



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA

SPOLOČNE BEZ HRANÍC

„Medzné stavy únosnosti“

NÁZOV PROJEKTU:

**Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov
v oblasti mostného stavebníctva v cezhraničnom regióne
(ITMS kód projektu 304010U647)**



VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

EDUMOS

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Medzné stavy únosnosti

Všeobecne

V rámci medzných stavov únosnosti sa overuje:

- **odolnosť prierezov**
- **odolnosť prvkov – strata stability tvaru**
- **odolnosť spojov**
- **odolnosť proti krehkému lomu**
- **únavová odolnosť**
- **strata stability polohy**

Návrhové hodnoty odolností prierezov závisí od ich klasifikácie, ktorá je rovnaká ako pre konštrukcie budov. Odolnosti prierezov triedy 1 a 2 sa môžu stanoviť podľa teórie plasticity.

Odolnosti prierezov triedy 3 sa musia počítať na základe pružného rozdelenia napätia po priereze.

Všeobecne

Odolnosť prierezov triedy 4 sa stanovuje tiež podľa teórie pružnosti s uvažovaním lokálnej straty stability parciálnych častí prierezov, ktorá spôsobí prerozdelenie napätia po priereze.

Okrem vydúvania sa pri mostných konštrukciách prejavujú aj vplyvy ochabnutia šmykom tiež sprevádzané prerozdelením napätia po priereze.

Pre výpočet návrhových hodnôt odolností prierezov a prvkov sa aplikujú príslušné parciálne súčinitele podľa nasledujúcej tabuľky.

Všeobecne

Parciálne súčinitele spoľahlivosti pre stanovenie odolnosti:

a) odolnosť prútov a prierezov:	
– odolnosť prierezov proti nadmernej plastizácii a lokálnemu vydúvaniu	$\gamma_{M0} = 1,00$
– odolnosť prútov proti strate stability hodnotená posúdením prútov	$\gamma_{M1} = 1,10$
– odolnosť ťahaných prierezov proti lomu	$\gamma_{M2} = 1,25$
b) odolnosť uzlov	
– odolnosť skrutiek – odolnosť nitov – odolnosť čapov – odolnosť zvarov – odolnosť plechov proti otlačeniu	$\gamma_{M2} = 1,25$
– odolnosť proti preklzu – v medznom stave únosnosti (kategória C) – v medznom stave používateľnosti	$\gamma_{M3} = 1,25$ $\gamma_{M3,ser} = 1,10$
– otlačenie injektovaných skrutiek	$\gamma_{M4} = 1,10$
– odolnosť uzlov priehradových nosníkov z dutých profilov	$\gamma_{M5} = 1,10$
– odolnosť čapov v medznom stave používateľnosti	$\gamma_{M6,ser} = 1,00$
– predpätie vysoko pevnostných skrutiek	$\gamma_{M7} = 1,10$

Odolnosť prierezu

Odolnosti prierezu v prípadoch elementárnych namáhání sa stanovujú podľa STN EN 1993-1-1.

Ťah:
$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \text{ resp.}$$

$$N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2}$$

kde A je plná plocha prierezu, A_{net} je oslabená plocha prierezu, f_y a f_u sú charakteristické hodnoty medze klzu a medze pevnosti materiálu .

Odolnosť prierezov

Tlak:
$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \text{ pre prierezy triedy 1,2 a 3}$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \text{ pre prierezy triedy 4}$$

kde A_{eff} je účinná plocha prierezu rešpektujúca vplyv vydúvania jeho časti.

Odolnosť prierezov

Ohyb:
$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pre prierezy triedy 1 a 2}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pre prierezy triedy 3}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{pre prierezy triedy 4}$$

kde W_{pl} , $W_{el,min}$ a $W_{eff,min}$ sú prierezové moduly plastický, elastický a účinný.

Odolnosť prierezov

Šmyk: $\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} \text{ pre prierezy triedy 1 a 2}$$

$$\frac{\frac{\tau_{Ed}}{f_y}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \leq 1,0 \text{ pre prierezy triedy 3}$$

kde $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t}$

Odolnosť prierezo

Krútenie: $\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0$

kde T_{Rd} je návrhová hodnota odolnosti prierezu v krútení

$$T_{Ed} = T_{t,Ed} + T_{w,Ed}$$

$T_{t,Ed}$ je St. Venantov krútiaci moment,
 $T_{w,Ed}$ je krútiaci moment viazaného krútenia.

Správny postup výpočtu

$$\tau_{t,Ed} = T_{t,Ed} t / I_t \quad \tau_{w,Ed} = T_{w,Ed} S_w / I_w t$$

$$\frac{\tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed}}{f_y / (\gamma_{M0} \sqrt{3})}$$

Odolnosť prierezo

V prípade prúta s uzavretým dutým prierezom sa môžu zanedbať účinky viazaného krútenia. Pri otvorených profiloch I a H je možné zanedbať účinky voľného krútenia.

Pri súčasnom posudzovaní priečnej sily a krútiaceho momentu sa má plastická šmyková odolnosť $V_{pl,Rd}$ redukovať na $V_{pl,T,Rd}$ podľa STN EN 1993-1-1. Potom návrhová priečna sila má spĺňať podmienku:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1,0 \quad V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{T_{t,Ed}}{1,25 \left(f_y / \sqrt{3}\right) / \gamma_{M0}}} V_{pl,Rd}$$

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

Odolnosť prierezov

Kombinácia namáhání:

Ak pôsobia súčasné ohyb, osová sila, priečna sila, interakciu medzi nimi je možné stanoviť pružnostne pomocou Huber-von Misses-Henckyho relácie:

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

Pri prierezoch triedy 1 a 2 sú k dispozícii presnejšie postupy s ohľadom na možnosti využitia plastických odolností prierezov.

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd}$$

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

Šmykové ochabnutie

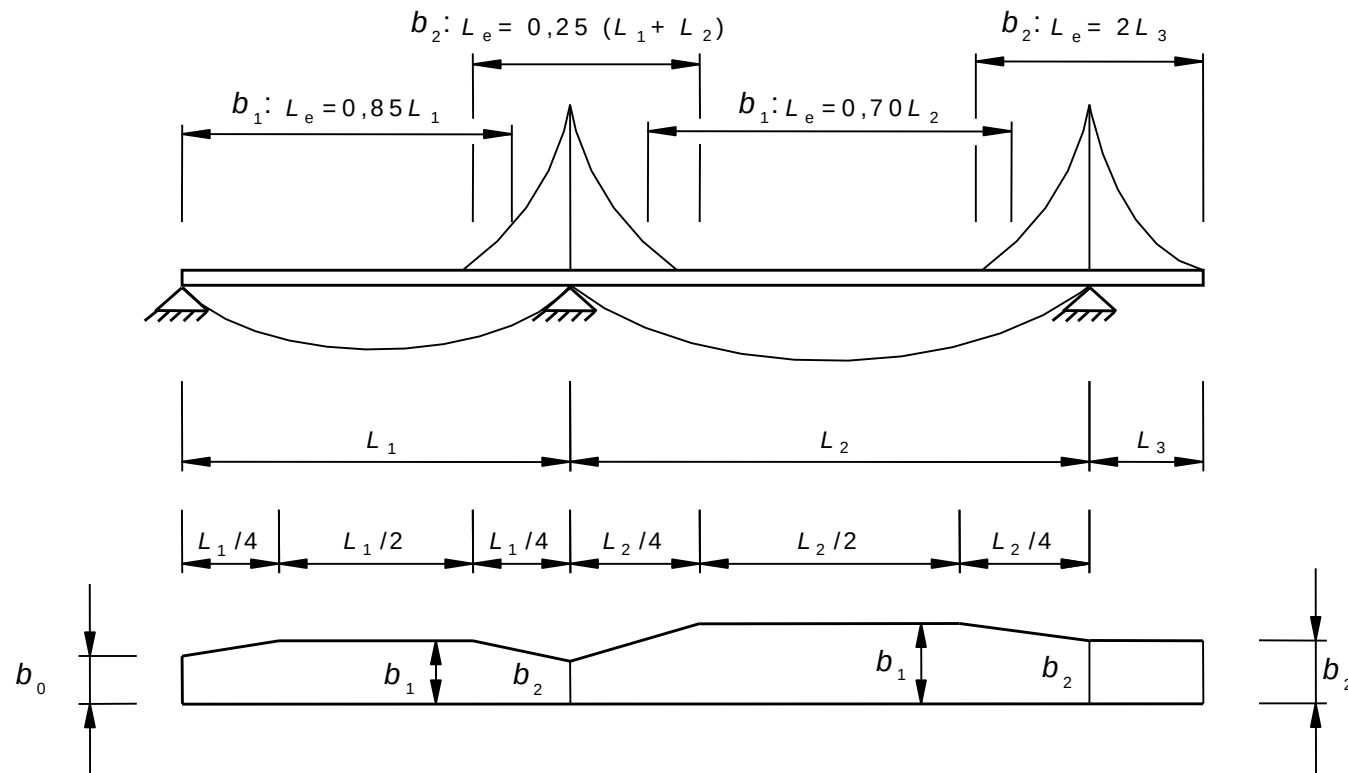
V širokých pásoch ohýbaných trámov dochádza v dôsledku šmykových deformácií k nerovnomernému rozloženiu napätia po šírke pásu. K ochabnutiu normálových napätí vplyvom šmyku (k šmykovému ochabnutiu) dochádza či v tlačенých tak i v ťahaných širokých pásoch.

