něj vyneseme bod znázorňující působící vnitřní síly.

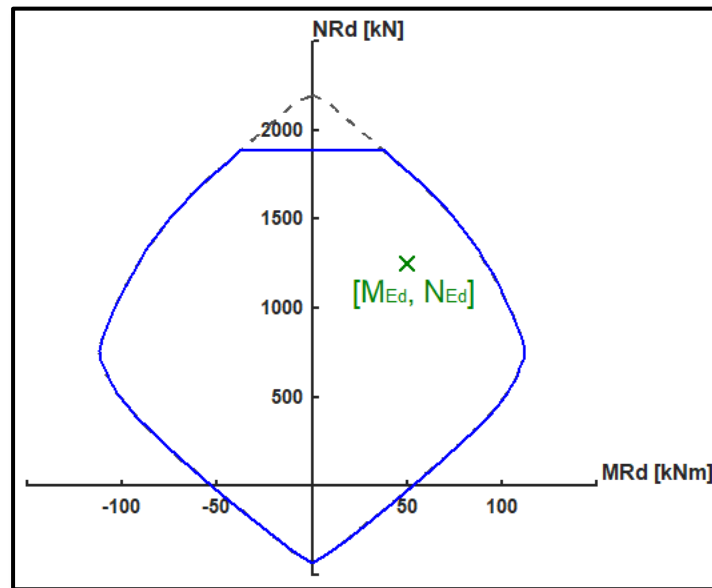


* Nebo obecně jakéhokoliv prvku namáhaného kombinací normálové síly a ohybového momentu.

[†] *Co to je?*

Posouzení průřezů sloupu

Posouzení průřezu sloupu* děláme **pomocí interakčního diagramu**[†]. Nejprve sestojíme interakčního diagram průřezu a následně do něj vyneseme bod znázorňující působící vnitřní síly.



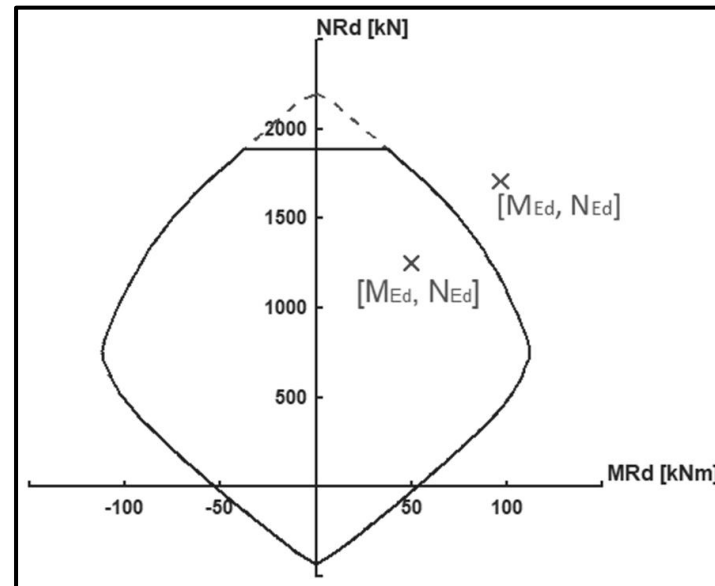
* Nebo obecně jakéhokoliv prvku namáhaného kombinací normálové síly a ohybového momentu.

[†] Interakční diagram průřezu je křivka, která znázorňuje únosnost průřezu pro všechny možné různé kombinace namáhání.

Posouzení průřezů sloupu

Pokud **bod** leží **uvnitř** digramu, návrh *vyhovuje/nevyhovuje?*

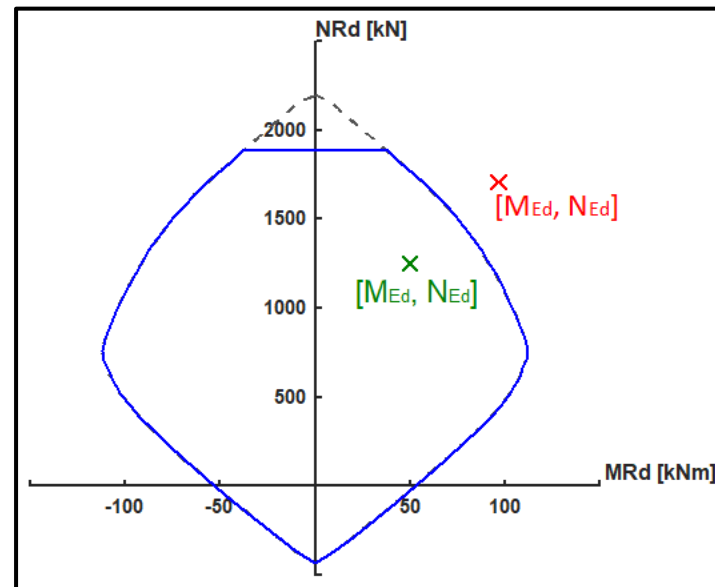
Pokud **bod** leží **mimo** diagram, návrh *vyhovuje/nevyhovuje?*



