

OCELOVÉ KONSTRUKCE (OK01)

**Prof. Josef Macháček - B623
(akad. rok 2018/2019)**

Doporučená literatura:

- Trahair, Bradford, Nethercot, Gardner: The behaviour and design of steel structures to EC3. Taylor & Francis, 2008, 490 s. (ISBN: 978-0-415-41865-2)
- Dowling, Knowles, Owens: Structural Steel Design. Butterworths London, 1988, 399 s. (ISBN: 0-408-03717-2)
- Macháček, Studnička: Ocelové konstrukce 20. Skriptum ČVUT, 2002, 309 s.

- | | |
|-------------------------|--|
| 1. týden: | Globální analýza OK. Kroucení prutů. |
| 2. týden: | Interakce. Členěné prvky. Ocelobetonové nosníky a sloupy. |
| 3. týden: | Stabilita stěn. |
| 4. týden: | Tenkostěnné za studena tvarované prvky. Únava. |
| 5. týden: | Ocelové skelety budov. Dispozice, stropy. |
| 6. týden: | Sloupy, patky, kotvení, ztužidla. |
| 7. týden: | Halové stavby. Dispozice, střešní konstrukce. |
| 8. týden: | Střešní ztužení, vetknuté patky sloupů. Rámové haly. |
| 9. týden: | Obvodové stěny. Jeřáby, nosníky mostových jeřábů. |
| 10. týden: | Haly velkých rozpětí. |
| 11. týden: | Vysoké budovy, návrh na zemětřesení. |
| 12. ÷ 13. týden: | Rezerva pro přednášky externistů. |

OK01 – Ocelové konstrukce (1)

1

1. Globální analýza OK. Kroucení prutů.

Volba oceli pro konstrukce, globální analýza konstrukce, imperfekce, klasifikace konstrukcí z hlediska stability a metod řešení.

Kroucení otevřených a uzavřených profilů.

Volba oceli pro konstrukce

Rozdělení ocelí podle ČSN EN 10020 (Definice a rozdělení ocelí):

- **nelegované (uhlíkové):** mají stanoven max. obsah legujících prvků.
 - jakostní (konstrukční oceli - např. S235, S275, S355),
 - ušlechtilé (strojní oceli).
- **legované:** mají větší obsah legur než je stanoveno pro nelegované.
 - jakostní,
 - ušlechtilé (kontrolované složení a výroba – např. S420, S460, S355W)
- **korozivzdorné:** mají stanoveno min. 10,5 % Cr, max 1,2 % C.
 - např. „nerezové“ austenitické oceli 1.4301, 1.4401,
 - nebo „nerezové“ duplexní oceli 1.4462.

Volba oceli pro nosné konstrukce

Hledisko pevnosti:

- běžně nelegované oceli jakostní: S235, S355;

- kvalitnější oceli podle potřeby:

jemnozrnné oceli s vyšší nebo vysokou mezí kluzu (S420, S460 ... S960);

nyní se často volí i pro část konstrukce v místě většího namáhání.

Problémy: poněkud dražší, citlivější na veškeré stabilitní problémy (menší χ , χ_{LT} , ρ , χ_w), větší problémy s únavou, vyžadují připravenost výrobce ke zpracování.

(též UHSS: S960, S1100, S1300)

Ocel S690 (DILLIMAX, plech tl. 180 mm)



Beckettův most v Dublinu
(arch S. Calatrava)



Plavba z Rotterdamu

Hledisko křehkého lomu:

- u běžných ocelí podle jakostního stupně (JR, J0, J2, K2);
- u jemnozrnných ocelí jsou křehkolomové vlastnosti podle tepelného zpracování (M, N, ML, NL, Q, QL, QL1) velmi dobré. (Viz též doplňující informace.)

Při výběru oceli se postupuje podle tabulky ČSN EN 1993-1-10 („Houževnatost materiálu a vlastnosti napříč tloušťkou“, viz též doplňující informace).

Stanovuje se potřebný jakostní stupeň podle:

- referenční teploty konstrukce (v ČR se bere $\approx -35-5 = -40$ °C),
- napjatosti od mimořádné kombinace zatížení (jinak pro napětí v tahu nebo v tlaku),
- tloušťky prvku t_{\min} .

Např. pro referenční tahové napětí (velký tah \approx plná únosnost v tahu v základní kombinaci zatížení):

| | | |
|----------|-----------------------------------|-------------------------------|
| S235JR | velký tah: lze pro $t \leq 25$ mm | tlak: lze pro $t \leq 65$ mm |
| S235J2 | velký tah: lze pro $t \leq 50$ mm | tlak: lze pro $t \leq 115$ mm |
| S355J0 | velký tah: lze pro $t \leq 20$ mm | tlak: lze pro $t \leq 70$ mm |
| S355J2 | velký tah: lze pro $t \leq 35$ mm | tlak: lze pro $t \leq 95$ mm |
| S420M, N | velký tah: lze pro $t \leq 35$ mm | tlak: lze pro $t \leq 100$ mm |

Hledisko funkční:

- např. oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi (typ Corten):
S355J0W (obchodní značka v ČR Atmofix A),
S355J2W (Atmofix B, Arcorox®).

Problémy: Oceli jsou jen mírně legovány Cr, Cu, Si, Ni, Mo ... a vyžadují pravidelné omývání dešťovou vodou, hrozí štěrbinová koroze a poškození jiných povrchů od tvoření korozní vrstvy v počátečním stádiu. Vyžadují pečlivé konstruování detailů (lépe mimo městské prostředí).

- nebo oceli korozivzdorné, žáruvzdorné, žáropevné, odolné otěru (jeřábové kolejnice), apod. viz volitelný předmět Nerezové konstrukce.

Hledisko ekonomické:

Ocel je nejkvalitnější běžný stavební materiál, ve srovnání s betonem drahý.