Šmykové ochabnutie v pásoch môžeme zanedbať, pokiaľ polovičná šírka pásnice b_0 medzi stenami resp. prečnievajúca časť pásu spĺňa nerovnosť:

$$b_0 < L_e / 50$$

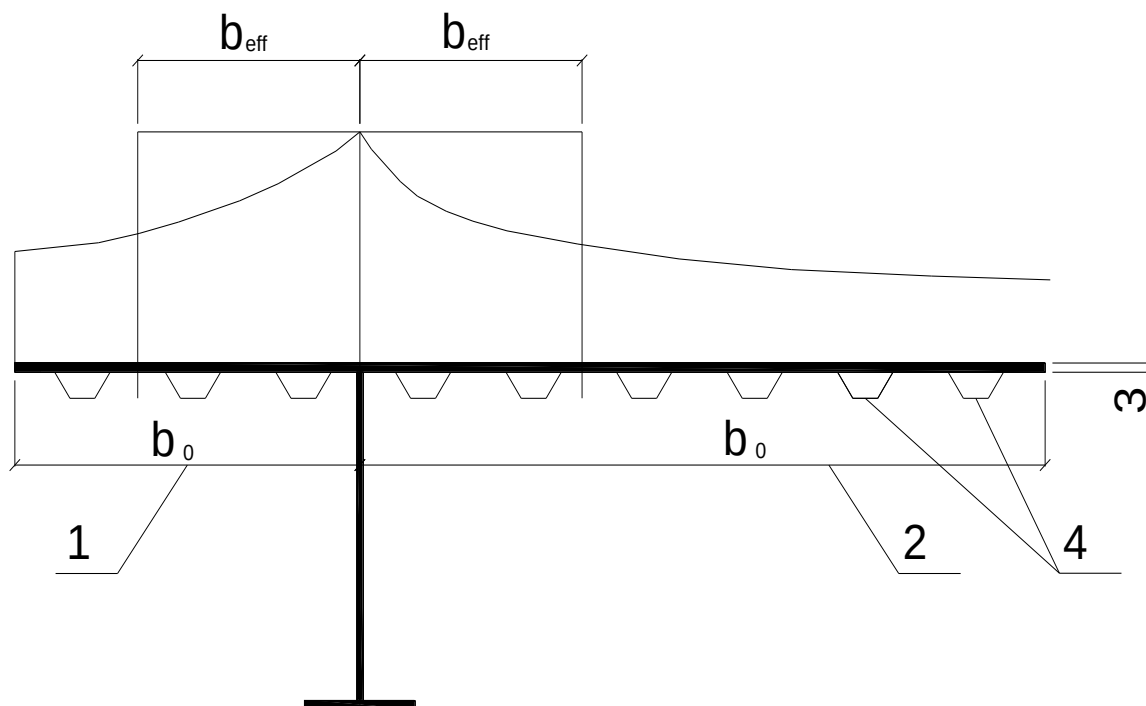
kde L_e je dĺžka medzi bodmi s nulovým momentom podľa obrázku - ekvivalentná dĺžka.

Šmykové ochabnutie



Ekvivalentné dĺžky L_e sa môžu určiť z obrázku za predpokladu, že sa rozpätia susedných polí nelíši viac ako 50% a vyloženie žiadnej konzoly nie je väčšie ako polovica dĺžky priľahlého poľa. Pre všetky ostatné prípady sa má L_e určiť ako vzdialenosť medzi dvoma susednými bodmi s nulovou hodnotou ohybového momentu.

Šmykové ochabnutie



1 prečnievajúca časť pásu
2 vnútorná časť pásu

3 hrúbka plechu t
4 pozdĺžne výstuhy

Šmykové ochabnutie

Vplyv šmykového ochabnutia sa zohľadňuje pomocou spolupôsobiacej šírky b_{eff} , ktorá sa pre medzné stavy používateľnosti a únavu stanoví zo vzťahu:

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0$$

Súčiniteľ spolupôsobiacej šírky pre šmykové ochabnutie sa určí v závislosti od pomeru

$$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e \quad \alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}}$$

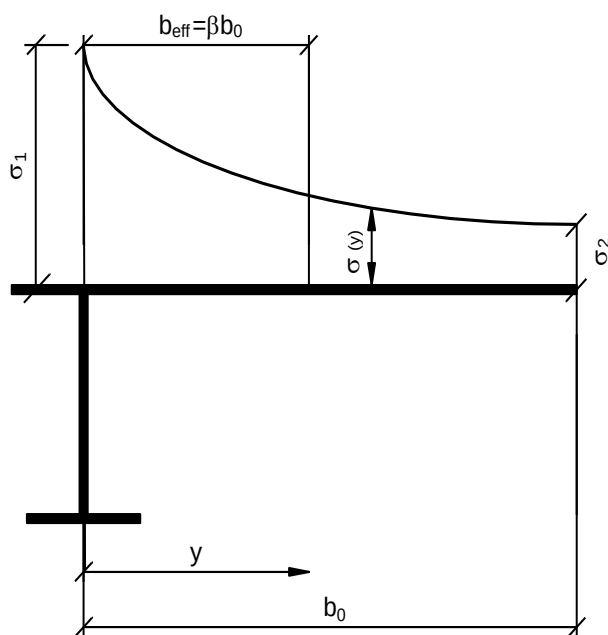
A_{sl} je plocha všetkých pozdĺžnych výstuh umiestnených v úseku s šírkou b_0 .

Šmykové ochabnutie

κ	Miesto overenia	β – hodnota
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	kladné ohybové momenty	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4 \kappa^2}$
	záporné ohybové momenty	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500 \kappa} \right) + 1,6 \kappa^2}$
$> 0,70$	kladné ohybové momenty	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9 \kappa}$
	záporné ohybové momenty	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6 \kappa}$
všetky κ	koncová podpera	$\beta_0 = (0,55 + 0,025 / \kappa) \beta_1$, but ale $\beta_0 < \beta_1$
všetky κ	konzola	$\beta = \beta_2$ pri podpere a na konci
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$ kde $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{s\ell}}{b_0 t}}$ a $A_{s\ell}$ je plocha všetkých pozdĺžnych výstuh v úseku b_0 . Ostatné značky sú definované v obrázkoch 3.1 a 3.2.		

Šmykové ochabnutie

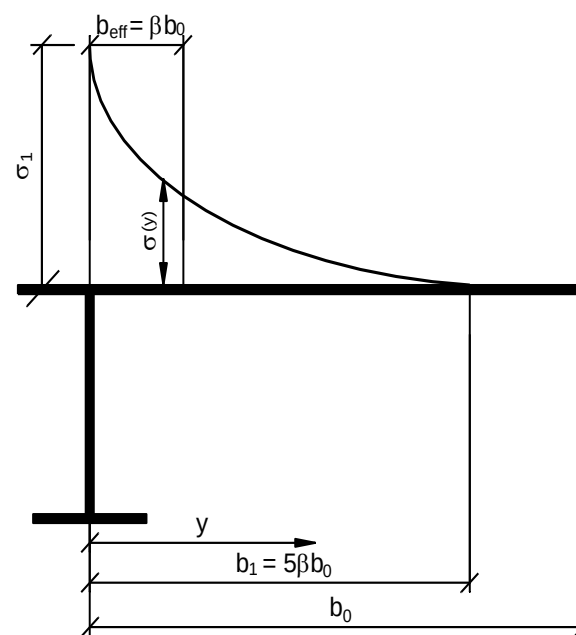
Priebeh ochabnutia pozdĺžneho normálového napätia v plechu pásu vplyvom šmyku sa môže stanoviť podľa obrázku



$\beta > 0,20 :$

$$\sigma_2 = 1,25 (\beta - 0,20) \sigma_1$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) (1 - y/b_0)^4$$



$\beta \leq 0,20 :$

$$\sigma_2 = 0$$

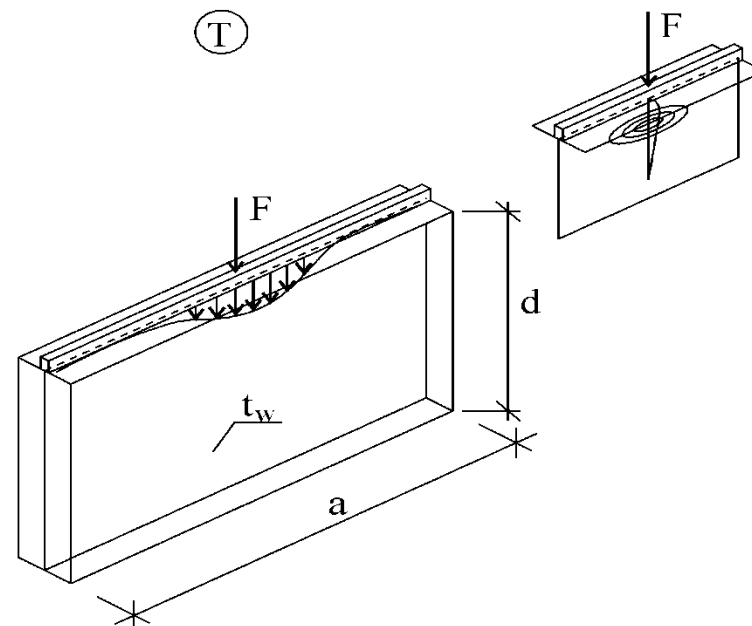
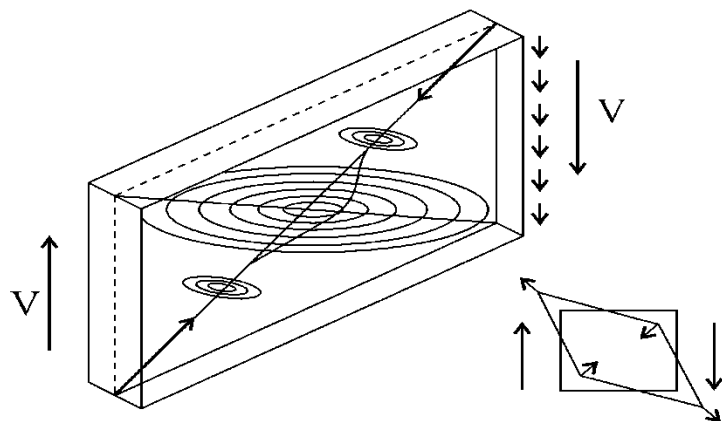
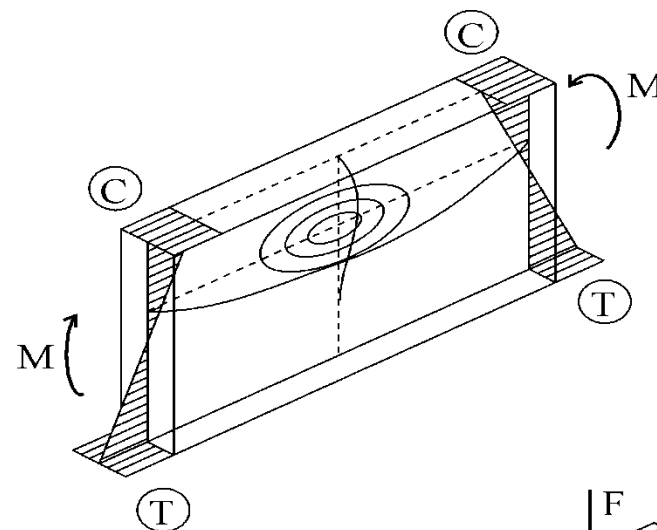
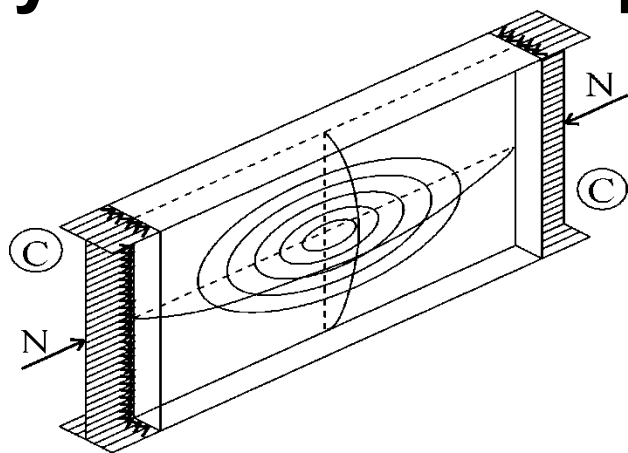
$$\sigma(y) = \sigma_1 (1 - y/b_1)^4$$

