

Betonové a ocelové konstrukce

Ing. Josef Novák, Ph.D.
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Ing. Břetislav Židlický, Ph.D.
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

České vysoké učení technické v Praze



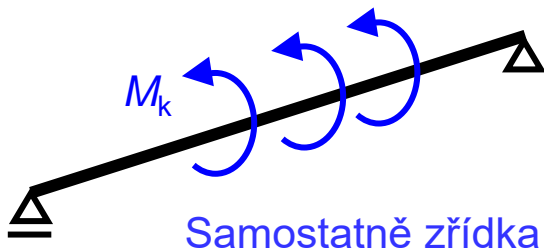
Seznam přednášek

- Spoje: kloubové, tuhé a polotuhé; klasifikace styčníků, čepové spoje
- **Kroucení, kombinace namáhání, únava ocelových konstrukcí**
- Ocelové haly s jeřábovou dráhou – nosník dráhy, ztužení, detaily
- Požární odolnost ocelových a ocelobetonových konstrukcí
- Zásobníky, nádrže, lanové a membránové konstrukce
- Lešení, korozivzdorná ocel

Kroucení, kombinace namáhání

Kroucení prutů

- Vždy pružný výpočet
- Podle ČSN EN 1993-1-1 lze kombinovat s plastickým rozdělením napjatosti od ohybu

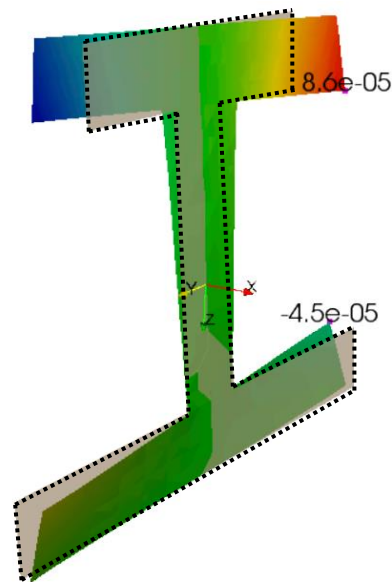


Obvykle kroucení spolu s ohybem způsobené excentricitou zatížení vzhledem k rovině ohybu

- Rozlišuje se
 - Kroucení prosté
 - Pouze smyková napětí
 - Kroucení vázané
 - Smyková i normálová napětí

Základní pojmy

- Tenkostěnné pruty
 - Délka více než 10x než šířka
 - Šířka více než 10x větší než tloušťka
- Deplanace průřezu
 - Ztráta rovinnosti průřezu
 - Není zachována rovinnost příčných řezů po deformaci
 - Posun bodu průřezu ve směru podélné osy prutu



Základní pojmy

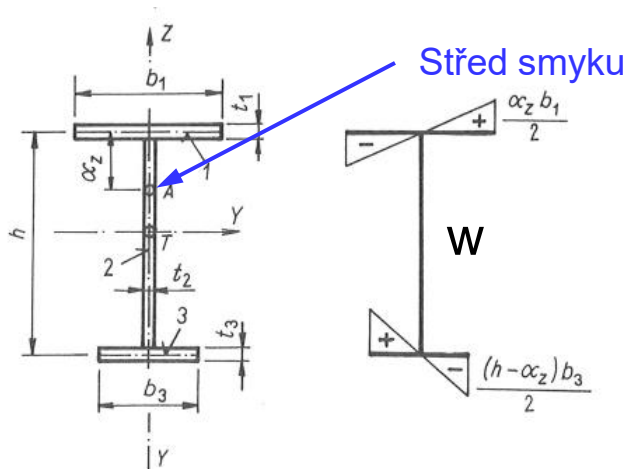
- Rozlišujeme dva druhy kroucení
 - Prosté kroucení
 - Pouze smyková napětí τ_t
 - Vázané kroucení
 - Smyková napětí $\tau = \tau_t + \tau_w$
 - Normálová napětí σ_w
 - Alespoň v jednom místě bráněno deplanaci průřezu

- Střed smyku
 - Bod v rovině příčného řezu
 - Bod, okolo kterého se průřez při kroucení otáčí
 - Působí-li zatížení do středu smyku nedochází ke kroucení (pouze ohyb)

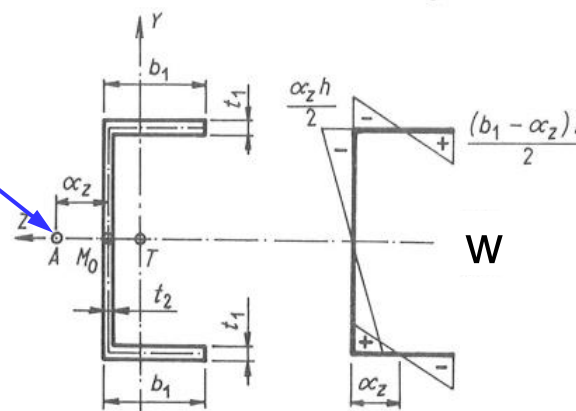
Základní pojmy

- Střed smyku
 - Pro dvojose symetrické průřezy se střed smyku = těžiště průřezu

- Výsečová plocha
 - Dvojnásobek plochy opsané průvodičem procházejícím středem smyku a pohybujícím se po střednici průřezu
 - Kladná hodnota při směru osy y vpravo je ve směru hodinových ručiček



Výsečová plocha nesymetrického I profilu



Výsečová plocha profilu U

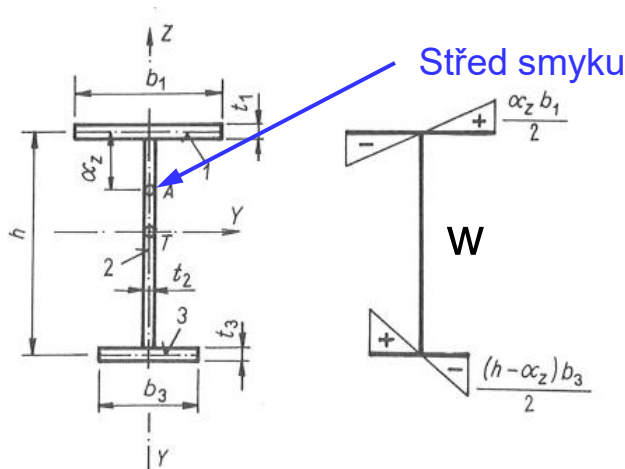
Základní pojmy

- Výsečový statický moment

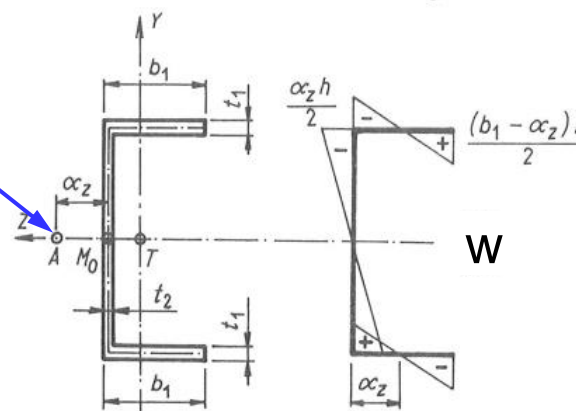
$$S_w = \int_A w dA$$

- Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = \int_A w^2 dA$$



Výsečová plocha nesymetrického I profilu

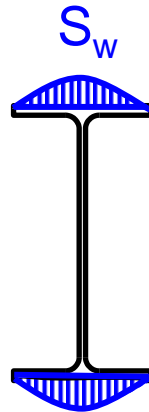
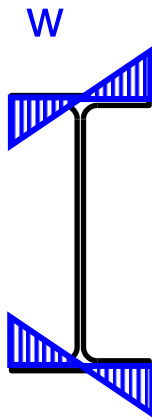
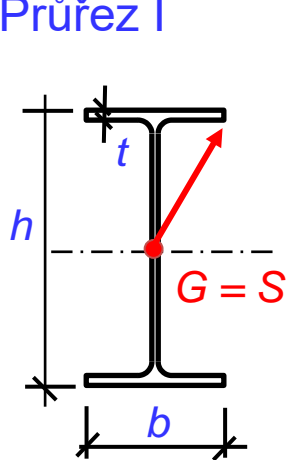


Výsečová plocha profilu U

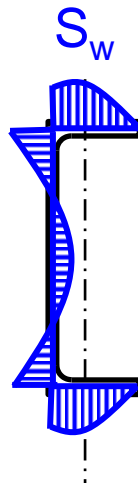
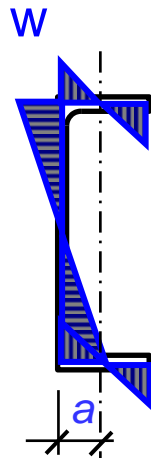
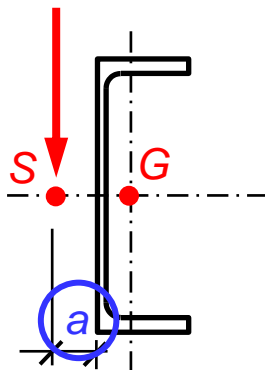
Základní pojmy

- Výsečové charakteristiky

Průřez I



Průřez U



- Pro průřezy I a H platí

- Hlavní výsečová plocha

$$w = \int_s r ds = \frac{hb}{2}$$

- Statický výsečový moment

$$S_w = \int_A w dA = \frac{hb^2t}{16}$$

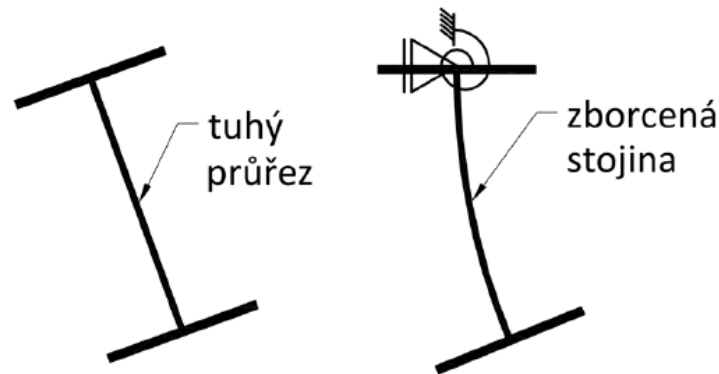
- Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = \int_A w^2 dA = \frac{h^2}{4} I_z$$

- Pro válcované průřezy je uvedeno v tabulkách

Prosté kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Předpoklady
 - Nedochozí k distorzi průřezu
 - Nedochozí ke změně příčného řezu prutu po deformaci
 - Nedochozí k natočení jednotlivých částí průřezu vůči sobě



