

Bagley street bridge DETROIT

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*



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

Úvod (Introduction)

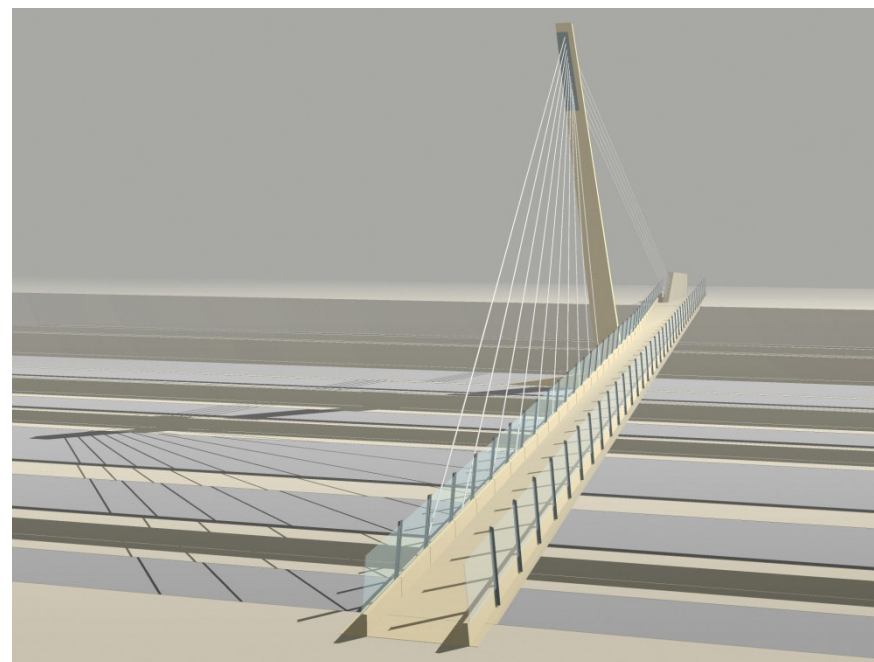
Mexicantown ako významná komunita a zároveň aj štvrť v juhozápadnom Detroitu má jedinečnú polohu a históriu, pretože do tejto oblasti priťahuje mexické rodiny prisťahovalcov od začiatku 20. rokov 20. storočia. Komunita susedí s kultovým mostom *Ambassador Bridge*, ktorý tvorí vstupnú bránu z Kanady do USA ako najväčší hraničný priechod v Severnej Amerike. Visutý most *Ambassador Bridge* s celkovou dĺžkou 2300 m a rozponom 560 m bol postavený v roku 1927–1929 ponad rieku *Detroit river*, ktorá tvorí zároveň hranicu medzi Kanadou a USA. Ulica *Bagley Street* v detroitskej časti *Mexicantown* je definovaná reštauračnou štvrťou, maloobchodom, centrom mládeže a rôznymi kultúrnymi podnikmi. Súdržnosť komunity bola prerušená koncom 60. rokov výstavbou medzištátnych diaľnic I-96 a I-75, ktoré rozdelili komunitu na 40 rokov, aby sa uvoľnili zápchy z mosta *Ambassador Bridge*.

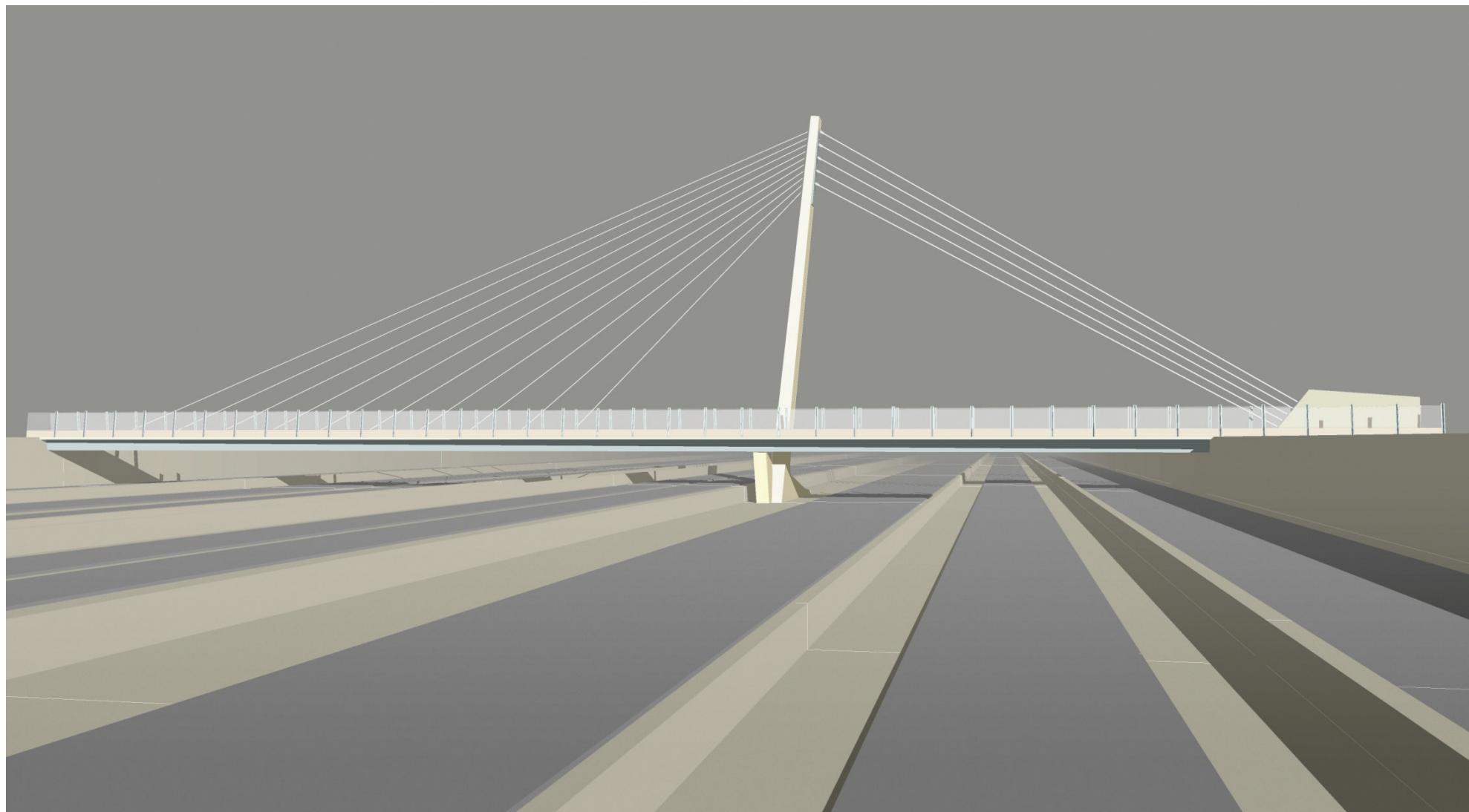
V roku 1998 bola súťaž, ktorú sponzoroval *Ambassador Gateway Steering Committee*, poverená návrhom nového mosta pre peších s cieľom vytvoriť opätovné prepojenie pozdĺž ulice *Bagley Street*. Súťaž bola súčasťou *Štúdie vplyvu na životné prostredie* predloženej *Federálnej správe diaľnic* s cieľom zmierniť škody spôsobené komunite pôvodnou výstavbou diaľnic a zároveň byť súčasťou oveľa väčšieho obnovenia infraštruktúry Detroitu, postihnutého recesiou.

