



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Globálna analýza mostov

Priehradové mosty

NÁZOV PROJEKTU:

**Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov
v oblasti mostného staveľstva v cezhraničnom regióne**

**VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA**



EDUMOS

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

Globálna analýza

Zjednodušený „ručný“ výpočet

- Model mostovky
- Model priehradových hlavných nosníkov
- Zohľadnenie spolupôsobenia mostovky s hlavnými nosníkmi

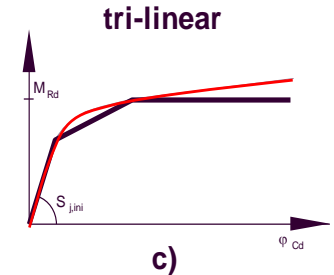
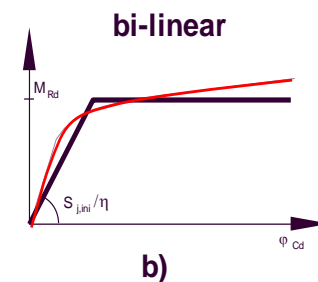
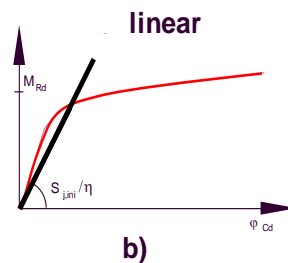
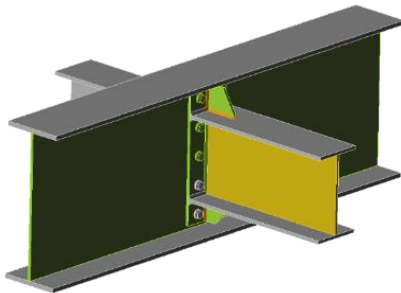
Analýza mostovky

- Dosková mostovka
 - priečinková spriahnutá – **pozri KM1**
 - postup riešenia - ako trámové spriahnuté mosty
 - spolupôsobenie mostovku s hl. nosníkmi vnáša do dosky ťahové sily - prípoj priečnikov pre M_z riešiť kĺbovo (netuho), overiť MSP (trhliny), odseparovať účinky pred a po spriahnutí
- oceľová „ortotropná“ – ešte tento semester

Globálna analýza

Prvková mostovka

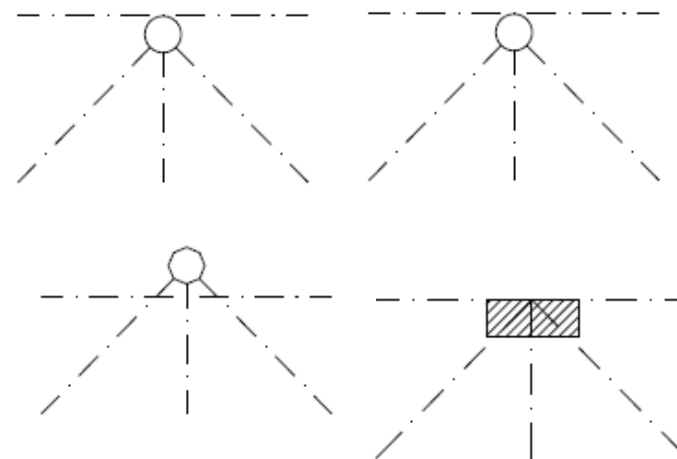
- roštový model - pozri KM1
- submodely prvkov - pozri KM1
 - postupy pri zjednodušenej analýze ako pri plnostenných mostoch
 - väčšie rozpätia pozdĺžnikov
 - priehradové stuženie pozdĺžnikov
 - mimouzlové zaťaženie pozdĺžnika priehradovým stužidlom
- možnosť aj zohľadniť čiastočne prípoj pozdĺžnika na priečnik



Globálna analýza

Analýza hlavných nosníkov – priehradových trámov

- Pôsobenie uzlov priehradovky



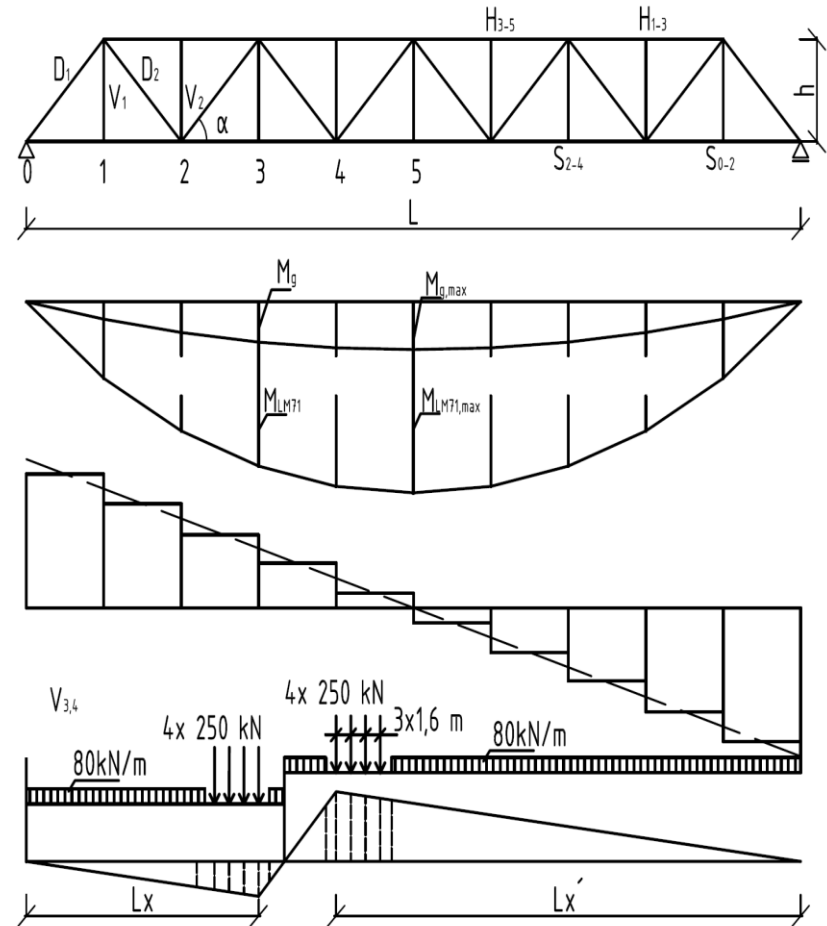
Globálna analýza

Výpočet vnútorných síl

$$S_{Ed,i} = -H_{Ed,i} = \frac{M_{Ed,j}}{h}$$

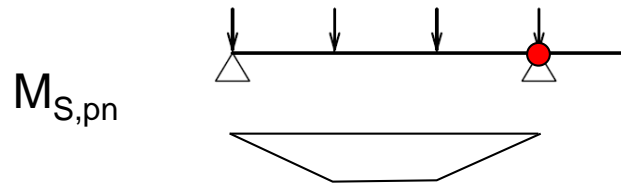
$$D_{Ed,i} = \pm \frac{Q_{i-1,i}}{\sin \alpha}$$

