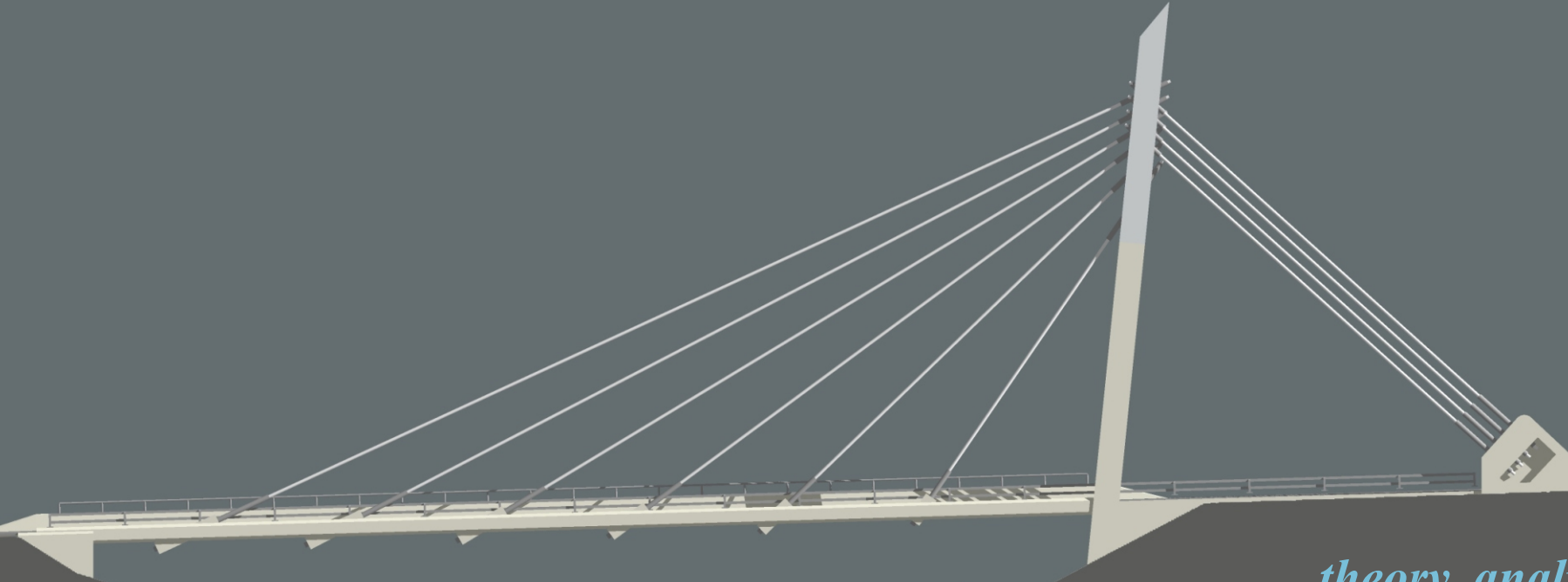


Elbow river cable-stayed bridge

Calgary, CANADA

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

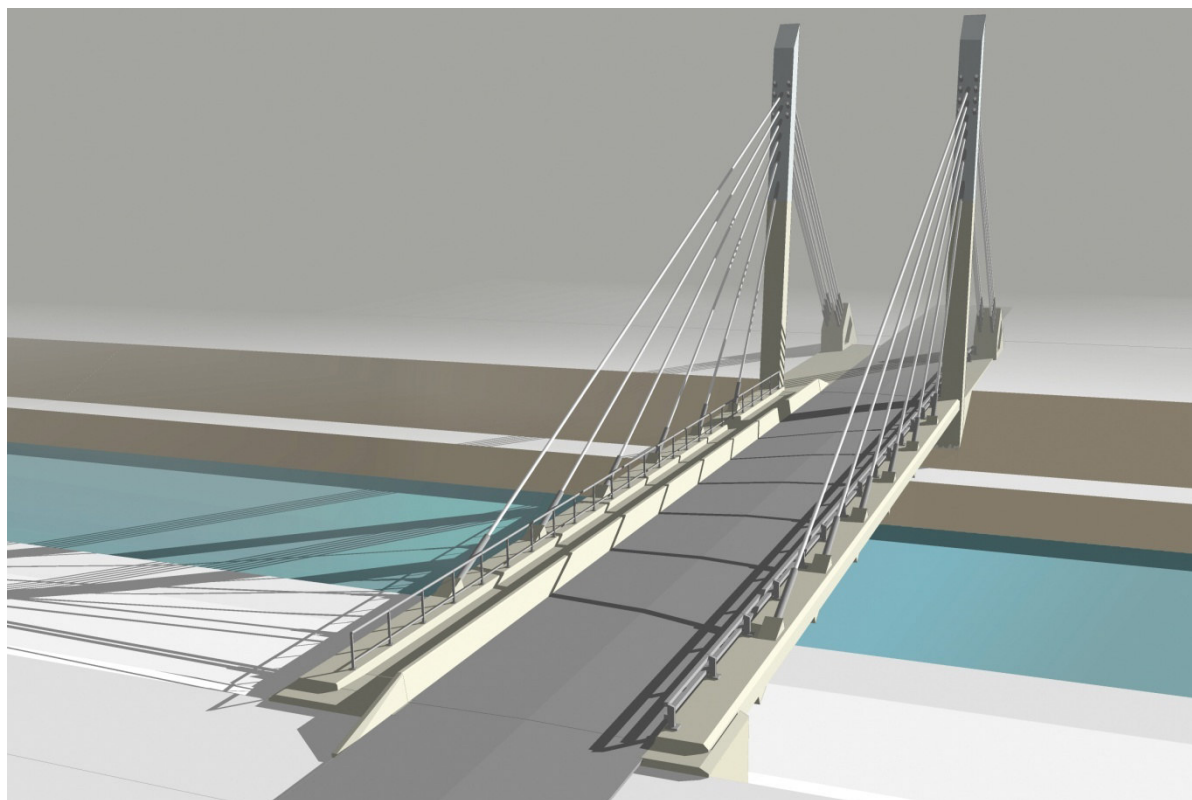


*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*

KEYWORDS : bridge, cable-stayed bridge, computation, calculation, structural analysis, statický výpočet, SSK

ÚVOD (Introduction)

V meste Calgary v provincii Alberta vo vnútrozemskej Kanade sa každoročne koná populárne kultúrne podujatie *Calgary Stampede*. V rámci neho sa každý júl konajú (väčšinou pod holým nebom) festivaly, koncerty, výstavy, prehliadky, poľnohospodárske súťaže, preteky *chuckwagon racing* (vozy prekryté plachtou ťahané koňmi) a hlavne rodeo. Toto podujatie navštevuje vyše milión divákov. Podujatie sa koná na rozľahlom priestore so štadiónmi, pretekárskymi dráhami, krytými halami a parkoviskami. Organizátor podujatia – spoločnosť *Calgary Exhibition & Stampede Ltd* má aj rozsiahle priestory pre zázemie so skladovými halami, garážami pre obslužné vozidlá (väčšinou veľké kamióny) a iné. Problém bol však v tom, že tieto priestory oddeľuje od objektov podujatia rieka *Elbow*. Jeden starší menší most už prestával kapacitne postačovať zväčšujúcim sa požiadavkám podujatia. Tiež bolo treba riešiť ďalší dopravný bypass k parkoviskám.