Most pre chodcov *Bagley street bridge* je pre motoristov dominantnou vstupnou panorámou do Detroitu, keď zídu z mosta *Ambassador Bridge* a pokračujú na diaľnice v USA. Je to prvý zavesený most v Michigane. Funkcia a estetický efekt tejto lávky pre peších má pozitívny vplyv na miestne okolie. Opätovné spojenie poskytuje obyvateľom a návštevníkom bezpečný prechod ponad desaťprúdovú cestu, ktorá oddeľuje dve mestské časti.

Účastníci výstavby

Vlastník :	Michigan department of transportation
Architekt :	Vantine/Guthrie studio of Architecture , Northville, Michigan, – spolupráca Nathaniel M. Stanton
Návrh :	HNTB Corporation , Chicago (AISC Member)
Inšpekcia nosnej konštrukcie :	URS Corporation , Grand Rapids, Michigan and Tampa, Florida
Špeciálna konštrukčná inšpekcia :	Michael Baker Corporation , Pittsburgh
Detaily ocelevej konštrukcie :	Tensor engineering , Indian Harbour Beach, Florida
Výroba ocelevej konštrukcie :	Industrial Steel Construction , Gary, Indiana
Pevnostná analýza, výpočty :	Genesis structures , Kansas City, Missouri
Návrh postupu výstavby :	Genesis structures , Kansas City, Missouri
Generálny dodávateľ :	Walter Toebe Construction , Wixom, Michigan
Lanový systém :	Stay Cable System Supplier CBSI , Houston
Koniec výstavby :	2010





Popis konštrukcie lávky

Počet polí : 2
Rozpony : 84,1 + 43,1 m
Šírka mostovky : ~ 4,65 m ÷ 10,4 m

Výška nad terénom : ~ 5,4 m
Výška pylóna : 47,3 m
Typ konštrukcie : Zavesený most, spriahnutá mostovka oceľ-betón

Nosnú konštrukciu mosta tvorí jednokomorový oceľový prierez, spriahnutý s betónovou doskou premenlivej šírky. Táto konštrukcia je zavesená na železobetónovom pylóne pomocou oceľových pozinkovaných lán. Avšak zavesené je len západné rozpätie dĺžky 84,1 m, východné rozpätie dĺžky 43,1 m je od podpory k podpore samonosné.

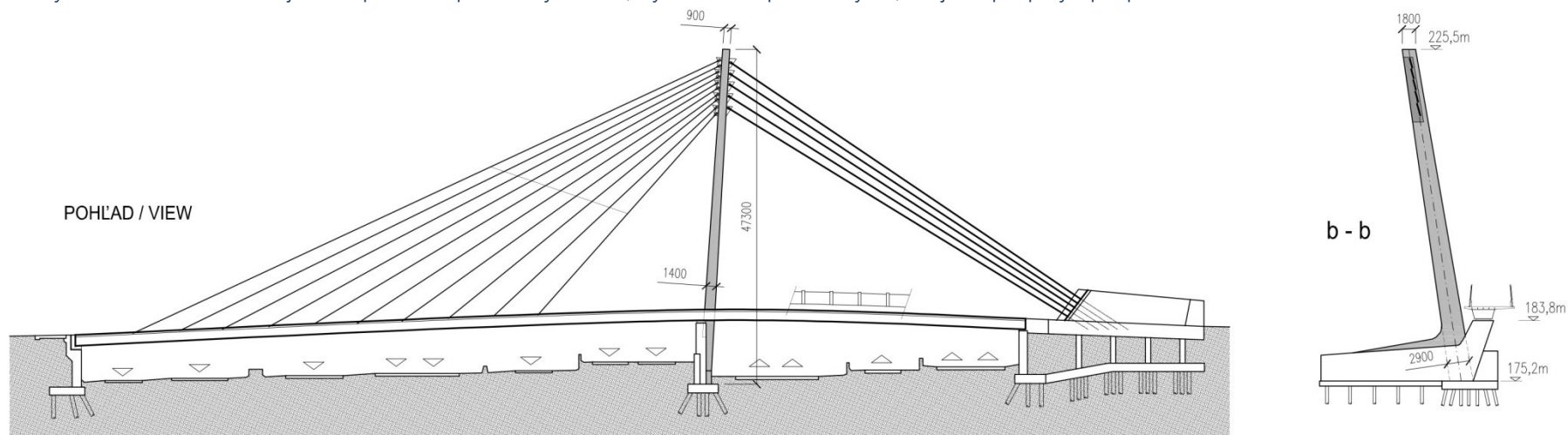
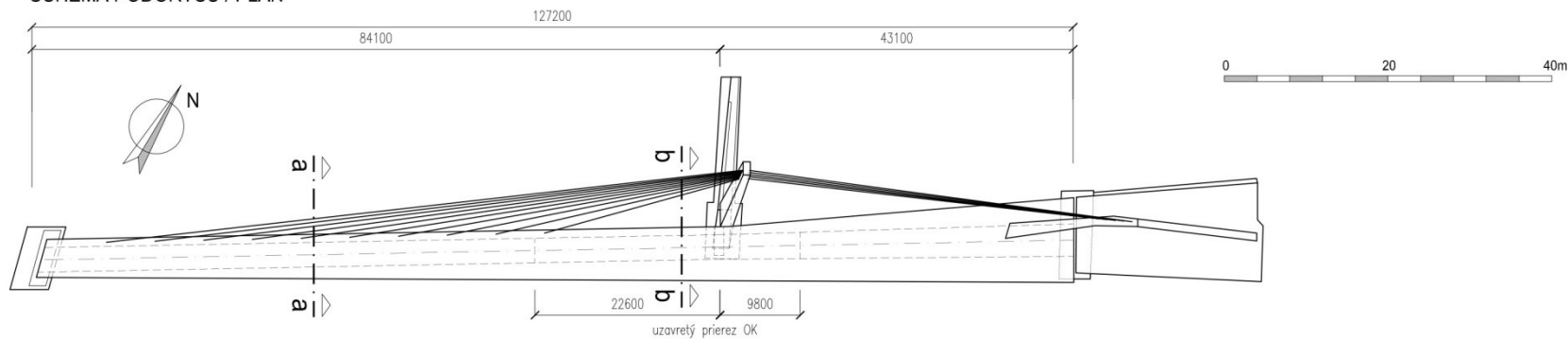


SCHÉMA PŮDORYSU / PLAN



Most má jedinečný asymetrický dizajn v každej svojej časti. Závesné laná západného rozponu sú vejárovito usporiadané. Na mostovku sú pripevnené z bočnej strany, čo vyvoláva značné krútiace momenty na spriahnutý komorový prierez. Desať závesných lán západného rozponu nie je v jednej rovine s piatimi lanami východného rozponu, čo prispieva k zvýšeniu momentového namáhania pylóna. Pylón je naklonený kolmo aj rovnobežne k osi mostovky. Päť lán východného rozponu je kotvených naspodu do pevnej opory na konci mosta.