$$V = A_{\text{cross beam}} + V_{\text{selfweight}}$$



Globálna analýza

Vplyv mimo uzlového zaťaženia



$M_{S, pn}$

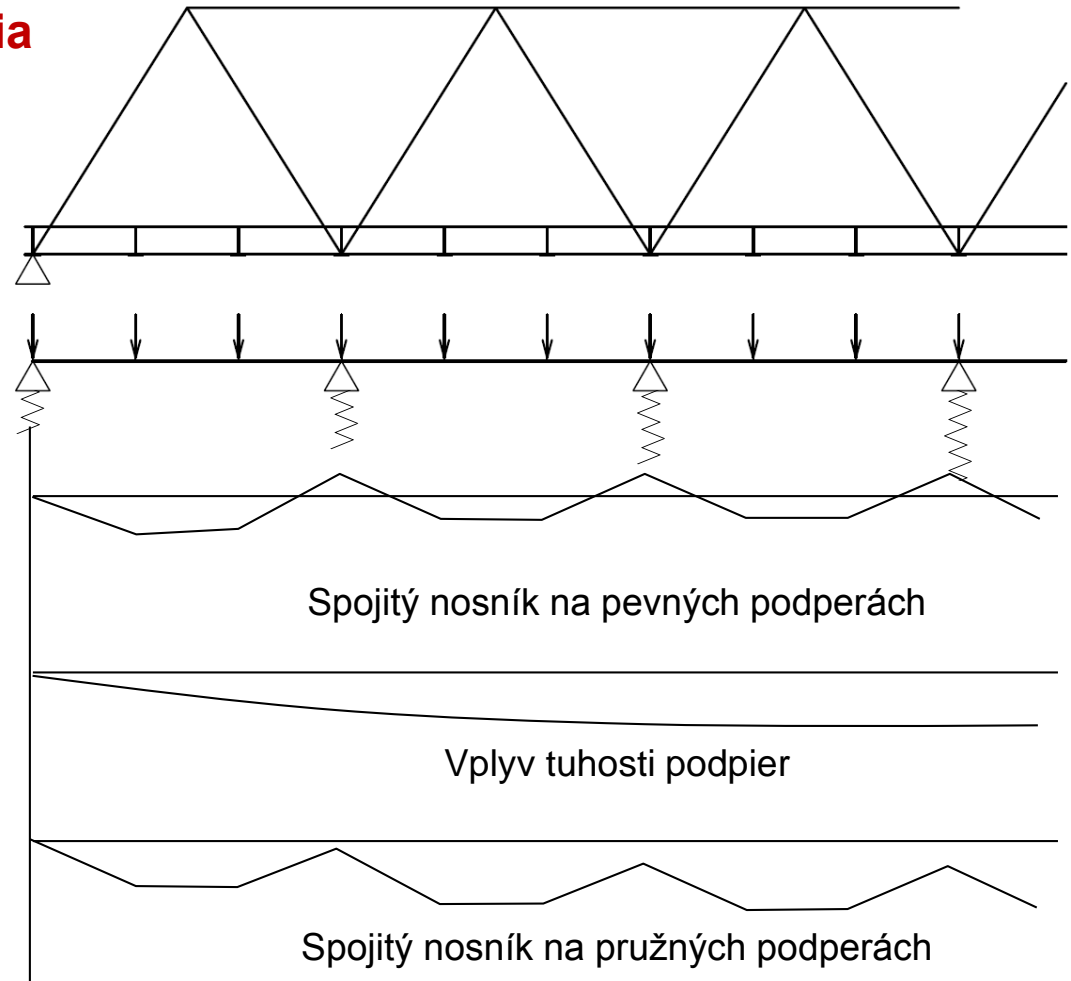
Bezpečne pre S1

$$M_{S1+} \approx + M_{S, pn}$$

$$M_{S1-} \approx - 1/2 \cdot M_{S, pn}$$

avšak...

$$M_{Smax} = +(1,1 \sim 2) \cdot M_{S, pn}$$



Globálna analýza

Spolupôsobenie mostovky s hlavnými nosníkmi

- Mosty s prvkovou mostovkou
 - princíp podobný ako v trámových plnostenných mostoch (KM1)
 - pre jednokoľajný most s brzdným stužidlom uprostred rozpätia dostávame

$$X_1 = \frac{a \sum_1^m \sigma_i}{\frac{k c^3}{I_{z,cb}} + \mu a \left(\sum_1^m \frac{1}{A_{mg,i}} + \frac{m}{A_s} \right)}$$

$$X_2 = \left(\frac{2m-1}{m} \right) X_1$$

$$X_{\max} = 1,05 \left(\frac{m+1}{2} \right) X_1$$

$A_{mg,i}$ je plocha i-tého prúta pásu hlavného priehradového nosníka,

A_s je plocha pozdĺžnika,

$I_{cb,z}$ je kvadratický moment plochy priečnika k jeho zvislej osi z,

a je dĺžka jedného poľa pozdĺžnika,

m je počet polí do polovice rozpätia mosta,

$k = \left(\frac{3b-4c}{6c} \right)$ pre priečnik uložený kĺbovo vo vodorovnom smere,

$k = \left(\frac{2b-3c}{2b} \right)$ pre priečnik votknutý vo vodorovnom smere,

b je osová vzdialenosť hlavných nosníkov,

c je osová vzdialenosť pozdĺžnikov od zvislej osi hlavných nosníkov,

$\mu = (m+1)(2m+1)/6m$,

$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$,

N_i je normálová sila v prútoch spolupôsobiaceho pásu hlavného nosníka.

Globálna analýza

- v prípade tuhých prípojev pozdĺžniky na priečnik - aj zvislý ohyb
- pre namáhanie priečnika detto ako trámové plnostenné mosty

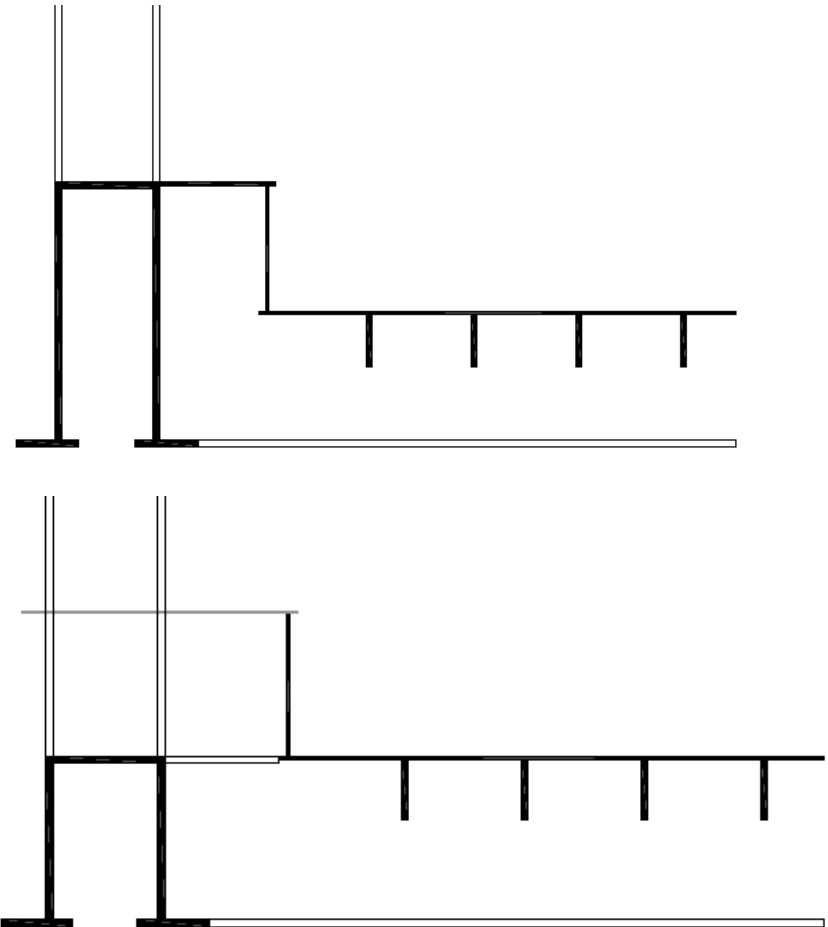
$$\Delta M_{y,s,Ed} = M_{y,mg,Ed} I_{y,s} / (I_{y,s} + I_{y,mg}) \quad I_{y,mg} \doteq \frac{A_t A_b}{A_t + A_b} h^2$$

