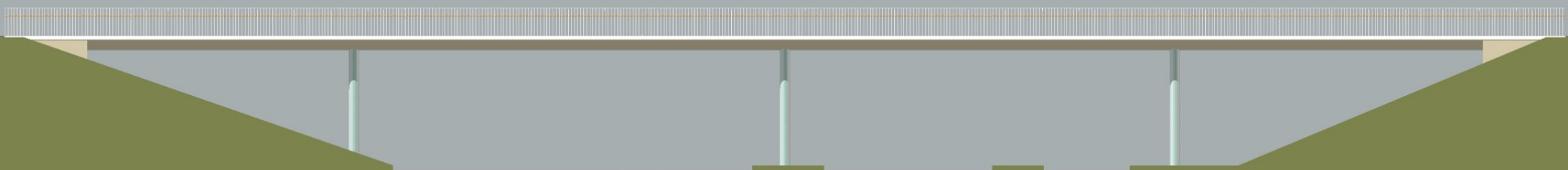


FOOTBRIDGE OVER NJARDARGATA

Reykjavik

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*



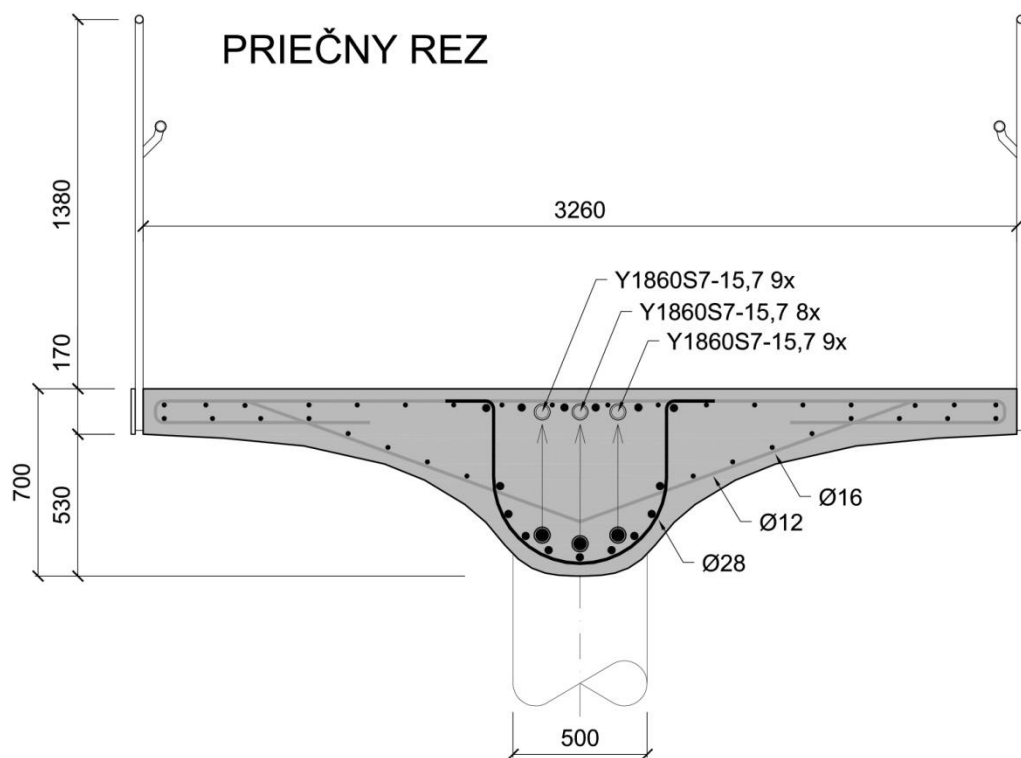
*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*

Keywords: footbridge, bridge, computation, calculation, structural analysis, most, lávka pre peších, statický výpočet, SSK

Úvod (Introduction)

Výstavba novej mestskej diaľnice so šiestimi jazdnými pruhmi (*Hringbraut street*), ktorá smeruje na letisko v centre mesta Reykjavík, si vyžadovala nový systém peších trás. V roku 2003 sa uskutočnila dvojstupňová súťaž a prvú cenu získal návrh architektov *Studio Granda* v spolupráci s *Línubönnun Consulting Engineers*. Vznikla tak trojica lávok pre peších a cyklistov, dve ponad *Hringbraut street* a jedna ponad križujúcu *Njardargata street*. Lávky majú takmer identický prierez a dizajn, líšia sa len počtom poľí, rozponom poľí a zakrivením. Prvé dve lávky majú tieto rozpätia poľí: 15,5+20,6+27,1+23,6+21,6+19,3+17,7+15,4 m a 9,1+18,4+23,5+16,7+10,1 m.