POŽIADAVKY NA VLASTNOSTI MOSTA

Investor *Calgary Exhibition & Stampede* mal „jasnú“ predstavu, ako by mal taký most vyzeráť. Táto predstava sa nelíšila od väčšiny súkromných investorov. Mal by byť lacný a čo najrýchlejšie postavený. Horná hrana vozovky mosta nesmie byť vyššie ako prilahlé cesty. Navyše by mal byť vzhľadný a atraktívny. Podľa požiadaviek správcu toku musí byť spodná hrana mostovky v predpísanej vzdialenosti nad úrovňou povodňovej vlny.

Dodávateľ už mal pripravené oceľové nosníky („ička“) na výstavbu. Výška nosnej konštrukcie bola však príliš vysoká, aby sa vmestila do tolerancie medzi prilahlú cestu a vodnú hladinu.

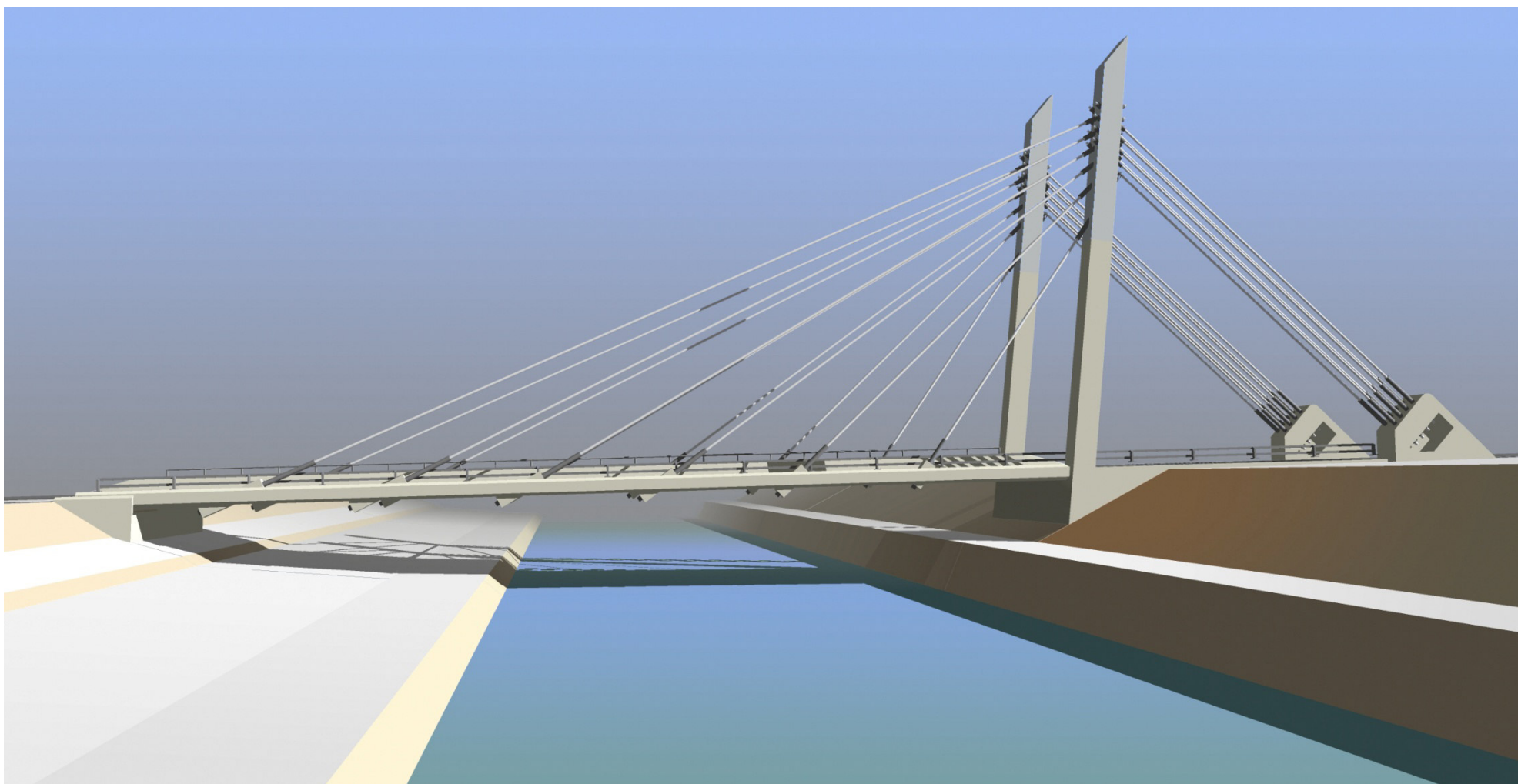
Najprísnejšia, takmer nerealizovateľná, bola požiadavka doby výstavby a projektu zároveň – a to 1½ roka, z toho vlastná výstavba 1 rok medzi dvomi podujatiami. Preto sa pristúpilo na systém výstavby „*design & build*“ so všetkými jej výhodami a nevýhodami.

Do užšieho výberu sa dostali dva typy konštrukcií : priehradový nosník a zavesený most. Investor si potom vybral kvôli väčšej atraktívnosti zavesený most, aj keď vychádzal o niečo drahšie. Vlastník oslovil dve primárne organizácie : konzultačnú firmu *CH2M Hill* a dodávateľa *Graham Construction and Engineering Inc.*, ktoré museli navzájom spolupracovať. Tie si potom vybrali ďalších subdodávateľov.