Vydúvanie stien a pásov

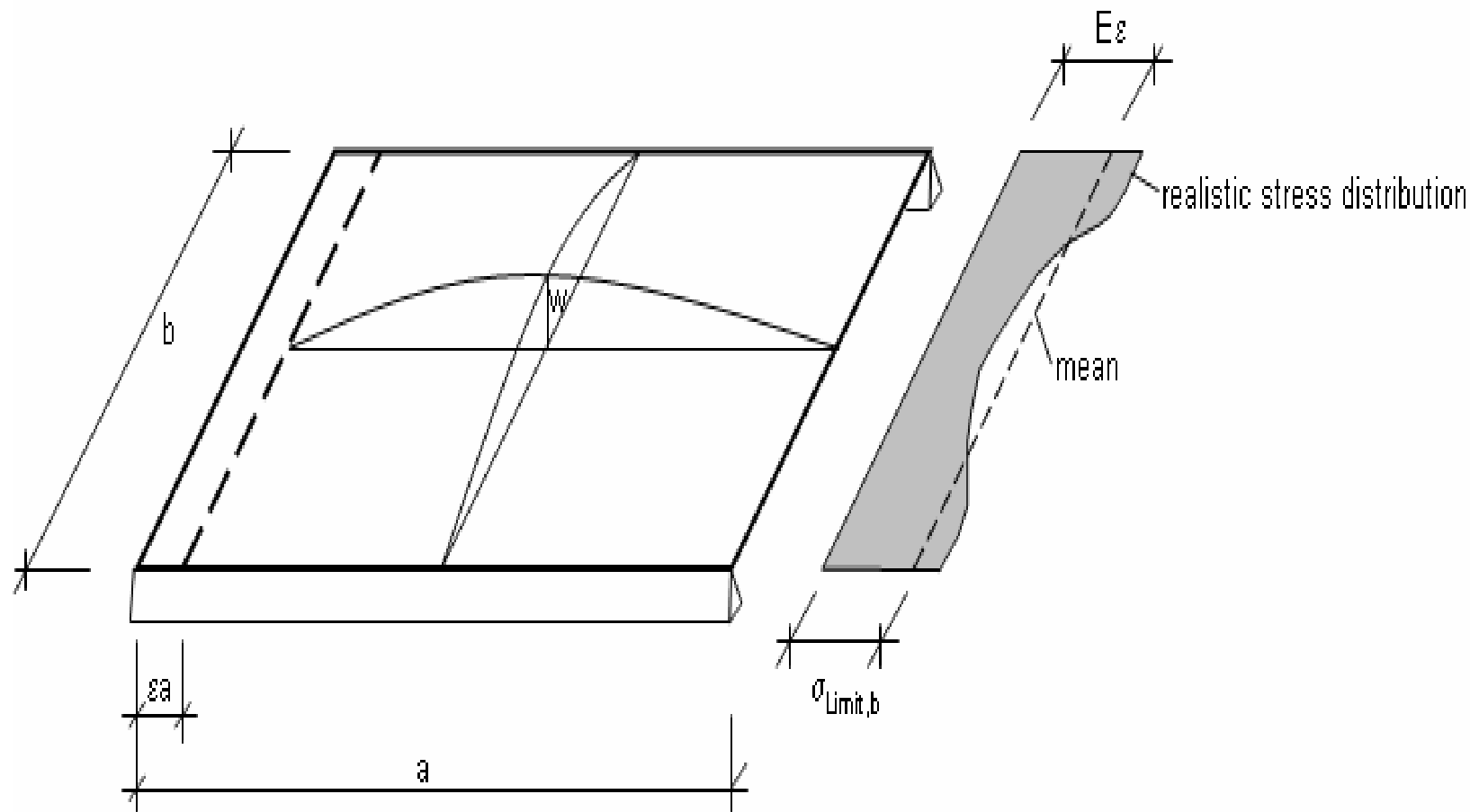
Postup zohľadnenia vplyvu vydúvania stien a pásov mostných konštrukcií uvedený v STN EN 1993-1-5 platí za nasledujúcich predpokladov:

- a) polia steny sú pravouhlé a pásnice sú rovnobežné resp. takmer rovnobežné s odklonom do 10° ;**
- b) výstuhy, pokiaľ je stena má, sú orientované v pozdĺžnom alebo priečnom smere alebo v oboch smeroch;**
- c) nevyplnené otvory a výrezy sú malé;**
- d) prvky majú konštantný prierez;**
- e) nedôjde k vydúvaniu steny vyvolanému vybočením pásnice v rovine steny.**

Vydúvanie stien a pásov



Vydúvanie stien a pásov



Vydúvanie stien a pásov

Vplyv vydúvania sa môže zohľadniť dvoma postupmi:

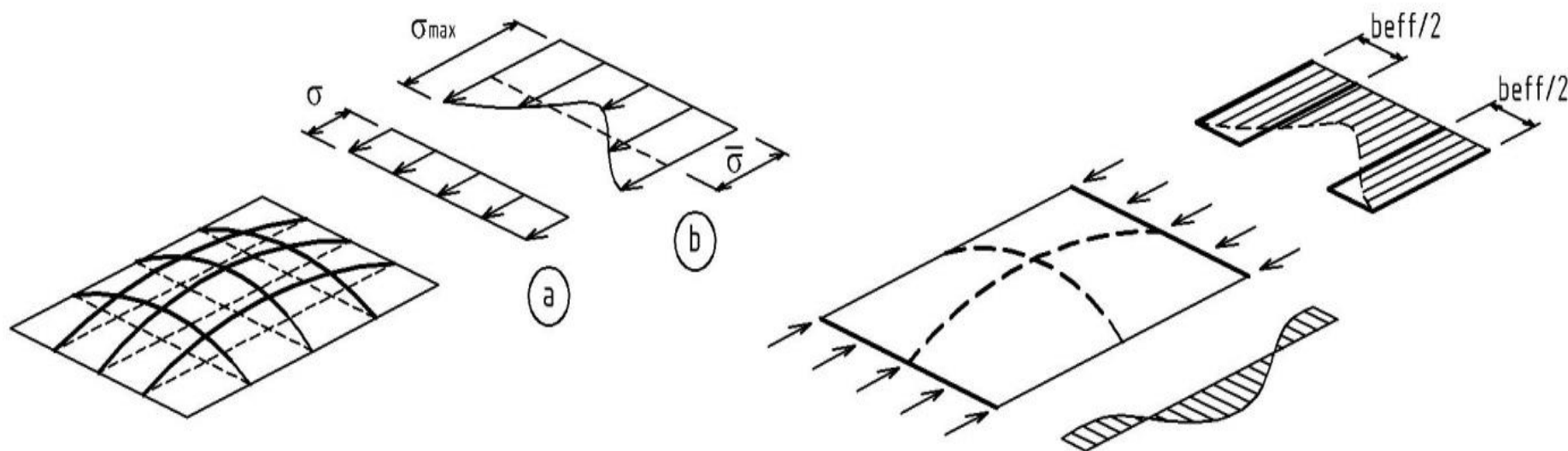
- pomocou koncepcie účinných plôch stien a pásov;
- pomocou koncepcie redukovaných napätí.

Účinné plochy sa majú určiť na základe lineárneho priebehu pomerného predĺženia a predpokladu, že pomerné predĺženie zodpovedajúce medzi klzu sa dosiahne v strednicovej rovine tlačenej steny.

Posúdenie odolnosti a overenie globálnej stability prvkov pri vybočení v dôsledku vzperu alebo klopení príp. ich kombinácie sa vykoná pomocou charakteristík prierezu (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}) podľa STN EN 1993-1-1.

Koncepcia účinnej šírky

Vychádza z úvahy nahradenia šírky reálnej steny jej účinnou šírkou, ktorá pri tlakovom namáhaní relatívne nevydúva, pričom normálové napätie sa predpokladá rovnomerne rozložené po tejto šírke.



Koncepcia účinnej šírky

$$\sigma_{\max} d_{\text{eff}} t_w = \int_0^d \sigma_y t_w dy \Rightarrow d_{\text{eff}} = \frac{1}{\sigma_{\max}} \int_0^d \sigma_y dy$$

Odolnosť tlačenej steny pri rešpektovaní pružnostného medzného stavu a zápisu podľa metódy parciálnych súčiniteľov vyjadríme s použitím účinnej šírky v tvare:

$$N_{Ed} \leq d_{\text{eff}} t_w f_y / \gamma_{M0} = A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{M0}$$

Koncepcia redukovaného napätia

Vychádza z myšlienky redukcie odolnosti prierezu súčiniteľom vydúvania ρ , ktorý je definovaný pomerom priemerného napätia σ_b v stene a maximálneho napätia σ_{max} na pozdĺžnych okrajoch:

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

Prvý vzťah pre súčiniteľ vydúvania odvodil Marquerre:

$$\rho = 0,5 + 0,5 / \eta_{cr} \quad \text{a} \quad \eta_{cr} = f_y / \sigma_{cr}$$

V STN EN sa používa upravený Winterov vzťah:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}, \quad \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2}$$

$$\bar{\lambda}_p = \left(\frac{f_y}{\sigma_{cr}} \right)^{0,5} = \left(\frac{f_y}{k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{d} \right)^2} \right)^{0,5} = \frac{d / t_w}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

ψ je pomer napätí na okrajoch steny.

$$N_{Ed} \leq A \sigma_b / \gamma_{M0} = A \frac{\sigma_b}{f_y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \rho A \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Koncepcia účinnej šírky