V roku 2007 boli nominovaní architekti *Studio Granda* na Islandské architektonické ceny za návrh troch lávok ponad dopravné tepny *Hringbraut* a *Njardargata* v Reykjavíku :



Three footbridges over Hringbraut & Njardagata :

- Icelandic Concrete Award 2010
- Icelandic Road Administration best project 2005-2007, 2009
- Nominated for the Icelandic Architecture Award 2007

Tento článok sa zaoberá tret'ou lávkou ponad dopravnú tepnu *Njardargata*. Táto štvorpoľová lávka pre svoj najmenší rozpon nebola experimentálne dynamicky testovaná, na rozdiel od prvých dvoch, kde boli určité pochybnosti vo výpočtoch, hlavne pre najväčšie rozpory.

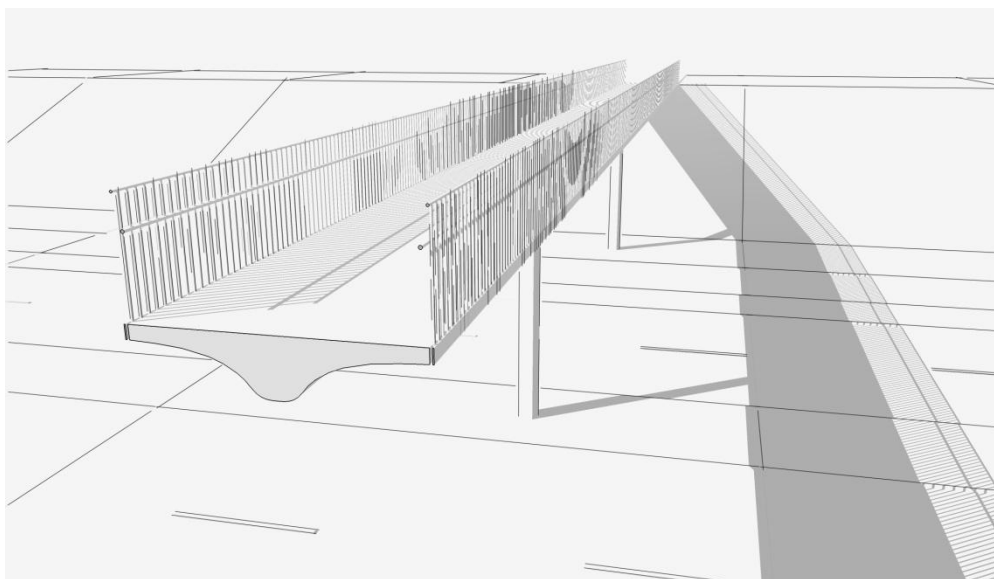
Nosná konštrukcia lávky ponad *Njardargatu* je spojený predpätý monolitický betónový nosník prierezu „T“, pričom spodný povrch je plynulo zaoblený, tvarovaný z doskového reziva. Zábradlie je vyskladané zo zvislých prvkov z nehrdzavejúcej ocele. Nosná konštrukcia je nesená nerezovými votknutými stĺpmi vyplnenými betónom s vloženou betonárskou výstužou, na koncoch sú minimálne betónové opory. Toto usporiadanie umožňuje, aby mosty boli zakrivené v pôdoryse aj v reze a prispôbené každému miestu bez podstatnej zmeny základnej konštrukcie.

Mosty sú odlievané do rezaného debnenia podporovaného rovnakými priečnymi ramenátmi. Dilatačné škáry sú potrebné iba pri oporách, pretože stĺpy a mostovka sú dostatočne flexibilné, aby akceptovali tepelné pohyby. Koncové elastomery nad oporami sú v podĺžnom smere pohyblivé a v priečnom smere tuhé. Upevňovací uholník zábradlia z nehrdzavejúcej ocele je zaliaty v mostovke a k nemu je pripojené zábradlie.

Všetky komponenty z nehrdzavejúcej ocele boli kreslené na Islande a digitálne odoslané do Číny na výrobu.



Celkový pohľad na lávku



Riešením rovnice je potom (za určitých zjednodušujúcich podmienok)

$$f_j = j^2 \pi / (2L^2) \sqrt{(E)/\mu} * [1 + NL^2 / (j^2 \pi^2 E)] \quad [\text{Hz}] \quad \text{z čoho vyplýva, že čím je väčšia predpínacia sila, tým je nižšia vlastná frekvencia } f.$$

Avšak v skutočnosti to je presne naopak, ako vyplýva z mnohých experimentov. Čiže riešenie v uzavretom tvare je v praxi nepoužiteľné. Tento fenomén je predmetom pokračujúceho experimentálneho výskumu. Zvýšenie vlastnej frekvencie predpätého nosníka závisí od viacerých faktorov a konfigurácií – káble súdržné, nesúdržné, externé, priame, zalomené, parabolické a pod. a pohybuje sa cca od 5±15%. Pri podrobnom nelineárnom FEM výpočte sa experimenty dostatočne presne zhodujú s výpočtami, závisí to od podrobnosti modelovania a zavedenia vhodných FEM prvkov.