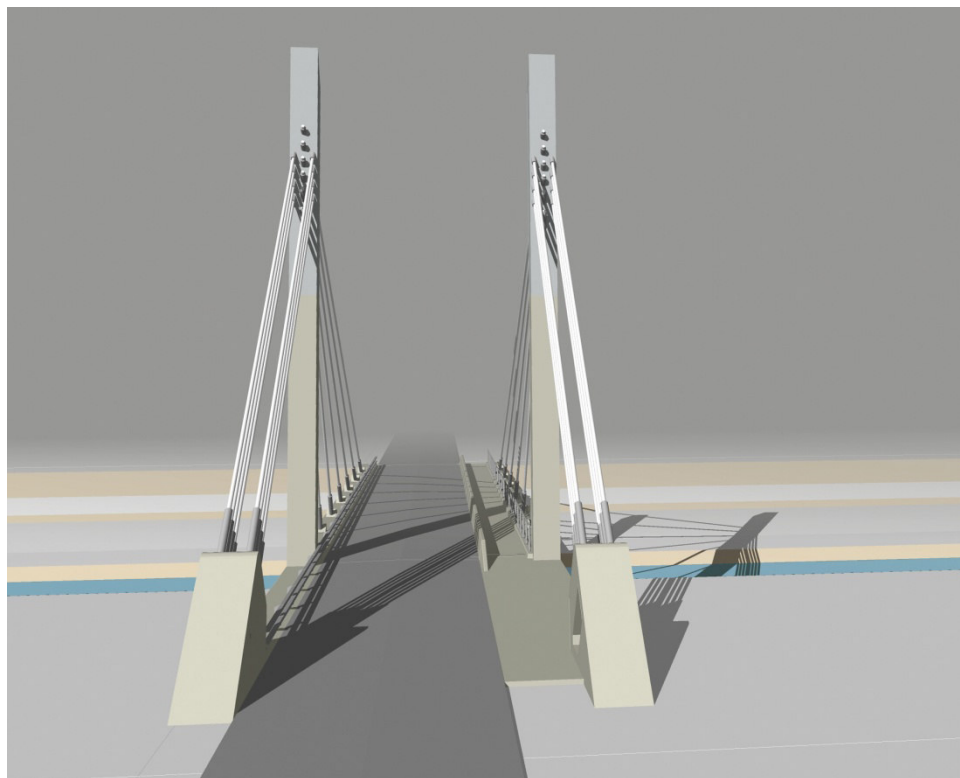
Pri spôsobe výstavby *design-build* počas procesu projektovania a výstavby dodávateľ rozhoduje o otázkach návrhu, ako aj o otázkach súvisiacich s nákladmi, ziskom a časovou náročnosťou. Zatiaľ čo

tradičná metóda obstarávania výstavby oddeľuje projektantov od záujmov dodávateľov, *design-build* nie. Z týchto dôvodov sa usudzuje, že postup *design-build* je nedostatočne prispôsobený projektom, ktoré vyžadujú zložité návrhy na technické, programové alebo estetické účely. Niektoré ďalšie nevýhody postupu *design-build*:

- nevyužíva konkurenčné ponuky
- typické problémy projektového manažmentu (stanovenie zodpovednosti, písanie zmlúv, odhady rozsahu a harmonogram)
- problémy s poistením zodpovednosti za škodu



Pri štátnych zákazkách k tomu pristupujú ešte ďalšie veci, ako napr. nepriehľadnosť čerpania financií, nedostatočná kontrola verejnosti a pod., čo však už nie je problém tohto mosta. V každom prípade, tento spôsob výstavby bol vzhľadom na veľmi krátky termín výstavby a projektovania zrejme jediný možný.



IDENTIFIKAČNÉ ÚDAJE MOSTA

Investor : Calgary Exhibition & Stampede Ltd.
Dodávateľ : Graham Construction and Engineering Inc.
Konzultant : CH2M Hill Ltd.

Subkonzultanti :

- Jiří Stráský Consulting Engineer (nezávislý recenzent)
- Speco Engineering Pvt. Ltd.
- Matrix Solutions Inc.
- International Quality Consultants Inc.

Začiatok projektových prác : marec 2008
Začiatok výstavby : júl 2008
Koniec výstavby : august 2009
Celkové náklady : ≈ 5 mil. CAD
Rozpon : 48,5 m
Výška : 23,3 m (od vozovky)
Celková dĺžka mosta : 75,3 m
Prejazdná šírka : 7,4 m
Chodník : 2 m
Typ mosta : zavesený