- Smykové deformace ve střednicové ploše prutu jsou nulové

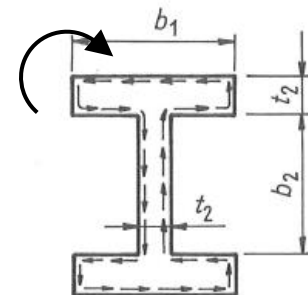
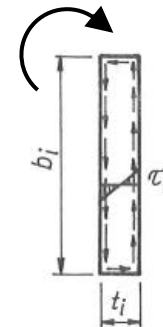
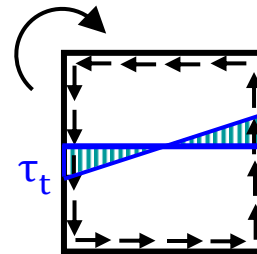
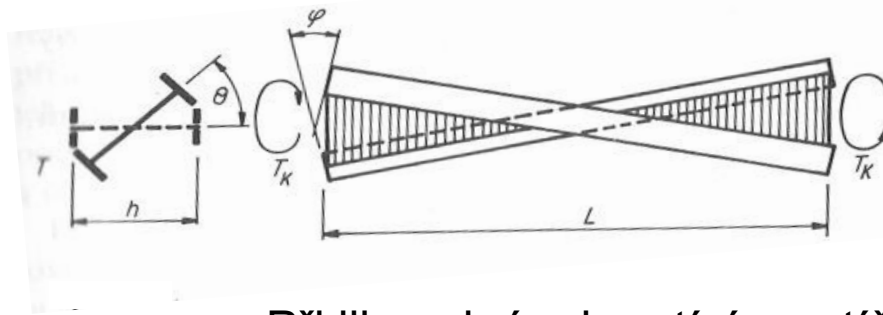
Prosté kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Prosté kroucení (Saint Venantovo)

- Vyskytuje se zřídka

- Prut zatížený koncovými momenty opačných znamének bez omezení deplanace

- Největší τ_t v místě nejtlustší stěny



- Při libovolném kroučícím zatížení a uložení u **svazkových průřezů**
 - Střed smyku S leží v průsečíku svazku

$$w = I_w = 0$$



Prosté kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Smykové napětí od prostého kroucení

$$\tau_{t,i} = \frac{T_t}{I_t} t_i \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

$$I_t = \frac{\alpha}{3} \sum b_i t_i^3$$

T_t moment prostého kroucení

I_t moment tuhosti v prostém kroucení

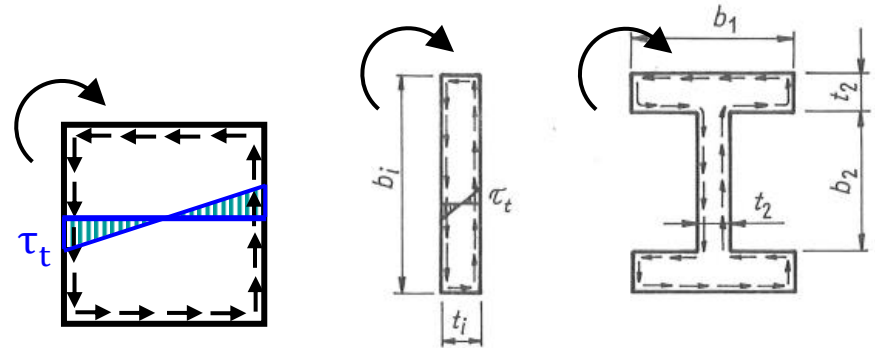
t_i tloušťka stěny v místě i

α Vliv zaoblení u válcovaných průřezů, jinak rovno 1,0

1,12 pro průřez U

1,15 pro průřez T

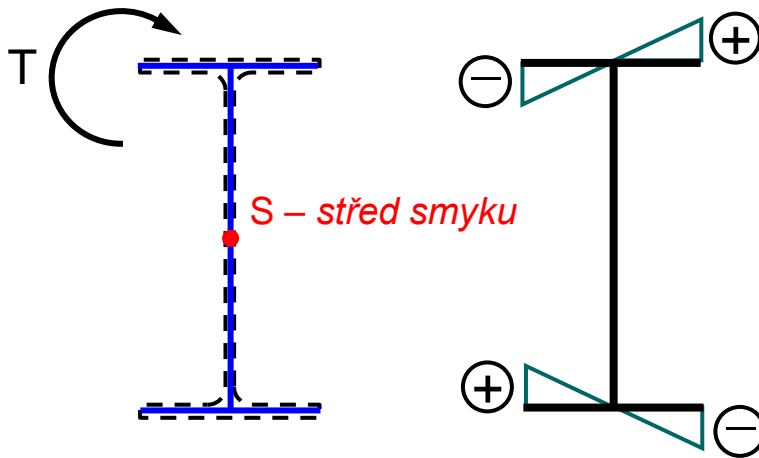
1,20 pro průřez I



- Tuhost tenkostěnných otevřených průřezů v prostém kroucení $G I_t$ je obecně velmi malá

Vázané kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Kroucení vázané (Vlasovova teorie)
 - Vzniká výsečové normálové napětí σ_w



- Základem vázaného kroucení otevřených průřezů je dif. rovnice pro neznámý úhel zkroucení θ

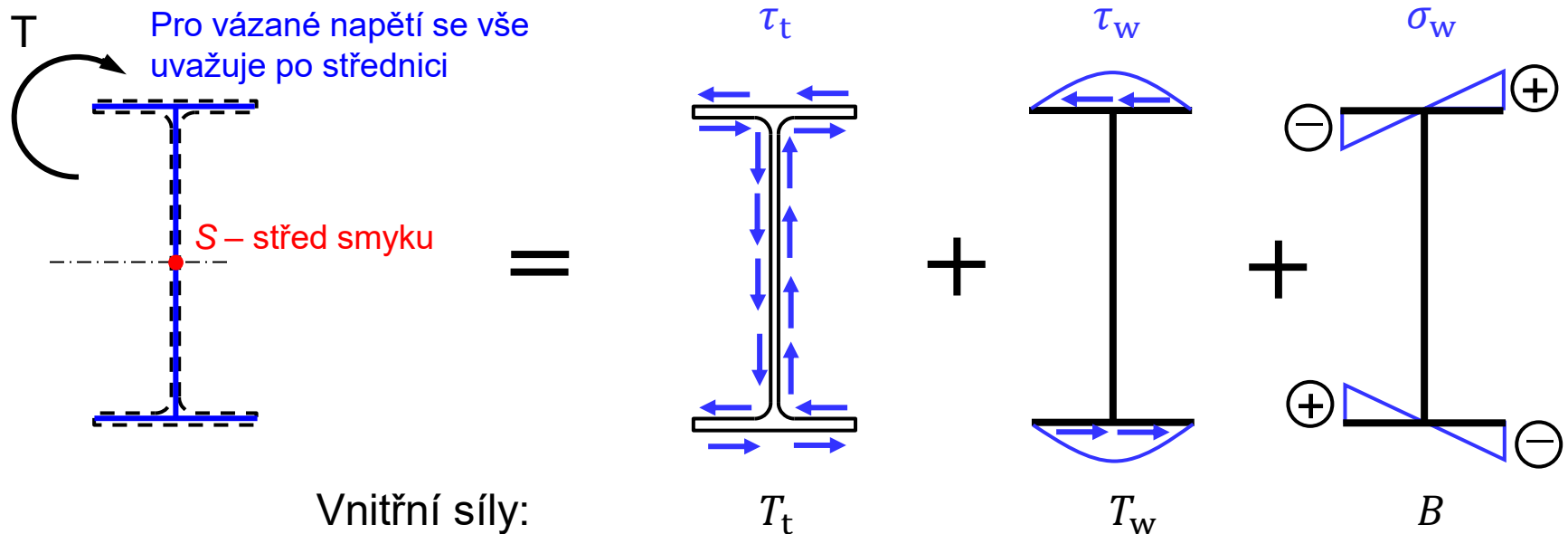
$$EI_w \theta^{IV} - GI_t \theta'' = m_k$$

EI_w	výsečová tuhost prutu
GI_t	tuhost v prostém kroucení
m_k	kroučící zatížení vztažené ke středu ohybu

Vázané kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Kroucení vázané (Vlasovova teorie)
 - Část krouťícího momentu T přenesena prostým kroucením
 - Část krouťícího momentu T přenesena vázaným kroucením

$$T = T_t + T_w$$



Vázané kroucení otevřených průřezů – I, U, L

■ Smyková napětí

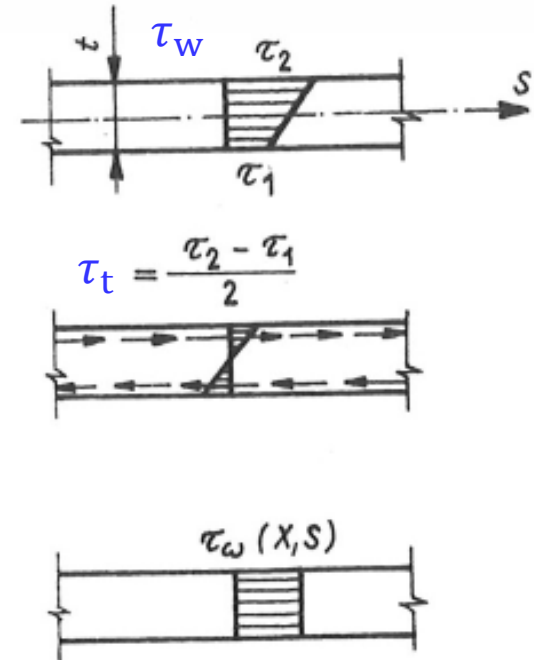
■ Prosté kroucení

$$\tau_{t,i} = \frac{T_t}{I_t} t_i$$

■ Ohybové kroucení

$$\tau_w = \frac{T_w S_w}{I_w t}$$

T_w	moment vázaného kroucení
S_w	výsečový statický moment plochy
I_w	výsečový moment setrvačnosti