Experimentálny výskum

V apríli 2006 sa začal výskumný projekt financovaný Islandskou verejnou správou ciest (*The Icelandic Public Roads Administration*). Projekt bol ukončený v septembri roku 2007 a výsledky boli podrobne publikované v [1]. Cieľom tohto projektu bolo definovať vhodné konštrukčné kritériá týkajúce sa vibračného správania lávok v dôsledku zaťaženia vyvolaného človekom na lávkach na Islande a predikovať predpokladané správanie budúcich nových lávok v Reykjavíku.

Projekt mal tieto hlavné ciele :

1. Overiť model FEM použitý vo fáze návrhu (prirodené frekvencie a tlmenie)
2. Porovnať nameranú a predpokladanú reakciu jednotlivých chodcov a bežcov

Dynamické vlastnosti lávok

Ak chceme ekonomicky navrhnuť nejakú lávku s väčším rozponom, takmer vždy sa dostaneme do normami neodporúčaných oblastí prvých zvislých vlastných frekvencií (1÷5 Hz → STN EN 1991–2/NA). Potom je nutné urobiť podrobný dynamický výpočet, ktorý však nie je taký jednoznačný, ako ľahko sa to napíše. Problémy sú so stanovením vstupných materiálových charakteristík konštrukcie, aj so zadenovaním dynamického zaťaženia chodcami.

Príkladom môže byť určenie vlastnej frekvencie predpätého nosníka v závislosti od veľkosti predpínacej sily :

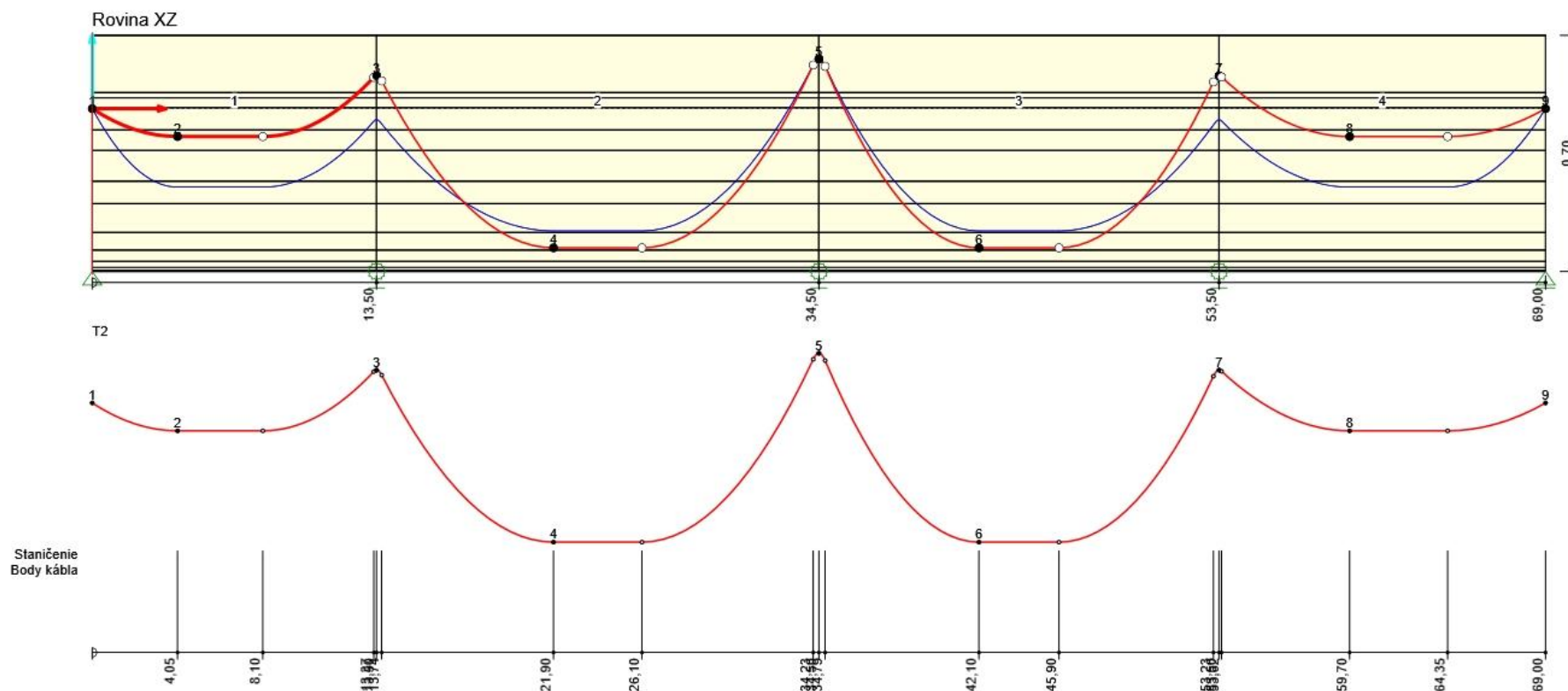
Podľa klasickej teórie Euler–Bernoulliho rovnice je rovnica nosníka zaťaženého osovou silou