Každá časť projektu, vrátane opier, vstupných plôch, zvodidiel a oplotenia využíva architektonické úpravy s trojrozmernými variáciami, a je vysoko esteticky štylizovaná. Pokiaľ sa architektom podaril výnimočný projekt, začlenený citlivo do zložitého mestského prostredia, ovenčený viacerými cenami, statici a konštruktéri asi až tak nadšení neboli. Sústava svojou asymetriou totiž vyvodzuje pomerne zložitý stav napätosti, ktorý je náročný na výpočty, konštrukčné detaily, ložiská a na stratégiu postupu výstavby. Projekt zahŕňa aj päť ladených tlmivcov hmoty na riadenie vibrácií mostnej konštrukcie, z ktorých štyri sú zvislé a jeden vodorovný.

Postup výstavby

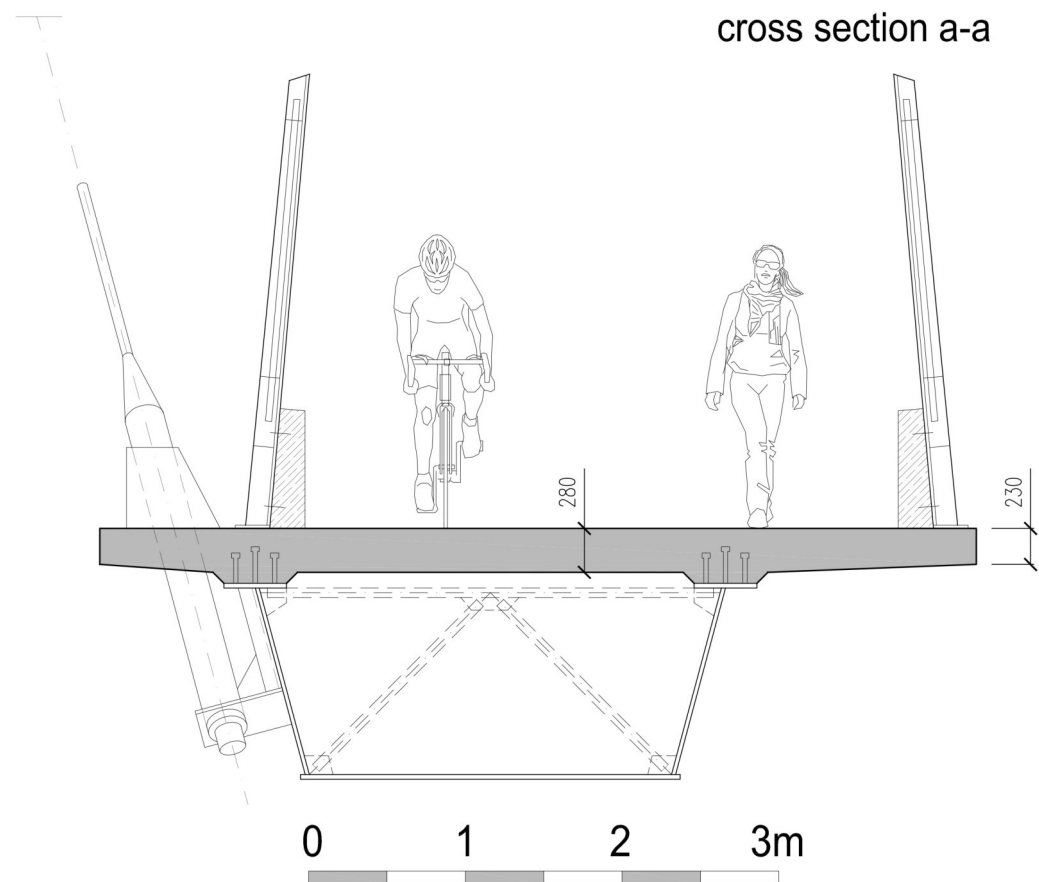
Na analýzu postupu výstavby spoločnosť *Genesis Structures* použila software *LUSAS* na modelovanie komplexnej geometrie mosta, jeho prvkov a súvisiacich materiálových vlastností. Podrobný model nosníkov a škrupinových prvkov predstavoval všetky dočasné a trvalé konštrukčné komponenty a umožnil presnú analýzu 62 definovaných fáz stavebného procesu. Tento most si vyžadoval podrobný návod na montáž a geometrický kontrolný plán vypracovaný odborným montážnym inžinierom. V montážnom manuáli bolo zdokumentovaných všetkých 62 jednotlivých fáz na dokončenie mosta a tento plán tesne nadväzoval na navrhovaný montážny plán spracovaný projektantom. Všetky tieto skutočnosti boli zahrnuté aj v zmluvných dokumentoch. Ďalej je popísaných 6 etáp výstavby, ktoré tvoria prehľadnejšie zhrnutie fáz výstavby.

1. etapa

Výstavba západnej a východnej opory, výstavba pylóna, inštalácia dočasných podporných lán pylóna.

Všetky základové konštrukcie sú na pilótach. Západná opora je pomerne jednoduchá, lebo prenáša len nepatrné zvislé zaťaženie. Východná opora je zložitejšia, lebo zahŕňa podoprenie mostovky a kotvenie piatich lán východnej vetvy, ktoré musia preniesť značné vodorovné zaťaženie. Skladá sa okrem pilót zo spodnej železobetónovej dosky a z vrchnej železobetónovej dosky, ktoré sú spojené zvislými stenami, medzi ktorými je zemný balast. Nahor vyčnieva zvislá kotevná stena, do ktorej sú zabudované dodatočne predpäté kotevné tyče na upevnenie kotevných blokov piatich lán východnej vetvy.

Pylón bol po vybetónovaní zabezpečený štyrmi dočasnými montážnymi lanami na každú stranu zhruba v tretine výšky a ďalšími štyrmi lanami v dvoch tretinách výšky.



2. etapa

Vybudovanie dočasných podpôr pre západný rozpon mostovky vo forme troch ocelových priehradových veží. Montáž ocelového komorového nosníka po celej dĺžke mosta na trvalé aj dočasné montážne podpery s plánovaným nadvýšením.