Běžné konstrukce (skelety z válcovaných tyčí – plechy a profily podle oceli 20 ÷ 26 Kč/kg):

výroba konstrukce: cca 35 ÷ 40 Kč/kg

včetně montáže, nátěrů, dokumentace, dopravy: cca 45 ÷ 55 Kč/kg

Velmi náročné konstrukce (mostní a speciální svařované konstrukce):

výroba konstrukce: cca 70 ÷ 80 Kč/kg

včetně montáže, nátěrů, dokumentace, dopravy: cca 100 ÷ 150 Kč/kg

Často se proto kombinuje s betonem:

- **spřažené ocelobetonové konstrukce,**
- **kombinované systémy (mají ocelovou a betonovou část).**

Nejdůležitější oceli pro stavební konstrukce:

- nelegované oceli jakostní, třídy: S235, S275, S355

S235JR, S235J0 (běžné konstrukční oceli) $f_y = 235 \text{ MPa}$, $f_u = 360 \text{ MPa}$

S355J0, S355J2 (běžné konstrukční oceli) $f_y = 355 \text{ MPa}$, $f_u = 490 \text{ MPa}$

Označení stavu: +N (stav normalizačního žíhání), +AR (as rolled).

Úplné značení tedy např.: S235J0+N, S355J2+AR

Pozn.: pro tloušťky prvků $t > 40 \text{ mm}$ jsou meze kluzu i pevnosti nižší (vesměs o 20 MPa).

- legované ušlechtilé jemnozrnné oceli s vyšší mezí kluzu, třídy: S420, S460, S500, S550, S620, S690, S700, S890, S960 (číslo určuje mez kluzu při tloušťce $t \leq 40 \text{ mm}$)

Značení stavu: N, M, NL, ML, Q, Q1 (válcování normalizační; termomechanické; pro nízké teploty s méně P, S; kalené a popouštěné, viz závěr přednášky).

Úplné značení tedy např.: S420ML, S460Q.

- legované ušlechtilé oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi

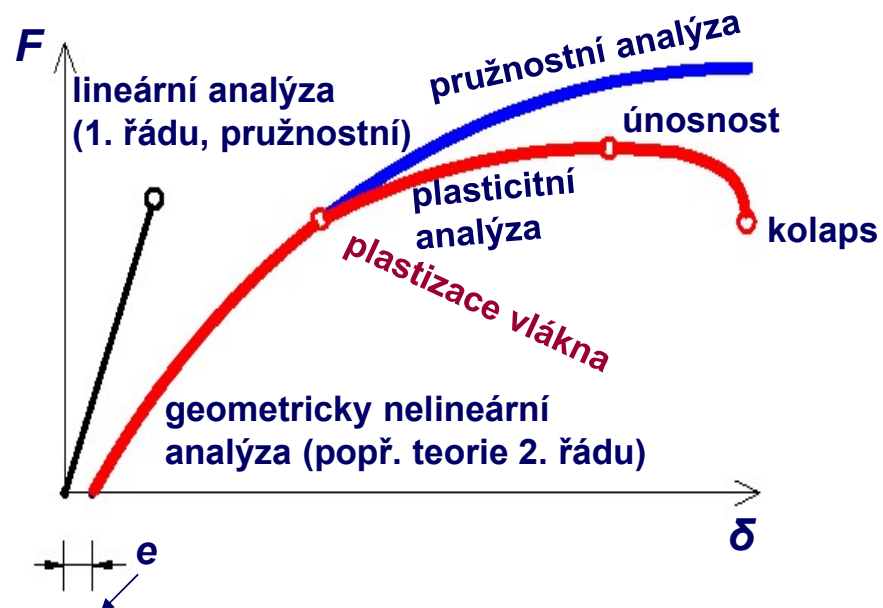
tzv. patinující oceli, s příměsí Cr, Cu, Si, Ni, Mo ... typ „Corten“ (USA, cca od r. 1940).

Podle Eurokódů: S355J0W (obchodní značka v ČR Atmofix A),

S355J2W (Atmofix B, nově od Arcelor Mittal Ostrava: Arcorox®).

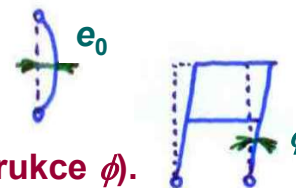
Globální analýza konstrukce (výpočet vnitřních sil)

Výpočetní modely:



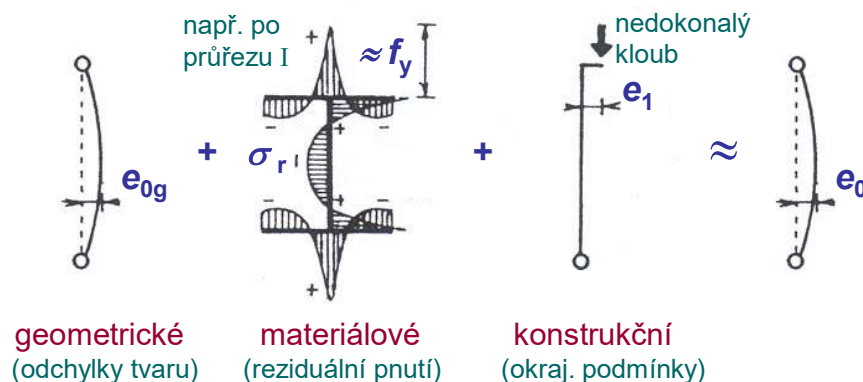
tzv. imperfekce e :

1. imperfekce prutu (vyjadřuje se počátečním prohnutím e_0),
2. imperfekce soustavy (vyjadřuje se náklonem patrové konstrukce ϕ).



Imperfekce (= nedokonalosti):

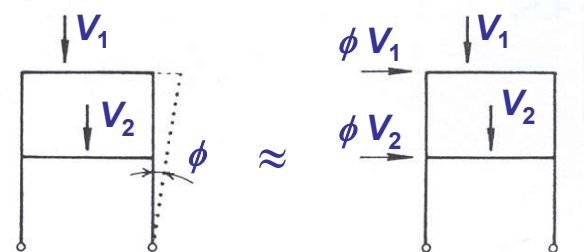
1. Imperfekce prutů: zahrnou se pomocí ekvivalentní geometrické imperfekce e_0



Účinky všech těchto imperfekcí, tj.