■ Normálové napětí

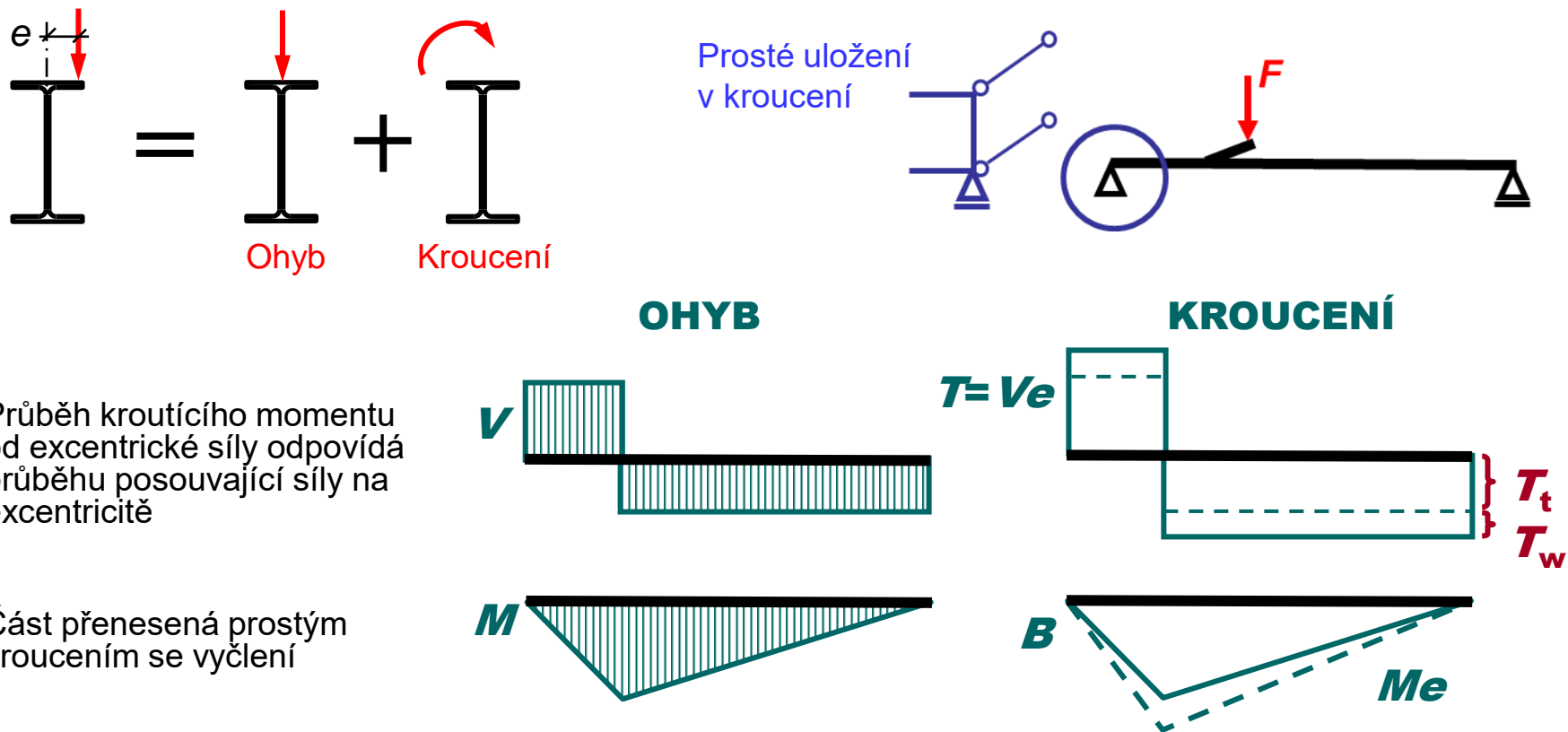
$$\sigma_w = \frac{B w}{I_w} = \frac{B}{W_w}$$

B	bimoment
w	výsečová pořadnice posuzovaného místa
I_w	výsečový modul pružnosti

Vázané kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Stanovení vnitřních
 - Zjednodušeně na základě analogie

Průběh krouticího momentu – zjednodušený výpočet bimomentu



- Průběh krouticího momentu od excentrické síly odpovídá průběhu posouvající síly na excentricitě
- Část přenesená prostým kroucením se vyčlení

Vázané kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Stanovení vnitřních

- Moment prostého kroucení

$$T_t = V e \kappa$$

- Moment ohybového kroucení

$$T_w = V e (1 - \kappa)$$

- Bimoment

$$B = M e (1 - \kappa)$$

$$\kappa = \frac{1}{\beta + \left(\alpha/L \sqrt{\frac{GI_t}{EI_w}} \right)^2}$$

κ opravný součinitel zahrnující vliv skutečné tuhosti průřezu v prostém kroucení

α, β koeficienty zohledňující typ zatížení a okrajové podmínky uložení

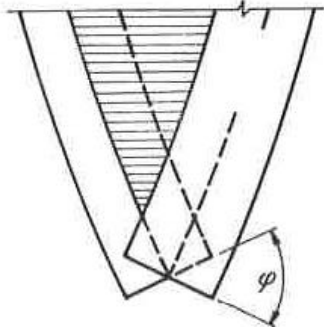
ČSN EN
1993-1-1

Okrajové podmínky při kroucení		Krutící zatížení		α	β
Oboustranné podepření nosníku	prosté podepření (volná deplanace)	plné rovnoměrné		3,1	1,00
		obecné		3,7	1,08
	vetknutí (deplanaci je zabráněno)	plné	pro vnitřní síly v podpoře	8,0	1,25
		rovnoměrné	pro maximum v poli	5,6	1,00
		obecné		6,9	1,14
Konzola	vetknutí	obecné - pro vnitřní síly v podpoře		2,7	1,11

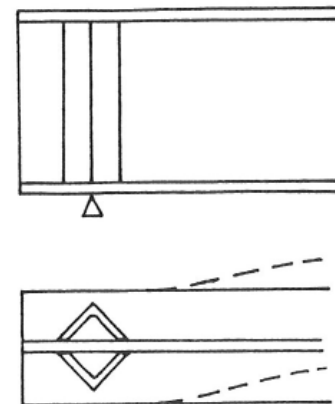
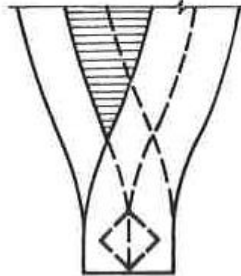
Kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Uložení v kroucení
 - Prosté uložení
 - Vetknutí
 - Je třeba zabránit deplanaci průřezu v místě podpory
 - Výztuha s velkou tuhostí v prostém kroucení zabraňuje pootočení přírub
 - Přesunutí výsečového napětí z mezipodporové části k podporám

Prosté uložení
v kroucení

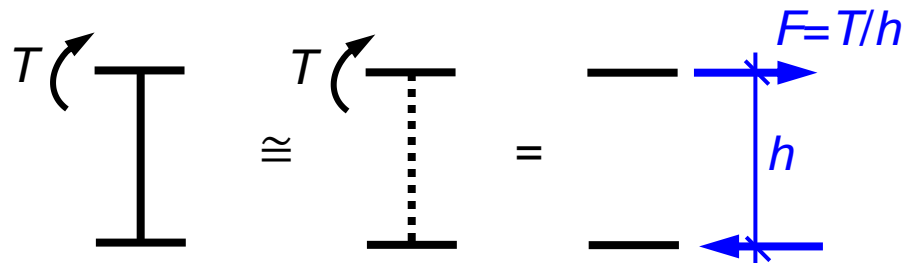
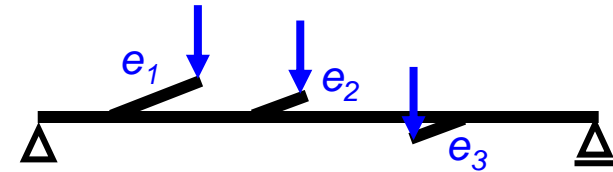


Vetknutí
v kroucení



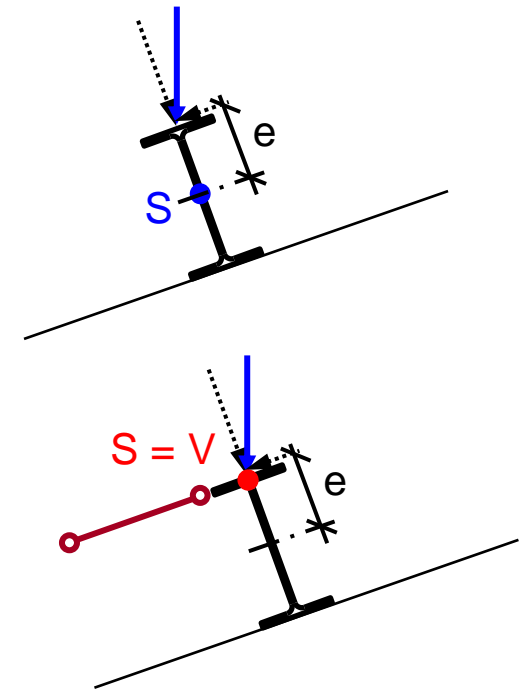
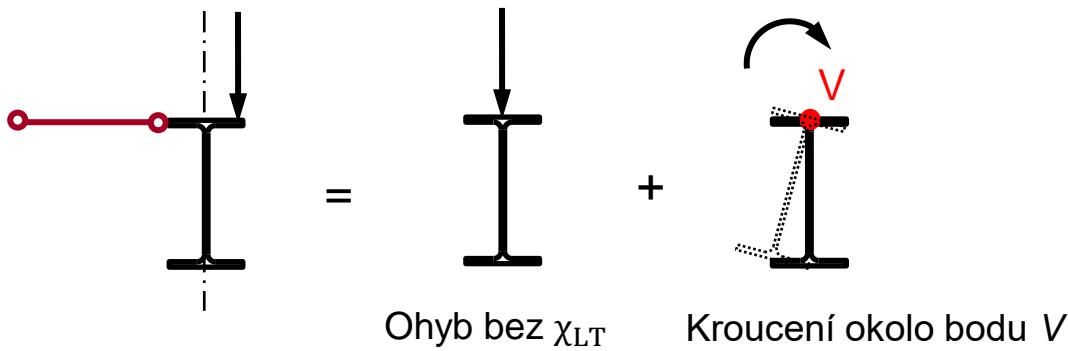
Kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Stanovení vnitřních – složitější případ
 - Řešení pomocí superpozice
- Přibližné (konzervativní) řešení
 - Zanedbání prostého kroucení
 - Řeší se pouze přídavný ohyb pásnic
 - Často vyhovuje
 - Z hlediska σ_w je řešení konzervativní

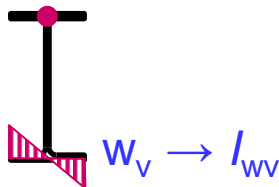


Kroucení otevřených průřezů – I, U, L

- Kroucení k vynucené ose
 - Vaznice + střešní plášť
 - Řešení s původním středem smyku je neekonomické
 - Kroucení navíc omezeno tuhostí pláště → často se zanedbává