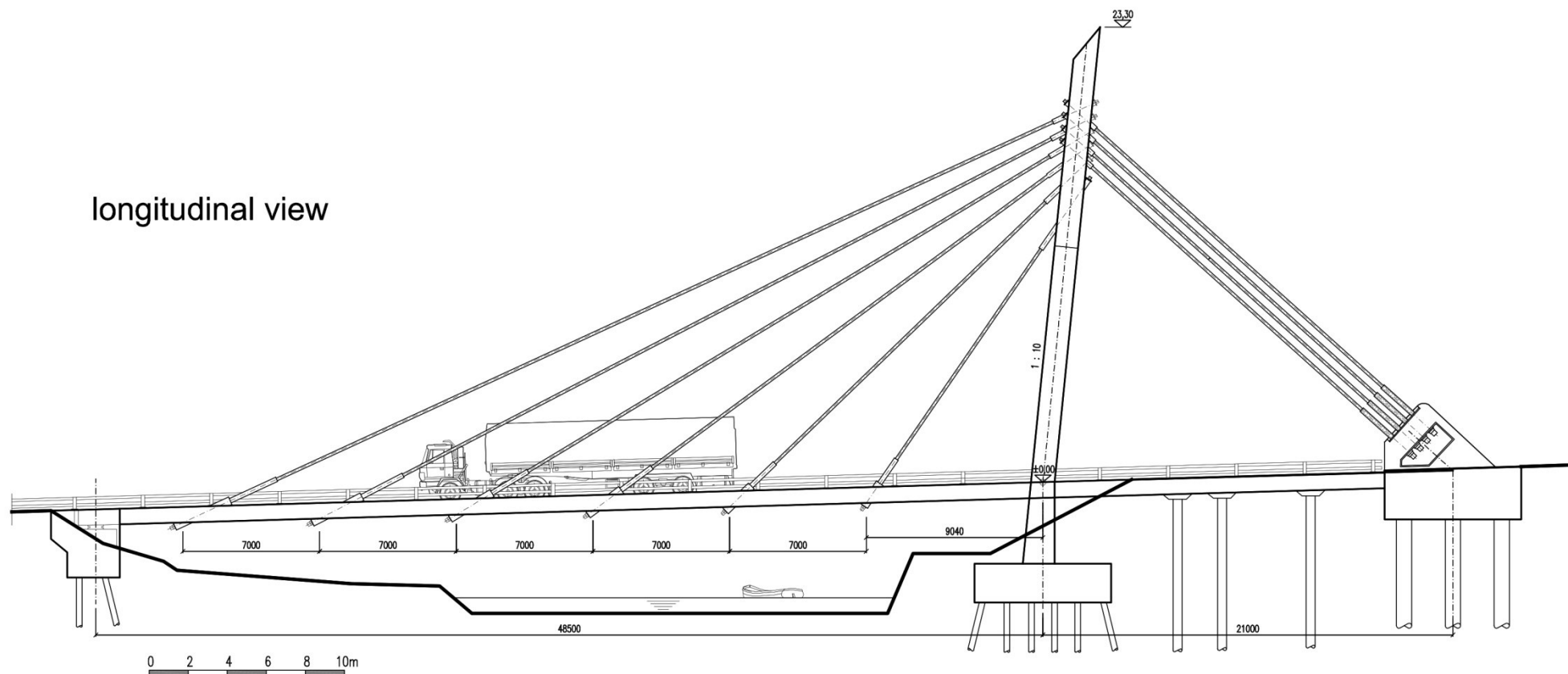
POPIS KONŠTRUKCIE MOSTA

Okrem údajov zrejmých z obrázkov dopĺňujeme nasledovné informácie : Zakladanie je na pilótach. Betónová mostovka je obojstranne predpätá, počítaná ako čiastočne predpätá. Je betónovaná in situ v jednom zábere. Mostovka je votknutá do pylónov, opornej steny medzi pylónmi a do dvoch vodorovných betónových nosníkov spájajúcich pylóny so zadnými kotevnými blokmi. Tieto vodorovné nosníky nie sú spojené s cestnými panelmi, ktoré ich len pokrývajú. Dva vodorovné nosníky prenášajú horizontálne zložky reakcií zadných závesných káblov do mostovky, kde sa vyrovnávajú s vodorovnými reakciami predných káblov. Predná časť mostovky je uložená na štyroch posuvných hrncových ložiskách. Pylóny majú priečny rozmer 1,21 x 1,26 m. V spodnej časti sú železobetónové a v hornej časti, kde sa križujú závesné laná, tvoria oceľovú krabicu vystuženú priečkami. Pylóny sú sklonené v pomere 1 : 10. 2x 4 káble (od prednej časti mosta) sú z 19 lán $\phi 15,7$ mm, ďalšie 2x 2 káble sú zo 17 lán $\phi 15,7$ mm. Zadné káble 2x 4x 2 sú znova z 19 lán $\phi 15,7$ mm. Každé lano je umiestnené v HDPE plášti priemeru 140 mm s protivibračnou špirálovou úpravou. Horná časť kotevného bloku je spojená s masívnym základom predpätými tyčami.

Všetky konštrukčné diely mosta sú navrhnuté tak, aby umožňovali čo najrýchlejšiu výstavbu a mohli byť zabudované pokiaľ možno nezávisle od ostatných častí. Pri betonáži mostovky sa využilo 8 oceľových nosníkov dĺžky 44 m, ktoré mal k dispozícii dodávateľ po predošlom projekte, ako lešenie ponad vodný tok a tak sa mohla doska vyliať na jeden záber, aby sa nemuselo čakať na vytvrdnutie betónu po jednotlivých častiach, ako sa zvyčajne zvyknú budovať zavesené mosty. Nosníky boli odstránené až po napnutí všetkých káblov.

Všetky predpínané prvky sú systému Dywidag.

longitudinal view



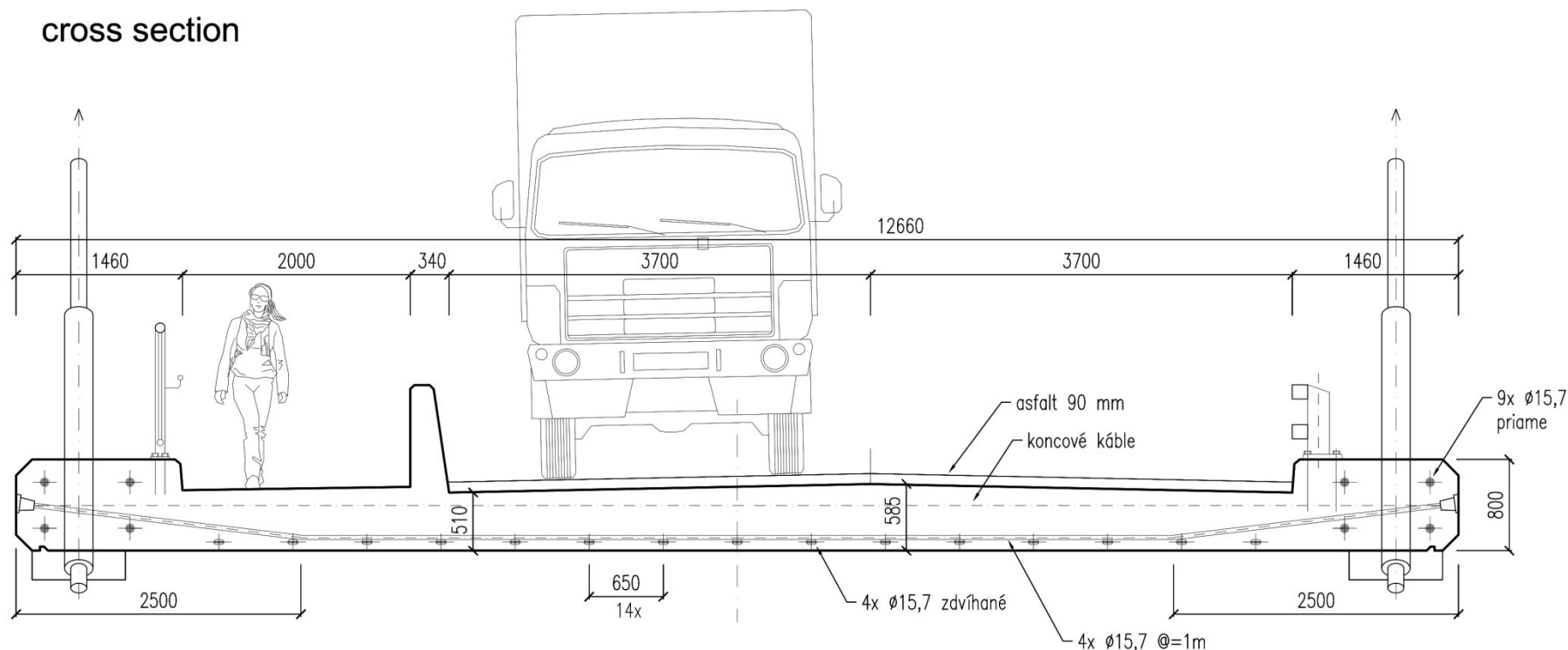
Zároveň nebolo treba budovať dočasný alebo trvalý pilier vo vodnom toku, čím by sa skomplikovala a predĺžila výstavba, naviac s dodatočným enviromentálnym zaťažením rieky.