- počátečního průhybu e_{0g} ,
 - reziduálního pnutí po průřezu σ_r ,
 - nedokonalosti v okrajových podmínkách e_1 ,
- se pro modelování převádějí **do jediné ekvivalentní geometrické imperfekce (prohnutí) s hodnotou amplitudy e_0 .**

2. Imperfekce soustavy (náklon patrové konstrukce): zahrne se pomocí ϕ



v Eurokódu: $\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$

kde $\phi_0 = 1/200$

$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$ ale $\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$

$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$

h .. celková výška [m]
 m .. počet zatížených sloupů v řadě

Modely podle vlivu přetvoření:

1. Geometricky nelineární (pro OK je dostatečná teorie 2. řádu).

Vždy je vyžadována pro stabilitní chování prvků (které vybočují) a netuhé prvky (Iana).

Výpočet musí zahrnovat vliv imperfekcí:

- tlačené pruty (imperfekce pomocí ekvivalentního počátečního prohnutí e_0),
- patrové konstrukce (zavést náklon ϕ , popř. náhradní vodorovné síly),
- stěny při boulení (imperfekce podle Eurokódu 1993-1-5).

Nevýhody: neplatí princip superpozice, bez softwarového vybavení obtížné.

2. Lineární (podle teorie 1. řádu) – řešení je přibližné.

U konstrukcí s tuhými prvky je nutné zahrnout bezpečně vliv imperfekcí a vybočení pomocí součinitelů vzpěrnosti, klopení, boulení (odvozených pomocí teorie 2. řádu).

Modely podle využití materiálu:

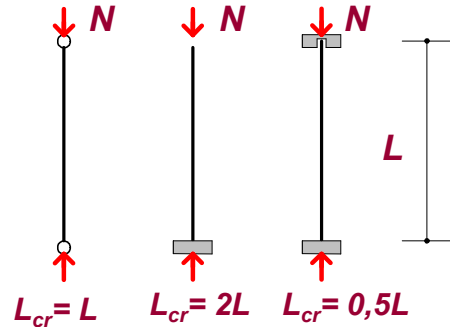
1. Pružnostní - lze vždy, končí však již dosažením meze kluzu vlákna.

Nejsou hospodárné, lze-li počítat plasticitně.

2. Plasticitní - jen jsou-li splněny následující podmínky:

- a) **na materiál:** ocel je tažná (tažnost min. 15 % → splňují všechny běžné oceli),
- b) **na průřez:** průřezy neboulí (vyžaduje se třída průřezu 1),
- c) **na prut:** nosník je v plastickém kloubu příčně podepřen (neklopí).

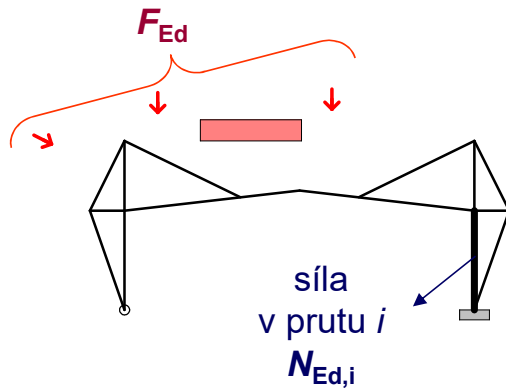
Posudek na vzpěr – opakování z předmětu NNK:



Základní případy (pro 1. tvar vybočení):

platí $L_{cr} = \beta L = \sqrt{\frac{N_E}{N_{cr}}}$ (N_E ... Eulerovo břemeno)

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{L_{cr}/i}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{N_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \rightarrow \chi$$



Obecné případy:

pro n -té kritické zatížení soustavy platí (software)

$$\alpha_{cr,n} = \frac{F_{cr,n}}{F_{Ed}} \quad \text{tj.} \quad F_{cr,n} = \alpha_{cr,n} F_{Ed} \quad (n = 1 \text{ až } \infty)$$

Kritická síla $N_{cr,n,i}$ v prutu i (pro stanovení $\bar{\lambda}$):

$$N_{cr,n,i} = \alpha_{cr,n} N_{Ed,i} \geq \alpha_{cr,1} N_{Ed,i} \quad (\text{tzn., že 1. tvar je konzervativní})$$

Pro prut i je rozhodující posouzení **k němu příslušného tvaru** vybočení n (ale lze **konzervativně pro $n = 1$**).

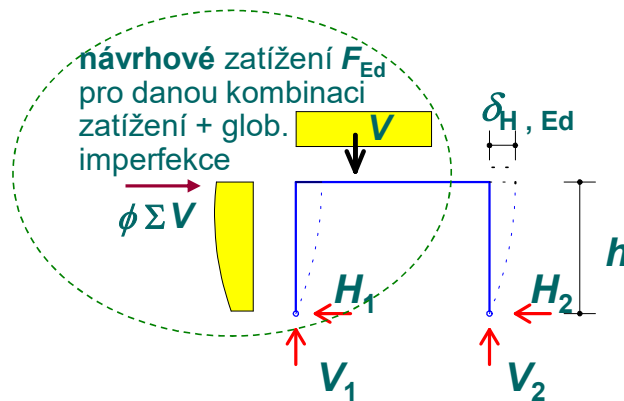
Klasifikace rámu a složitějších patrových konstrukcí

Klasifikace závisí na geometrii i zatížení → řešit pro každou kombinaci zatížení !!

1. Konstrukce řešené podle teorie 1. řádu ($\alpha_{cr} \geq 10$): souč. krit. zatížení

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad \left[\begin{array}{l} \text{pro plasticitní} \\ \text{analýzu} \geq 15 \end{array} \right]$$

Pro dané libovolné zatížení F_{Ed} je α_{cr} výsledkem řešení stability MKP (viz např. SCIA Engineer).



Přibližně lze α_{cr} pro vybočení s posunem styčniců podle obrázku stanovit:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{\sum H_{Ed}}{\sum V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H, Ed}} \right)$$

U pravidelných skeletů se tento výpočet provede pro každé patro, rozhoduje nejmenší hodnota.