- Nová výsečová plocha
- Nový I_w



$$\sigma = \frac{M}{I} z + \frac{B w_v}{I_{wv}} \leq f_{yd}$$

Prosté kroucení uzavřených průřezů

- Předpokládá se, že nemůže dojít k distorzi průřezu



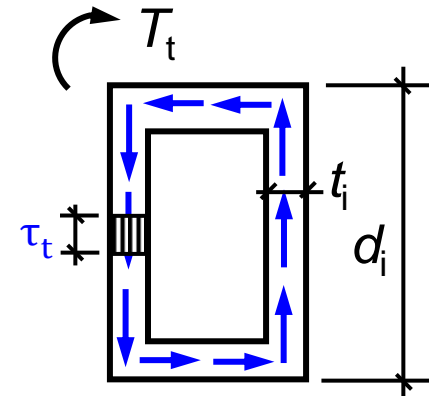
- Prosté kroucení

- Smyková napětí rozdělena rovnoměrně po tloušťce stěn
- Výslednicí je smykový tok
- Bredtův smykový tok

$$\tau_{t,i} = \frac{T_t}{\Omega t_i} = \frac{V e}{\Omega t_i}$$

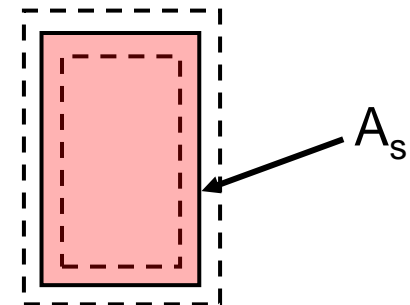
$$\Omega = 2 A_s$$

A_s plocha vymezená střednicí průřezu



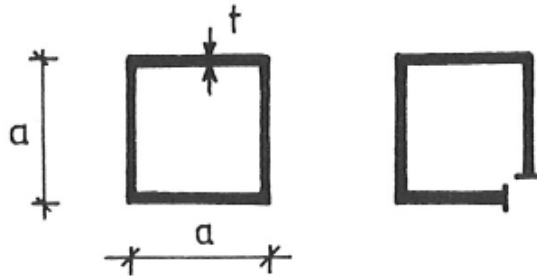
- Největší τ_t v místě nejtenčí stěny
- Bredtův moment tuhosti v prostém kroucení

$$I_d = \frac{\Omega}{\int \frac{ds}{d}}$$



Prosté kroucení uzavřených průřezů

- Ukázka poměru tuhostí uzavřeného a otevřeného průřezu



- Moment tuhosti v prostém kroucení pro uzavřený průřez

$$I_d = \frac{(2a^2)^2}{4 \frac{a}{t}} = \frac{4 a^3 t}{4} = a^3 t$$

- Moment v prostém kroucení pro otevřený průřez

$$I_t = \frac{4}{3} a t^3$$

- Pro $a = 10t$

$$I_d = 1000t^4$$

$$I_t = \frac{40}{3} t^4$$



$$\frac{I_d}{I_t} = 75$$

Poměr tuhostí 75 : 1

Vázané kroucení uzavřených průřezů

- Teorie Umanského
 - Za předpokladu tuhého příčného řezu
- Řešení podle Vlasova
 - Netuhý příčný řez
- Řešení MKP včetně deplanace
 - → Ohybové momenty ve stěnách
- Lze stanovit napětí τ_t , τ_w , σ_w
 - Napětí τ_w a σ_w jsou velmi malá, lze zanedbat
- **Vázané kroucení uzavřených průřezů netvoří rozhodující složku**
 - → uložení nosníků v kroucení nemá takový význam jako u prutů otevřeného průřezu

Kombinace ohyb + kroucení

- Vlivem kroucení vznikají napětí

$$T_{t,Ed} \rightarrow \tau_{t,Ed} = \frac{T_{t,Ed}}{I_t} t$$

$$T_{w,Ed} \rightarrow \tau_{w,Ed} = \frac{T_{w,Ed} S_w}{I_w t}$$

$$B_{Ed} \rightarrow \sigma_{w,Ed} = \frac{B_{Ed} w}{I_w}$$

- Pružný výpočet
 - Napětí od ohybu a kroucení se sčítají

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1$$

Kombinace ohyb + kroucení

- Pružný výpočet

- Normálová napětí od ohybu a kroucení

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{I_y} z + \frac{B_{Ed} w}{I_w} = \sigma_y + \sigma_w \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_y} + \frac{B_{Ed}}{W_w} = \sigma_y + \sigma_w \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

 Pouze pro vlákna při ohybu tlačena

- Smyková napětí od ohybu a kroucení

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_v} + \frac{T_{t,Ed}}{I_t} t + \frac{T_{w,Ed} S_w}{I_w t} = \tau + \tau_t + \tau_w \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}$$

- Srovnávací napětí

$$\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + 3\tau_{Ed}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Kombinace smyková síla + kroucení

- Plastický výpočet

- Plastická únosnost ve smyku se redukuje kvůli vlivu kroucení
- Podmínka únosnosti

$$V_{pl,T,Rd} \geq V_{Ed}$$

- Pro otevřené průřezy I, H a U Pouze průřezy U

$$V_{pl,T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}} - \frac{\tau_{w,Ed}}{\frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}}} \right] \cdot V_{pl,Rd}$$

- Pro uzavřené průřezy

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}} \right] \cdot V_{pl,Rd}$$

- Návrhová plastická únosnost ve smyku

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

Kombinace smyková síla + kroucení

■ Plastický výpočet

- Interakce smyku a ohybu lze zanedbat, pokud je splněna podmínka malého smyku

$$V_{pl,T,Rd} \geq 2V_{Ed}$$

- Pokud není splněno → redukce momentové únosnosti

$$\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2$$

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left(W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4 t_w} \right) f_y}{\gamma_{M0}} \leq M_{pl,Rd}$$

$$M_{y,V,Rd} \geq M_{Ed}$$

Interakční rovnice

- ČSN EN 1993-1-1 žádný vztah neudává
- Uvedeno v ČSN EN 1993-6 Příloha A
 - Norma pro jeřábové dráhy

$$\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_w k_{zw} k_\alpha B_{Ed}}{\frac{B_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$k_w = 0,7 - \frac{0,2B_{Ed}}{\frac{B_{Rk}}{\gamma_{M1}}}$$

$$k_w = 1 - \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}$$

$$k_\alpha = \frac{1}{1 - \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,cr}}}$$

$$M_{y,Rk} = W_{y,i} f_y$$

$$B_{Rk} = \frac{I_w}{w_{\max}} f_y$$

Kombinace ohyb + kroucení

- Plastický výpočet

- Podle ČSN EN 1993-1-1
 - Bimoment nutné stanovit pružně

- Celková únosnost v kroucení

$$T_{pl,Rd} = T_{t,pl,Rd} + T_{w,pl,Rd}$$

- Únosnost v prostém kroucení

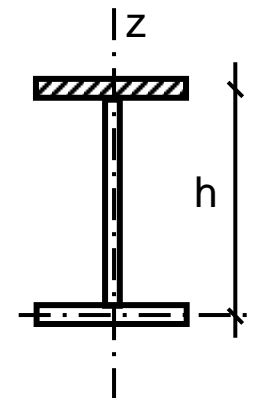
$$T_{t,pl,Rd} = W_{t,pl} \frac{\tau_{Rd}}{\gamma_{M0}} = W_{t,pl} \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

- Únosnost v ohybovém kroucení

$$T_{w,pl,Rd} = \frac{2h}{L} M_{f,pl,Rd,z}$$

- Interakce (pouze pro třídu průřezu 1 a 2)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} + \frac{T_{Ed}}{T_{pl,Rd}} \leq 1,0$$



Plastický průřezový modul otevřeného průřezu z obdélníků

$$W_{t,pl} = \frac{1}{2} \sum b_i t_i^2$$

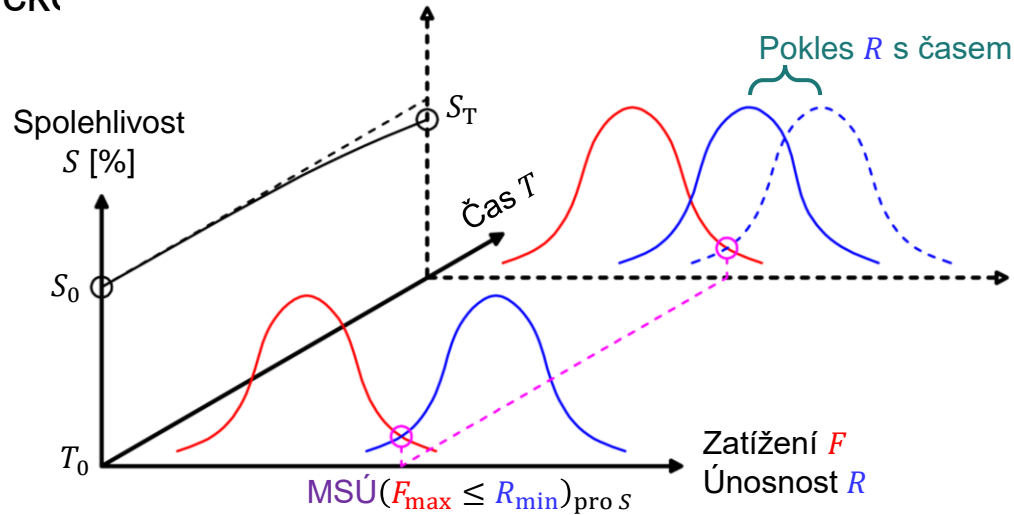
$$M_{f,pl,Rd,z} = W_{pl,z} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Ohybová únosnost pásnice I průřezu