Projektové tímy spracovali veľké množstvo výpočtov na veľkom počte výpočtových modelov. Bolo by žiadúce spracovať kompletný projekt pred začatím výstavby, lebo zavesený most je komplexný systém, ktorý musí byť jemne vyladený. Na to však nebolo času. Jednotlivé čiastkové výsledky museli byť dodávané na stavbu po malých dieloch, často boli upravované podľa priebehu stavby a vrátené na prepočítanie na upravených modeloch. To vyvolávalo enormný tlak na projektantov a termíny výstavby.

Na výpočty boli projektovými tímami použité programy ANSYS, SAP2000 a CRACK.

Pre väčšinu aplikácií nebudú zavesené lanové mosty, hlavne pri tak „malých“ rozpätíach cenovo konkurencieschopné. Konštrukcia a materiálové náklady sú vo všeobecnosti vyššie ako pri konvenčných trámových mostoch. Avšak existujú prípady, ako napríklad tento most, že pre rôzne príčiny môžu byť akceptované. Tu je to potreba minimalizovať hrúbku mostovky z dôvodu vysokej hladiny vodného toku a existujúcej niveley cesty, prekenuť prekážku bez medzistĺpov a v neposlednom rade sú to aj estetické dôvody objektu v blízkosti prestížnych verejných podujatí.

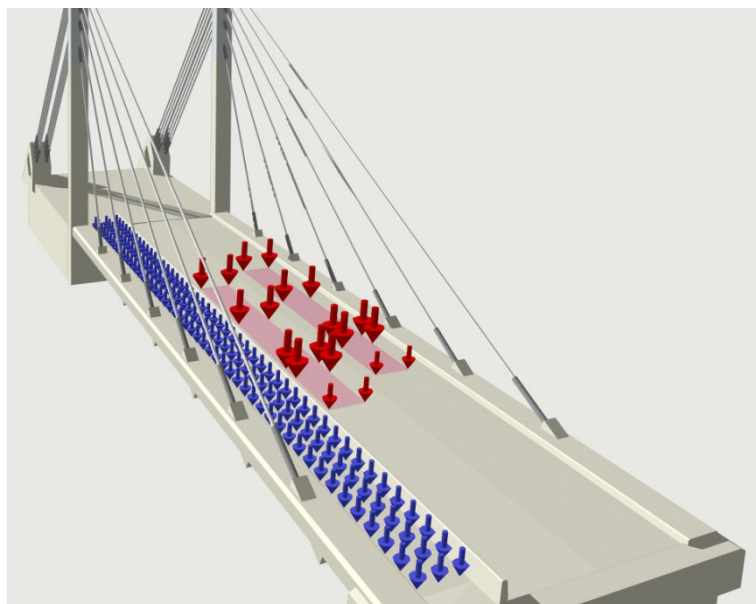
cross section



VÝPOČTY

Na základe niektorých veľmi zjednodušených prepočtov sme zisťovali, aké sú základné namáhania jednotlivých konštrukčných častí. Zamerali sme sa na vlastnú hmotnosť mosta a zaťaženie účinkami dopravy. Výpočty prebiehali v zmysle Eurokódov, a to jednak v zaťaženiach a jednak v materiálových vlastnostiach prvkov. Výnimku tvorilo len zaťaženie rozmerným nákladným vozidlom s označením CL-800 s piatimi nápravami so zaťažienami (postupne spredu) $64 \text{ kN} + 160 \text{ kN} + 160 \text{ kN} + 224 \text{ kN} + 192 \text{ kN} = 800 \text{ kN}$ a vzdialenosťami náprav $3,6 + 1,2 + 6,6 + 6,6 \text{ m}$. Naprieč sú kolesá osovo od seba vzdialené $1,8 \text{ m}$. Na most pôsobia vedľa seba dve pohybujúce sa vozidlá, každé v jednom pruhu. Zaťaženie na chodníku zástupom ľudí malo charakteristickú hodnotu $5,0 \text{ kN/m}^2$.

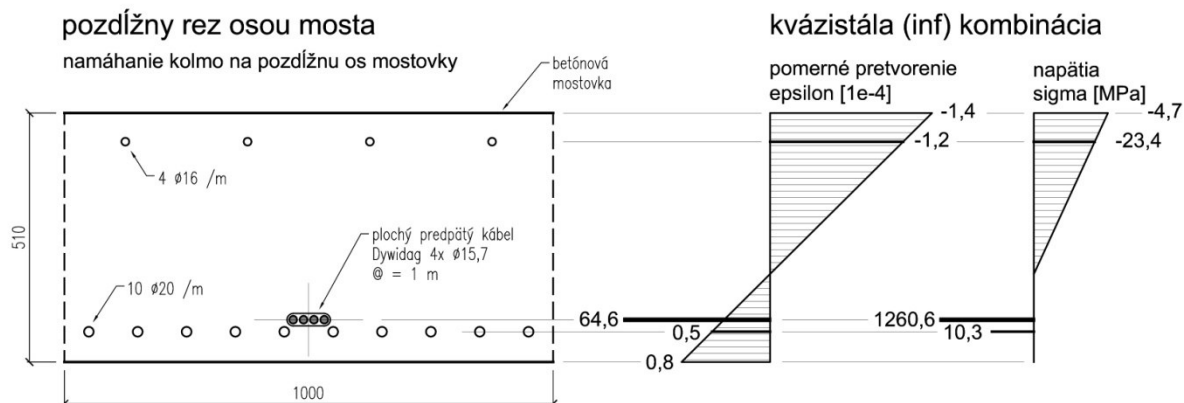
Konečný stav predpätia závesných káblov sme najskôr zjednodušene uvažovali pri približne nulových zvislých posunoch mostovky v mieste spodného ukotvenia kábla pri stálom zaťažení a nulovom vodorovnom posune pylóna. Tieto hodnoty sme odhadli po viacerých výpočtoch za sebou približovacou metódou. Výsledné napätia pri vyššie deklarovaných prierezoch káblov nám vyšli v najviac namáhanom kábli $\sigma \approx 0,5 f_{pk}$ (pri $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$). V druhom slede sme postup výpočtu káblov spresnili (viď. ďalej strana 8).