Pozn.: Pro štíhlost prutů v rovině mezi styčnicí by mělo při přibližném výpočtu platit (jinak může tento prut vybočit bez posunu styčniců):

$$\bar{\lambda} \geq 0,3 \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}}$$

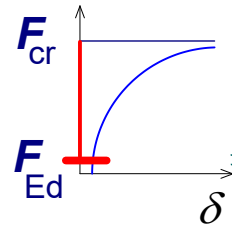
Posouzení všech prutů rámu pro toto zatížení lze potom bezpečně provést pro vzpěrnou délku mezi styčnicí, tzv. systémovou délku ($L_{cr} = L$, event. u konzol $L_{cr} = 2L$).

Pozn.: Pro $\alpha_{cr} > 25$ lze podle Eurokódu uvažovat přímo $\chi = 1$.

Vysvětlení:

$$\text{pro } \alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10$$

se vliv nelinearity
neprojeví



zde někde je hodnota únosnosti

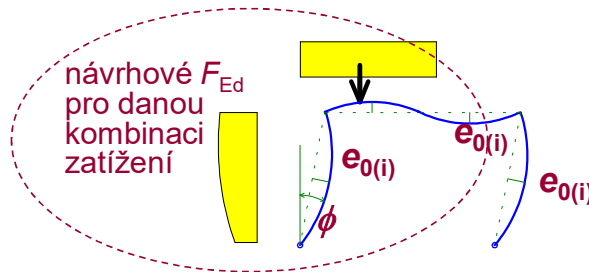
2. Konstrukce řešené podle teorie 2. řádu ($\alpha_{cr} < 10$):

Obecně lze postupovat 3 způsoby:

a) Geometricky nelineárním řešením kompletně imperfektní konstrukce.

(Geometricky nelineární analýza s imperfekcemi, tzv. GNIA).

Účinky druhého řádu a globálních i prutových imperfekcí jsou potom zahrnuty ve výsledných vnitřních silách a posouzení jednotlivých tlačných prutů se provede **pouze na prostý tlak bez součinitelů vzpěrnosti χ** .

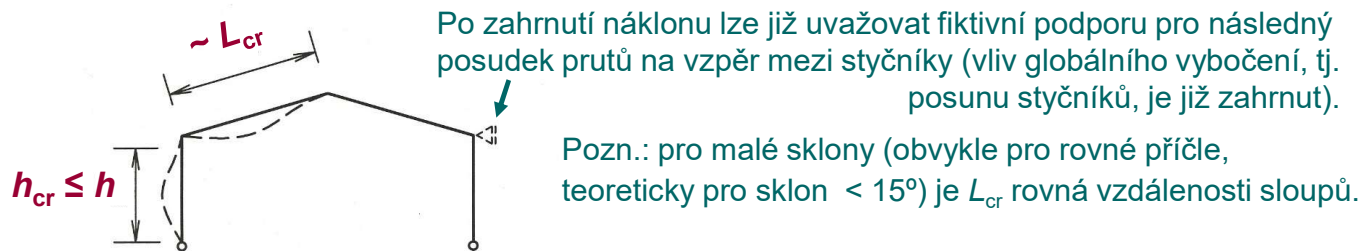


Toto řešení je náročné na software,
zavedení imperfekcí i vyhodnocení.

b) Geometricky nelineárním řešením konstrukce pouze s globální imperfekcí
 (tj. zavedením náklonu konstrukce – obvykle pomocí náhradního vodorovného zatížení).

Posouzení jednotlivých prutů na vzpěr (tj. pro zahrnutí vlivu 2. řádu a prutových imperfekcí) se poté provede pouze pro systémové délky (tj. mezi styčníky).

Tj. např. u sloupu haly vzít vzpěrnou délku h (případně s redukcí na vetknutí do patek), u příčle $L/2$.



Pro $3 \leq \alpha_{cr} < 10$ a vybočuje-li konstrukce s posunem styčníků, lze účinky 2. řádu od posunu styčníků řešit přibližně následovně:

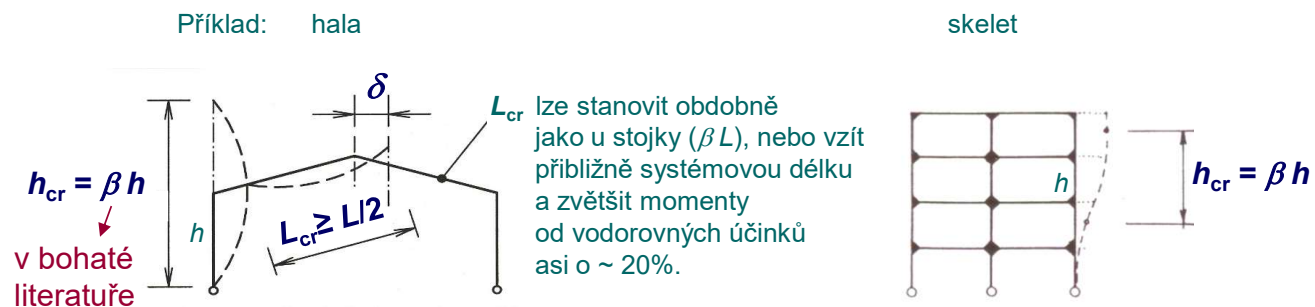
Konstrukce se řeší podle teorie 1. řádu se zavedenou imperfekcí soustavy, ale všechny vodorovné síly H_{Ed} (včetně např. vlivu imperfekcí $V_{Ed} \phi$) se zvětší (přenásobí) součinitelem 2. řádu:

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \geq 1$$

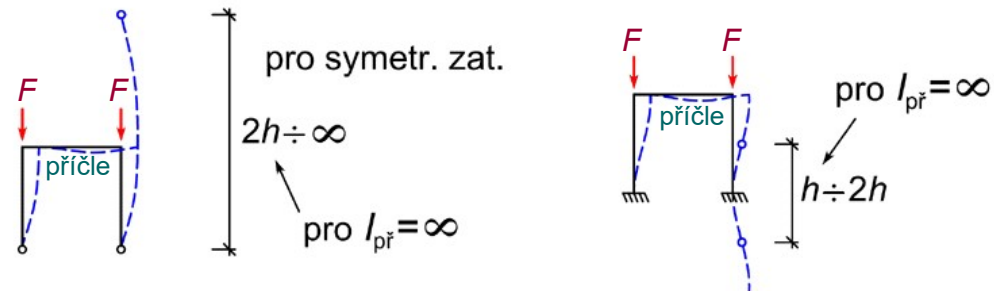
c) Často („klasické řešení“) se soustava řeší teorií I. řádu bez imperfekcí, s pomocí tzv. **globálních vzpěrných délek**. Ekvivalentní pruty se posoudí na globální vzpěrné délky (se zavedením χ pro vzpěr).