Únava ocelových konstrukcí

Únava ocelových konstrukcí

- K poškození únavou dochází při zatížení výrazně proměnném v čase
 - Cyklické



- Únosnost R se snižuje vlivem
 - Iničiace trhlin
 - Růstu trhlin
- Mezní stav únavy

$$F_{max}(T) \leq R_{min}(T)$$



Únava ocelových konstrukcí

■ Cyklické zatížení

■ Rozkmit napětí

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

■ Parametr cyklu

$$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Režim zatížení

Pulsující tah, tlak

$$0 < \rho < 1$$

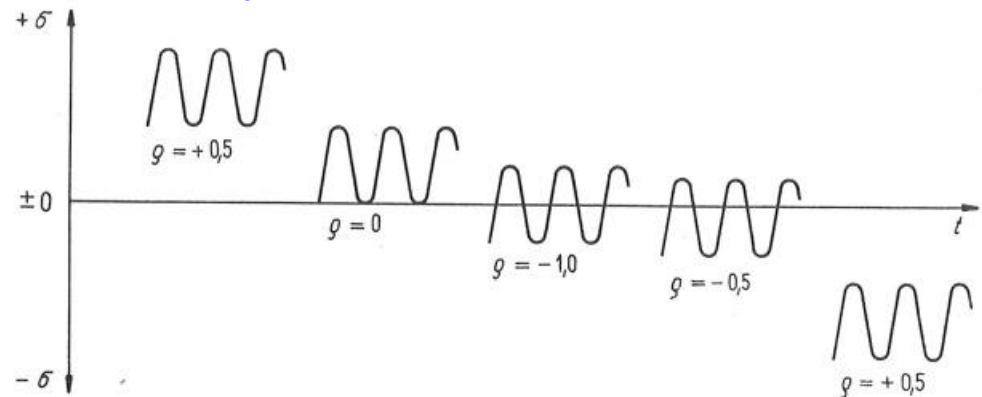
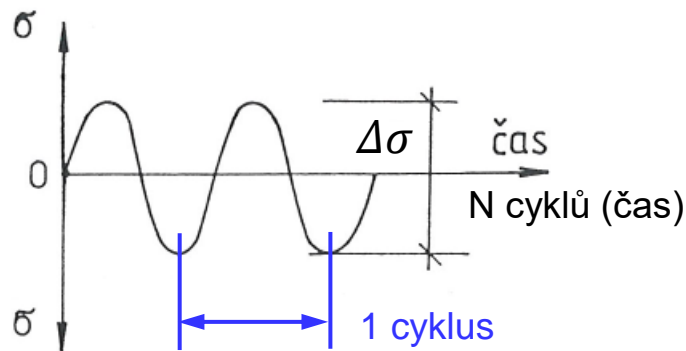
Střídavé namáhání

$$-1 \leq \rho < 0$$

Míjivé v tahu či tlaku

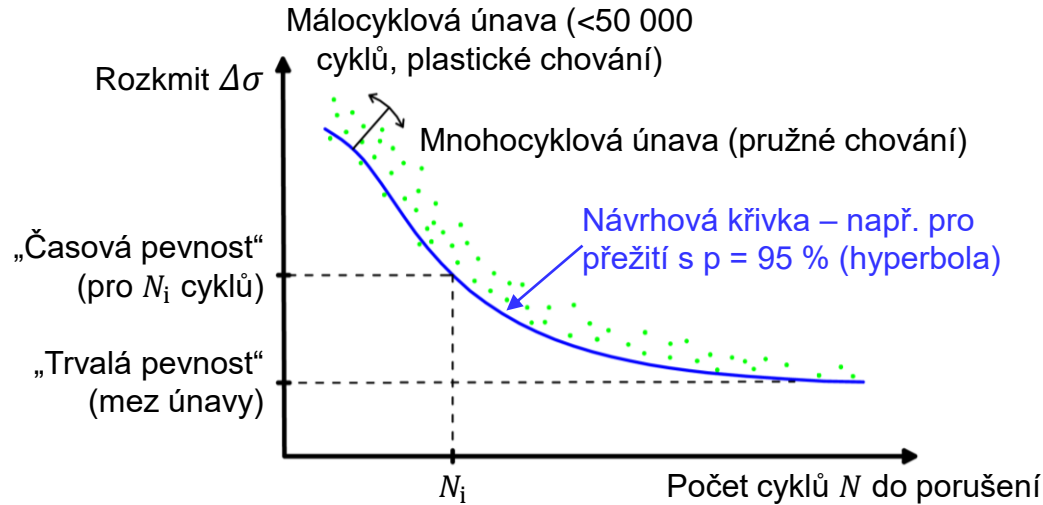
$$\rho = 0 (\sigma_{\min} = 0)$$

Ideální cyklické zatížení se stálým rozkmitem

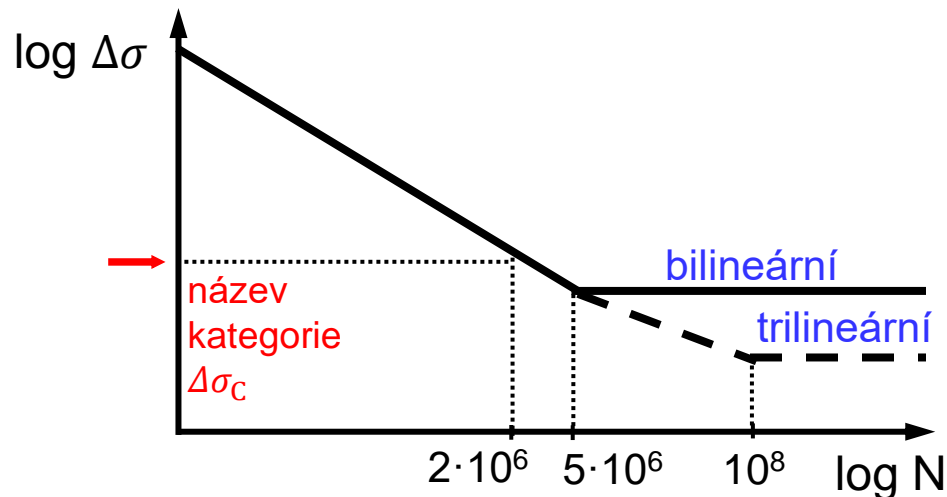


Únava ocelových konstrukcí

■ Wöhlerova křivka



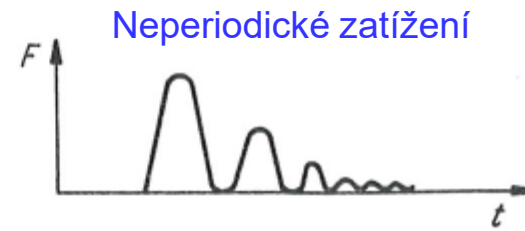
■ Wöhlerova křivka v log souřadnicích



Únavové zatížení

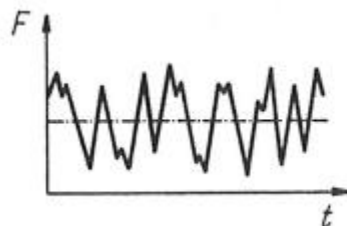
■ Zatížení deterministická

- Mění se pravidelným způsobem
- Velikost lze přesně určit v libovolném okamžiku

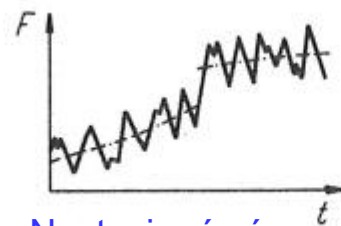


■ Zatížení stochastická

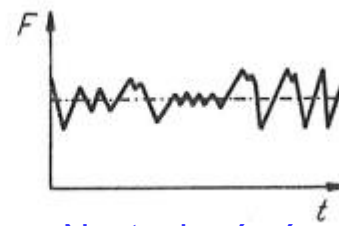
- Mění se nepravidelně náhodným způsobem
- Lze je popsat statistickými charakteristikami (střední hodnota, směrodatná odchylka)
- Stacionární a nestacionární (stacionární mají konstantní statist. charakt.)



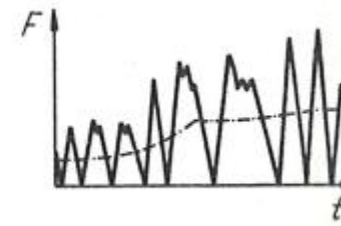
Stacionární
zatížení



Nestacionární s
proměnnou střední
hodnotou



Nestacionární s
proměnnou směrodatnou
odchylkou



Nestacionární s proměnnou
střední hodnotou i
směrodatnou odchylkou

Únavové zatížení

- Zatížení stavebních konstrukcí
 - Náhodný charakter (stochastické)
 - Obvykle se považuje za přibližně stacionární
 - Jeřábové dráhy
 - Klimatické zatížení
 - Nestacionární zatížení
 - Obvykle zatížení mostů
 - Narůst hmotnosti vozidel
- Odezva zatížení
 - Účinek zatížení na konstrukci
 - Dynamický výpočet
 - Lze stanovit statickým výpočtem
 - Výsledky se zvětší dynamickým součinitelem φ_{FAT}

Konstantní ekvivalentní rozkmit

- Stanovení únavového „namáhání“

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n \Delta\sigma_k$$

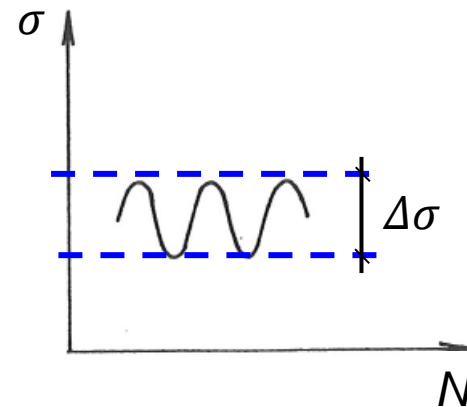
γ_{Ff} součinitel zatížení

$\Delta\sigma_{E,2}$ odpovídá účinkům poškození pro $N = 2 \cdot 10^6 \lambda_1$

λ_1 součinitel ekvivalentního únavového poškození, závisející na spektrech specifikovaných v EN

$\Delta\sigma_k$ únavové zatížení

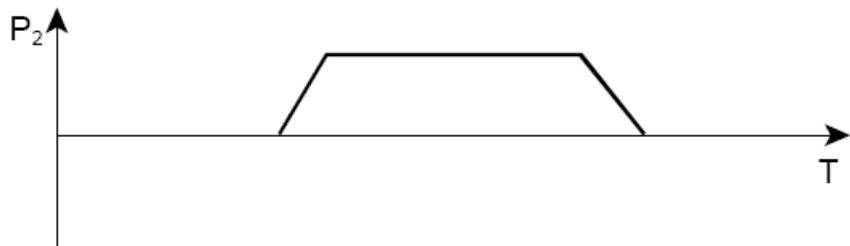
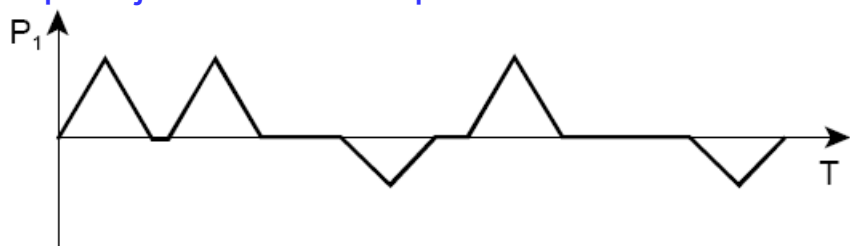
- Hodnoty $\Delta\sigma$ a N jsou přibližně odhadnuty