3. etapa

Betonáž mostovkovej dosky a betonáž zvodidiel (spodná časť zábradlia).

4. etapa

Rozmiestnenie balastného zaťaženia, nahradzujúceho architektonické kovové zábradlie (ešte nebolo vyrobené).

Inštalácia závesných káblov v rovnovážnom režime. Horná časť káblov sa upínala pomocou vidlicových čapových spojov a spodný spoj káblov bol napínaný ako rektifikovateľný blok. Niektoré káble sa napínali jednorázovo a iné na dvakrát.

Odstránenie dočasných montážnych lán pylóna.

5. etapa

Odstránenie troch montážnych podpier mostovky.

6. etapa

Finálne doladenie predpätia závesných káblov. Odstránenie balastného zaťaženia a montáž architektonického zábradlia. Montáž páskového spojenia medzi závesnými káblami západného rozpätia v strede ich dĺžok. Závěrečné overenie kábových sil a geometrie vodorovného spriahnutého nosníka a pylónu. Doladenie hmotnostných ladených tlmičov.



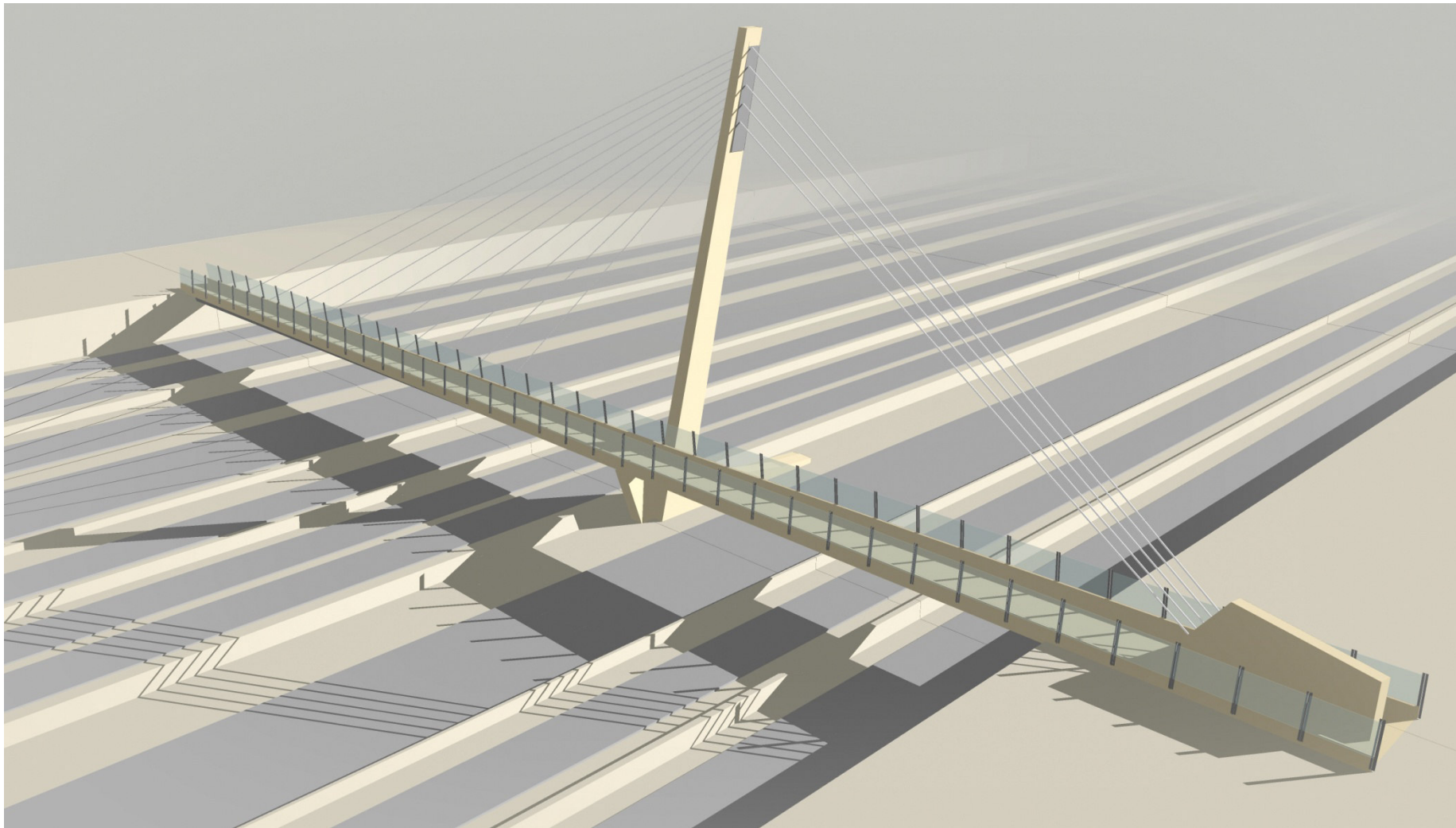
Konštrukčné podrobnosti

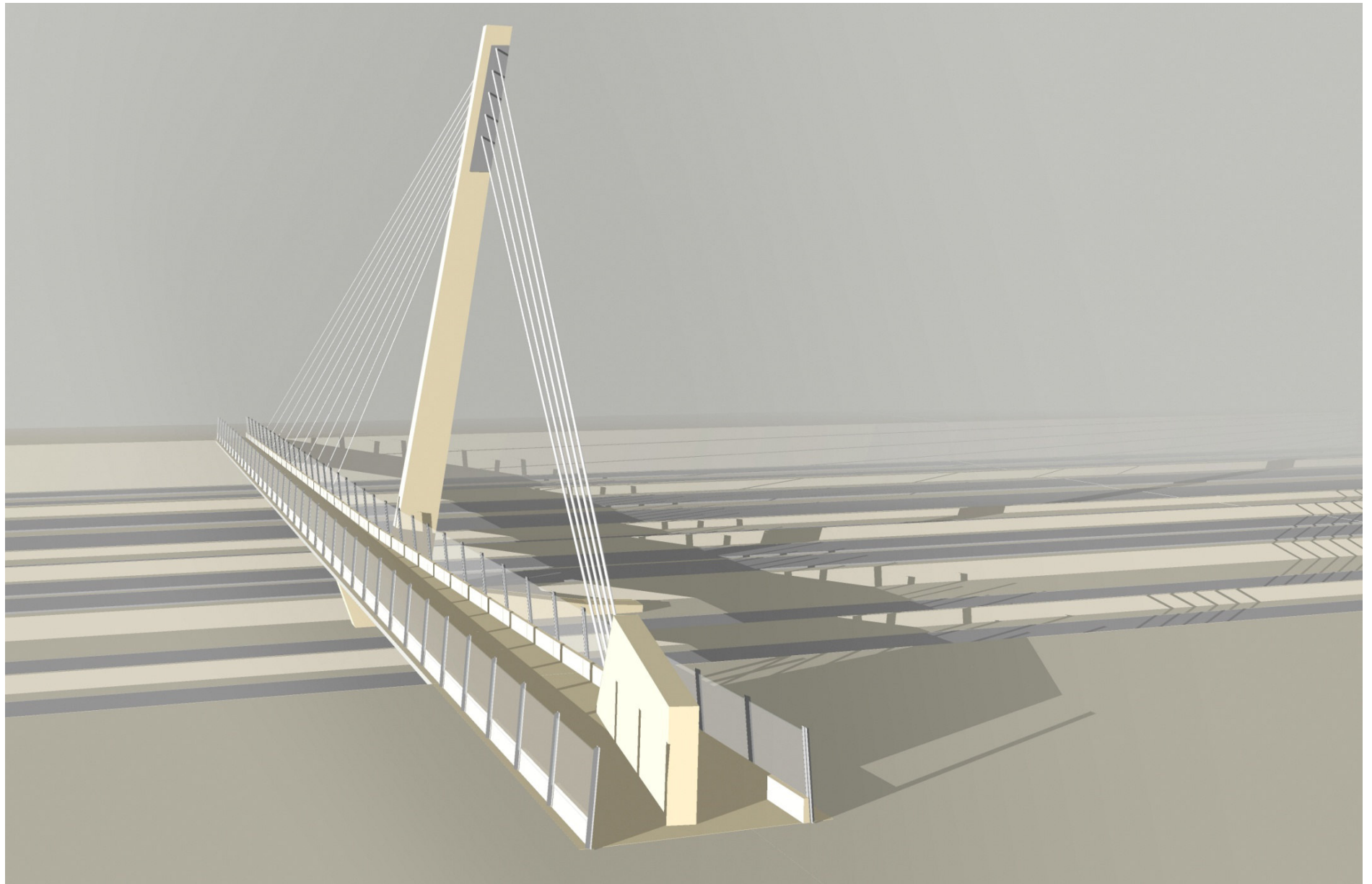
Uloženie mosta je dvojaké : votknutie a posuvné uloženie. Votknutie je na východnej opore, pričom v montážnom stave počas betonáže mostovky nebolo bránené krúteniu ocelevej trapézovej komory a až v konečnom stave sa uloženie zmonolitnilo. Posuvné uloženie je pri pylóne a na západnej opore. Pozostáva z trojakých ložísk : posuvné hrncové ložisko, preberajúce zvislý tlak, ložisko situované zvislo, odolné voči posunu v smere kolmom na os mosta a ťahové kĺbové ložisko (kvôli krúteniu).

Schéma montáže ocelového skriňového nosníka si vyžadovala tri podperné veže na podporu západného rozpätia predtým, ako boli nainštalované závesné káble. Zmluvné dokumenty obsahovali hodnoty prevýšenia, ktoré zohľadňovali tieto tri dočasné podpery.

Skriňový nosník (trapézová komora) má konštantnú šírku od západnej opory až po presah pylónu, v tomto bode sa začína rozširovať na najväčšiu šírku pri východnej opore. Horná príruha skriňového nosníka sa tiež líši od plného prierezu v oblastiach s vysokým krútiacim momentom až po rozdelenie na dve krátke príruby na vrchu každej stojiny. Okrem toho ladené tlmiče hmoty inštalované medzi západnou oporou a pylónom vyžadovali, aby sa otvory v hornej príruhe po inštalácii zakryli ocelovými poklopmi.