Globální vzpěrné délky lze stanovit z kritického zatížení odpovídajícího vybočení daného prutu a závisí na tuhostech prutů a na zatížení !! Jsou uvedeny ve vzorcích a tabulkách v literatuře, nebo se stanoví z kritického zatížení konstrukce.

Např. u sloupů hal mohou být mnohonásobkem systémových délek. U příčlí lze postupovat obdobně, popř. vzít systémovou délku a zvětšit momenty od vodorovných účinků cca o 20%:



Typické vzpěrné délky jednoduchého rámu pro globální vybočení:



Vzpěrné délky stоек soustav lze určit ze vzorců nebo grafů v literatuře. Nejlépe se však určí z kritického zatížení N_{cr} po výpočtu nejnižšího $\alpha_{cr,i}$ odpovídajícího vybočení daného prutu i běžným softwarem následovně:

$$L_{cr,i} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{N_{cr,i}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{\alpha_{cr,i} N_{Ed}}}$$

(N_{Ed} je osová síla v posuzovaném prutu od daného zatížení F_{Ed} a EI jeho tuhost.)

Důležité poznámky:

- 1) Použije-li se α_{cr} podle přibližného vzorce na str. 10 (odpovídá pouze pro vybočení s posunem styčniců), nelze brát vzpěrnou délku menší než systémovou délku (délku mezi styčnicí).
- 2) Použije-li se pro dané zatížení hodnota $\alpha_{cr,min}$ (platná pro vybočení jiného než posuzovaného prutu), bude výsledek posudku na bezpečné, ale neekonomické straně.
- 3) Pozor na změnu průřezu po posudku: mění se α_{cr} a tedy i L_{cr} .

Kroucení

Obvykle jen pružné řešení napjatosti (též podle Eurokódu).

Plastické řešení (s obdélníkovým průběhem normálových napětí) uvádí Strelbickaja, Trahair.

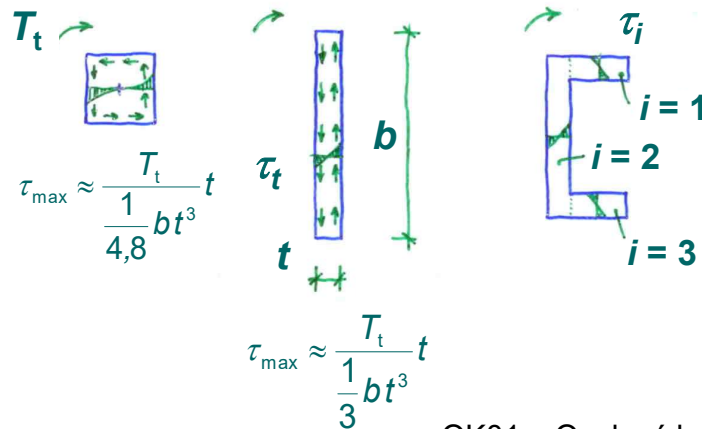
Podle Eurokódu lze kombinovat s plastickým rozdělením napjatosti od ohybu.

Rozlišuje se:

- kroucení prosté (vznikají jen smyková napětí),
- kroucení vázané (vznikají smyková i normálová napětí).

1. Otevřené průřezy (např. I, U, L)

a) Kroucení prosté (Saint Venantovo): vyskytuje se výjimečně, viz dále.



Vzniká jen smyk (největší v t_{\max}):

$$\tau_{t(i)} = \frac{T_t}{I_t} t_{(i)} \leq \frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sqrt{3}} \quad [\text{MPa}]$$

$$I_t = \alpha \frac{1}{3} \sum_i b_i t_i^3 \quad [\text{mm}^4]$$

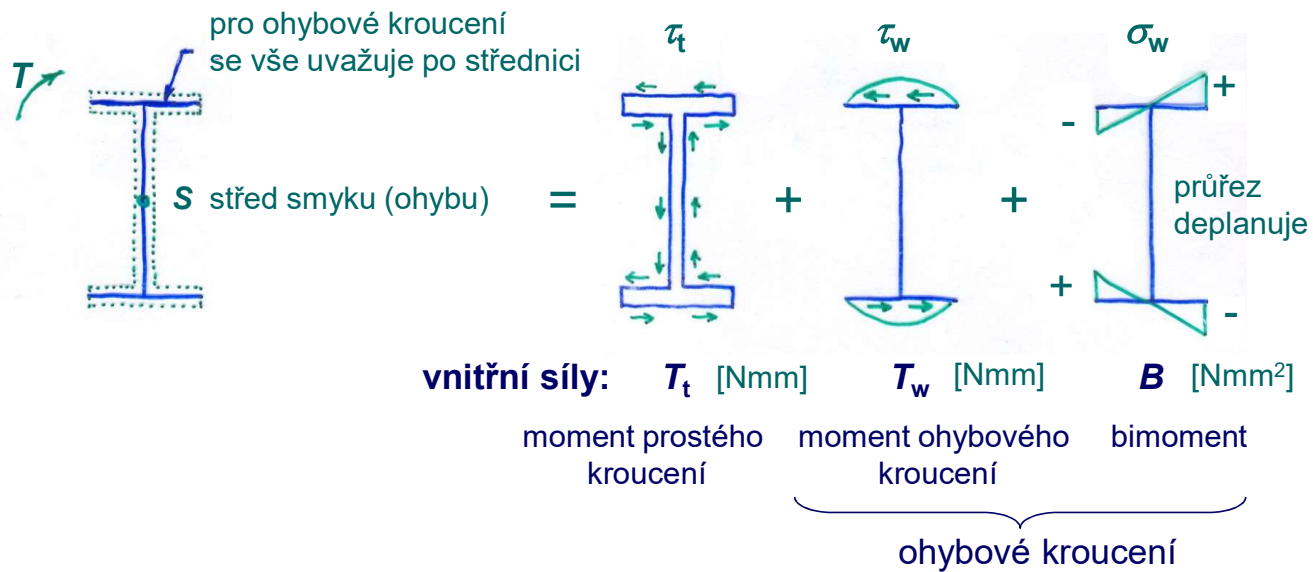
(vliv zaoblení u válcovaných průřezů, jinak 1)