- ak sú brzdné stužidlá na obidvoch koncoch nosnej konštrukcie
 - cca konštantná sila: $X_1 = X_2 = \dots X_{max}$

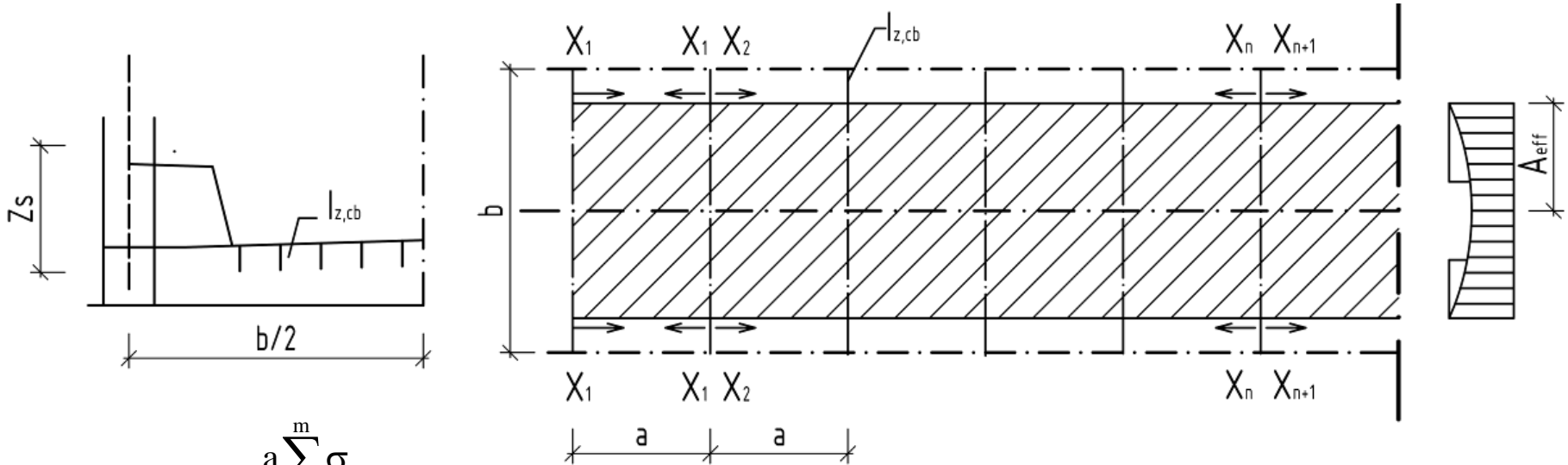
Globálna analýza

Mosty s doskou mostovkou

- ak JE plech mostovky priebežne spojený
 - mostovka je súčasťou hl. nosného systému
 - šmykové ochabnutie v širokom páse (ešte bude tento semester)
- ak plech mostovky NIE JE priebežne spojený
- vodorovné napätia sú ovplyvnené
 - tuhosťou krátkeho priečnika (vo vodorovnom smere) – sily X_i
 - Následne šmykovým ochabnutím v širokom plechu ortotropnej mostovky smerom k stredu priečného rezu (ešte bude tento semester)



Globálna analýza



$$X_1 = \frac{a \sum_1^m \sigma_i}{\frac{k c^3}{I_{z,cb}} + \mu a \left(\sum_1^m A_i + \frac{m}{A_{\text{eff},d}} \right)}$$

$A_{\text{eff},d}$ je spolupôsobiaci plocha mostovky, $A_{\text{ef},d} = \beta A_d / 2$,

A_d je plocha celej plechovej ortotropnej mostovky vrátane pozdĺžnych výstuh,

I_{zb} je kvadratický moment plochy krátkeho prierečníka k jeho zvislej osi z,

β je faktor spolupôsobiacej šírky v dôsledku šmykového ochabnutia,

$k = 1/3$.