$$\delta^2/\delta x^2 [E](x) (\delta^2 v(x, t)/\delta x^2) - N (\delta^2 v(x, t)/\delta x^2) + \mu(x) (\delta^2 v(x, t)/\delta t^2) = 0$$

kde $v(x, t)$ je výchylka nosníka kolmo na os, N je osová (predpínacia) sila → $N(+)$ ťah *tensile force* a $N(-)$ tlak *compressive force*, $\mu(x)$ je hmotnosť nosníka na meter dĺžky.

3. Zmerať reakciu vybraných konfigurácií skupín chodcov a bežcov na rôznych lávkach v Reykjavíku
4. Definovať súbor smerníc pre posudzovanie budúcich vibrácií lávok pre človeka vyvolaných človekom v implementáciách v Islandských národných aplikačných dokumentoch pre Eurokódy.

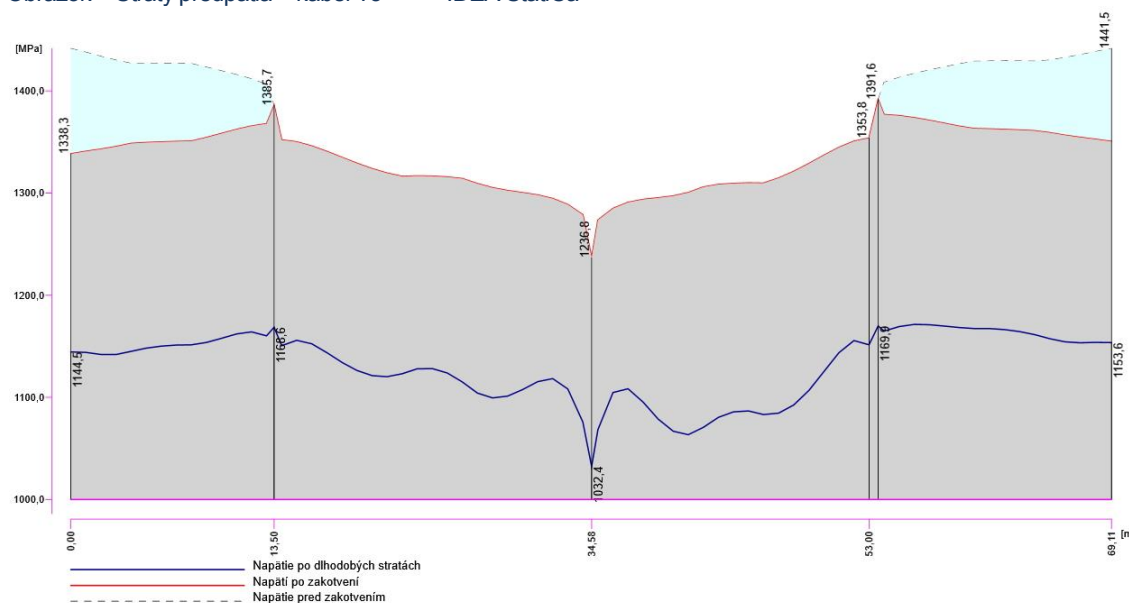
Prieskum zahrňoval 3 existujúce lávky v Reykjavíku, z toho dve mali rovnaký prierez ako tu opisovaná lávka ponad cestu Njardargata (2 spomínané lávky ponad cestu Hringbraut).