Nosné laná pozostávajú z pozinkovaného ocelového lana s konštrukčným drôtom (ASTM 586) so žiarovo pozinkovaným povlakom triedy A pre vnútorné drôty a povlakom triedy C pre vonkajšie drôty. Jeden koniec lana na pylóne používa svorníkový vidlicový kotviaci systém. Spojenie medzi zásuvkou a prameňom kábla sa dosiahlo rozpletením drôteného lana a naliatím roztaveného zinku do kónického priestoru. Zásuvky sú navrhnuté a pripevnené tak, aby vydržali 110% medze pevnosti kábla. Dĺžky káblov boli určené presným zameraním po dokončení pylónu a postavení nosníka. Tolerancia bola zabezpečená v dĺžke závitového hrdla, aby sa zohľadnila konštrukčná zmena dĺžky a teplotná kompenzácia. Na napínanie káblov boli použité kalibrované zdvíhaky. Napínanie lán bolo ešte kontrolované sekundárnym tenzometrom, umiestneným na lanách. Všetky káble sa napínali zdola.





Zmluvná dokumentácia obsahovala konštrukčné obmedzenia na pylón, určujúce horizontálne posunutie v jeho hornej časti na 5 cm a tiež obmedzila maximálnu veľkosť ohybového momentu okolo jeho slabšej osi. Cieľom obmedzenia týchto hodnôt bolo minimalizovať dotvarovanie a zmršťovanie a dosiahnuť lepšiu kontrolu geometrie. Vykonaním podrobnej analýzy pylónu v programe LUSAS vo všetkých fázach výstavby výpočtári preukázali, že vplyv na dotvarovanie zo skutočného vychýlenia pylónu bol prijateľný a že celková momentová kapacita okolo slabšej osi pylónu bola dostatočná na to, aby odolala skutočným ohybovým momentom pozorovaným počas výstavby. Pomocou získaných výsledkov z analýzy vykonanej pomocou programu LUSAS bolo vytvorených množstvo grafov a diagramov, ktoré ukazujú časové efekty pre kľúčové komponenty konštrukcie.

Patrí sem:

- Časová história posunu pre vrchol pylónu
- Diagramy ohybového momentu pre slabšiu os pylónu počas výstavby
- Časová história napätia káblov pre dočasné a trvalé káble
- História reakcií pre všetky podpory a ložiská
- Grafy zvislého posunutia a napätia pre hornú a spodnú časť spriahnutého nosníka pre všetky fázy výstavby a pre začiatok a koniec prevádzkových podmienok. Získali sa aj začiatkové a koncové prevádzkové napätia pre závesné káble a začiatok prevádzkových napätí v betónovej doske mostovky.