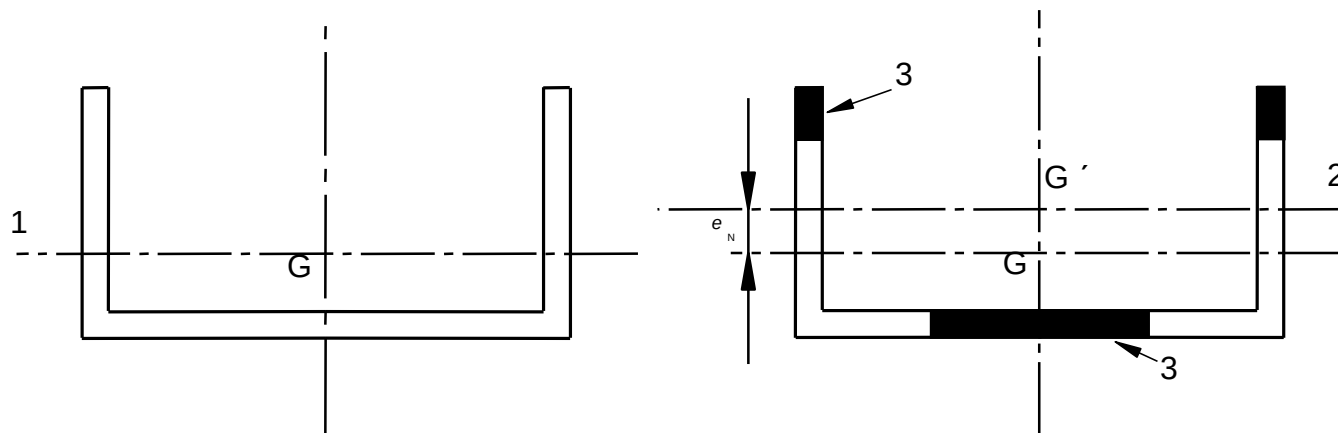
Účinná plocha A_{eff} sa má určiť za predpokladu, že prierez je namáhaný len konštantnými tlakovými napätiami od osového namáhania. Pri nesymetrických prierezoch možný posun e_N ťažiska účinnej plochy A_{eff} od ťažiska plného neredukovaného prierezu vedie k vzniku prídavného momentu, ktorý sa má zväžiť pri posudzovaní prierezu.

Účinný prierezový modul W_{eff} sa má určiť, za predpokladu, že prierez je namáhaný len ohybovými napätiami.

Alternatívne sa samostatný účinný prierez môže určiť z priebehu napätia pri uvážení súčasného pôsobenia osovej sily N_{Ed} a ohybového momentu M_{Ed} . Vplyvy e_N sa majú zohľadniť len pre namáhanie osovou silou N_{Ed} .

Koncepcia účinnej šírky

Prierez namáhaný osovou silou



G ťažisko neredukovaného prierezu

G' ťažisko účinného prierezu

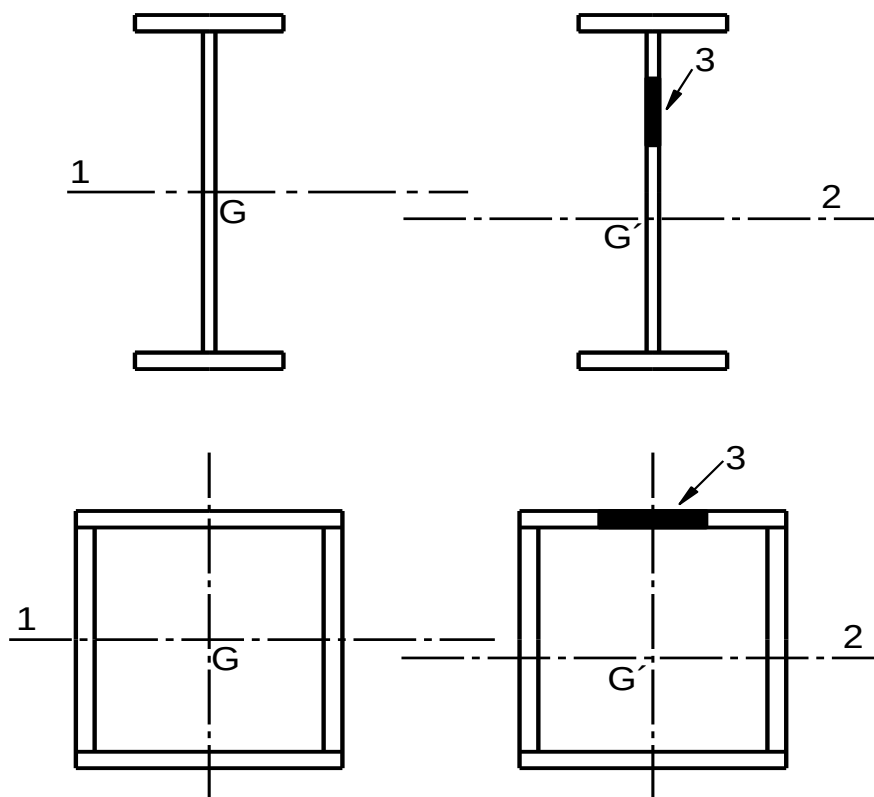
1 ťažisková os neredukovaného prierezu

2 ťažisková os účinného prierezu

3 neúčinná oblasť

Koncepcia účinnej šírky

Prierez namáhaný ohybovým momentom



G ťažisko neredukovaného prierezu

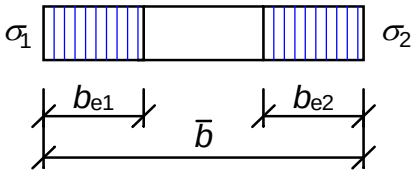
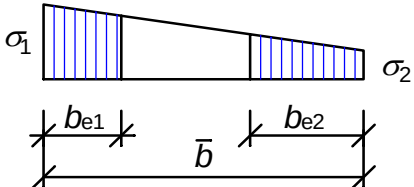
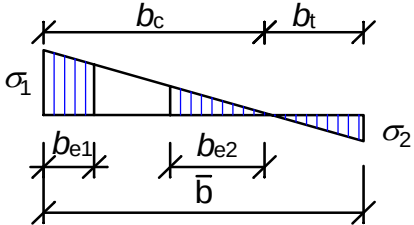
G' ťažisko účinného prierezu

1 ťažisková os neredukovaného prierezu

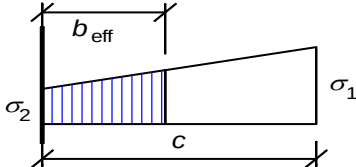
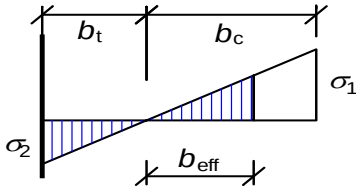
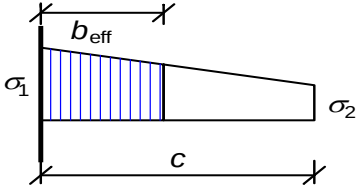
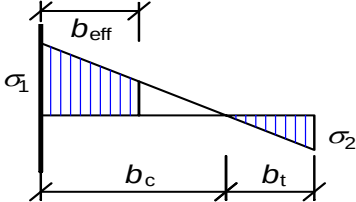
2 ťažisková os účinného prierezu

3 neúčinná oblasť

Steny bez pozdĺžnych výstuh

Pribeh napätia (tlak sa berie ako kladný)				Účinná šírka b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Súčiniteľ kritického napätia k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Steny bez pozdĺžnych výstuh

Pribeh napätia (tlak sa berie ako kladný)			Účinná šírka b_{eff}		
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho \ c$		
			$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho \ b_c = \rho \ c \ / \ (1-\psi)$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Súčiniteľ kritického napätia k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho \ c$		
			$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho \ b_c = \rho \ c \ / \ (1-\psi)$		
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$		0	$0 > \psi > -1$
Súčiniteľ kritického napätia k_σ	0,43	$0,578 \ / \ (\psi + 0,34)$		1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
					-1
					23,8

Steny bez pozdĺžnych výstuh

Účinná plocha tlačenej oblasti steny, ktorá má neredukovanú plochu A_c sa určí z:

$$A_{c,eff} = \rho A_c$$

kde ρ je súčiniteľ vydúvania steny.

Súčiniteľ vydúvania ρ sa stanoví nasledovne pre:
vnútorné tlačenej časti:

$$\rho = 1,0 \quad \text{pre} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \left(\bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi)} \right)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{pre} \quad \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \left(\bar{\lambda}_p \geq 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi)} \right)$$

Steny bez pozdĺžnych výstuh

prečnievajúce tlačené časti:

$$\rho = 1,0 \text{ pre } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ pre } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b} / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [N / mm^2]}}$$

$\bar{b}$ je príslušná šírka – b_w

t je hrúbka;

σ_{cr} je pružné kritické napätie pri vydúvaní steny;

Steny bez pozdĺžnych výstuh

Pre pásy I prierezov a komorových nosníkov sa pomer napätie ψ určuje z tabuliek vyššie z vlastností plného prierezu alebo z prierezu redukovaného v dôsledku šmykového ochabnutia.