Vedenie káblov – prevýšený pozdĺžny rez

IDEA StatiCa

Obrázok – Straty predpätia – kábel T3 IDEA StatiCa



Výskumy sa zamerali jednak na analýzu výpočtov v projekte lávok realizovaných v komerčnom programovom systéme SAP2000 a jednak na porovnanie výsledkov s experimentálnymi meraniami na skutočných lávkach. Robili sa podrobné dynamické merania frekvencií a zrýchlení, vyvolané chodcom – jednotlivcom, bežcom – jednotlivcom, skupinou chodcov, skupinou bežcov a pomaly sa pohybujúcim davom. Projektované údaje vlastných frekvencií boli mierne podhodnotené (nepriaznivejšie), ako sa namerali. Nameraná frekvencia bola vyššia hlavne v dôsledku priaznivejšej hodnoty skutočného E-modulu, vplyvu predpätia a vplyvu zábradlia, ktoré nebolo uvažované. Pri meraní zrýchlení vplyvom chodcov a bežcov boli prekvapivo prekročené normové hodnoty chodca – jednotlivca, ktoré však pocitovo neboli vnímané do takej miery, aby sa pristúpilo k dodatočným konštrukčným opatreniam (namontovaniu tlmičov), ako sa to stalo na inej lávke v Reykjavíku na podnet sťažností občanov.

Na základe výsledkov tohto experimentálneho výskumu sa pracuje na definovaní vhodných kritérií návrhu, ktoré sa pravdepodobne použijú ako základ pre Islandskú národnú prílohu, týkajúcu sa vibrácií lávky pre chodcov. Cieľom je pomôcť investorovi plánovanej stavby definovať vhodné kritériá použiteľnosti, týkajúce sa vibrácií spôsobených chodcami alebo bežcami.

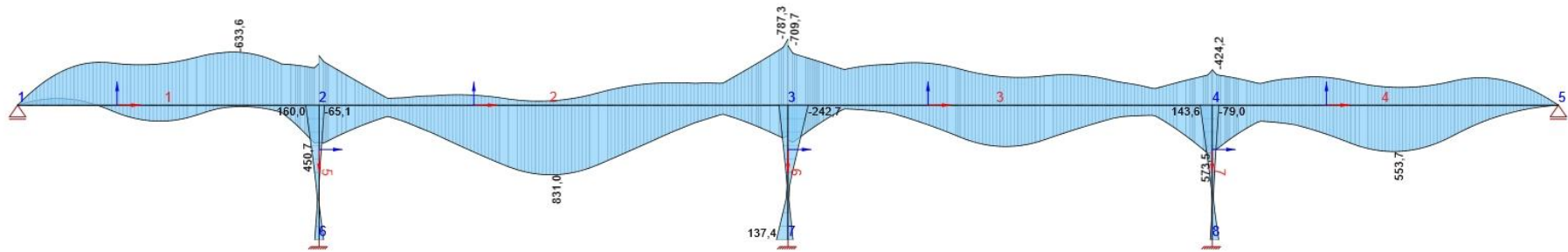
Kritériá budú závisieť od umiestnenia mosta, dôležitosti chodníka alebo prípadne špecifickej udalosti (napr. zriedkavé davy)

Podobný prístup je navrhnutý vo francúzskych smerniciach SÉTRA, ktorý sa pri nedostatku relevantných podkladov využíva aj u nás.

Dôležitosť zhodnotenia aktuálnych poznatkov bude zdôraznená tak pri vstupných zaťaženiach, ako aj na modelovaní systému nosnej konštrukcie a limitných kritérií zrýchlenia. Odporúča sa tiež vziať do úvahy možnú inštaláciu systému tlmičov v neskoršej fáze, ak by bol problém so zabezpečením vibrácií. To sa bude týkať konštrukcií, pri ktorých sa už pri projektovaní očakáva, že most by mohol byť náchylný na vibrácie. Inštalácia tlmičov by bola následne ekonomicky výhodnejšia, pretože by neboli potrebné zásadné zmeny v konštrukcii a nebol by nutný neprímeraný zásah do estetického pôsobenia mosta.