b) Kroucení vázané (Vlasovova teorie)

Předpoklady:

1. Příčný řez prutu je tuhý (nedeformuje se).
2. Smykové přetvoření je nulové (tzn. smykové ochabnutí se neuvažuje).

- část kroucího momentu T se přenáší prostým kroucením: T_t
- část kroucího momentu T se přenáší ohybovým kroucením: T_w
- celkem: $T = T_t + T_w$

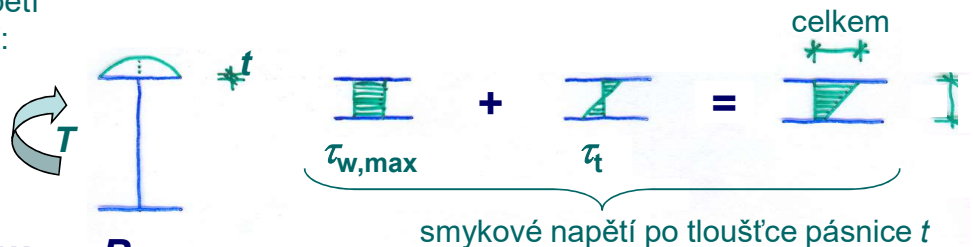


Vzniklá napětí:

Smyková:

- **prosté kroucení** τ_t
 - **ohybové kroucení** $\tau_w = \frac{T_w S_w}{t I_w}$
- \rightarrow výsečový statický moment plochy
 \rightarrow výsečový moment setrvačnosti

např. pro smyková napětí
v horní pásnici profilu I:



Normálová:

$$\sigma_w = \frac{B w}{I_w} = \frac{B}{W_w}$$

\rightarrow výsečový modul průřezu

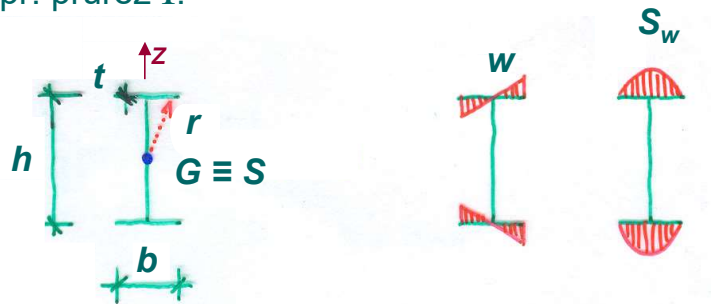
Pozn.: Zanedbá-li se tuhost v prostém kroucení (pro $\tau_t \approx \mathbf{0}$), platí pro ohybovou část vázaného kroucení obdobná diferenciální rovnice jako pro prostý ohyb (odtud tzv. **analogie s ohybem**):

| | |
|--|---|
| Ohyb: svislé spojité zatížení q | Ohybové kroucení: spojité kroucí zatížení $m = q e$ |
| ohybový moment M (např. $1/8 qL^2$) | bimoment B (analog. $1/8 mL^2$) |
| normálové napětí $\sigma = M/W$ | výsečové napětí $\sigma_w = B/W_w$ |
| posouvající síla $V \rightarrow \tau = VS/(tI)$ | moment ohybového kroucení $T_w \rightarrow \tau_w = T_w S_w / (tI_w)$ |
| průhyb δ (např. $5/384 \cdot qL^4 / (EI)$) | úhel zkroucení θ (např. $5/384 \cdot mL^4 / (EI_w)$) |
| natočení δ' | deplanace θ' |

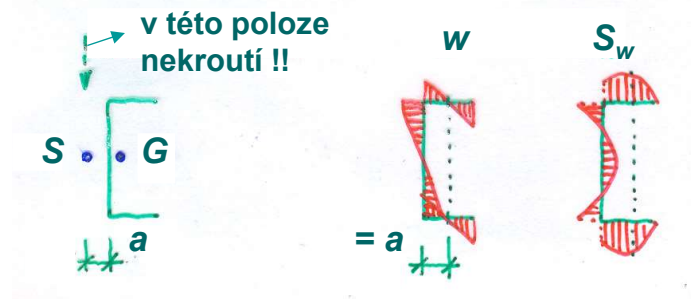
Výšečové charakteristiky

- pro válcované průřezy v tabulkách.
- obecně se odvodí z výšečové plochy w :

např. průřez I:



průřez U:



Poloha hlavního počátku w : $\int_A 1 w dA = 0$

Poloha středu smyku (ohybu) S :

$$\int_A y w dA = \int_A z w dA = 0$$

(výšečové deviační momenty)

Hlavní výšečová plocha pro průřez I :

$$w = \int_s r ds = \frac{hb}{4} \quad [\text{mm}^2]$$

Statický výšečový moment pro I :

$$S_w = \int_A w dA = \frac{hb^2 t}{16} \quad [\text{mm}^4]$$

Výšečový moment setrvačnosti pro I :