Posouzení průřezů sloupu

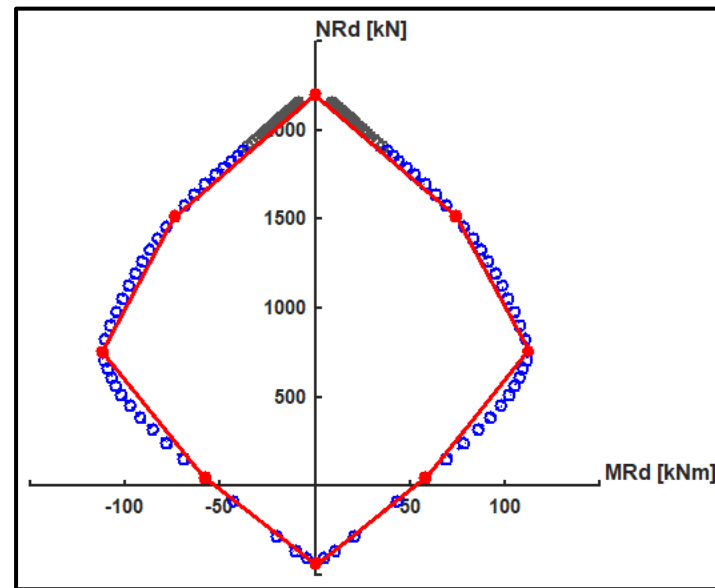
Pokud **bod** leží **uvnitř** digramu, návrh **vyhovuje**.

Pokud **bod** leží **mimo** diagram, návrh **nevyhovuje**.



Sestrojení interakčního diagramu

Pro rychlejší* posouzení průřezu používáme **bodový interakční diagram**[†].



* a zároveň i bezpečnější

† tj. diagram sestavený pouze z několika „speciálních“ bodů

Sestrojení interakčního diagramu

Bodový interakční diagram se skládá ze šesti bodů

- Bod 0 – maximální únosnost v tlaku (*čím je tento bod speciální?*),
- Bod 1 – neutrální osa prochází výztuží 1 (*čím je tento bod speciální?*),
- Bod 2 – maximální momentová únosnost (*čím je tento bod speciální?*),
- Bod 3 – prostý ohyb (*čím je tento bod speciální?*),
- Bod 4 – Neutrální osa prochází výztuží 2 (*čím je tento bod speciální?*),
- Bod 5 – maximální únosnost v tahu (*čím je tento bod speciální?*).

Sestrojení interakčního diagramu

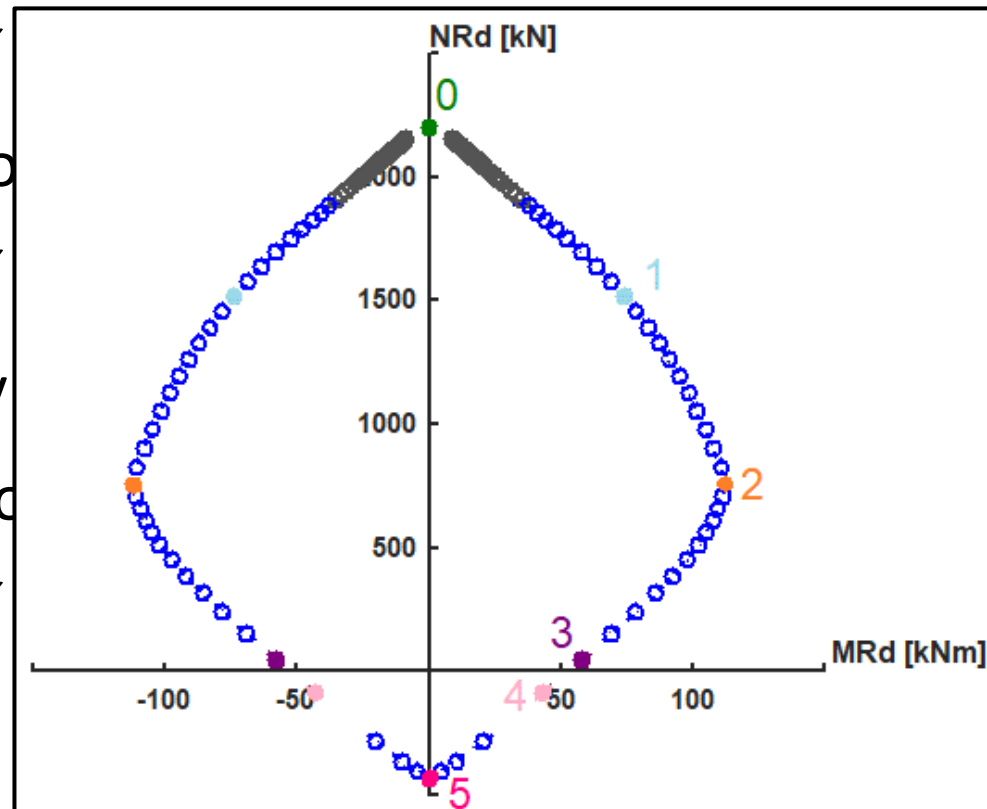
Bodový interakční diagram se skládá ze šesti bodů