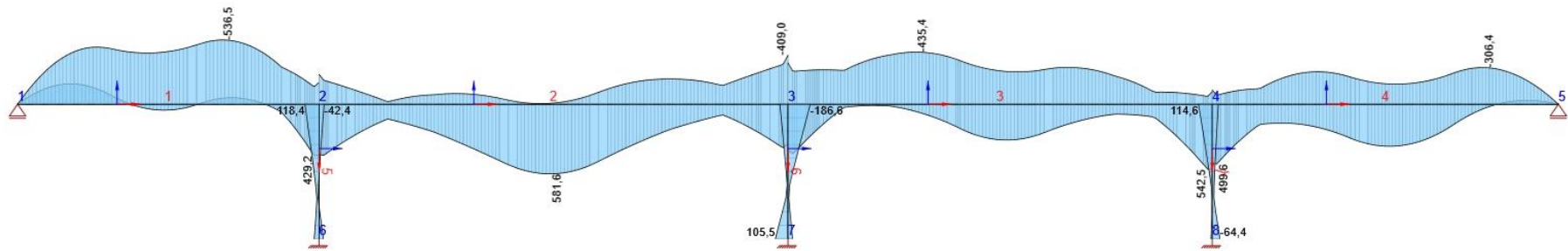
Výpočty

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie sme previedli zjednodušený výpočet lávky. Išlo hlavne o rozloženie predpínacích káblov pozdĺž mosta a výpočet vlastných frekvencií. Nemali sme k dispozícii presné výkresy výstuže, len základné schémy rozloženia výstuže. V kombináciách zvislých zaťažení sme vynechali servisné vozidlo, lebo použité spojitě rovnomerné zaťaženie $q_{fk} = 5,0 \text{ kN/m}^2$ vykazovalo nepriaznivejšie účinky. Výpočty sa robili na dvoch statických schémach, ako rámová konštrukcia a ako spojitý nosník s pružnými podperami v mieste stĺpov.



MSÚ – obálka

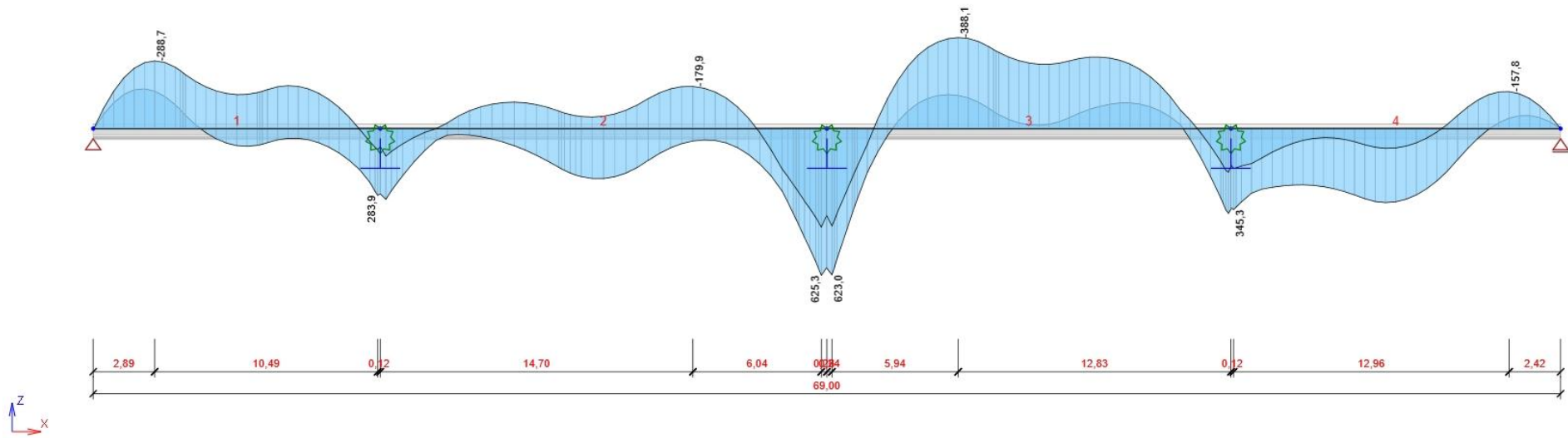
IDEA StatiCa



MSP Charakteristická kombinácia – obálka

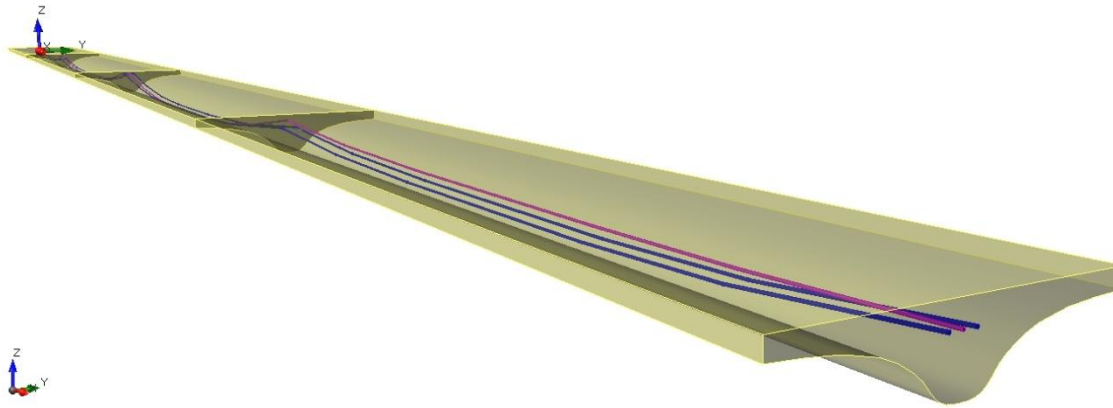
IDEA StatiCa

Vnútročné sily sú vzťahnuté k ťažisku celého prierezu.