Premenné zaťaženie dvomi pohybujúcimi sa vozidlami CL-800 a zástupom ľudí na chodníku (hodnoty viď. predošlá strana)

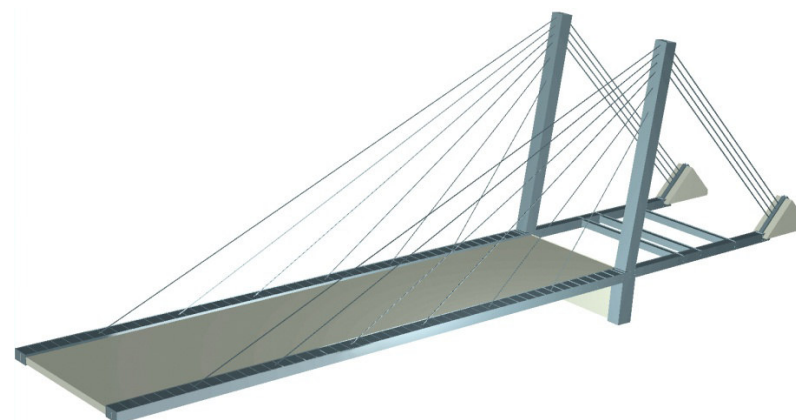
Pri výpočte mostovky v priečnom smere, kde je deklarovaná predpätá výstuž v plochom kábli 4x lano $\phi 15,7$ v rozteči 1 m, nám vyšiel výsledok v zmysle EN trochu iný, pri stálom zaťažení SLS v kvázistálej kombinácii (inf) nie je prierez celý tlačенý (viď. obrázok vpravo hore). Skúšali sme výpočet upresniť na reálny tvar premenného priečného rezu mostovky a príslušného zaťaženia, ale výsledok bol takmer rovnaký. Ani pri vypustení násobiteľa „inf“ sme nepochodili.

Keby sme dali dva káble na bežný meter ($@=0,5\text{m}$), tak výsledkom by bol celý prierez tlačенý, pričom mäkká výstuž by stačila len ako minimálny stupeň vystuženia.