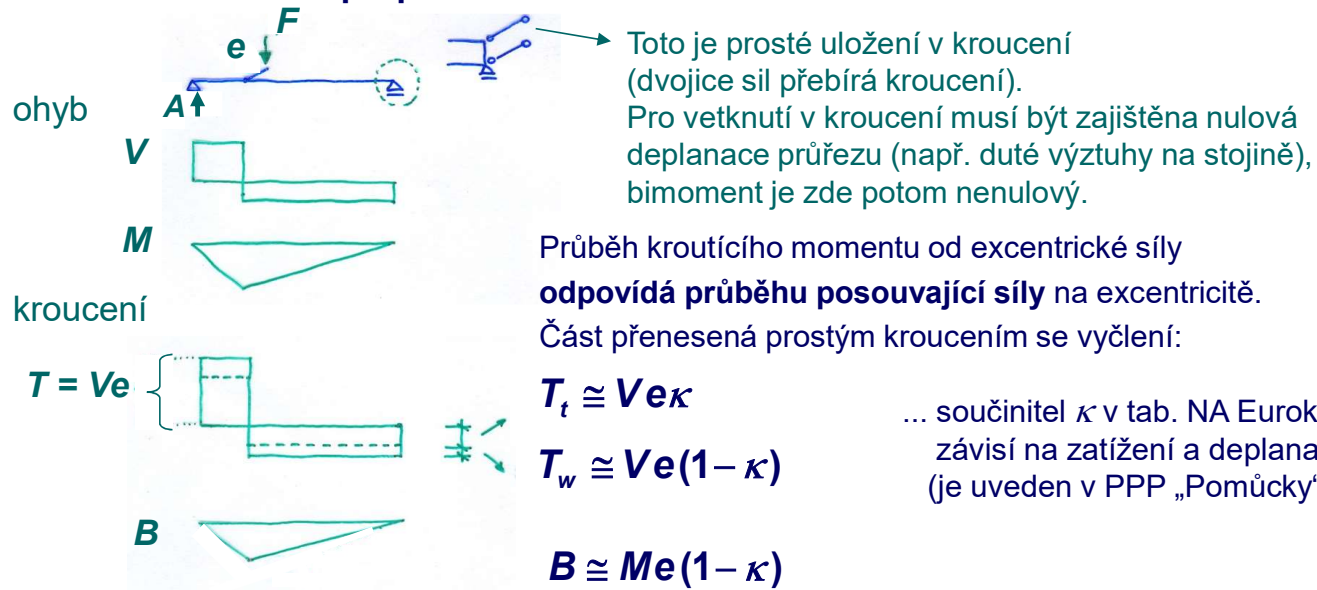
$$I_w = \int_A w^2 dA = \frac{h^2}{4} I_z \quad [\text{mm}^6]$$

w, S_w, I_w ... viz tabulky

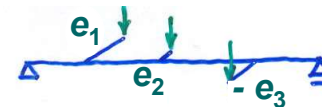
Stanovení vnitřních sil při kroucení:

- řešení z diferenciálních Vlasovových rovnic, popř. vzorce pro běžné případy,
- přibližně na základě analogie s ohybem (viz str. 16),
- přibližně podle Národní přílohy (NA) Eurokódu, jak dále uvedeno:

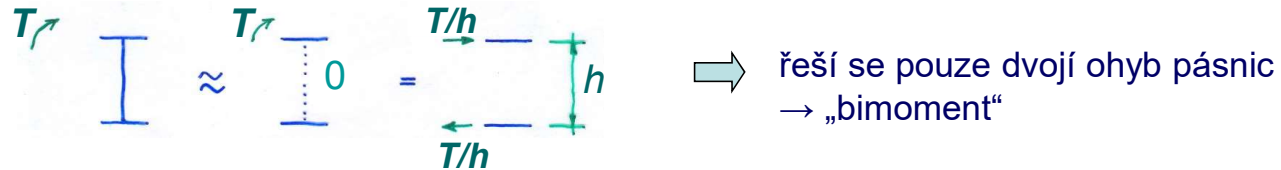
Průběh vnitřních sil při prostém uložení v kroucení:



U složitějších zatížení lze použít superpozici:



Přibližné (konzervativní) řešení – při zanedbání prostého kroucení:



Důležité poznámky:

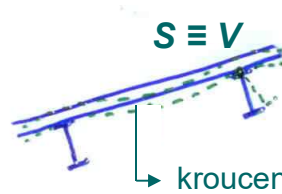
1. Normálová napětí jsou velká, nelze je zanedbat!
2. Normálová napětí (ohybové kroucení) nevznikají:
 - a) při zatížení napětím τ_t , přibližně též pro zatížení koncovým T (vzniká jen prosté kroucení):



- b) u "svazkových" průřezů (neboť $w = I_w = 0$):

(střed smyku S leží v průsečíku svazku)

3. V praxi se obvykle vyskytuje tzv. kroucení k vynucené ose (V):



řešení s původním středem smyku S je nevhodné !!!

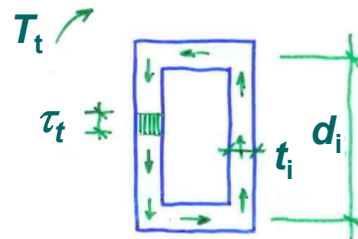
kroucení navíc omezeno tuhostí pláště \Rightarrow kroucení se často zanedbává.

2. Uzavřené průřezy



a) Kroucení prosté

(obvyklé posudky, jen pro smyková napětí)

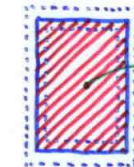


Bredtův smykový tok (τt) = konst.

$$\tau_{t(i)} = \frac{T_t}{\Omega t_{(i)}}$$

$$= 2 A_s$$

(největší τ je v t_{\min})



A_s
(plocha uzavřená střednicí)

informačně:
$$I_t = \frac{\Omega^2}{\oint \frac{ds}{t}}$$

b) Kroucení vázané: od ohybové složky malá napětí, zanedbávají se.