MSP Častá kombinácia – obálka

IDEA StatiCa



Vedenie káblov – Perspektíva

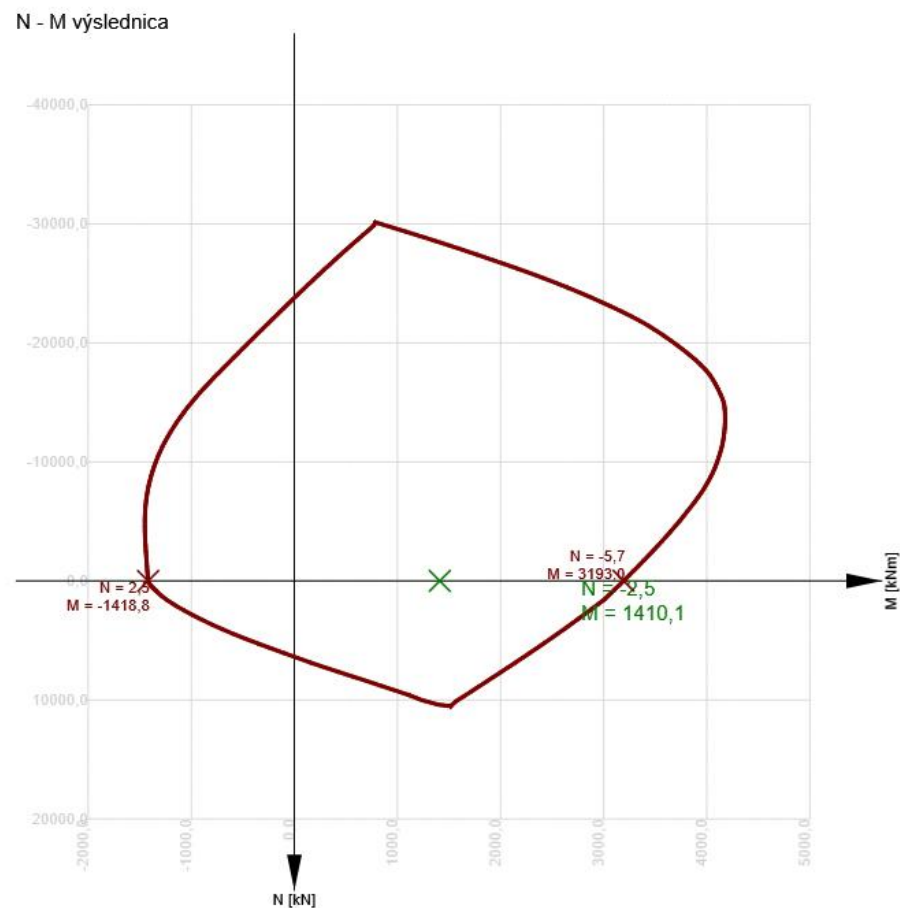
program IDEA StatiCa

Základné zvislé vlastné frekvencie
(bez započítania zábradlia a bez aktualizácie E_0):

	zat'azenie	
	základné	+0,7 kN/m ² náhodilé
f_1	3,0523 Hz	2,9395 Hz
f_2	4,1192 Hz	3,9670 Hz
f_3	5,6417 Hz	5,4332 Hz
f_4	6,7267 Hz	6,4782 Hz