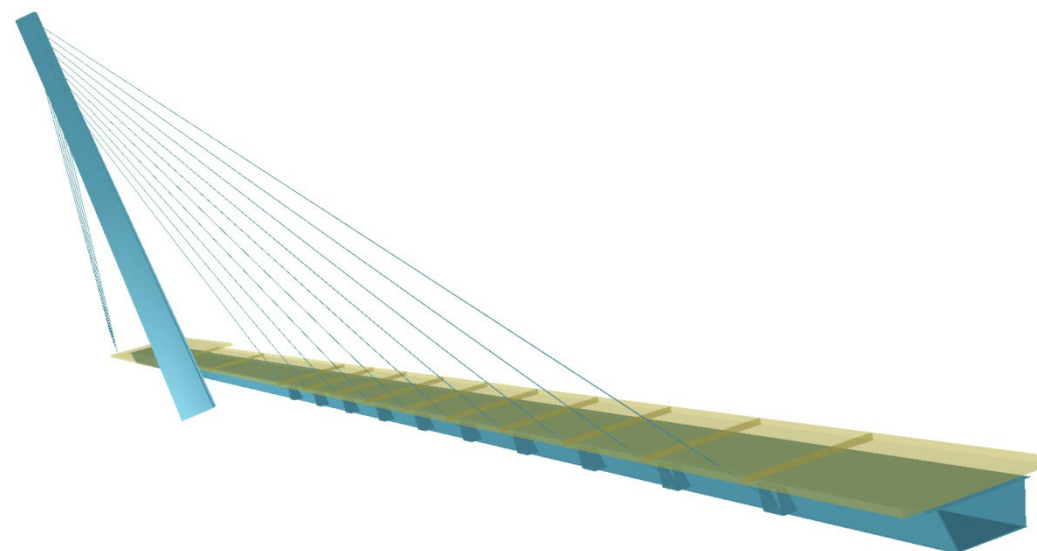
Výpočty

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie sme previedli veľmi zjednodušený výpočet lávky (*simplified calculation*). Vyplýva to hlavne z toho, že sme nemali k dispozícii podrobné konštrukčné výkresy. Zamerali sme sa hlavne na zaťaženie od vlastnej tiaže a náhodilé zaťaženie od chodcov. Jednotlivé dimenzie prvkov veľmi závisia od toho, aké pomery tuhostí sa zvolia medzi mostovkou a závesnými káblami. Rozhoduje aj postup výstavby a mnoho ďalších okolností. Situácia je skomplikovaná aj tým, že jedna časť mostovky je zavesená, resp. podporovaná závesnými káblami a druhá časť je samonosná na celom rozpätí. Odborníci si určite tiež všimli, že používam slovo „mostovka“, čo tiež nie je legislatívne a odborne správne, ale takto som si to zjednodušil a myslím tým spriahnutú vodorovnú nosnú časť konštrukcie. Pokiaľ by sme to chceli nejakým prekladať z americkej angličtiny, tak sa tiež ponúka slovo „paluba“, čo je pomerne vulgárne, ale napokon aj výstižné.

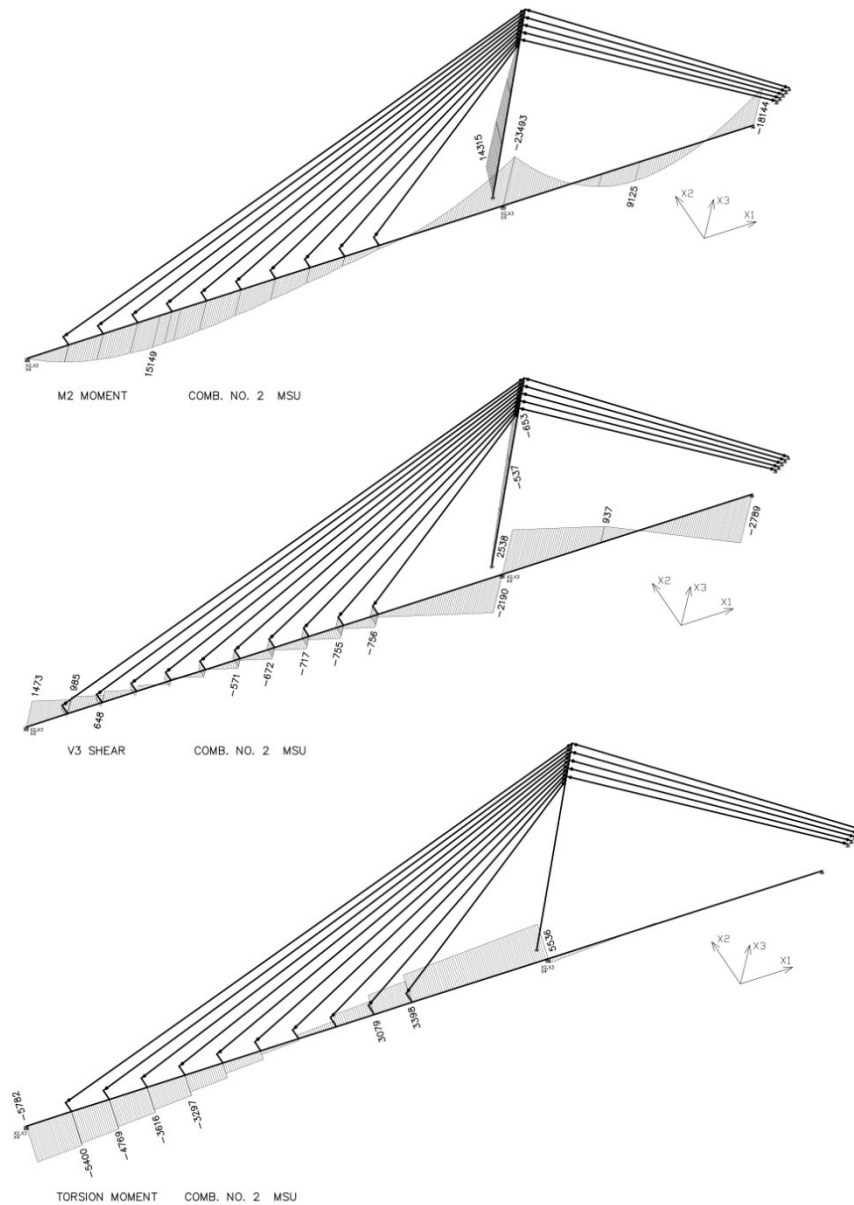
Táto mostovka teda prechádza v takmer nezmenenom tvare zavesenou časťou, samonosnou časťou, časťou, kde ju poriadne krúti a časťou bez krútenia, niekde je v tlaku a niekde nie. Pozdĺž mostovky sú maximálne pozitívne zvislé momenty, aj maximálne negatívne momenty. Tiež je značne namáhaná priestorovo, teda aj vo vodorovnom smere.

V ďalšom sú uvedené niektoré schémy, ako nám vychádzali vnútorné sily. Ak zvolíme čisté účinné plochy prierezov káblov v západnom rozpätí cca 12 cm² (celkom 10 káblov) a vo východnom rozpätí zhruba dvojnásobnú plochu cca 24 cm² (5 káblov), tak pri miere namáhania $0,45 \times f_{pk}$ vychádzajú osovité sily západného rozpätia od cca 470 kN po 920 kN a vo východnom rozpätí od cca 1200 do 1300 kN na jeden kábel. Predĺženie pri predpínaní vychádza v západnom rozpätí (veľké rozdiely v dĺžkach) cca od 135 mm po 315 mm, a vo východnom rozpätí okolo 225 mm (malé rozdiely v dĺžkach káblov) pre $f_{pk} = 1770$ MPa.