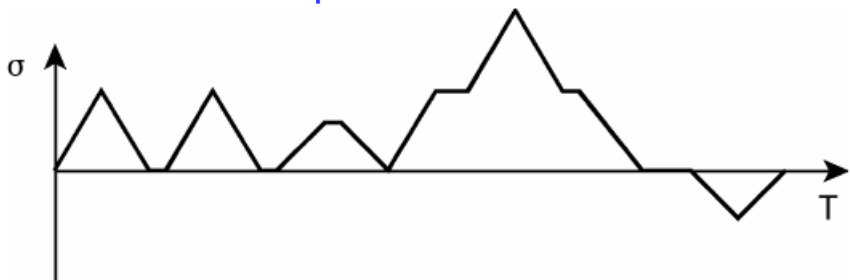
Spektrum rozkmitu napětí

- Skutečný průběh napětí podle některé z třídících metod
 - Metoda nádrže

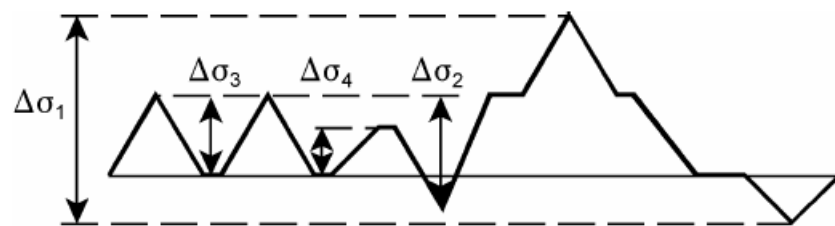
Zatěžovací blok: typický průběh zatížení, opakující se n-krát v průběhu návrhové životnosti



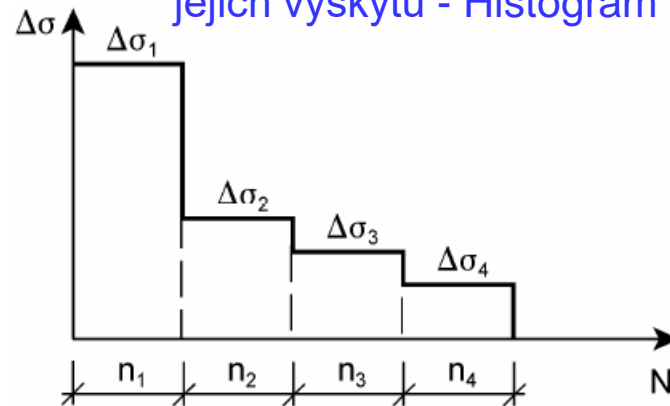
Historie napětí v detailu konstrukce



Metoda nádrže - rozkmity napětí

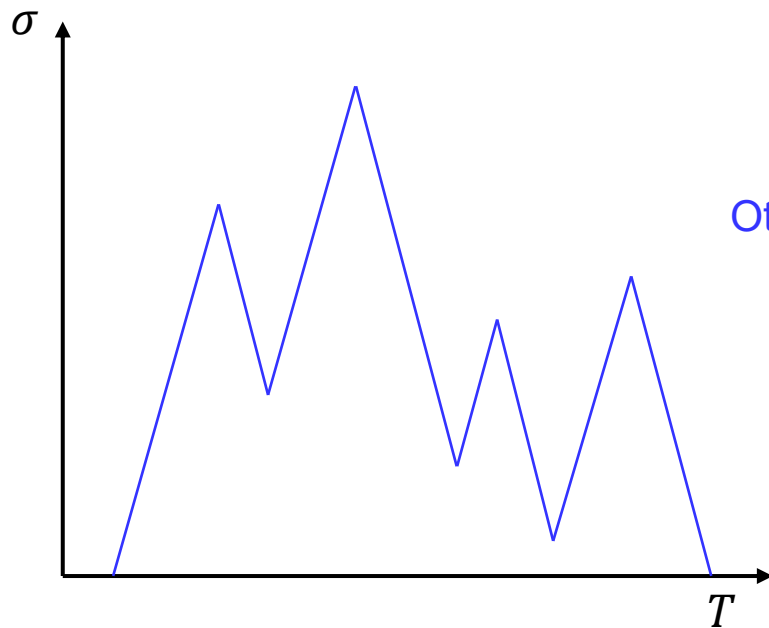


Spektrum rozkmitů napětí a počet cyklů jejich výskytu - Histogram

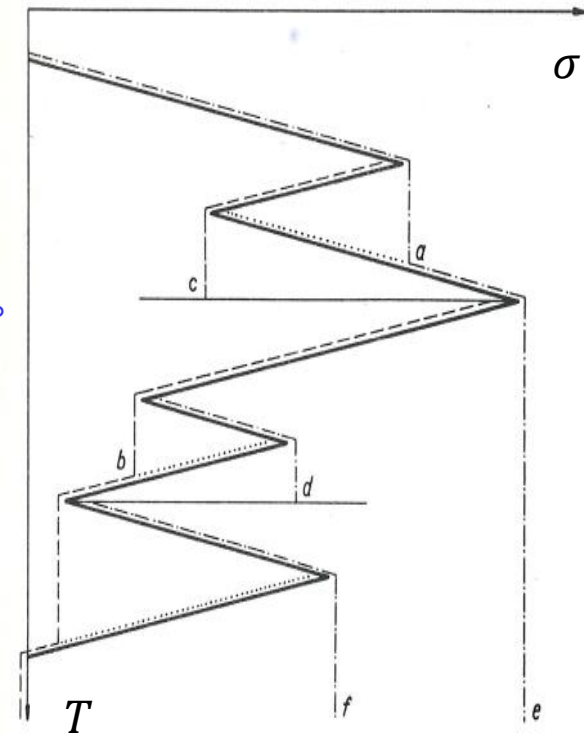


Spektrum rozkmitu napětí

- Skutečný průběh napětí podle některé z třídících metod
 - Metoda stékajícího deště (rain-flow)
 - Výhodná při asymetrickém namáhání
 - Časový záznam napětí otočen o 90° (představa „střechy pagody“)
 - Stékání vody po „střeše“
 - Jednotlivým proudům vody odpovídají příslušné rozkmity

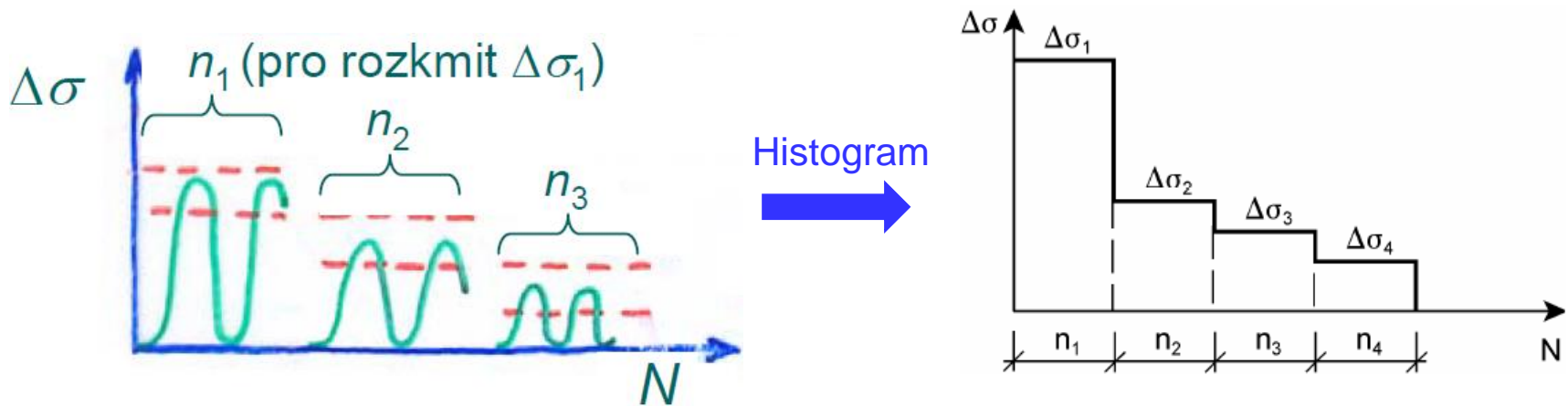


Otočeno o 90°



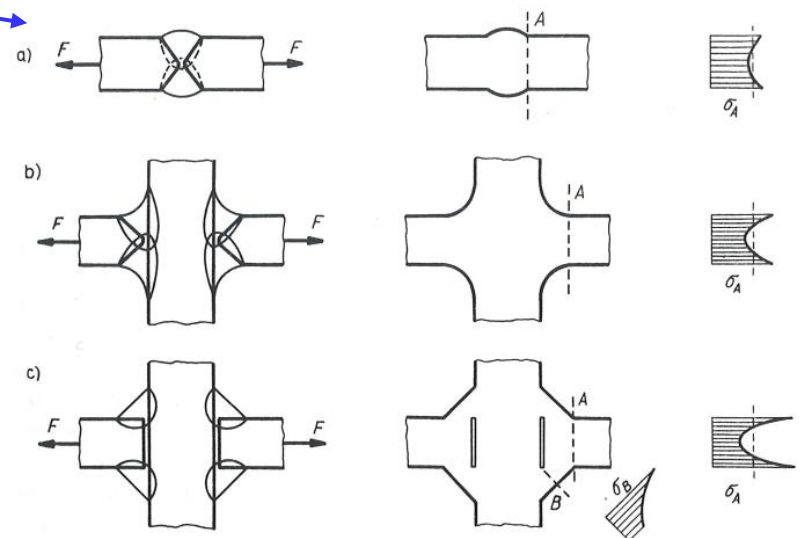
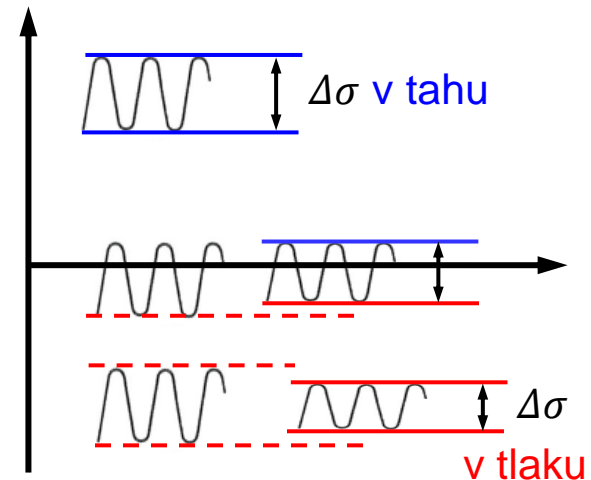
Spektrum rozkmitu napětí