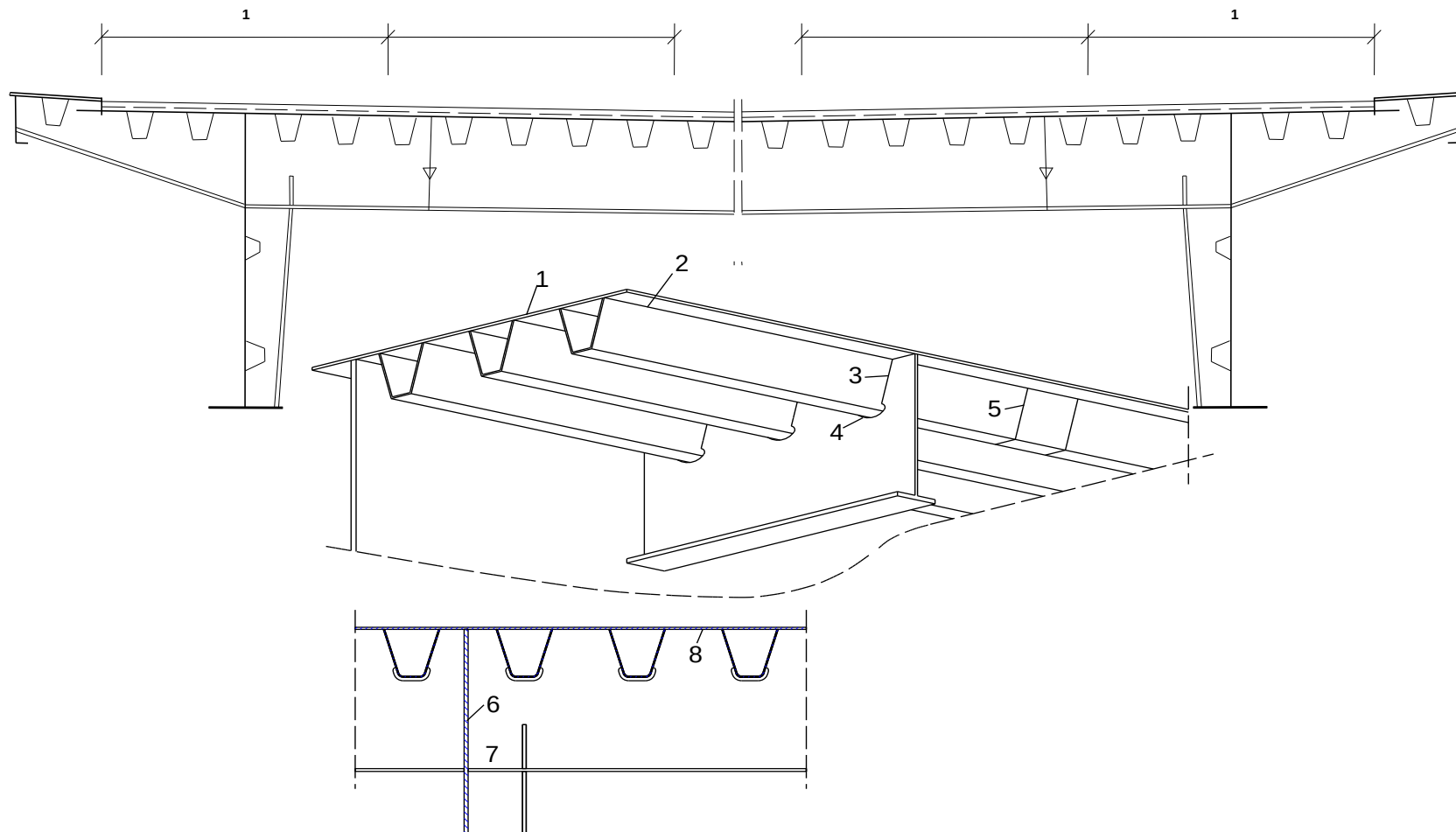
Pre časti steny nosníka sa určí s uvažovaním účinnej plochy tlačeneho pásu a plné plochy steny nosníka a ťahané pásnice resp. pásu.

Štíhlosť steny časti prierezu sa môže nahradiť štíhlosťou

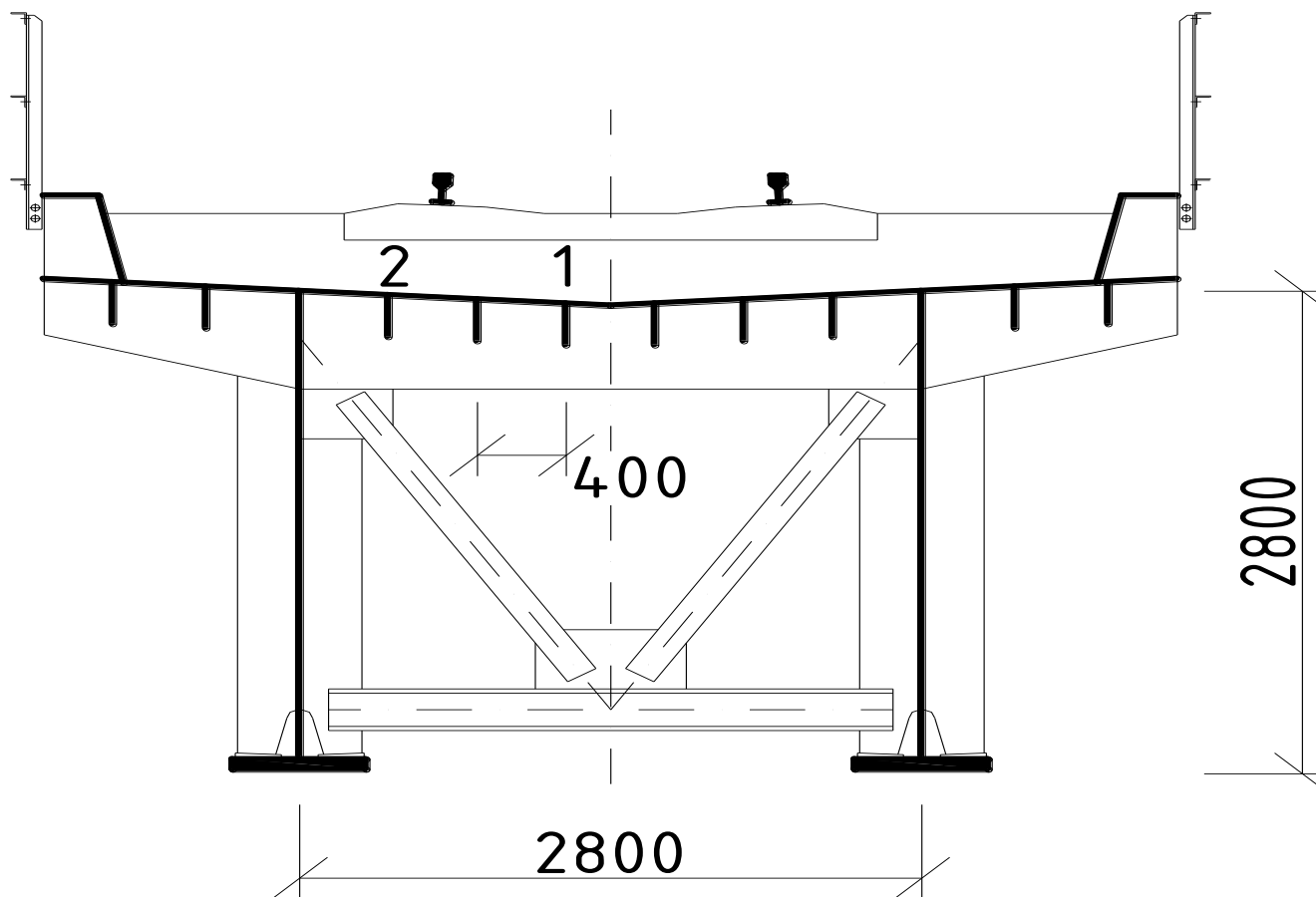
$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}}$$

$\sigma_{com,Ed}$ je najväčšie návrhové tlakové napätie v časti prierezu, ktoré sa určí s použitím účinnej plochy prierezu stanovenej pri uvážení súčasného pôsobenia všetkých zaťažení.

Steny a pásy s pozdĺžnymi výstuhami



Steny a pásy s pozdĺžnymi výstuhami



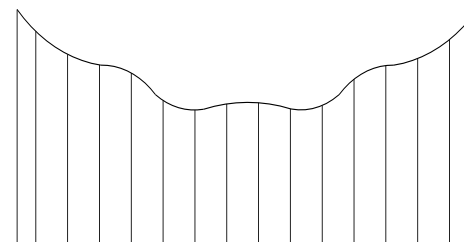
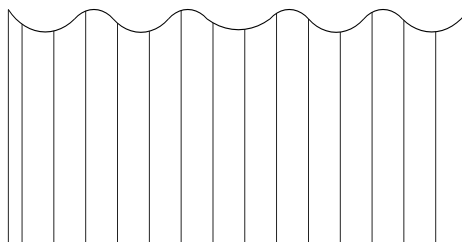
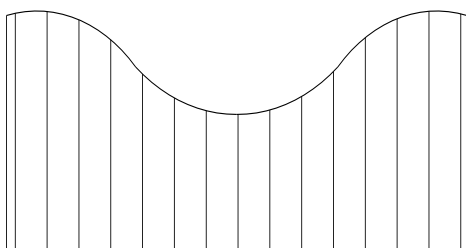
Steny a pásy s pozdĺžnymi výstuhami

Pri stenách a pásoch s pozdĺžnymi výstuhami dochádza všeobecne k interakcii globálneho vydúvania celého panelu spolu s lokálnym vydúvaním plechu medzi pozdĺžnymi a priečnymi výstuhami. O tom, či nastanú oba javy, resp. len jeden z nich, rozhodujú tuhostné parametre steny (páso) a výstuh.

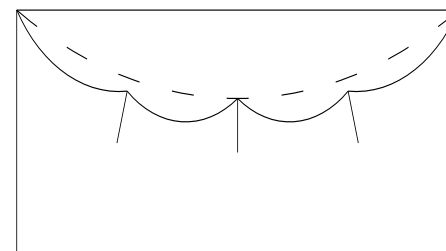
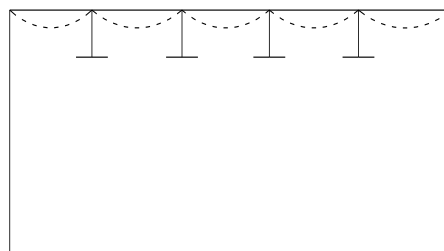
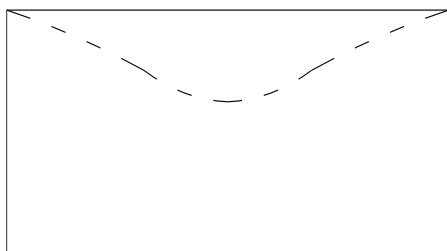
Vplyv oboch typov vydúvaní je možné vyjadriť pomocou koncepcie účinnej šírky (plochy) alebo pomocou koncepcie redukovaného napätia.