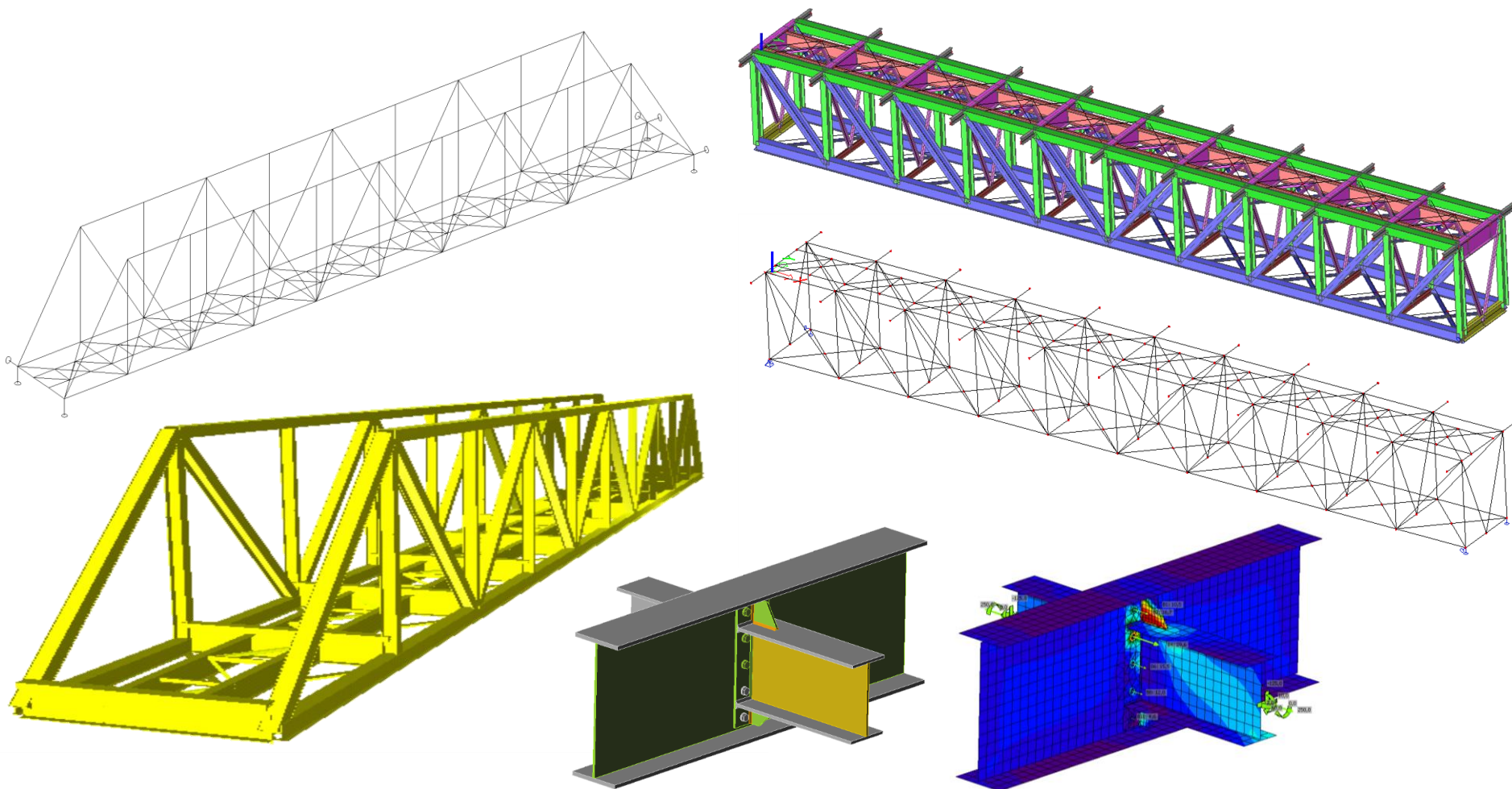
Globálna analýza – 3D MKP

Priehradové mosty s prvkovou mostovkou

Najčastejšie 3D model prútovej konštrukcie – 1D konečné prvky

- zohľadnenie excentricít
- hlavné nosníky
 - obyčajne spojité ohybovo tuhé pásy
 - prípoj diagonál v rovine aj z roviny závisí od konštrukčného riešenia (kíbový, tuhý, polotuhý)
 - napr. v prípade dvojstenných/komorových pásov a prípoja diagonál realizovaného trecími spojmi alebo zvarmi - tuhý rámový uzol v rovine aj z roviny
- poloha mostovky a všetkých stužidiel - reálnou excentricitou
- vyžaduje nenáročnú výpočtovú techniku
- vystihnúť spolupôsobenia všetkých prvkov nosnej konštrukcie
- často výhodne aplikovateľný modul pohyblivého zaťaženia

Globálna analýza – 3D MKP



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

Globálna analýza – 3D MKP

Priehradové mosty s doskovou mostovkou

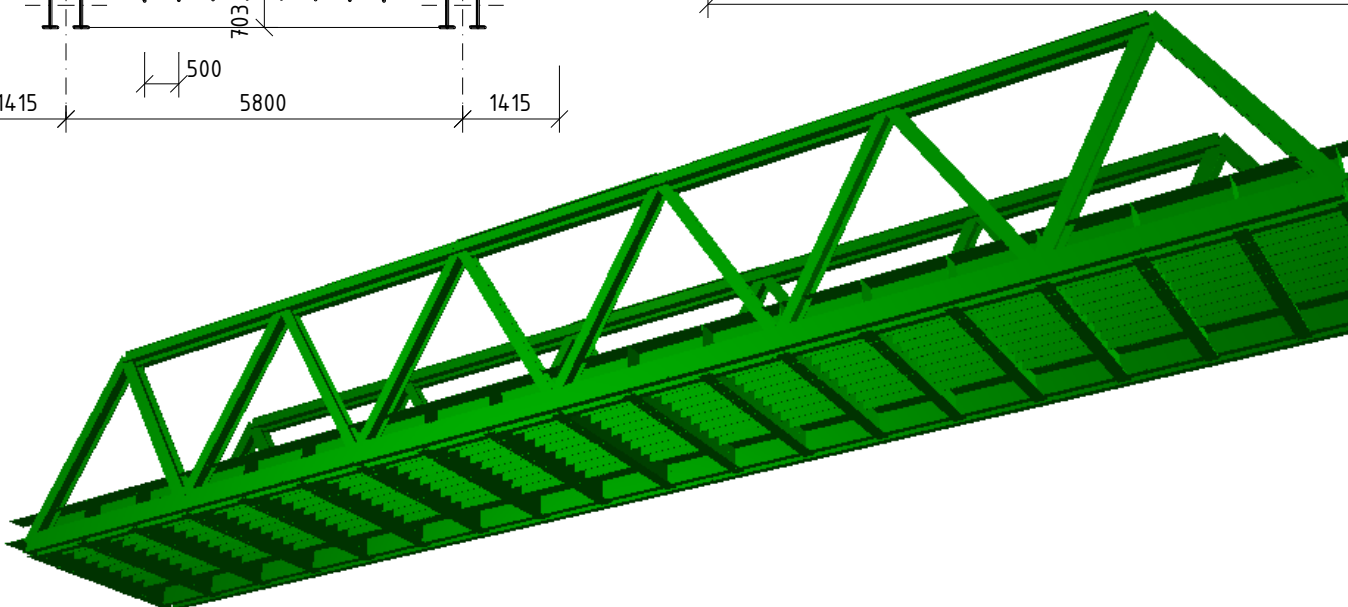
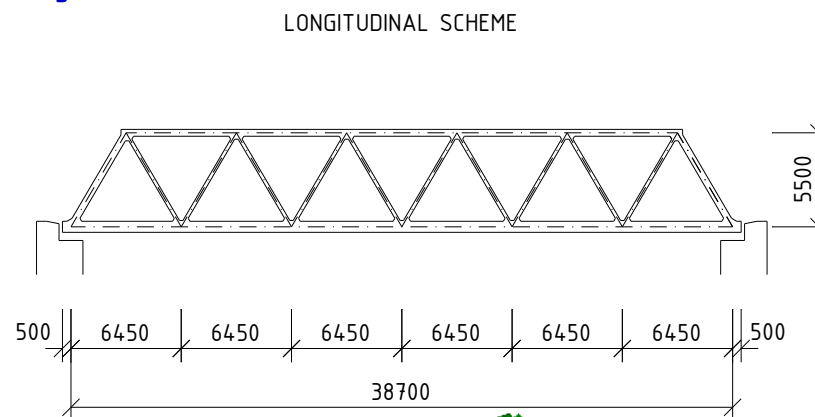
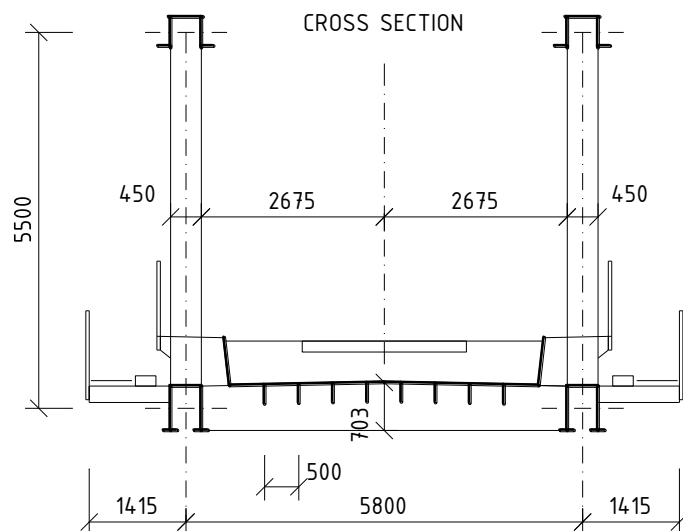
Najčastejšie 3D model prútovej konštrukcie – 2D (škrupinové) konečné prvky pre dosku mostovky, ostatné prvky 1D