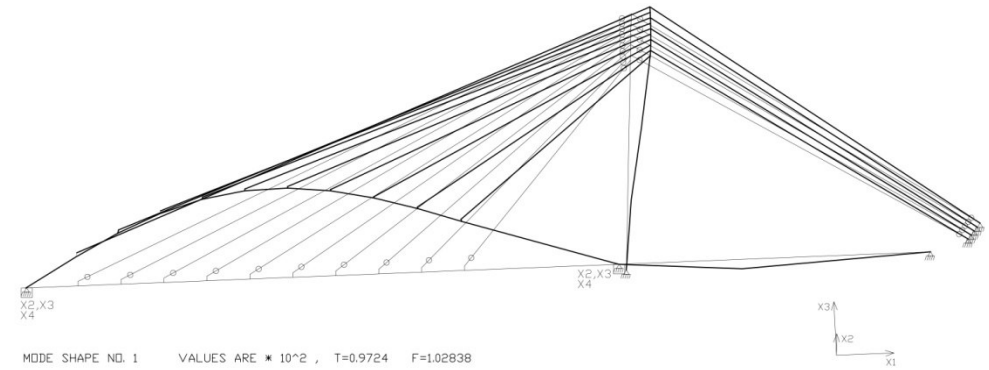
Výpočtový model v programe STRAP



← Vnútorne sily M, V, T [kN, kNm]



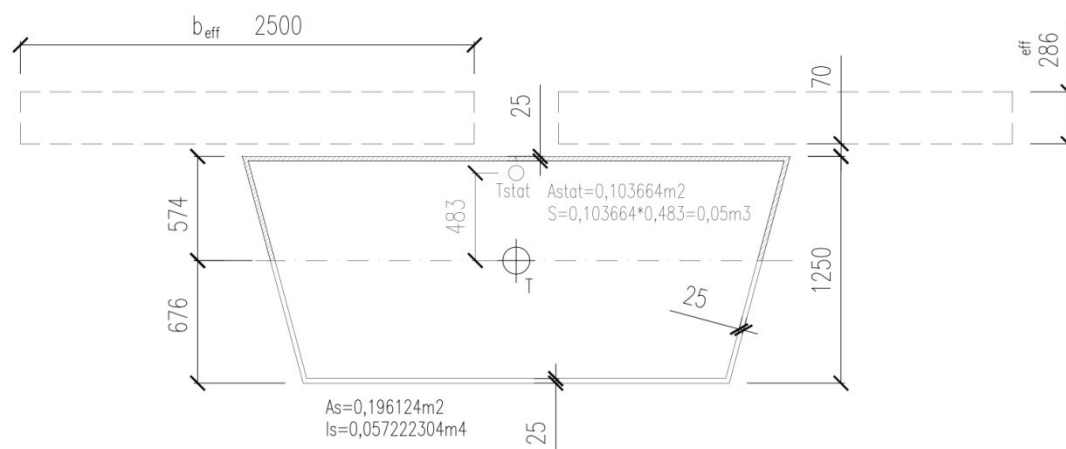
Vlastné frekvencie sústavy sa pohybujú v prvých šiestich tvaroch medzi 1,0 ÷ 3,5 Hz. Keďže bolo namontovaných celkom 5 hmotnostných ladených tmičov v západnom rozpätí (4 zvislé a 1 vodorovný), musela to byť vskutku nemalá a vysoko odborná práca pre projektantov aj výrobnú montážnu firmu.



Prvá vlastná frekvencia $f_1 \approx 1,028$ Hz

Spriahnutú mostovku sme idealizovali podľa zobrazenej schémy na ďalšej strane, pričom sme uvažovali, že zvislé šmykové sily a krútiace momenty prenesie ocelová komorová časť mostovky, kde v najviac namáhaných miestach je komora vyrobená ako uzavretý profil. Inde hornú prírubu preberá betónová spriahnutá doska.

Idealizácia mostovky



Posúdenie v zmysle [5]

Výpočet napätia v stojine od pričnej sily v osi ťažiska : $\tau_{Ed} = V * S / (I * t) = 2538 * 0,05 \text{m}^3 / (0,057222 * 0,05 \text{m}) = 44353 \text{ kN/m}^2$

Posúdenie hladiny napätia od pričnej sily bez vplyvu krútenia : $\tau_{Ed} / (f_y / (3^{0,5} * \gamma_{M0})) < 1,0$ $44353 / (355000 / (1,732 * 1,0)) = 0,216399 < 1,0$

Šmyková odolnosť profilu bez vplyvu krútenia : $V_{pl,Rd} = A_v * (f_y / (3^{0,5})) / \gamma_{M0} = 1,25 \text{m} * 0,05 \text{m} * 355000 / 1,732 / 1,0 = 12809 \text{ kN} > 2538 \text{ kN} = V_{Ed}$

$2 * V_{Ed} < V_{pl,Rd}$ → nie je nutné brať ohľad na súčasné pôsobenie pričnej sily a ohybového momentu

Súčasné pôsobenie pričnej sily a krútenia

Napätie od voľného krútenia (uzavretý profil) :

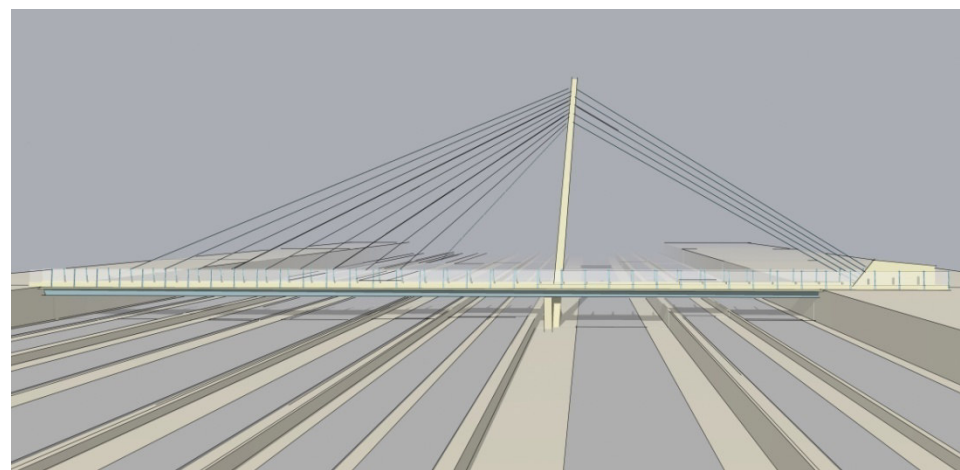
$\tau_T = T_{Ed} / (2 * A^{str} * t) = 5782 \text{ kNm} / (2 * 3,252692 \text{m}^2 * 0,025 \text{m}) = 35662 \text{ kN/m}^2$

kde A^{str} je plocha uzavretá strednicou komorového profilu

Šmyková odolnosť profilu s vplyvom krútenia :