Steny a pásy s pozdĺžnymi výstuhami

priebeh normálového napätia pri rôznych typoch vydúvania

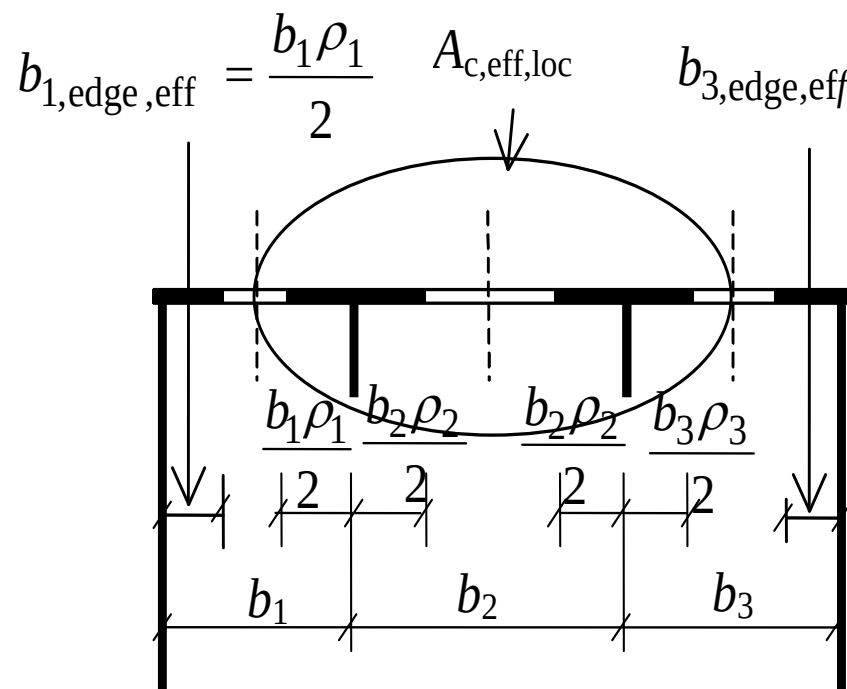
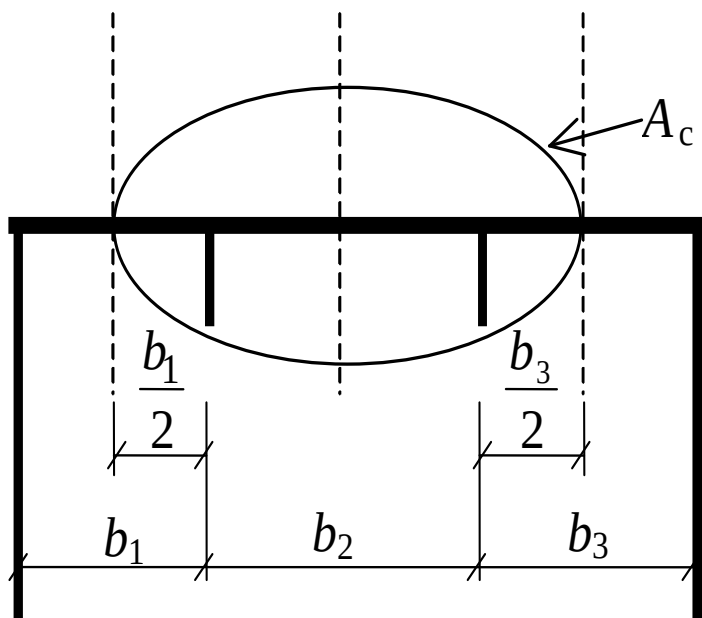


priebeh deformácie v dôsledku rôznych typov vydúvania



Steny a pásy s pozdĺžnymi výstuhami

Lokálne vydúvanie plechu medzi výstuhami



Steny a pásy s pozdĺžnymi výstuhami

Účinná plocha prierezu každého čiastkového poľa steny medzi pozdĺžnymi výstuhami sa má určiť pomocou súčiniteľa vydúvania ρ zohľadňujúceho lokálne vydúvanie, teda ako pre stenu bez výstuh. Účinná plocha $A_{c,eff,loc}$ čiastkových polí a pozdĺžnych výstuh potom bude:

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t$$

$A_{sl,eff}$ je súčet účinných prierezov pozdĺžnych výstuh v tlačenej časti steny alebo pásu;

$b_{c,loc}$ je šírka tlačenej časti každého čiastkového poľa steny;

ρ_{loc} je súčiniteľ vydúvania určený pre každé čiastkové pole steny alebo pásu ako steny bez výstuh;

t je hrúbka plechu čiastkového poľa steny alebo pásu.

Steny a pásy s pozdĺžnymi výstuhami

Globálne vydúvanie

Účinná plocha tlačenej vystuženej steny alebo pásu sa má určiť nasledovne:

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t$$

kde ρ_c zohľadňuje globálne vydúvanie steny alebo pásu;
 $b_{edge,eff}$ je účinná šírka okrajových častí podopretých susednými stenovými prvkami.

Globálne vydúvanie pásu

Súčiniteľ globálneho vydúvania ρ_c sa stanovuje interpoláciou medzi súčiniteľom χ_c vyjadrujúceho vydúvanie steny alebo pásu ako vybočenie prútu a súčiniteľom ρ zohľadňujúcim stenové (doskové) vydúvanie panelu.

Redukciu tlačenej plochy $A_{c,eff,loc}$ pomocou ρ_c je možné uvažovať ako rovnomernú redukciu celého prierezu. Súčasne sa má zohľadniť aj vplyv šmykového ochabnutia pásu ako v tlačenej tak i ťahanej časti prierezu, pričom ťahaný pás sa redukuje len s ohľadom na ochabnutie šmykom.

Z takto definovaného účinného prierezu sa vypočítajú efektívne prierezové charakteristiky A_{eff} , I_{eff} , W_{eff} pružnostným prístupom.

Globálne vydúvanie pásu – stenový typ

Súčiniteľ globálneho vydúvania panelu ρ sa stanoví za predpokladu rozmazaniu pozdĺžnych výstuh a vytvorenie ortotropného kontinua. Potom ρ určíme z rovnakých vzťahov ako u steny bez výstuh

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$$

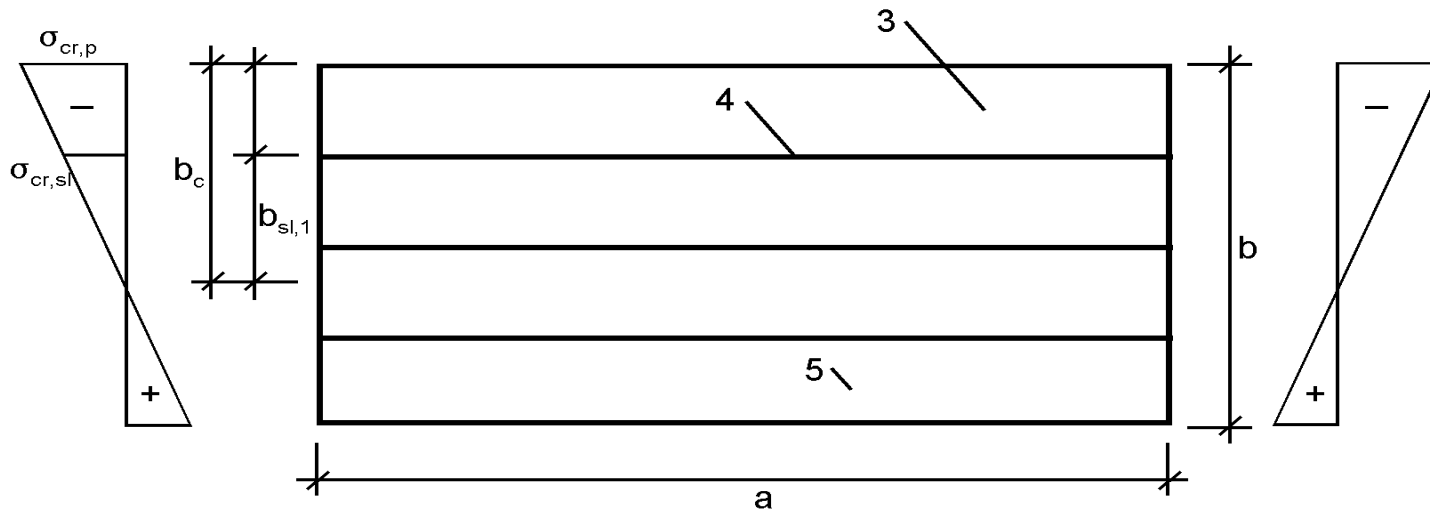
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}}$$

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \sigma_E$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12 (1 - \nu^2) b^2} = 190000 \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

Globálne vydúvanie pásu – stenový typ



Súčiniteľ kritického napätia $k_{\sigma,p}$ sa získa z príslušných diagramov pre stenu s rozmazanými výstuhami alebo zodpovedajúcich simulácií na počítači; alternatívne sa môžu použiť diagramy pre diskkrétne uvažované výstupy za predpokladu, že lokálne vydúvanie čiastkových polí steny je možné vylúčiť a riešiť samostatne. Pre prípad steny s min. 3 výstuhami pravidelne usporiadanými možno použiť analytické vzťahy v prílohe A v STN EN 1993-1-5.

Globálne vydúvanie pásu – prúťový typ

Vplyv globálneho vydúvania sa vyjadrí pomocou vzpernostného súčiniteľa χ_c

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} \quad \Phi = 0,5 \left[1 + \alpha_e \left(\bar{\lambda}_c - 0,2 \right) + \bar{\lambda}_c^2 \right]$$

Pro nevyztužené stěny

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E t^2}{12 (1 - \nu^2) a^2}$$

Pro vyztužené stěny

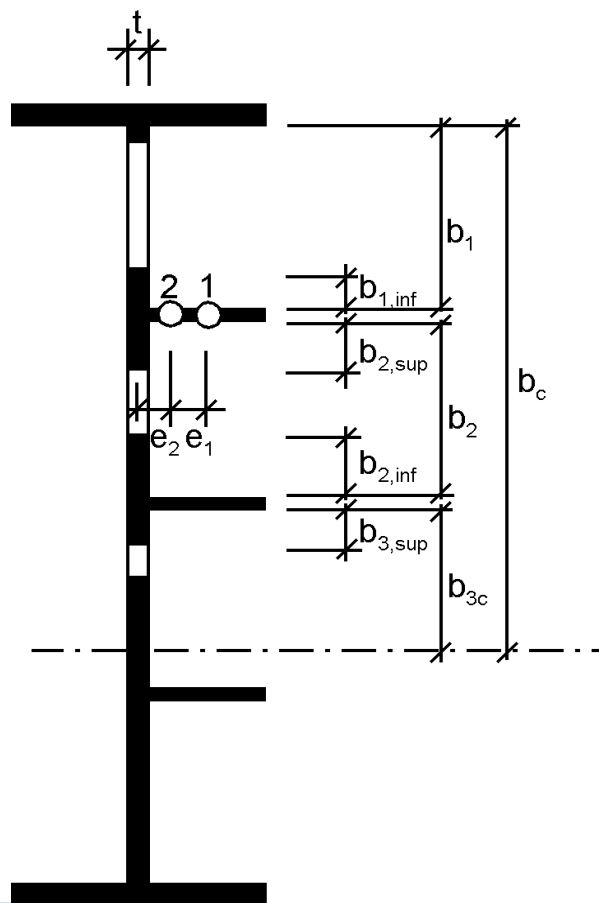
$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}} \quad \sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2}$$