- výrazne komplikovanejší
- šmykové ochabnutie po šírke dosky
- moderné softvéry - jednoduché zaťažovanie plôch
- v prípade prútov pripojených k doske je možná integrácia vnútorných síl do náhradných prierezov so spolupôsobiacou šírkou dosky
 - pozdĺžne a priečne výstupy pri plechovej doskovej mostovke
 - spriahnutý priečnik pri betónovej doskovej mostovke
- dá sa pracovať s tuhosťou dosky – napr. modelovanie ortotropie, napr.
 - „rozmazanie výstuh“ pri ortotropnej plechovej mostovke,
 - zohľadnenie tuhosti ovplyvnenej trhlinami pri betónovej mostovke
- veľmi efektívny a poskytuje veľmi dobrú zhodu s experimentálne overeným globálnym pôsobením

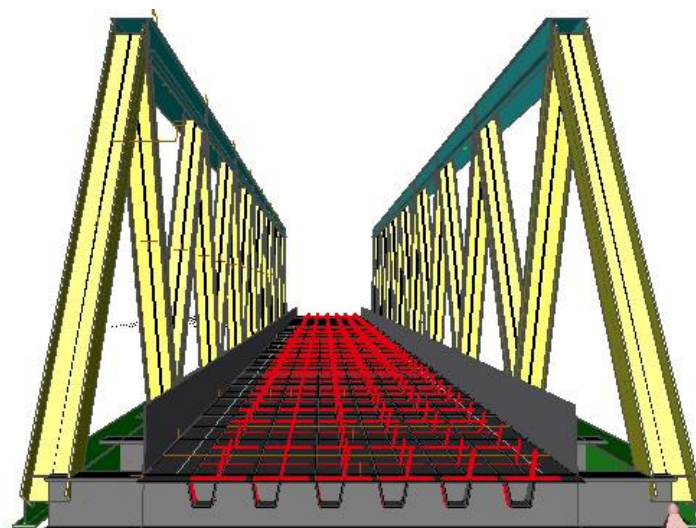
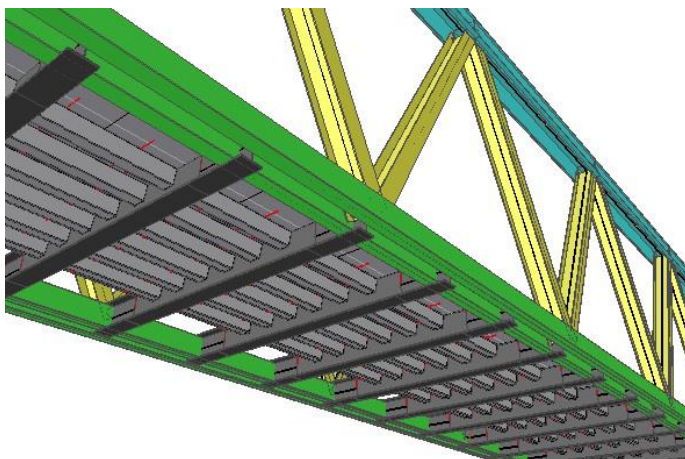
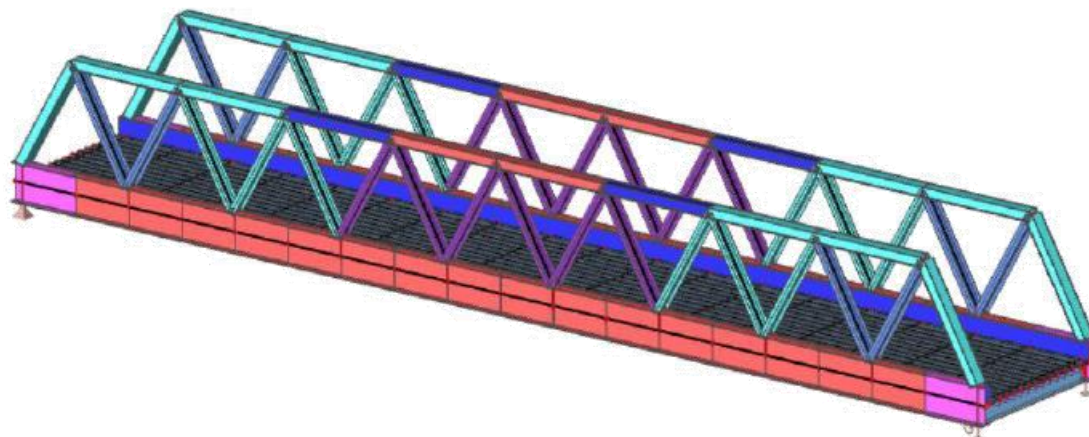
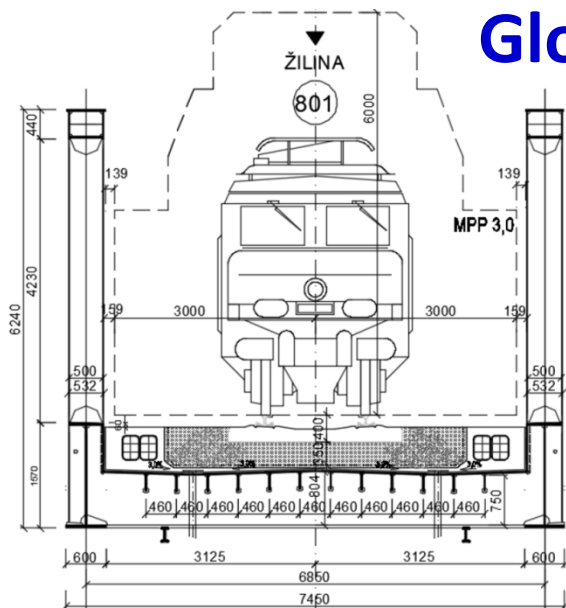
Možná prútová idealizácia mostovky v podobe roštovej náhrady

- model je jednoduchší
- sekundárnymi zásahmi rešpektovať vodorovnú tuhosť dosky

Globálna analýza – 3D MKP



Globálna analýza – 3D MKP

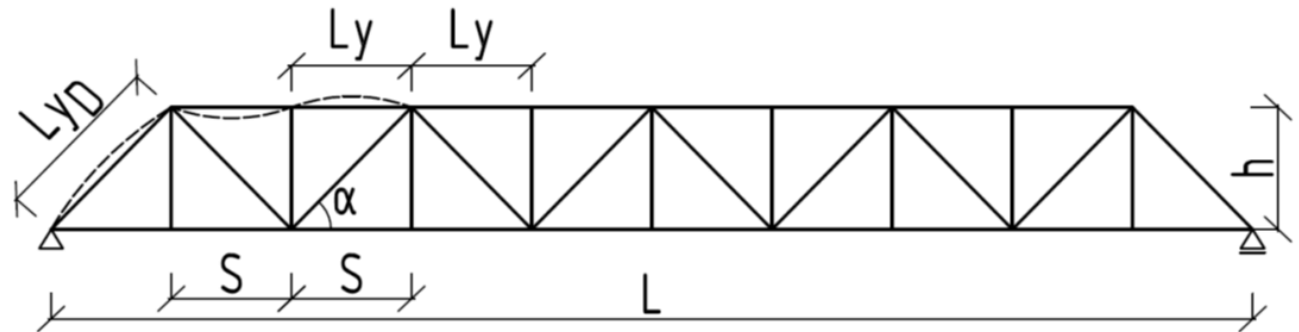


Stabilita tlačeneho pásu

V ROVINE

- takmer neposuvné podopretia uzlov - overenie modelom náhradného prúta

Vzperné dĺžky v rovine priehradového trámu



Odhady pre $L_{cr,y}$:

Pásky:

- cca vzdialenosť styčníc, t.j.

$$L_{cr,y} \approx L_i$$

Výplňové:

- zvyčajne \leq vzdialenosť styčníc
- v závislosti od riešenia prípoja
- pri štandardných skrutkovaných a celozváraných prípojoch :

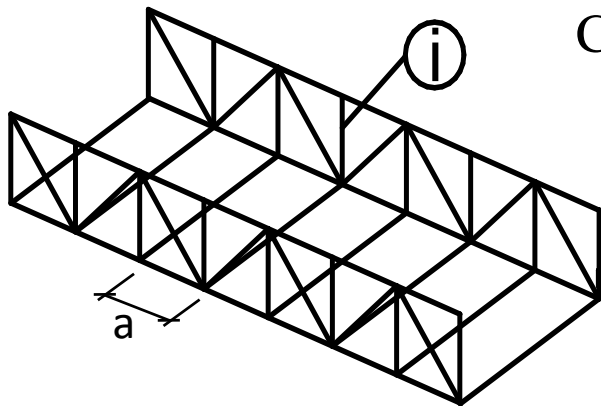
$$L_{cr,y} = 0,7-0,9 L_{Di}$$

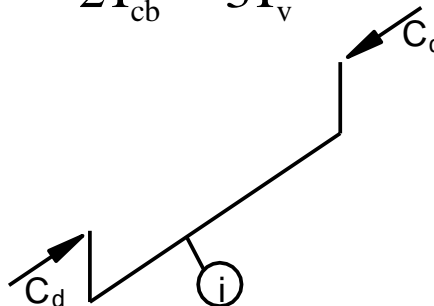
Stabilita tlačeneho pásu

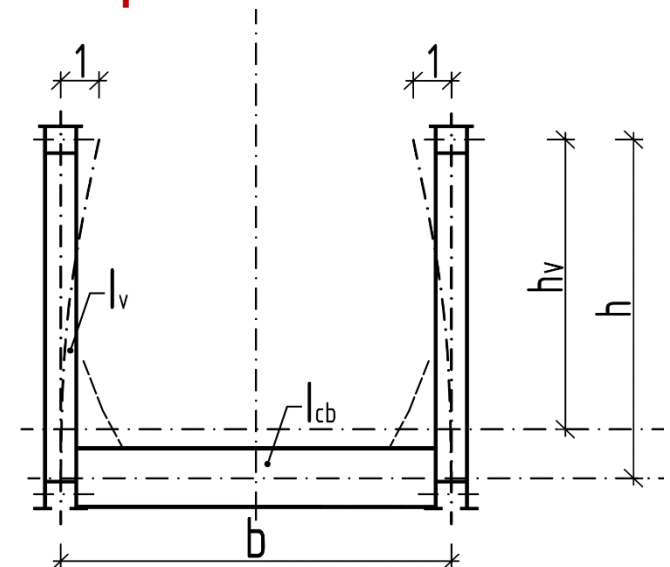
Z ROVINY:

- Polotuhé podpretia uzlov v prípade horného stuženia
- Veľmi pružné podpretia uzlov – pri mostoch bez horného stuženia (otvorene usporiadaný priečny rez)
- „stabilita pružne podpretého tlačeneho pásu“

Vzperné dĺžky ovplyvnené tuhosťou „priečných rámov tzv. polorámov“

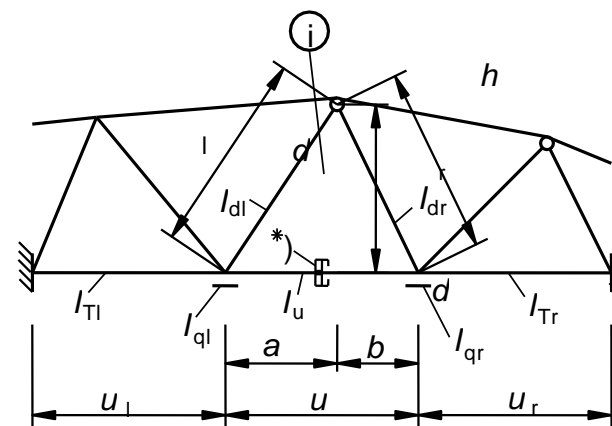
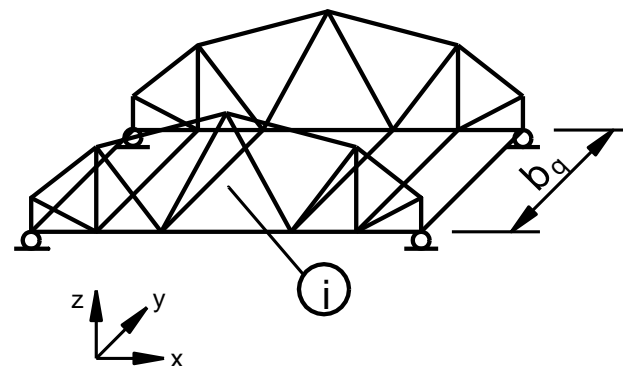
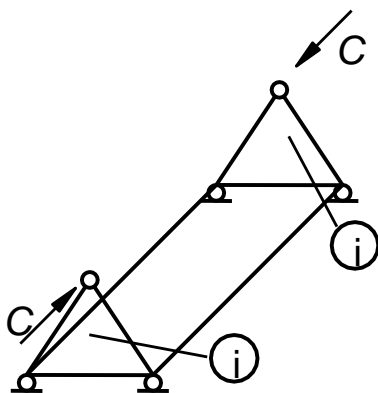
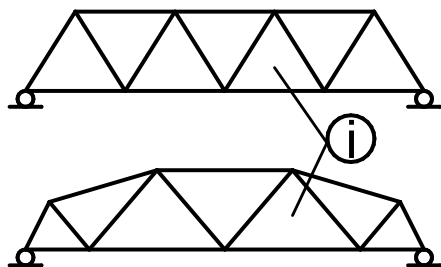


$$C_d = \frac{E}{\frac{bh^2}{2I_{cb}} + \frac{h_v^3}{3I_v}}$$




Stabilita tlačeneho pásu

V STN EN 1993-2 aj....