- Bod 0 – maximální únosnost v tlaku ($M_{Rd} = 0$),
- Bod 1 – neutrální osa prochází výztuží 1 ($\varepsilon_{s1} = 0 \rightarrow \sigma_{s1} = 0 \rightarrow F_{s1} = 0$),
- Bod 2 – maximální momentová únosnost ($M_{Rd,max}$),
- Bod 3 – prostý ohyb ($N_{Rd} = 0$),
- Bod 4 – Neutrální osa prochází výztuží 2 ($\varepsilon_{s2} = 0 \rightarrow \sigma_{s2} = 0 \rightarrow F_{s2} = 0$),
- Bod 5 – maximální únosnost v tahu ($M_{Rd} = 0$).

Sestrojení interakčního diagramu

Bodový interakční diagram se skládá ze šesti bodů

- **Bod 0** – maximální
- **Bod 1** – neutrální o
- **Bod 2** – maximální
- **Bod 3** – prostý ohy
- **Bod 4** – Neutrální o
- **Bod 5** – maximální



$$F_{s1} = 0 \rightarrow F_{s1} = 0),$$

$$F_{s2} = 0 \rightarrow F_{s2} = 0),$$

Výpočet bodů interakčního diagramu

Všechny body se obecně počítají stejným postupem

- 1) Určíme výšku tlačené oblasti.
- 2) Vypočteme přetvoření výztuží.
- 3) Vypočteme napětí ve výztužích.
- 4) Vypočteme síly ve výztužích a sílu v betonu.
- 5) Vypočteme únosnost N_{Rd} a M_{Rd} .

Rozdíl ve výpočtu u jednotlivých bodů je jen v tom, že **každý bod má nějaká specifika**, která výpočet zjednodušují* nebo zesložitují†.

* např. body 1 a 4, kde napětí ve výztuži 1 a 2 jsou nulová

† např. bod 3, kde musíme iteračně/analyticky hledat výšku tlačené oblasti

Sestrojení interakčního diagramu

Postup výpočtu bodů a sestrojení interakčního diagramu jsme probírali už v NNKB. Pro připomenutí si můžete projít PDF prezentace ([únosnost](#), [posouzení](#)) nebo videa ([únosnost](#), [posouzení](#)).

Případné další podklady jsou [výťah z diplomové práce](#) a [vzorový postup výpočtu](#).

Pro kontrolu můžete použít [program InDiOn](#).

Posouzení průřezu

Po sestrojení interakčního diagramu průřezu můžeme **posoudit průřez tak, že do něj vykreslíme body znázorňující namáhání průřezu** $[N_{Ed}, M_{Ed}]^*$.

Do interakčního diagramu průřezu vyneseme **celkem čtyři body**

- vnitřní síly v hlavě sloupu pro **celkově největší moment**,
- vnitřní síly v patě sloupu pro **celkově největší moment**,
- vnitřní síly v hlavě sloupu pro největší moment **při největší normálové síle**,
- vnitřní síly v patě sloupu pro největší moment **při největší normálové síle**.

		Hlava	Patá
	$ M_{imp} $	8	10
KZS1	M_{Ed}	7	-17
	$M_{Ed} + M_{imp}$	15	-7
	$M_{Ed} - M_{imp}$	-1	-27
KZS2	M_{Ed}	15	-9
	$M_{Ed} + M_{imp}$	23	1
	$M_{Ed} - M_{imp}$	7	-19
KZS3	M_{Ed}	17	-25
	$M_{Ed} + M_{imp}$	25	-15
	$M_{Ed} - M_{imp}$	9	-35

Díky za pozornost

Poděkování

Děkuji **Radku Štefanovi, Tomáši Trtíkovi, Romanu Chylíkovi** za časté konzultace při vypracovávání prezentace.

Děkuji **Petru Bílému a Martinovi Tipkovi** za vytvoření a udržování oficiálních podkladů, ze kterých vychází tato prezentace.