Globálne vydúvanie pásu – prúťový typ

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e}$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}}$$

$$e = \max(e_1, e_2)$$



$\alpha = 0,34$ pre výstuhy s uzavretým prierezom;

$\alpha = 0,49$ pre výstuhy s otvoreným prierezom;

$\alpha = 0,21$ pre nevystužené steny

$I_{sl,1}$ je moment zotrvačnosti neredukovaného prierezu výstuhy a účinných častí steny vzťahnutý k ohybu steny z jej roviny;

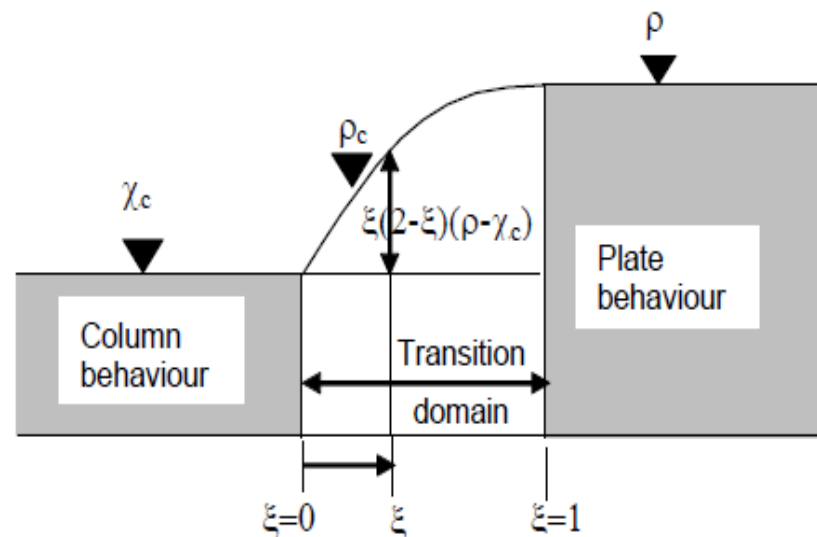
$A_{sl,1}$ je plocha neredukovaného prierezu výstuhy a účinných častí steny.

Interakcia medzi oboma typmi vydúvania

Výsledný súčiniteľ globálneho vydúvania steny alebo pásu

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad \text{ale} \quad 0 \leq \xi \leq 1$$



$\sigma_{cr,p}$ je pružné kritické napätie steny podľa prílohy A.1(2);

$\sigma_{cr,c}$ je pružné kritické napätie tlačeneho prúta;

χ_c je súčiniteľ vzperu zodpovedajúci vybočeniu tlačeneho prúta;

ρ je súčiniteľ vydúvania zodpovedajúci vydúvaniu steny.

Posúdenie

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff}} \leq 1,0$$

γ_{M0} γ_{M0} γ_{M0}

A_{eff} je účinná plocha prierezu;
 $e_{Ny}, e_{N,z}$ sú posuny polôh neutrálnych osí;
 $M_{ed}, M_{z,Ed}$ sú návrhové ohybové momenty;
 N_{Ed} je návrhová osová sila;
 $W_{y,eff}, W_{z,eff}$ sú pružné účinné prierezové moduly;
 γ_{M0} je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre odolnosť.

Posúdenie vydúvania poľa steny alebo pásu sa má vykonať v mieste min. (0,4a; 0,5b) od toho konca poľa steny, kde je väčšie napätie. Súčasne sa posúdi odolnosť neredukovaného prierezu na konci poľa steny.

Interakcia vydúvania a šmykového ochabnutia

Kombinované účinky vydúvania steny nebo pásu a šmykového ochabnutia sa môžu zohľadniť použitím A_{eff} takto:

$$A_{eff} = A_{c,eff} \beta_{ult}$$

$A_{c,eff}$ je účinná plocha tlačeneho pásu nebo steny zohľadňujúca vydúvanie stien;

β_{ult} je súčiniteľ spolupôsobiacej šírky pri ochabnutí normálového napätia šmykom v medznom stave únosnosti, ktorý sa môže určiť ako β , pričom α_0 sa nahradí hodnotou

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{c,eff}}{b_0 t_f}}$$

Interakcia vydúvania a šmykového ochabnutia

Účinky šmykového ochabnutia v pružno-plastickém stavu pri obmedzení hodnoty plastického pomerného predĺženia sa môžu zohľadniť použitím A_{eff} takto:

$$A_{eff} = A_{c,eff} \beta^{\kappa} \geq A_{c,eff} \beta$$

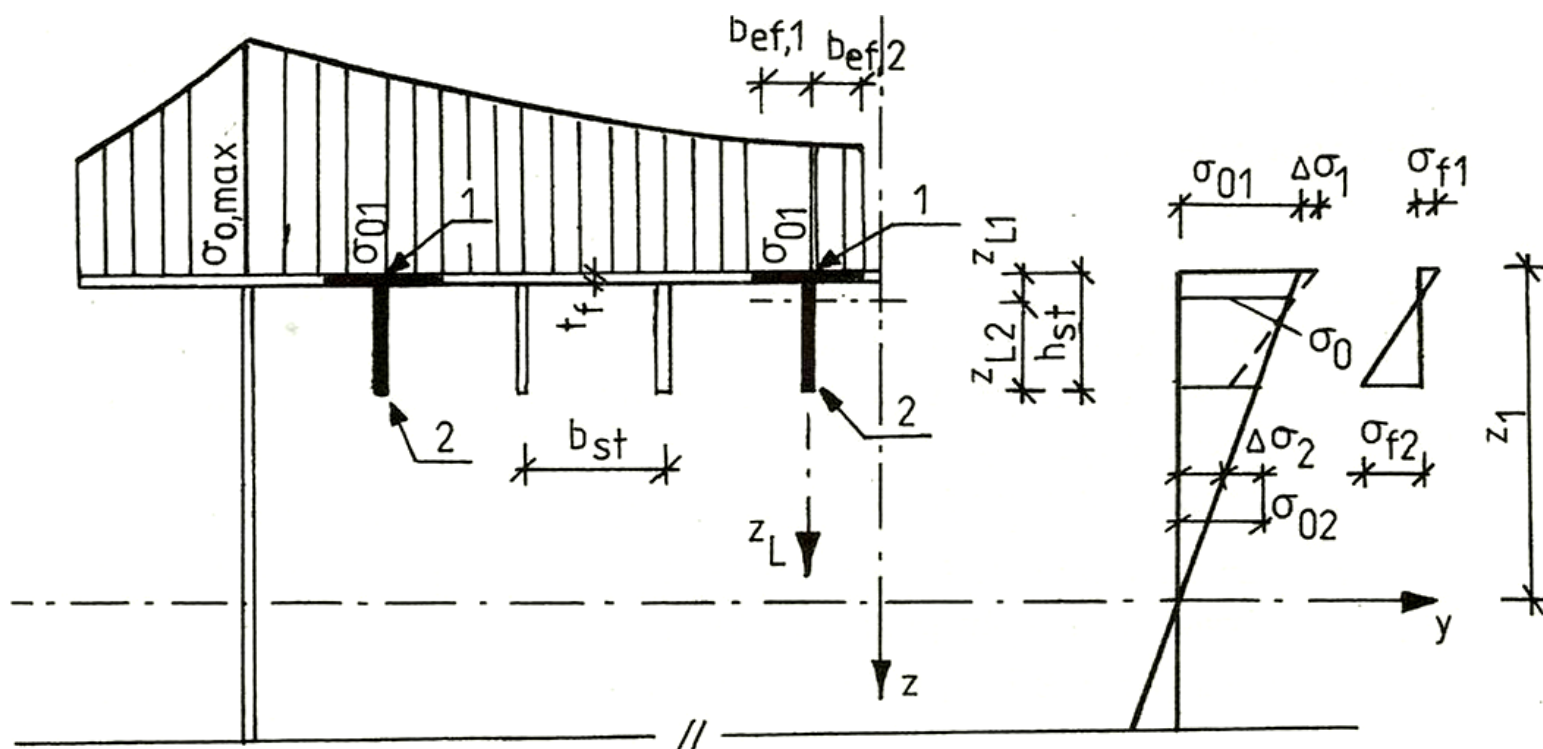
Všetky vzorce uvedené hore sa môžu použiť aj pre ťahané pásy, pričom $A_{c,eff}$ sa nahradí neredukovanou plochou ťahaného pásu.

Overenie odolnosti ortotropnej mostovky

Ortotropná mostovka vykonáva okrem funkcie súčasti hlavného nosného systému aj vlastnú funkciu mostovky, t.j. prenáša zaťaženie z mostného zvršku do hlavných nosníkov. V zjednodušených analýzach sa pre vyjadrenie celkového namáhania ortotropnej mostovky aplikuje nesprávne princíp superpozície oboch namáhání, teda súčet namáhania mostovky ako súčasti hlavného nosného systému a namáhania vyplývajúceho z funkcie mostovky.

Superpozícia je pri dolných ortotropných mostovkách na bezpečnej strane, zatiaľ čo pri horných mostovkách je na strane nebezpečnej. Chyba superpozície však nie je taká dramatická, aby ovplyvnila spoľahlivosť celej nosnej konštrukcie, nakoľko zjednodušená analýza je konzervatívna.

Overenie odolnosti ortotropnej mostovky



Šmyková odolnosť štíhlych prierezov

Stena namáhaná šmykom vydúva pri štíhlosti

$$h_w / t \geq \frac{72}{\eta} \varepsilon \quad \text{pre nevystužené steny}$$

$$h_w / t \geq \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \quad \text{pre steny vystužené}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

kde $\eta = 1,20$ pre ocele pevnostnej triedy až do S460 vrátane. Pre ocele vyšších pevností sa odporúča hodnota $\eta = 1,00$.

η zohľadňuje nárast odolnosti u málo štíhlych stien.

Nasledujúce pravidla výpočtu platia za týchto predpokladov:

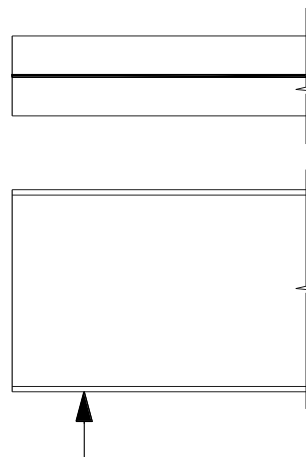
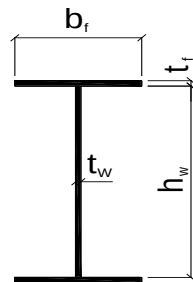
- a) pole steny sú pravouhlé s limitným uhlom odklonu do 10° ;
- b) výstuhy sú umiestnené v pozdĺžnom alebo priečnom alebo v oboch smeroch;
- c) všetky otvory a výrezy sú malé;
- d) prvky majú konštantný prierez.