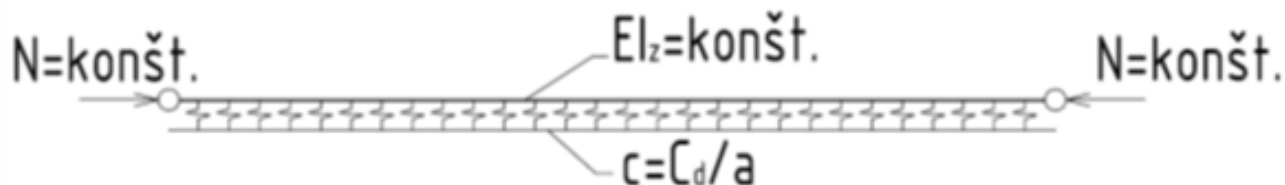
Stabilita tlačeneho pásu

A) Analytický model (Engesser)

- starý, veľmi zjednodušený, rýchly
- dáva však dobré hodnoty pre priame prúty s kĺbmi na koncoch

Predpoklady:

- prierez pásu je konštantný,
- osová sila je po celom páse konštantná,
- vzdialenosti pružných podpier (rámov) sú konštantné,
- spojitým pružné podložie Winklerovho typu s konštantou podložia $c = C_d/a$



Stabilita tlačeneho pásu

B) Numerická lineárna pružnostná stabilitná analýza tlačeneho pásu

1) Na modeli prúta s diskretnými podperami v mieste uzlov

- dajú sa modelovať zmeny prierezu aj priebeh osových síl v pásu
- potrebný výpočet tuhostí rámov
- krajná diagonála sa musí uvažovať „vystretá“ do úrovne horného pásu
- nezohľadňuje 3D tvar tlačeneho prúta, vplyv globálneho prerozdelenia tuhosti

- v dnešnej dobe lepšie:

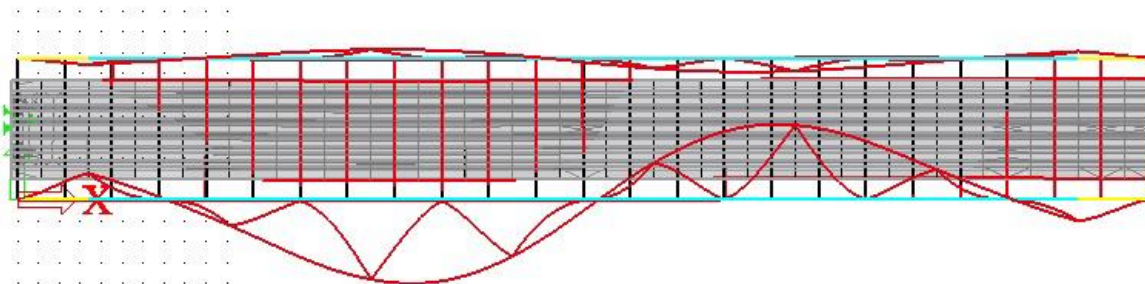
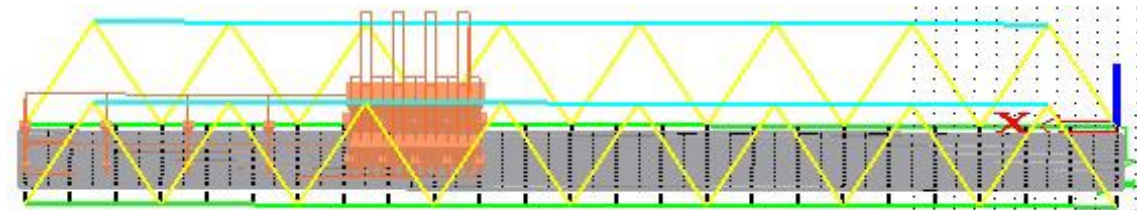
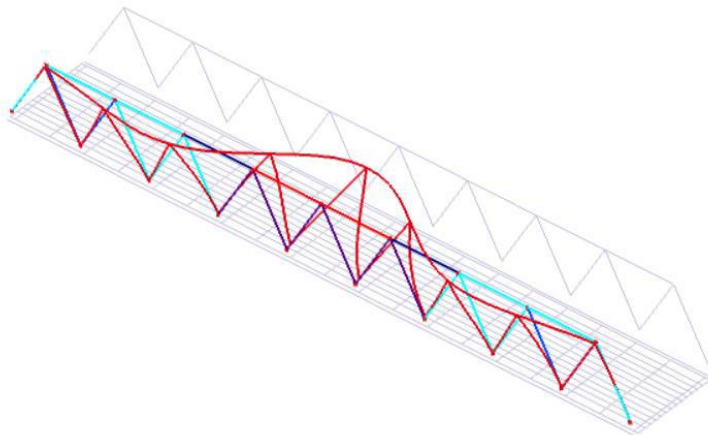
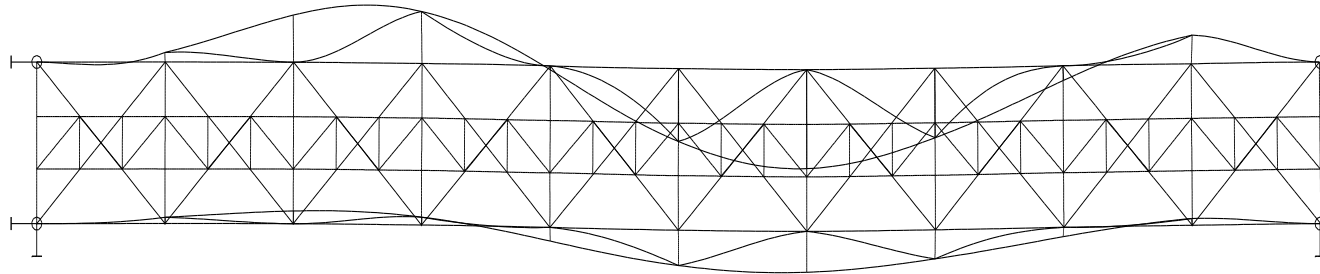
2) Vykonať stabilitnú analýzu priamo v 3D modeli konštrukcie

- rešpektuje globálne zmeny tuhosti - využitie skutočnej reálnej tuhosti polorámov ale aj celej konštrukcie
- rešpektuje priestorový (rovinný) tvar prúta
- v súčasnej dobe analýza otázka sekúnd/minút

Stabilita tlačeneho pásu

$$N_{cr,z} = \alpha_{cr,z} \cdot N_{Ed}$$

$$\lambda_y = \pi \sqrt{\frac{EI_z}{N_{cr,z}}}$$



Stabilita tlačeneho pásu

C) Numerická geometricky nelineárna pružnostná analýza tlačeneho pásu s imperfekciami (GNIA)

- v súčasnosti najdokonalejší nástroj
- komplikovaný, stále nie všeobecne aplikovateľný
- implementácia všetkých druhov imperfekcií (geometrických, štrukturálnych a konštrukčných) je stále zatiaľ ťažko realizovateľná
- nahrádza sa to ekvivalentnými geometrickými imperfekciami
- nutné poznať imperfektný tvar a veľkosť začiatočných ekvivalentných imperfekcií
- celá konštrukcia bude vykazovať jednak globálne imperfekcie celej sústavy, jednak lokálne imperfekcie parciálnych prútov
- z hľadiska dostatočnej spoľahlivosti nosnej konštrukcie sa požaduje voľba pokiaľ možno čo najnebezpečnejšieho tvaru aj veľkosti začiatočných imperfekcií
- imperfektný tvar sústavy sa spravidla volí na základe prvého vlastného tvaru straty stability celej sústavy – sú v ňom zahrnuté glob. aj lok.