↑ Výsledky kvázistálej kombinácie (SLS) v mostovke v zmysle Eurokódov

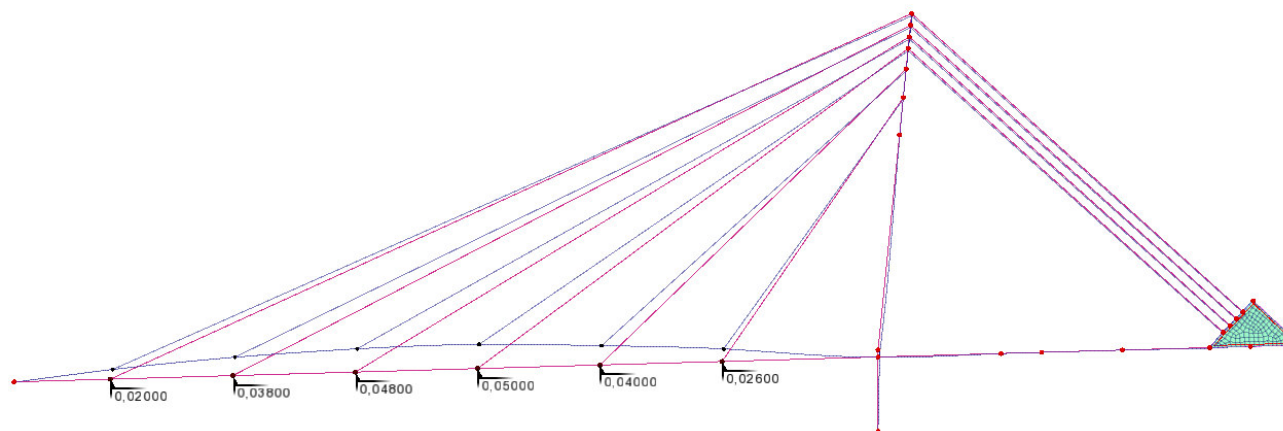
↓ Model FEM v programe STRAP



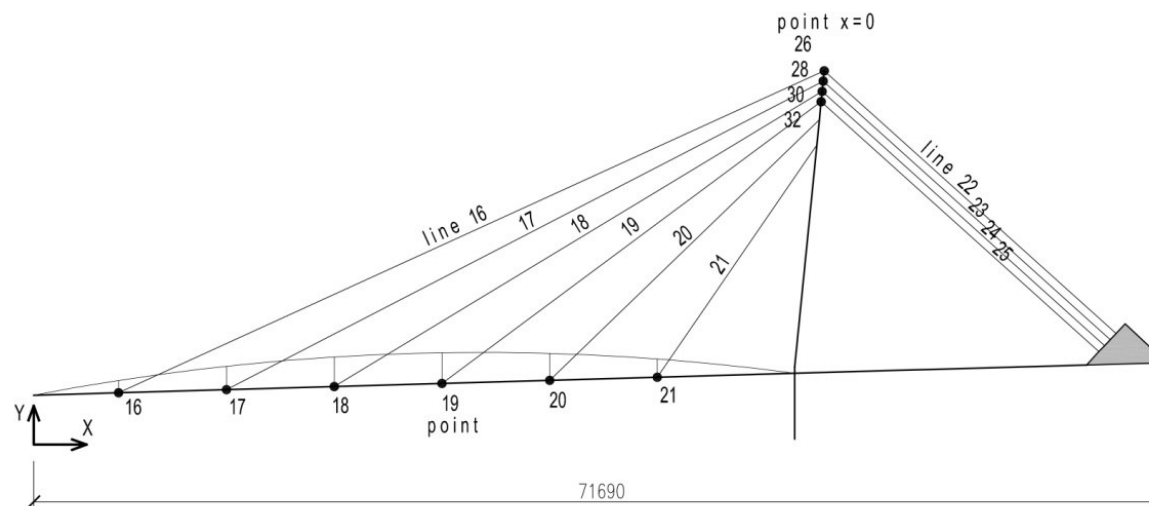


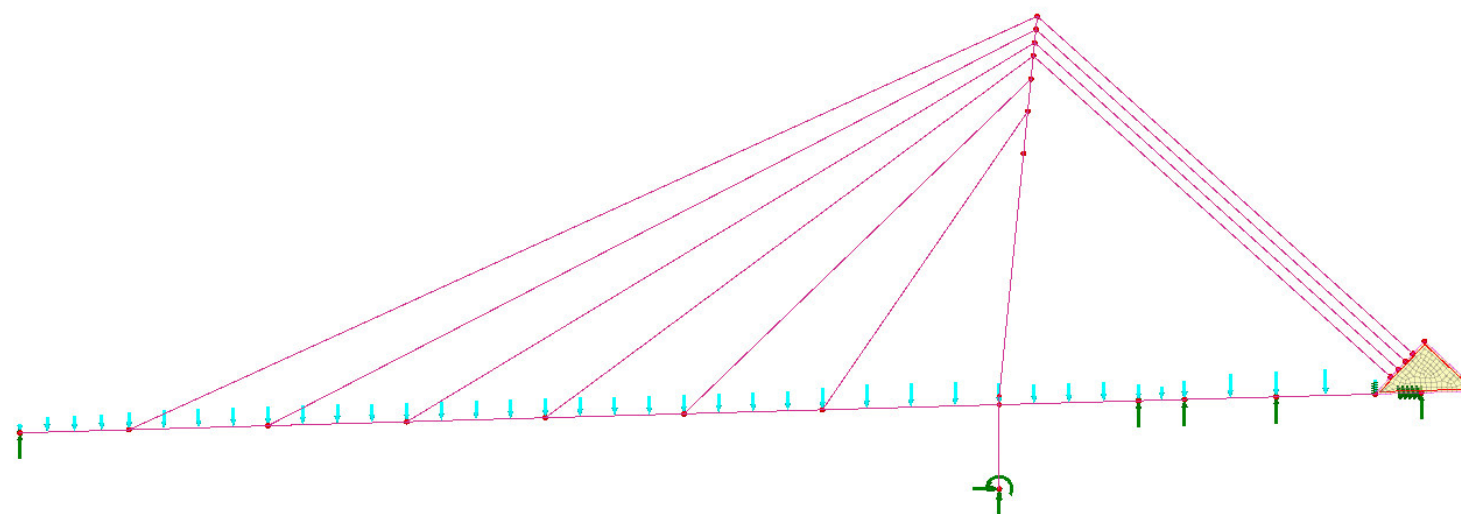
Ako sme už spomenuli, mostovka sa betónovala naraz v jednom slede a pomocné nosníky lešenia sa odstránili až po napnutí káblov. Otázka je teda, ako napnúť káble pri takomto postupe. Pri ladení káblov sme zvolili trochu inú metódu a pomohli sme si aj softvérom, ktorý umožňuje sofistikované ladenie káblov. Aj keď stále platí, že zavesený most je vysoko neurčitý systém a neexistuje priama exaktná metóda na jeho vyriešenie. Model sme zostavili len pre polovicu mosta, lebo konštrukcia je takmer symetrická. Sústava bola riešená pri stálom zaťažení : vlastná tiaž a ostatné stále zaťaženia (zvršok, zvodidlá a ďalšie). Pri napínaní káblov by sa mala mostovka trochu zdvihnúť, aby sa oddelila od debnenia a lešenia. Preto sme ako cieľové deformácie pre os Y nezmohli nuly, ale približnú priebybovú krivku v tvare oblúka v úrovni monolitckej dosky. V hornej úrovni pylóna boli zadané optimalizačné podmienky – nerovnice pre posuny blízke nule v osi X. Model má 10 lán a desať cieľových posunov.

Cieľové (*target*) hodnoty pre vstupné podmienky ladenia káblov v mostovke DY [m] – program LUSAS



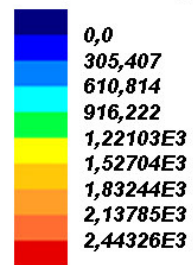
Číslovanie káblov (*line*) a uzlov (*point*)



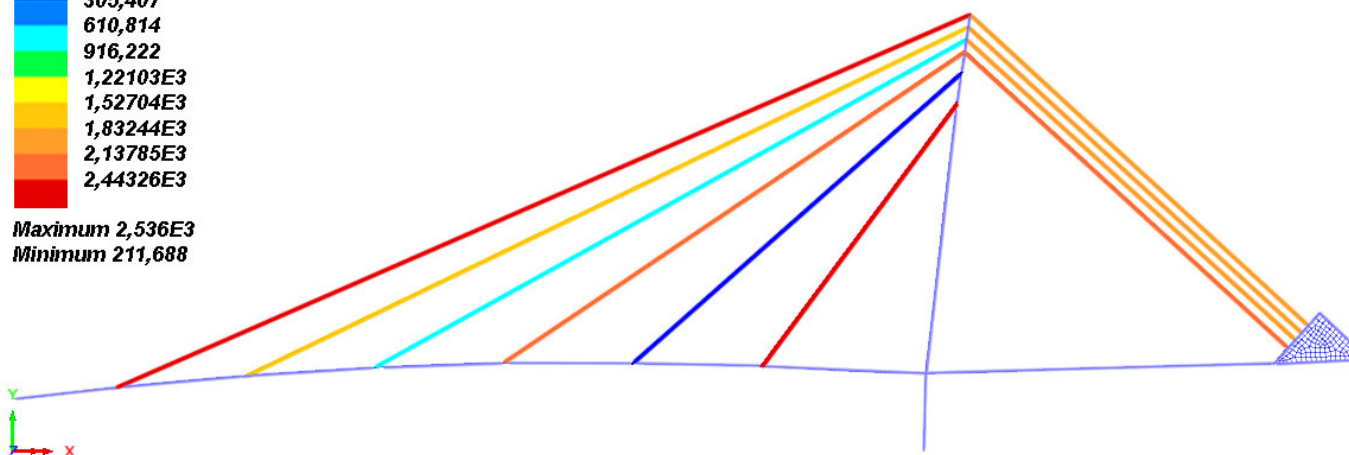


Okrajové podmienky a ostatné stále zaťaženie → 15,2 kN/m (okrem vlastnej tiaže nosnej konštrukcie)

Combination 1
Entity : Force/Moment - Bar
Component : Fx (Units: kN)