$V_{pl,T,Rd} = (1 - \tau_T / ((f_y / (3^{0,5})) / \gamma_{M0})) * V_{pl,Rd} =$

$= (1 - 35662 / 204959) * 12809 = 10580 \text{ kN} > 2538 \text{ kN} = V_{Ed}$ → vyhovuje



Plastic bending resistance of composite beam

Plastická odolnosť spriahnutého prierezu

Oceľový nosník symetrický k zvislej osi, namáhanie ohybom

VSTUPNÉ ÚDAJE

Výška betónovej dosky "d" [m]	0,286
Efektívna šírka bet. dosky "B" [m]	5
Výška kónusu "di" [m] nezapočítaná	0,07
Plocha oceľového nosníka "Aa" [m ²]	0,196124
Výška oceľového nosníka "ha" [m]	1,25
Ťažisko oceľ. nosníka "ta" [m] zhora	0,574
Šírka hornej pásnice nosníka "Ba" [m]	2,95
Výška hornej pásnice nosníka "dc" [m]	0,025
Hrúbka stojiny nosníka "t1" [m]	0,052
Plocha výstuže "As" [m ²]	0,007389
Vzdialen. ťažiska výstuže "ds" [m] zhora	0,143
Medza klzu nosníka "fy" [kN/m ²]	355000
Medza klzu výstuže "fsk" [kN/m ²]	500000
Pevnosť betónu v tlaku "fck" [kN/m ²]	35000
Súčiniteľ materiálu nosníka "γmo"	1,00
Súčiniteľ materiálu výstuže "γs"	1,15
Súčiniteľ materiálu betónu "γc"	1,50

Medzivýsledky

Návrh. hodn. mat. nosníka "fyd" [kN/m ²]	355000
Návrh. hodn. mat. výstuže "fsd" [kN/m ²]	434783
Návrh. hodn. mat. betónu "fcd" [kN/m ²]	23333
Ta od horného povrchu "da" [m]	0,930
Neutrálna os "x" [m] kladný moment M+	0,376
Neutrálna os "x" [m] záporný moment M-	0,762

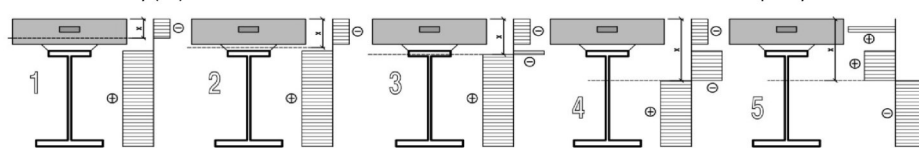
CHYBOVÉ SPRÁVY

OK
OK

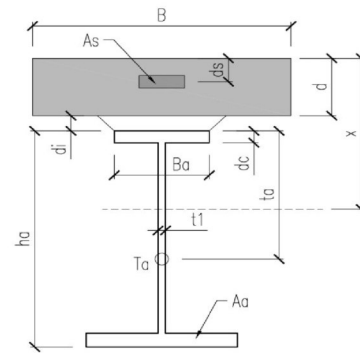
VÝSLEDKY

Mpl,Rd (+) [kNm]	45599
Mpl,Rd (-) [kNm]	36970

kladné momenty (4x)



www.budinskyssk.sk © SSK 2023
STN EN 1994-2



TEXT

Bagley street bridge
section 1

Pomocné hodnoty		ΔP	41262
X1,2	0,702	Aac	0,05812
Mpl1	0	Ba x dc	0,07375
Mpl2	0	X3	0,01970
Mpl3	45599	X4	-0,30065
Mpl4	0	X5	0,38052
Aat	0,0935	X4t	0,0496
		X5t	0,0554
		P_pasn	26181,25

PODMIENKY

- fy < 460 Mpa
- požaduje sa plné spriahnutie
- betonárska výstuž v tlaku nepôsobí

SPRÁVY

OK

Pružná únosnosť spriahnutého oceľobetónového prierezu

Oceľový nosník symetrický k zvislej osi. Namáhanie kladným momentom

2018

© SSK

VSTUPNÉ ÚDAJE

Hb výška betónu [mm]	286
Ho výška oceľ. nosníku [mm]	1250
Bb_eff šírka bet. časti [mm]	5000
Ao plocha oceľ. prierezu [cm ²]	1961
Io oceľový nosník [cm ⁴]	5,72E+06
ta ťažisko oceľ. prierezu odspodu [mm]	676
di medzera, kónus [mm]	70
Eo/Ecm Ecm-kratkod., Ecm/3-dlhod., Ecm/2-prijatelne	14,00
MEd [kNm]	15149
VED [kN] šmyková sila	2538

Bb_nahr [mm]	357
Ai [cm ²]	2982
xi [cm]	94,55
Ji [cm ⁴]	9,95E+06
Wdi [cm ³]	105248
Whi [cm ³]	150675

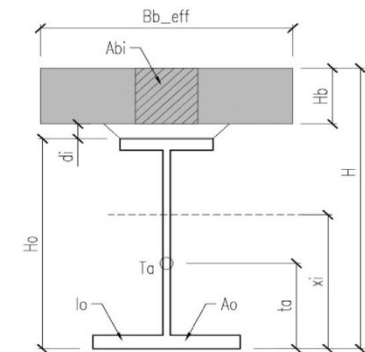
sigma_d oceľ [Mpa]	143,94
sigma_h betón [Mpa]	7,18

Návrhová šmyková sila na jednotku dĺžky pre trne v [kN/m]	1348
--	------

TEXT

Bagley street bridge
Section 1

Abi [cm ²]	1021
H [mm]	1606



Základné zjednodušené posúdenia spriahnutého prierezu. Oceľový profil je aproximovaný podľa komorovej idealizovanej schémy z predošlej strany.

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

- [1] Robert B. Anderson, P.E., Mike Guter, P.E., Victor Judnic, P.E. : ON A BEAUTIFUL TILT, Modern Steel Construction *Magazine*, July 2010
- [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 Zaťaženie mostov dopravou
- [5] STN EN 1993-1-1 Navrhovanie ocelových konštrukcií
- [6] STN EN 1994-1-1 Navrhovanie spriahnutých ocelobetónových konštrukcií. Všeobecné pravidlá
- [7] STN EN 1994-2 Navrhovanie spriahnutých ocelobetónových konštrukcií. Všeobecné pravidlá a pravidlá pre mosty
- [8] Footbridges – Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Load, Technical Guide, Sétra 2006
- [9] John Boschert, Structural Engineer, Genesis Structures : *Bagley Street Pedestrian Bridge*, www.lusas.com

Poznámka : Vo vizualizáciách nie sú zobrazené spády mostovky

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

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné **počítačové programy** :

STRAP, SketchUp, AutoCad LT, Microsoft Word, Microsoft Excel, PDF Creator, IrfanView, Corel Draw