⇒ pro kroucení volit uzavřené průřezy: - velká tuhost v kroucení,
- je jen malé napětí τ .

př.:
TR 100x10



jen proříznutím trubky se I_t zmenší 75x, napětí τ se zmenší o 33,4%, vzniká však značné σ_w)

Doplňující informace

OK01 – Ocelové konstrukce (1)

23

Legované oceli se zvýšenou mezi kluzu a oceli vysokopevnostní:

Stále více se pro extrémně namáhané, ale i běžné konstrukce aplikují jemnozrnné oceli, např.:

Francie - Millau Viaduct (celkem 43 Mt oceli, z toho 18 Mt ocel S460M).

Německo - most v Düsseldorfu přes Rýn (již 2002): pylony z oceli S460ML.

Norsko: polovina všech nových mostů z TM (termomechanicky zpracovaných) ocelí.

Normalizační válcování (N): válcování při ~ 950 °C, později ohřátí na ~ 900 °C, chlazení na vzduchu. Výsledkem je jemnozrnná ocel, vyšší CE (pro $t < 50$ mm $\approx 0,42$), odpovídající křehkolomové vlastnosti K2 (40 J při -20 °C);

Termomechanické válcování (M): řízené válcování jak v austenitické oblasti (~ 950 °C), tak v překryštalizační oblasti (pod ~ 900 °C). Výsledkem je jemnozrnná ocel, nízký CE (pro $t < 50$ mm $\approx 0,34$), vlastnosti K2;

Oceli do nízkých teplot (L): upravené složení, křehkolomové vlastnosti J5 (27 J při -50 °C);

Kalená a popouštěná ocel (quenched steel, Q): rychlé chlazení (vodou) pod 300 °C, popouštění k teplotě překryštalizace. Vzniká popuštěný martenzit (částečně bainit). Vysoká pevnost (až S1100), vyšší CE ($t < 20$ mm $\approx 0,42$, $t > 80$ mm $\approx 0,72$). Křehkolomové vlastnosti: 30 J pro: Q při -20 °C, pro QL při -40 °C.

Oceli vysoké pevnosti (f_y i přes 1000 MPa) jsou legovány niobem (vysoká pevnost, vysoká houževnatost).

Přehřevy pro svařování:

S355J2

nad $t = 30$ mm nutný;

S355M, S460M

do 100 mm bez přehřevu (event. nízký, do 100 °C).

Výběr jakostního stupně oceli (výťah z ČSN EN 1993-1-10)

| Značka oceli | Jakostní stupeň | Tloušťky prvků [mm] pro referenční teplotu $T_{Ed} = -40\text{ °C}$ | | |
|--------------|-----------------|--|-------------------------------|-------------------------------|
| | | Tažené prvky | | Tlačené prvky |
| | | $[\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)]$ | $[\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)]$ | $[\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)]$ |
| S235 | JR | 25 | 40 | 65 |
| | J0 | 35 | 55 | 85 |
| | J2 | 50 | 75 | 115 |
| S355 | JR | 15 | 25 | 55 |
| | J0 | 20 | 40 | 70 |
| | J2 | 35 | 55 | 95 |
| | K2, M, N | 40 | 65 | 110 |
| S420 | M, N | 35 | 60 | 100 |
| | ML, NL | 55 | 85 | 140 |
| S460 | Q, | 25 | 45 | 80 |
| | M, N | 30 | 55 | 95 |
| | QL | 40 | 65 | 115 |
| | ML, NL | 50 | 75 | 130 |
| | QL1 | 60 | 95 | 155 |

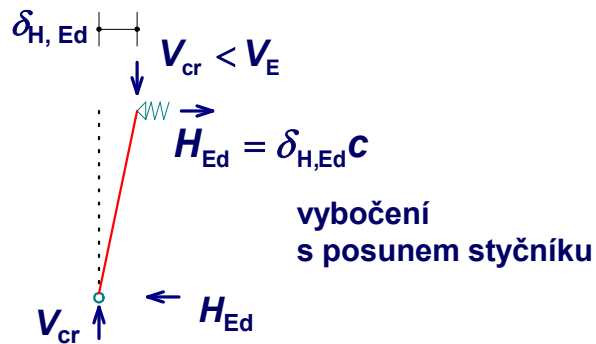
Pro tažené prvky se vypočte úroveň tahového napětí σ_{Ed} pro mimořádnou kombinaci zatížení (hlavní proměnné zatížení s častou hodnotou, pro ψ_1). Konzervativní hodnota odpovídá $\sigma_{Ed} \approx 0,75 f_y(t)$ (nebo interpolovat). Dále se stanoví referenční teplota T_{Ed} v místě potenciální trhliny (v ČR -35 °C a pro ztrátu vyzařováním -5 °C, celkem doporučeno $T_{Ed} = -40\text{ °C}$).

Pro tlačené prvky (může rozhodovat reziduální tahové napětí) se doporučuje brát pro určení jakostního stupně napjatost $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$.

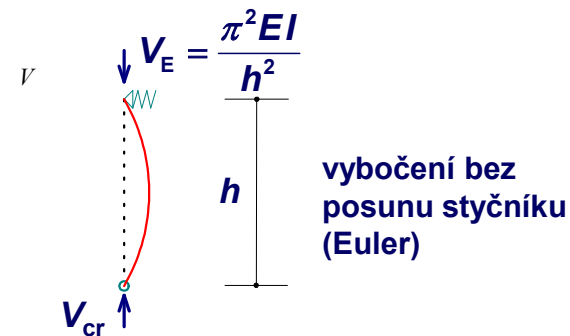
Odvození vzorce pro přibližné stanovení α_{cr} :

Tvar vybočení jednostranně pružně podepřeného prutu:

① Tuhost podepření $c < \frac{\pi^2 EI}{h^3}$



② Tuhost podepření $c \geq \frac{\pi^2 EI}{h^3}$



Z momentové podmínky rovnováhy plyne: $V_{cr} \delta_{H,Ed} = H_{Ed} h$

$$\text{odtud pro } \alpha_{cr} = \frac{V_{cr}}{V_{Ed}} \text{ plyne: } \alpha_{cr} = \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{h}{\delta_{H,Ed}}$$