- Rozkmity se utřídí do několikastupňového spektra
 - Pro příslušný počet $\Delta\sigma$
 - Následně vytvořen histogram
 - Spektrum rozkmitů napětí a počet cyklů jejich výskytů



Stanovení únavové pevnosti

- Rozhodující je vliv rozkmitu $\Delta\sigma$
- V tlaku je únavová pevnost vyšší než v tahu
 - Uvažuje se pouze 60 % rozkmitu
 - Svary vždy v tahu
 - Reziduální tahové napětí
- Vliv koncentrace napětí
 - Vruby
- Vliv meze kluzu je zanedbatelný
- Vliv prostředí
 - Snížení únavové pevnosti
 - Agresivní prostředí
 - Koroze
 - Nízké i vysoké teploty



Řešení problémů únavy

- 1) Wöhlerovský přístup
 - Pro návrh nových konstrukcí
 - Je uvažován v Eurokódu – ČSN EN 1993-1-9

- 2) Lomová mechanika
 - Zkoumá šíření dané trhliny
 - Dokáže stanovit „zbytkovou únosnost“

- V tomto předmětu se budeme zabývat pouze normálovým napětím řešeným Wöhlerovským přístupem, který je zahrnut v platné normě ČSN EN 1993-1-9

Návrh podle ČSN EN 1993-1-9

- Součinitel spolehlivosti zatížení pro návrhové hodnoty rozkmitů

$$\gamma_{Ff} = 1,0$$

- Dílčí součinitele spolehlivosti únavové pevnosti γ_{Mf} podle metody hodnocení
 - Metoda přípustných poškození
 - Má s přijatelnou úrovní spolehlivosti zajistit, že konstrukce bude uspokojivě sloužit po dobu návrhové životnosti za předpokladu předepsaného režimu kontrol a údržby pro zjištění a opravu únavových poškození
 - Metoda bezpečné životnosti
 - Má zajistit s přijatelnou úrovní spolehlivosti, že konstrukce bude uspokojivě sloužit po dobu návrhové životnosti bez potřeby pravidelné provozní kontroly únavových poškození

Hodnoty γ_{Mf}

Metoda hodnocení	Důsledky porušení	
	mírné	závažné
Přípustná poškození	1,00	1,15
Bezpečná životnost	1,15	1,35

Posudek – Konstantní ekvivalentní rozkmit

- Návrhová hodnota rozkmitu jmenovitého napětí

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n \Delta\sigma_k$$

- Posouzení pro rozkmit normálových napětí

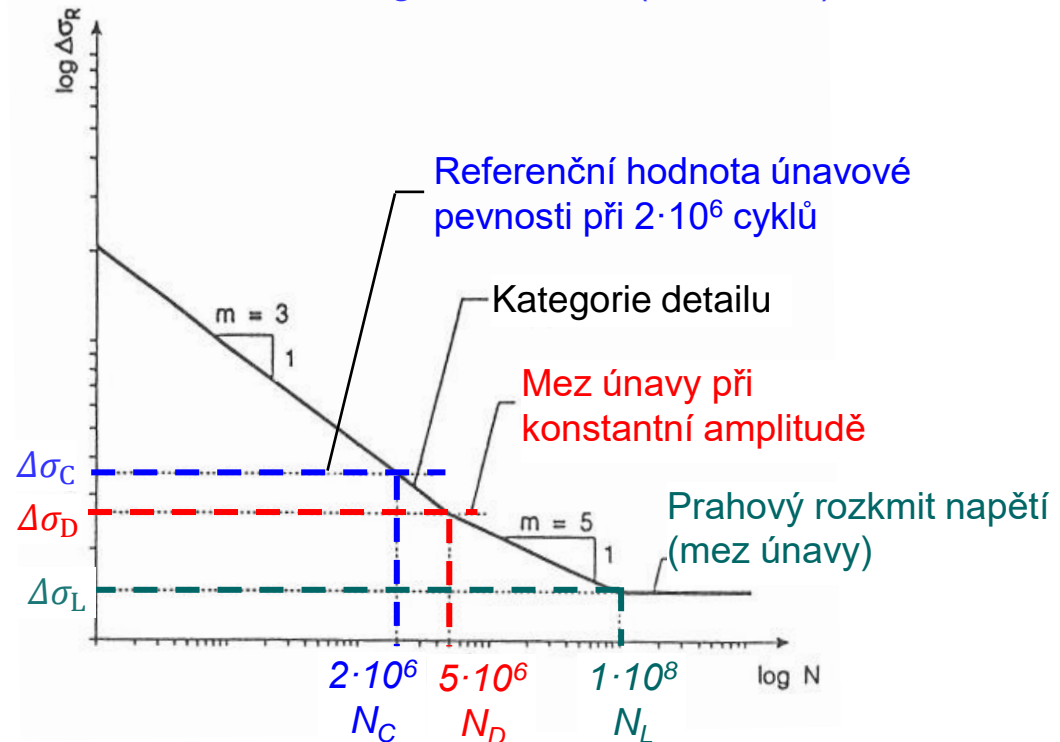
$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \leftarrow \text{„Únavová pevnost“ pro } 2 \cdot 10^6 \text{ cyklů daná názvem kategorie detailu (14 křivek)}$$

- Podmínka
 $\Delta\sigma \leq 1,5f_y$

Pro velké tloušťky
 (obvykle $t > 25 \text{ mm}$)
 se uvažuje

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \Delta\sigma_C$$

Hodnota uvedena u
 příslušného detailu



Posudek – Konstantní ekvivalentní rozkmit

- Kategorie detailu – ČSN EN 1993-1-9
 - Ploché prvky a nesvařované detaily

Kategorie detailu	Konstrukční detail	Popis	Požadavky
112		8) Souměrný spoj se dvěma příložkami s předpjatými vysokopevnostními šrouby nebo předpjatými injektovanými šrouby.	8) $\Delta\sigma$ se vypočte pro neoslabený průřez. (Detaily 8) až 13)): Všeobecně pro šroubové spoje:
90		9) Spoj se dvěma příložkami s lícovanými šrouby nebo nepředpjatými injektovanými šrouby.	9) $\Delta\sigma$ se vypočte pro oslabený průřez. Vzdálenost od konce: $e_1 \geq 1,5 d$ Vzdálenost od okraje: $e_2 \geq 1,5 d$ Rozteče: $p_1 \geq 2,5 d$
		10) Spoj s jednou příložkou s předpjatými vysokopevnostními šrouby nebo předpjatými injektovanými šrouby.	10) $\Delta\sigma$ se vypočte pro neoslabený průřez. $p_2 \geq 2,5 d$ Značky podle EN 1993-1-8, obrázek 3.1

Posudek – Konstantní ekvivalentní rozkmit

- Kategorie detailu – ČSN EN 1993-1-9
 - Složené průřezy s podélnými svary

Kategorie detailu

Konstrukční detail

Popis

Požadavky

125		<p><u>Nepřerušované podélné svary:</u></p> <p>1) Automatové oboustranné tupé svary. 2) Automatové koutové svary. Konce krycích desek se kontrolují jako detail 6) nebo 7) v tabulce 8.5.</p>	<p><u>Detaily 1) a 2):</u> Nejsou povolena žádná přerušování svařování s výjimkou oprav provedených specialistou, u kterých kontrola potvrdí správnost provedení opravy.</p>
112		<p>3) Automatové oboustranné koutové nebo tupé svary s místy přerušování svařování.</p> <p>4) Automatové jednostranné svary provedené na spojitě podložce bez míst přerušování svařování.</p>	<p>4) Jestliže tento detail obsahuje místa přerušování svařování, použije se kategorie detailu 100.</p>
100		<p>5) Ruční koutové nebo tupé svary.</p> <p>6) Ruční nebo automatové jednostranné tupé svary, zvláště u truhlíkových nosníků.</p>	<p>5), 6) Je důležité velmi dobré slícování pásnice a plechu stojiny. Úprava hrany stojiny musí umožnit dobrý souvislý průvar kořenové oblasti.</p>

Posudek – Konstantní ekvivalentní rozkmit

- Kategorie detailu – ČSN EN 1993-1-9
 - Příčné tupé svary

Kategorie detailu

Konstrukční detail

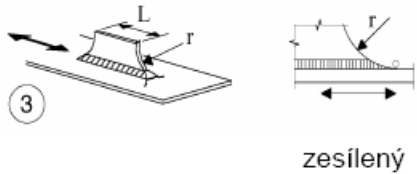
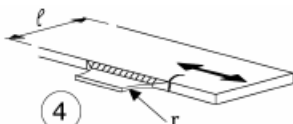
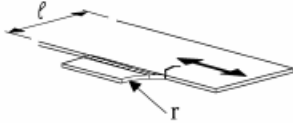
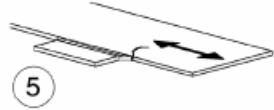
Popis

Požadavky

112	součinitel velikosti pro $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0,2}$		<p><u>Bez podložky:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Příčné styky plechů a pásů. 2) Styky pásů a stojin nosníků, svařených z plechu před sestavením nosníku. 3) Tupé svary ve styku celého řezu válcovaného průřezu bez výřezů ve svarech. 4) Příčné styky plechů a pásů proměnné šířky nebo tloušťky se sklonem $\leq 1/4$. 	<p>Všechny svary zabrousit do roviny plechu rovnoběžně se směrem šipky.</p> <p>Je potřebné použít a odborně odstranit příložky pro začátek a výběh svaru, hrany plechu se obrousí ve směru namáhání.</p> <p>Svařovat z obou stran, kontrola NDT.</p> <p><u>Detail 3):</u> Použít pouze pro stykování rozřezaných a opět svařených válcovaných průřezů.</p>
-----	--	--	--	---