Návrhová odolnosť prierezu v šmyku

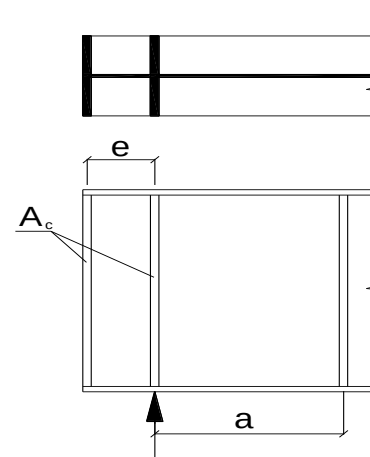
$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

$V_{bw,Rd}$ je príspevok steny daný vzorcom:

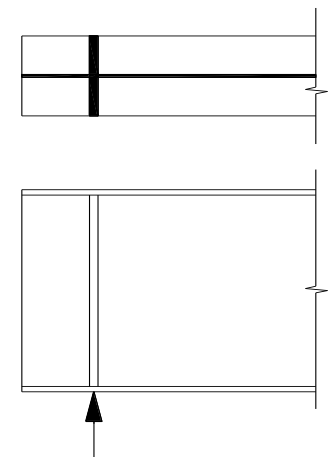
$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$



Bez koncové výztuhy



Tuhá koncová výztuha



Netuhá koncová výztuha

Návrhová odolnosť prierezu v šmyku

Pre steny nosníka s priečnymi výstuhami len nad podperami a pre steny nosníka s medzil'ahľými priečnymi výstuhami alebo s pozdĺžnymi výstuhami alebo s oboma, sa súčiniteľ χ_w zohľadňujúci príspevok odolnosti proti vydúvaniu steny namáhané šmykom má stanoviť z nasledujúcej tabuľky alebo z obrázku v STN EN 1993-1-5.

	Tuhá podperová výstuha na konci nosníka	Netuhá podperová výstuha na konci nosníka
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}}$$

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \sigma_E$$

Návrhová odolnosť prierezu v šmyku

Parameter štíhlosti sa môže určiť nasledovne:

a) priečne výstuhy len pri podperách:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \, t \, \varepsilon}$$

b) priečne výstuhy pri podperách a medziľahlé priečne výstuhy alebo pozdĺžne výstuhy alebo obidvoje:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \, t \, \varepsilon \, \sqrt{k_\tau}}$$

kde k_τ je najmenší súčiniteľ kritického napätia pole steny nosníka namáhaného šmykom.

Návrhová odolnosť prierezu v šmyku

Pre steny podopreté priečnymi výstuhami bez pozdĺžnych výstuh alebo s viacerými ako dvoma pozdĺžnymi výstuhami sa súčiniteľ kritického napätie v šmyku určí:

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \left(h_w / a \right)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{ak} \quad a / h_w \geq 1$$

$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34 \left(h_w / a \right)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{ak} \quad a / h_w < 1$$

$$k_{\tau sl} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right)^3} \quad \text{ale nie menej ako} \quad \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}}$$

a je vzdialenosť priečných výstuh;

I_{sl} je kvadratický moment plochy pozdĺžnych výstuh k osi z-z.

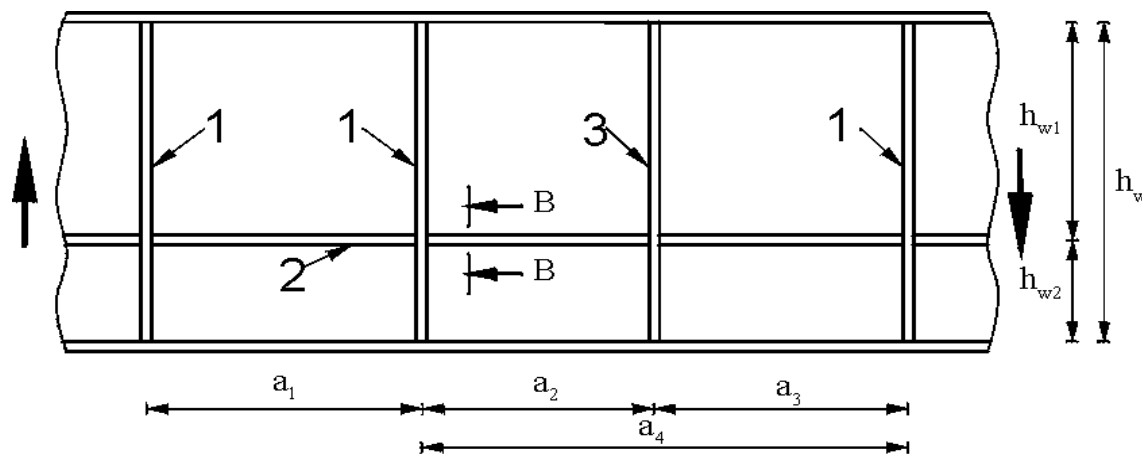
Pre steny s dvoma alebo viac pozdĺžnymi výstuhami, ktoré nemusia byť nevyhnutne rovnomerne rozmiestnené, je to súčet tuhostí individuálnych výstuh.

Návrhová odolnosť prierezu v šmyku

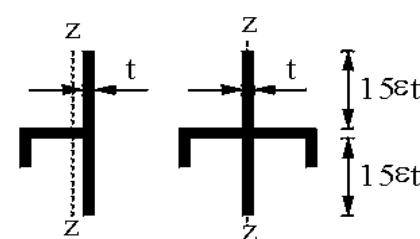
Pre steny s pozdĺžnymi výstuhami sa parameter štíhlosti nemá brať menší ako

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}}{37,4 \, t \, \varepsilon \sqrt{k_{\tau i}}}$$

h_{wi} a $k_{\tau i}$ zodpovedajú čiastkovému poľu steny, ktoré má parameter štíhlosti najväčší zo všetkých čiastkových poľí vyšetrovanej steny.



(a)



B - B

(b)

Návrhová odolnosť prierezu v šmyku

Príspevok pásnice, ak jej odolnosť nie je plne využitá na prenos ohybového momentu ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), sa má stanoviť nasledovne:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

b_f a t_f sú rozmery pásnice, ktorá dáva najmenšiu osovú odolnosť;

b_f sa neberie väčší ako $15t_f$ na každú stranu steny.

$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}}$ je ohybový moment odolnosti prierezu, ktorý tvoria len efektívne plochy pásnic.

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right)$$

Návrhová odolnosť prierezu v šmyku

Ak pôsobí v priereze aj osová sila N_{Ed} , hodnota $M_{f,Rd}$ sa má zmenšiť prenasobením výrazom

$$\left(1 - \frac{N_{Ed}}{\frac{(A_{f1} + A_{f2}) f_{yf}}{\gamma_{M0}}} \right)$$

Posúdenie steny v šmyku sa vykoná nasledovne:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Interakcia medzi priečnou silou, ohybovým momentom a osovou silou

$$\text{Ak } \bar{\eta}_3 \leq 0,5$$

Návrhové hodnoty ohybovej a normálovej odolnosti prierezu steny nie je potreba redukovať.

$$\text{Ak } \bar{\eta}_3 \geq 0,5$$

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{pre } \bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

$M_{f,Rd}$ je návrhový moment plastickej odolnosti prierezu tvoreného z efektívnych plôch pásnic;

$M_{pl,Rd}$ je návrhová plastická odolnosť prierezu tvoreného z efektívnych plôch pásnic a plne účinnej steny prierezu bez ohľadu na jej klasifikáciu do tried.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad \bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

Metóda redukovaného napätia

Táto metóda je alternatívou k metóde účinných plôch stien a pásov. Uplatní sa pri počítačovej analýze konštrukcie a zohľadňuje, že:

- $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ a τ_{Ed} pôsobí spoločne;
- medzné napätie najslabšej časti prierezu môžu definovať odolnosť celého prierezu

Pre nevystužené a vystužené pole steny namáhanej kombináciou napätí $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ a τ_{Ed} sa môžu uväzovať charakteristiky prierezu triedy 3, ak platí:

$$\frac{\rho \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1$$

Metóda redukovaného napätia

$\alpha_{ult,k}$ je minimálny zväčšovací súčiniteľ zaťaženia; po prenasobení návrhového zaťaženia týmto súčiniteľom dostaneme charakteristickú hodnotu odolnosti rozhodujúceho bodu steny;

ρ je súčiniteľ vydúvania, ktorý závisí od štíhlosti steny a zohľadňuje jej vydúvanie;

γ_{M1} je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti, ktorý sa použije v tejto metóde.

Štíhlosť steny $\bar{\lambda}_p$ sa potom stanoví
$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}}$$

α_{cr} je minimálny zväčšovací súčiniteľ zaťaženia; po prenasobení návrhového zaťaženia týmto súčiniteľom dostaneme pružné kritické zaťaženie steny namáhanej kompletným poľom napätí. V STN EN 1993-1-5 je zjednodušený postup výpočtu.

Metóda redukovaného napätia

α_{ult} sa môže stanoviť z podmienky plastizácie

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2$$

kde $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ a τ_{Ed} sú zložky poľa napätia v medznom stave únosnosti.

Súčiniteľ vydúvania ρ sa môže určiť použitím niektorej z nasledujúcich metód:

a) najmenšia hodnota z nasledujúcich redukčných súčiniteľov:

ρ_x pre pozdĺžne napätia pri zohľadnení vydúvania steny podobným spôsobom ako vybočuje tlačенý prút;

ρ_z pre priečne napätia pri zohľadnení vydúvania stany podobným spôsobom ako vybočuje tlačенý prút;

χ_w pre šmykové napätia;

Metóda redukovaného napätia

Táto metóda vedie na posúdenie v tvare:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq \rho^2$$

b) hodnota interpolovaná medzi hodnotami ρ_x , ρ_z a χ_w určenými v a) použitím vzorca pre $\alpha_{ult,k}$ ako interpolačnej funkcie

Táto metóda vedie na posúdení v tvare:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x f_y / \gamma_{M1}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z f_y / \gamma_{M1}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1$$