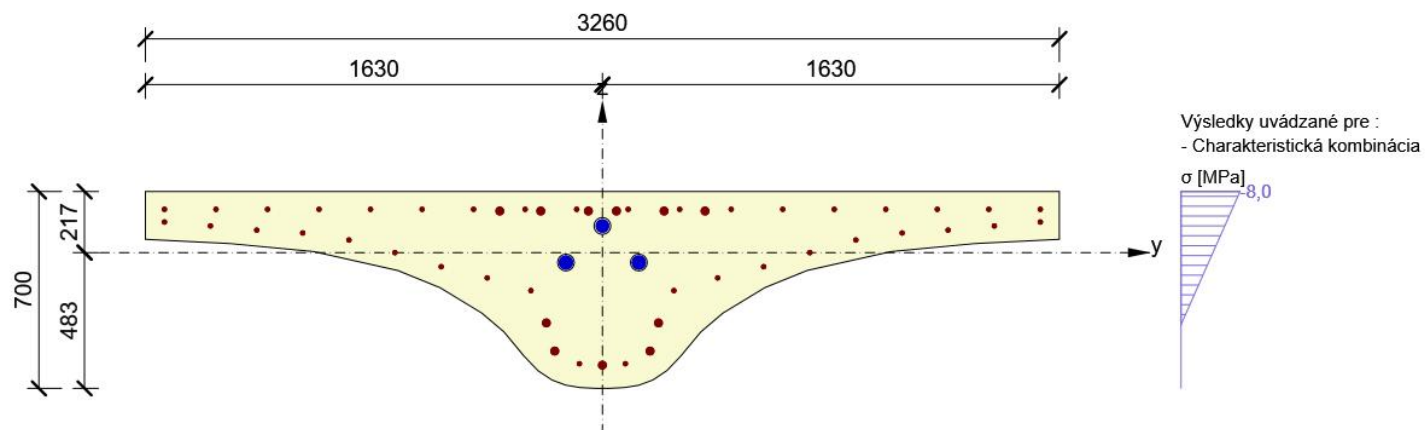
(0,7 je odporúčané zohľadnenie náhodilého zat'azenia)
Pre zaujímavosť základná FE–predpovedaná frekvencia prvého
8–poľového mosta nad cestou Hringbraut s maximálnym rozponom
27,1 m bola $f_1 = 1,92$ Hz, kalibrovaná za podpory experimentov na 2,34 Hz.

MSÚ – 2. pole – staničenie 24 m
program IDEA StatiCa

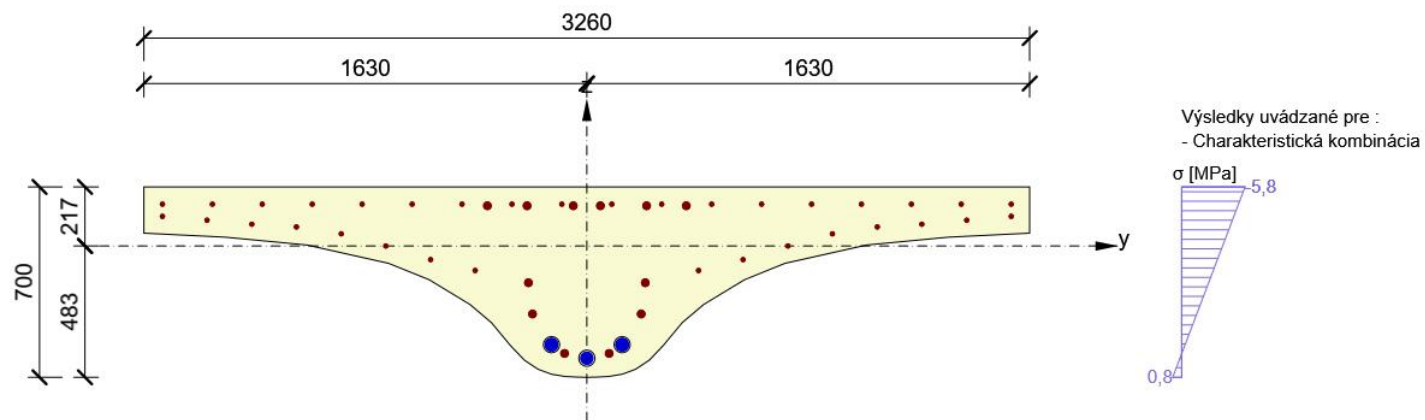


Niektoré **zdroje**, použité pri tvorbe článku:

- [1] Gudmundur V GUDMUNDSSON, Einar Thór INGÓLFSSON, Baldvin EINARSSON, Bjarni BESSASON : SERVICEABILITY ASSESSMENT OF THREE LIVELY FOOTBRIDGES IN REYKJAVIK, 12 July 2016
- [2] STN EN 1990 Zásady navrhovania konštrukcií
- [3] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
- [4] STN EN 1991–2 Zat'azenie mostov dopravou
- [5] STN EN 1992–1–1 Navrhovanie betónových konštrukcií – všeobecné pravidlá
- [6] STN EN 1992–2 Betónové mosty



Obmedzenie napätia – Predpínanie – vek 28 dní – nad podporou – staničenie 13,5 m program IDEA StatiCa



Obmedzenie napätia – vek 29200 dní – stred 2. poľa – staničenie 24 m program IDEA StatiCa

Všetky obrázky a prepočty v tomto príspevku sú pôvodné a neokopírované.

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné počítačové programy :

STRAP, PRECON, IDEA StatiCa Concrete & Prestressing , SketchUp, AutoCad LT, Microsoft Word, PDF Creator, Corel Draw