Stabilita tlačeneho pásu

1. Krok - lineárna pružnostná stabilitná analýza (LBA)

- prvý vlastný tvar straty stability NK (niekedy je komplikovanejšie ho určiť)
- Tento tvar sa potom môže považovať za jednotnú globálna a lokálna imperfekcia η_{cr}

2. Krok - určenie amplitúdy - „škálovanie“

- použitie vlastných tvarov straty stability konštrukcie ako ekvivalentných imperfekcií naráža na problém stanovenia amplitúd tvarov vybočenia.
- v súčasnosti zaužívaný princíp, podľa ktorého sa amplitúda ekvivalentnej imperfekcie použitá z vlastného tvaru straty stability prútovej sústavy, môže určiť z podmienky, kedy prút s najmenšou vzpernou odolnosťou pri namáhaní osovou silou má rovnakú vzpernú odolnosť ako jeho náhradný prút.
- podľa zovšeobecnej definície je náhradný prút definovaný ako prút na koncoch kĺbovo podoprený s rovnakým prierezom a osovou silou ako posudzovaný prút v rozhodujúcom priereze m .
- dĺžka náhradného prúta L_{cr} má byť taká, aby jeho kritická osová sila bola rovnaká ako kritická osová sila posudzovaného prúta v rozhodujúcom priereze.

Stabilita tlačeneho pásu

$$\eta_{\text{init}} = e_{0,d} \frac{N_{\text{cr},m}}{|\text{EI}_m \eta_{\text{cr}}''|_m} \eta_{\text{cr}}(\mathbf{x}) = \frac{e_{0,d}}{\bar{\lambda}_m^2} \frac{N_{\text{Rk},m}}{|\text{EI}_m \eta_{\text{cr}}''|_m} \eta_{\text{cr}}(\mathbf{x})$$

$$e_{0,d} = \alpha(\bar{\lambda}_m - 0, 2) \frac{M_{\text{Rk},m}}{N_{\text{Rk},m}} \frac{1 - \left(\chi \bar{\lambda}_m^2\right) / \gamma_{\text{M1}}}{1 - \chi \bar{\lambda}_m^2} = e_{0,k} \frac{1 - \left(\chi \bar{\lambda}_m^2\right) / \gamma_{\text{M1}}}{1 - \chi \bar{\lambda}_m^2}$$

$$\bar{\lambda}_m = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ult},k,m}}{\alpha_{\text{cr}}}} = \sqrt{\frac{A_m f_y}{N_{\text{cr},m}}}$$

- ak si však zvolíme vodorovný posun niektorého z uzlov pásu za porovnávací, môže sa potom amplitúda vypočítať ako

$$\eta_{\text{init,max}} = \frac{e_{0,d}}{\bar{\lambda}_m^2} \frac{N_{\text{Rk},m} |\eta_{\text{cr}}|_{\text{max}}}{|\text{EI}_m \eta_{\text{cr}}''|_m} = \frac{e_{0,d}}{\bar{\lambda}_m^2} \frac{N_{\text{Rk},m} |\eta^{\parallel}|_{\text{max}}}{|\mathbf{M}_{\eta_{\text{cr}}}^{\parallel}|_m}$$

Stabilita tlačeneho pásu

- kde $e_{0,d}$ je návrhová hodnota amplitúdy náhradného prúta, jej charakteristická hodnota $e_{0,k}$ sa používa na výpočet vzperu pri rovinnom vybočení prútov,
- $\bar{\lambda}_m$ je pomerná štíhlosť náhradného prúta,
- $|EI_m \eta_{cr}''|_m$ označuje ohybový moment prislúchajúci amplitúde $\eta_{cr,m}$ v kritickom priereze, teda rozumie sa tým fiktívny ohybový moment, ktorý by vznikol v priereze m , keby bola konštrukcia násilím ohnutá do tvaru vybočenia $\eta_{cr}(x)$,
- $N_{cr,m}$ je kritická sila v priereze m pri strate stability,
- $N_{Rk,m}$ je charakteristická odolnosť kritického prierezu m voči normálovej sile, t.j. $N_{pl,Rk,m}$,
- $\eta_{cr}(x)$ reprezentuje pretvorenie zodpovedajúce pružnému kritickému tvaru pri strate stability,
- α je faktor (miera) imperfekcie pre príslušnú krivku vzpernej pevnosti, pozri tabuľku 6.1 a tabuľku 6.2 v norme STN EN 1993-1-1,
- χ označuje súčiniteľ vzperu pre príslušnú krivku vzpernej pevnosti,
- $M_{Rk,m}$ je charakteristická momentová odolnosť kritického prierezu m , napríklad $M_{el,Rk,m}$ alebo $M_{pl,Rk,m}$ v závislosti od zatriedenia prierezu,
- γ_{M1} označuje parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu pre odolnosť prútov proti strate stability,
- $\alpha_{ult,k,m}$ je najmenšia hodnota násobiteľ'a síl, ktorým sa pri danej konfigurácii prenasobia osové sily N_{Ed} v prútoch tak, aby sa v priereze m , v ktorom pôsobí najväčšie osové napätie, dosiahla charakteristická odolnosť $N_{Rk,m}$ bez uváženia vzperu,
- α_{cr} predstavuje najmenšiu hodnotu násobiteľ'a zaťaženia (tu = kritického násobku osovej sily v oblúku), ktorým sa pri danej konfigurácii prenasobia osové sily N_{Ed} v prútoch tak, aby sa dosiahla pružná kritická strata stability,
- $|\eta^I|_{max}$ je maximum absolútnych hodnôt priehybov η^I konštrukcie so začiatočným pretvorením v tvare η_{cr} s ľubovoľne zvolenou amplitúdou $|\eta_{cr}|_{max}$ vypočítaných na základe teórie 2. rádu,
- $|M_{\eta_{cr}}^I|_m$ opisuje absolútnu hodnotu ohybového momentu podľa teórie 2. rádu v priereze m takto začiatočne zakrivenej konštrukcie.

– ... ešte sa k tomu vrátíme pri oblúkových mostoch

Stabilita tlačeneho pásu

3 . Geometricky nelineárna analýza s imperfekciami (GNIA)

- vo výsledkoch je zohľadnená teória 2. rádu aj vplyv imperfekcií (nepriamo pomocou ekvivalentnej)
- overujú sa teda iba odolnosti prierezov na priamo získané vnútorné sily či napätia.
 - ... ešte sa k tomu vrátíme pri oblúkových mostoch

Stabilita tlačeneho pásu

Namáhanie priečnych polorámov (ak nie je nelineárna analýza)

- Prídavné momenty na priečnikoch, zvisliciach (prípadne diagonálach)
- Nelineárnym výpočtom so zohľadnám imperfektného tvaru
- Približne

$$F_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{100} \quad \text{ak } a_k \leq 1,2 a,$$

$$F_{Ed} = \frac{a}{a_k} \frac{N_{Ed}}{80} \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crit}}} \quad \text{ak } a_k > 1,2 a,$$

$$\text{kde } a_k = \pi \sqrt{\frac{EI_z}{N_{crit}}}$$