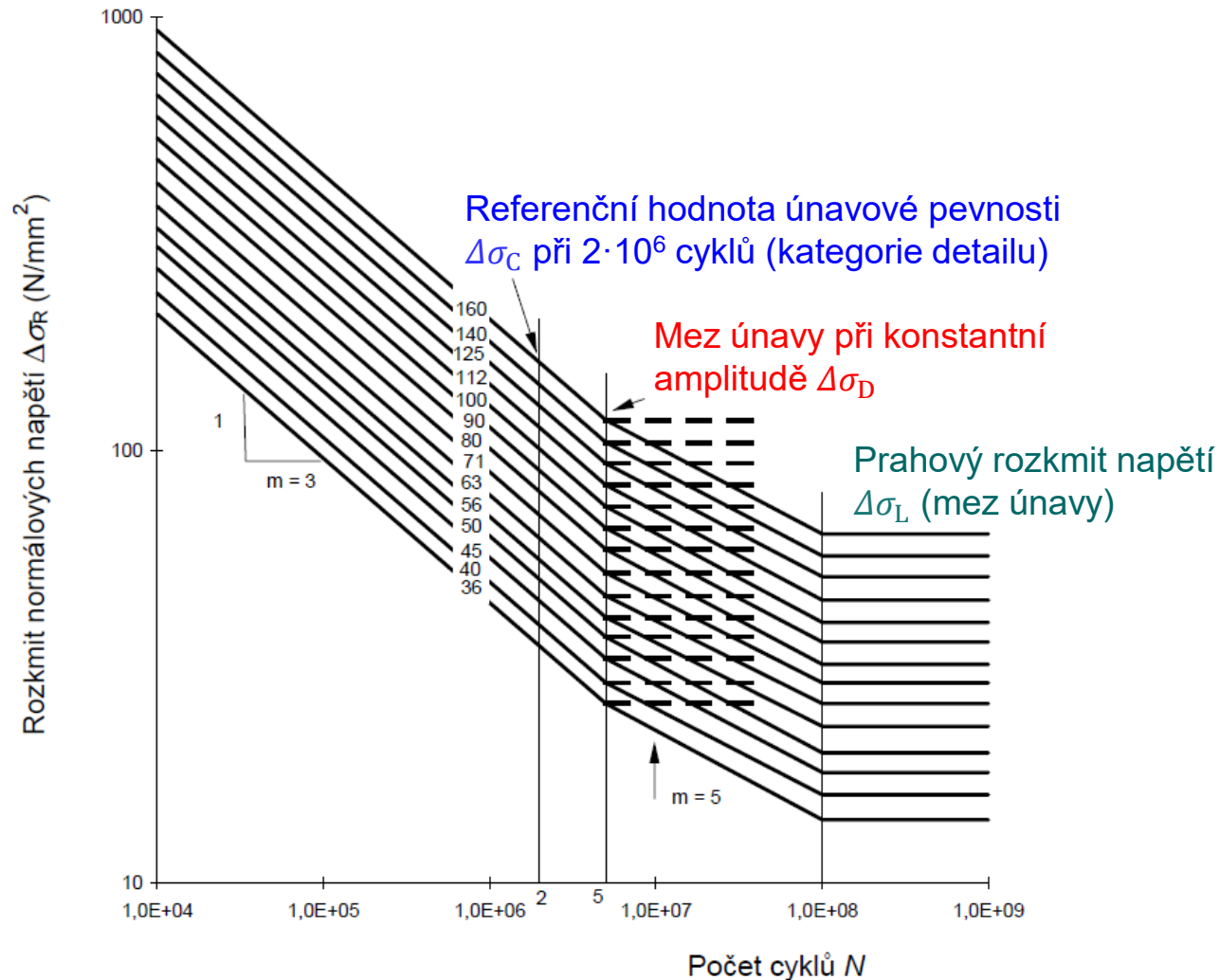
Posudek – Konstantní ekvivalentní rozkmit

- Kategorie detailu – ČSN EN 1993-1-9
 - Přivařené prvky a výztuhy

Kategorie detailu	Konstrukční detail	Popis	Požadavky
80	$r > 150\text{mm}$  <p>3) Podélný styčnickový plech přivařený koutovým svarem, v přechodu k plechu nebo trubce s opracováním o poloměru r, konec koutového svaru je zesílen (plný průvar), délka zesílení svaru $> r$.</p>	<p>3) Podélný styčnickový plech přivařený koutovým svarem, v přechodu k plechu nebo trubce s opracováním o poloměru r, konec koutového svaru je zesílen (plný průvar), délka zesílení svaru $> r$.</p>	<p><u>Detaily 3) a 4):</u> Hladký přechod o poloměru r vytvořený před svařením strojním opracováním nebo řezáním kyslíkem původního styčnickového plechu, potom se svarová plocha obrousí rovnoběžně se směrem šipky, tak aby úpatí příčného svaru bylo plně odstraněno.</p>
90	$\frac{r}{L} \geq \frac{1}{3}$ nebo $r > 150\text{mm}$  <p>4) Styčnickový plech, přivařený k hraně plechu nebo k pásnici nosníku.</p>	<p>4) Styčnickový plech, přivařený k hraně plechu nebo k pásnici nosníku.</p>	
71	$\frac{1}{6} \leq \frac{r}{L} \leq \frac{1}{3}$ 		
50	$\frac{r}{L} < \frac{1}{6}$ L: délka přípoje jako v detailu 1,2 nebo 3		
40	 <p>5) Svařeno bez zaobleného přechodu.</p>	<p>5) Svařeno bez zaobleného přechodu.</p>	

Posudek – Konstantní ekvivalentní rozkmit

- Křivky únavové pevnosti – ČSN EN 1993-1-9
 - Normálová napětí



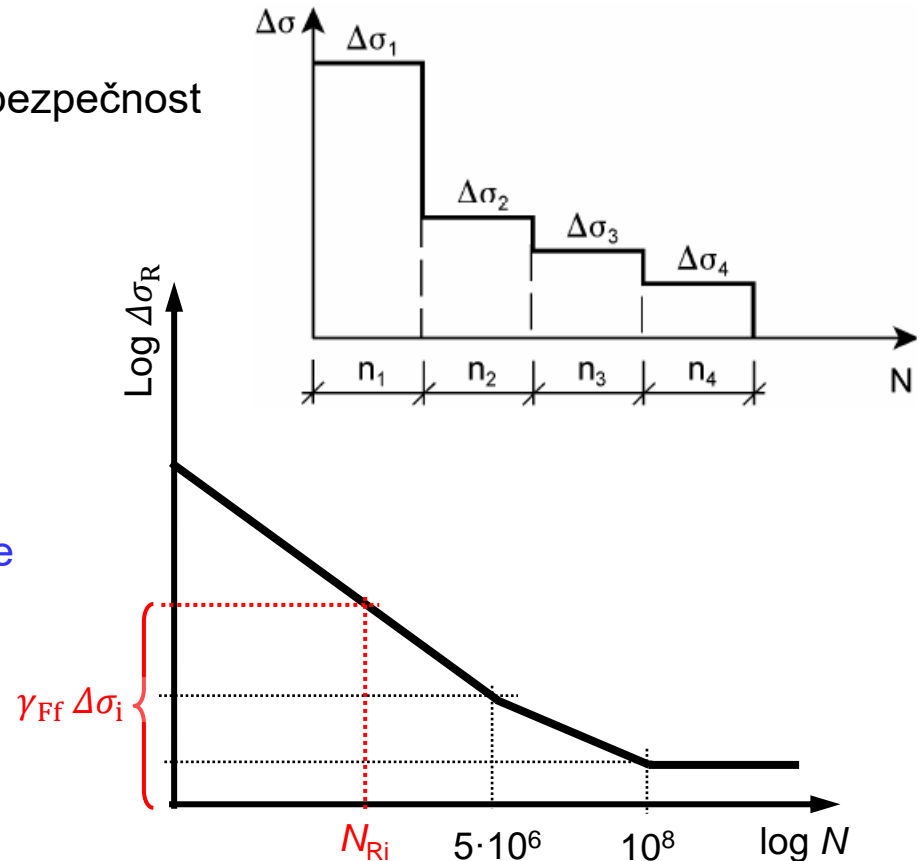
Posudek – Spektrum rozkmitů napětí

■ Několikastupňové spektrum

- $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3, \dots, \Delta\sigma_i$
- Palmgren-Minerova hypotéza kumulace poškození
 - P-M hypotéza tvrdí, že cyklus s určitým rozkmitem vyčerpá konstrukci úměrně tomuto počtu cyklů a rozkmitu
 - Jednoduchý postup
 - Experimentálně ověřena bezpečnost

$$D_d = \sum_1^i \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1,0$$

Počet cyklů pro amplitudu $\gamma_{FF} \Delta\sigma_i$
Počet cyklů do porušení téže amplitudy, určený z křivky kategorie detailu



Posudek – Spektrum rozkmitů napětí

- Počet cyklů N_i do porušení pro daný rozkmit $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$

Pro $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}$

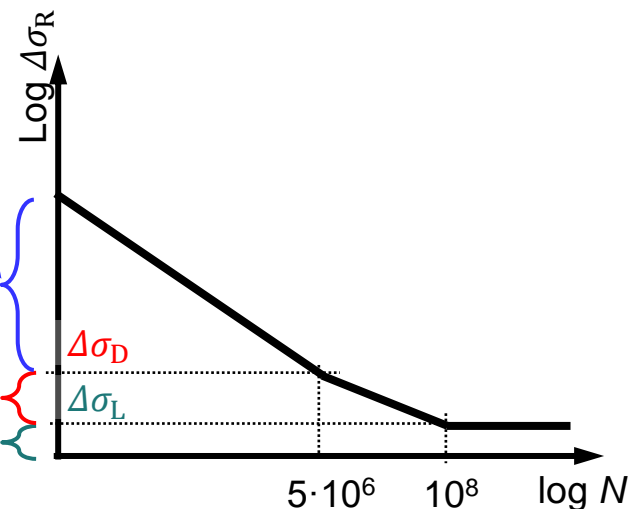
$$N_i = 5 \cdot 10^6 \left[\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf} \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i} \right]^3$$

Pro $\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} > \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \frac{\Delta\sigma_L}{\gamma_{Mf}}$

$$N_i = 5 \cdot 10^6 \left[\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf} \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i} \right]^5$$

Pro $\frac{\Delta\sigma_L}{\gamma_{Mf}} > \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$

$$N_i = \infty$$



- Mez únavy při konstantní amplitudě
 - Platí pro řešený detail, který lze zatřídit

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{3}} \Delta\sigma_C = 0,737 \Delta\sigma_C$$

- Pokud detail není v tabulce
 - Únavový posudek podle tvarového napětí
 - Zohlední koncentrace napětí v detailu
 - Složitě → MKP

Doporučení

- Při návrhu na únavu
 - Volit vhodné detaily
 - Omezení vrubů
 - Omezit reziduální pnutí
 - Svary ideálně vícevrstvé
 - Další housenky vyžihají předchozí
- Pro výrobu
 - Zvýšit jakost výroby
 - Například EXC3
 - Bez vrubů
 - Popřípadě zabrousit
 - Přetavit TIG
 - Upravit mechanicky
 - Malá reziduální pnutí
 - Svařování MAG, TIG



Děkuji za pozornost

Ing. Břetislav Židlický, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze