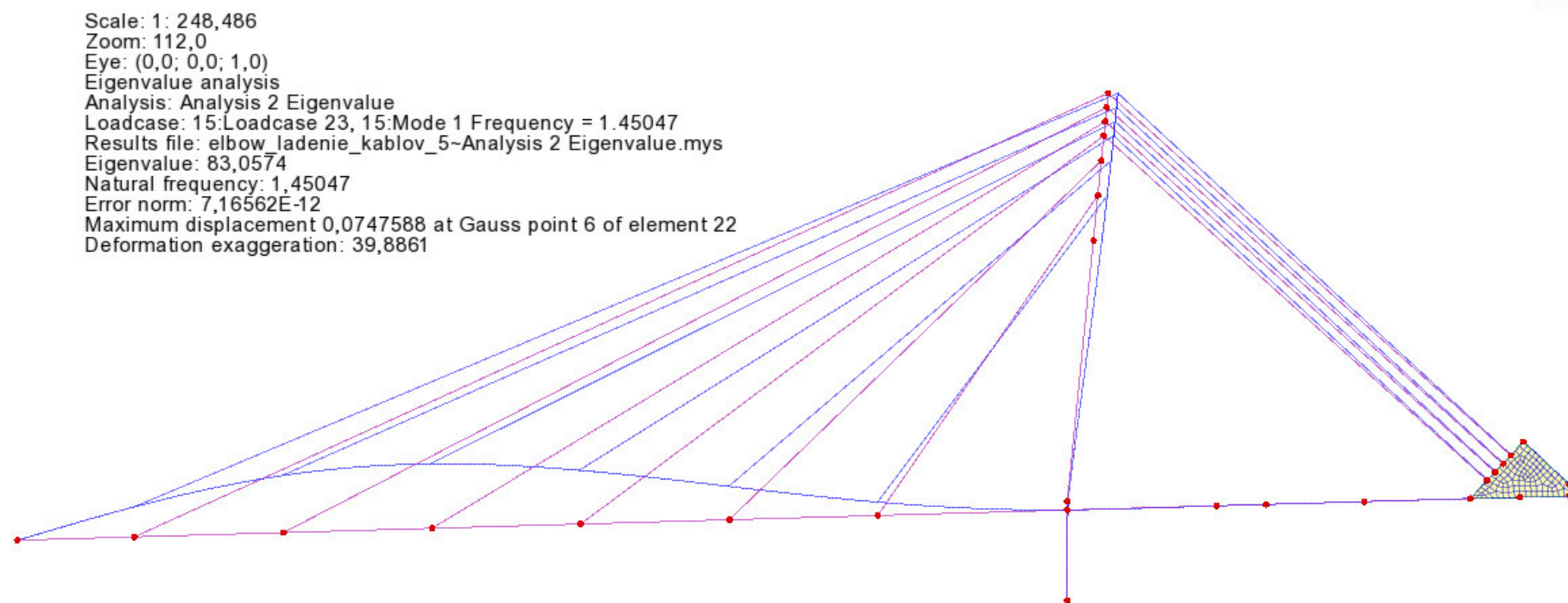
Maximum 2,536E3
Minimum 211,688



Výsledné sily
ladenia káblov
– program LUSAS

Kombinácia pre stále zaťaženie a výsledné ladenie káblov :

Name	cable	A [m ²]	Result Forces [kN]	σ [kN/m ²]	% f_{pk}
Line: 16	19*15,7mm	0,00285	2488	872982	46,93
Line: 17	19*15,7mm	0,00285	1613	565965	30,43
Line: 18	19*15,7mm	0,00285	886	310877	16,71
Line: 19	19*15,7mm	0,00285	2244	787368	42,33
Line: 20	17*15,7mm	0,00225	211	93778	5,04
Line: 21	17*15,7mm	0,00225	2537	1127556	60,62
Line: 22	2*19*15,7mm	0,0057	1975	346491	18,63
Line: 23	2*19*15,7mm	0,0057	2043	358421	19,27
Line: 24	2*19*15,7mm	0,0057	2087	366140	19,68
Line: 25	2*19*15,7mm	0,0057	2139	375263	20,18



Prvá relevantná vlastná frekvencia → 1,45 Hz



ZÁVER

Zavesené mosty sa zvyčajne považujú za mosty štýlove a miestotvorné a nie všeobecne považované za serióznu možnosť pre výstavbu väčšiny bežných mostov s krátkym až stredným rozpätím. Tento názor pramení hlavne z presvedčenia, že takéto mosty sú drahé a pre danú funkciu príliš prepracované. Vo veľa prípadoch však môžu zavesené mosty poskytnúť výhody aj pri relatívne miernom náraste nákladov. Niektoré z výhod sú napríklad :

- dlhé rozpätia s minimálnou hrúbkou nosnej konštrukcie
- odstránenie medziláhlych podpier
- zvýšená bezpečnosť premávky pod mostom bez stípov, či už v cestnej, železničnej alebo lodnej doprave
- minimalizácia vplyvov na životné prostredie
- vylúčenie alebo skrátenie obmedzení dopravy pod stavbou mosta
- atraktívny vzhľad

Tiež je však nutné rátať

- s väčšou náročnosťou projektových a výpočtárskych výkonov
- s vyššími nárokmi na koordináciu a spoluprácu zúčastnených strán
- s vyššou odbornosťou zhotoviteľských firiem

V každom prípade most v Calgary je pozoruhodný počin, kde sa podarilo dielo bez okázalostí, so zachovaním vysokej estetickej úrovne a funkčnosti, za rozumné náklady a v rekordne krátkom čase výstavby.

Niektoré ZDROJE, použité pri tvorbe článku :

- [1] Azita Azarnejad, Ken McWhinnie, Gamil Tadros, Jiří Stráský : Cable-Stayed Bridge as an Alternative for Medium and Short Span Bridges, Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Edmonton, Alberta, 2011
- [2] Azita Azarnejad, Ken McWhinnie, Gamil Tadros, Jiří Stráský : Elbow River Cable-Stayed Bridge, Calgary, Canada, Structures Congress 2010
- [3] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
- [4] STN EN 1991-2 Zaťaženie mostov dopravou
- [5] STN EN 1992-1-1 Navrhovanie betónových konštrukcií
- [6] New Landmark for World-Famous Western Event : Elbow River Bridge, Canada, Info Bulletin Dywidag SI, Unit DSI Canada Ltd., Western Division, Surrey, Canada

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

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné POČÍTAČOVÉ PROGRAMY :

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

