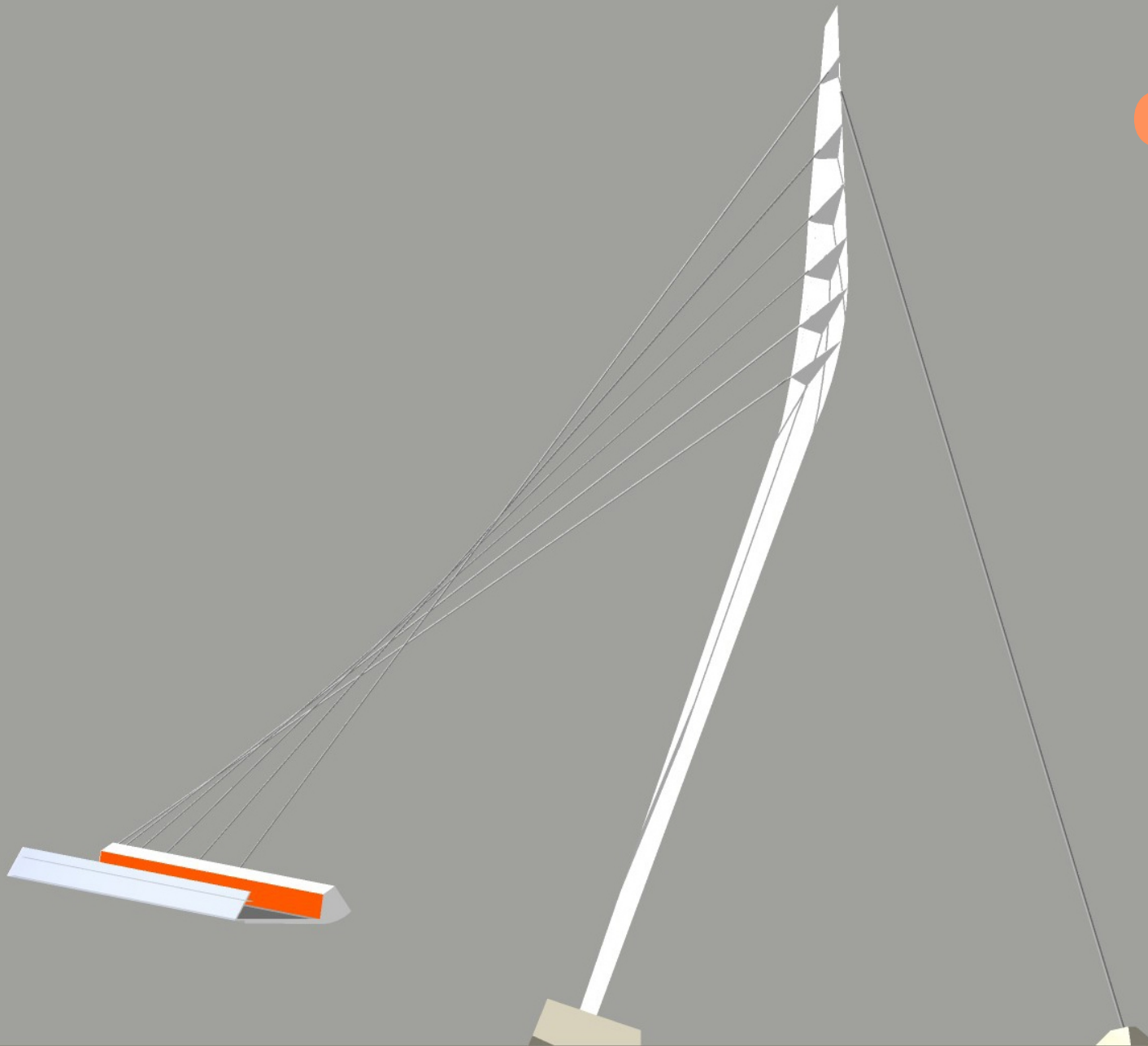


# ORTENAU BRIDGE

*in Lahr*

*static  
behavior*

*statické  
pôsobenie*



*theory, analysis*  
*Vladimír Budinský SSK*

**Keywords:** footbridge, bridge, computation, calculation, structural analysis, Ortenau, cable stayed bridge, Fußgängerbrücke, Schrägseilbrücke, Rad- und Fußwegbrücke, statische Berechnung, most, lávka pre peších, statický výpočet, SSK

## Úvod (Introduction)

Najkrajší most. Tak možno jednoducho charakterizovať oceľovú zavesenú lávku v nemeckom meste Lahr neďaleko Štrasburgu (Strasbourg). Lávka vznikla ako výsledok riešenia zložitej dopravnej situácie, kde bolo nutné spojiť dve záhradné oddychové centrá ponad dopravný uzol.

Projekt vznikol v rokoch 2013 – 2016, výstavba potom v rokoch 2016 – 2018.

Na projekte navzájom spolupracovali dve kľúčové projektové kancelárie :

Architekti :

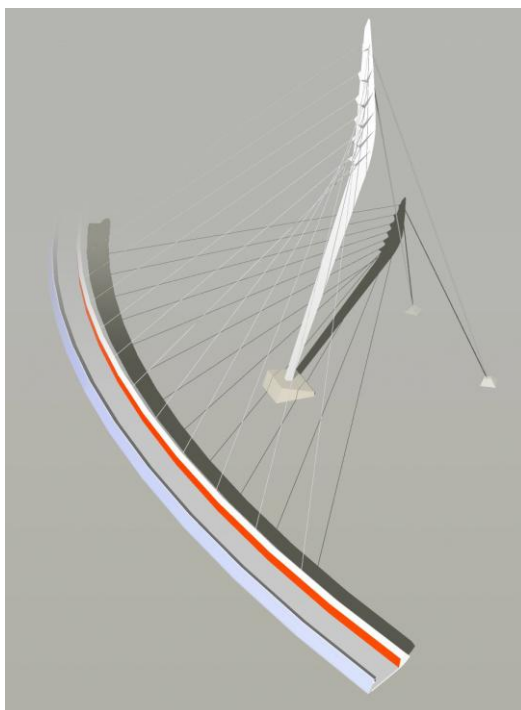
**Henchion Reuter Architects**, Berlin/Dublin

Konštrukčné inžinierstvo (statika) :

**EiSat Eisenloffel Sattler + Partner**, Gesellschaft Beratender Ingenieure für Bauwesen, Berlin

Investor :

**Landesgartenschau Lahr 2018 GmbH**, Stadt Lahr



Náklady stavby : 4,1 milión eur.

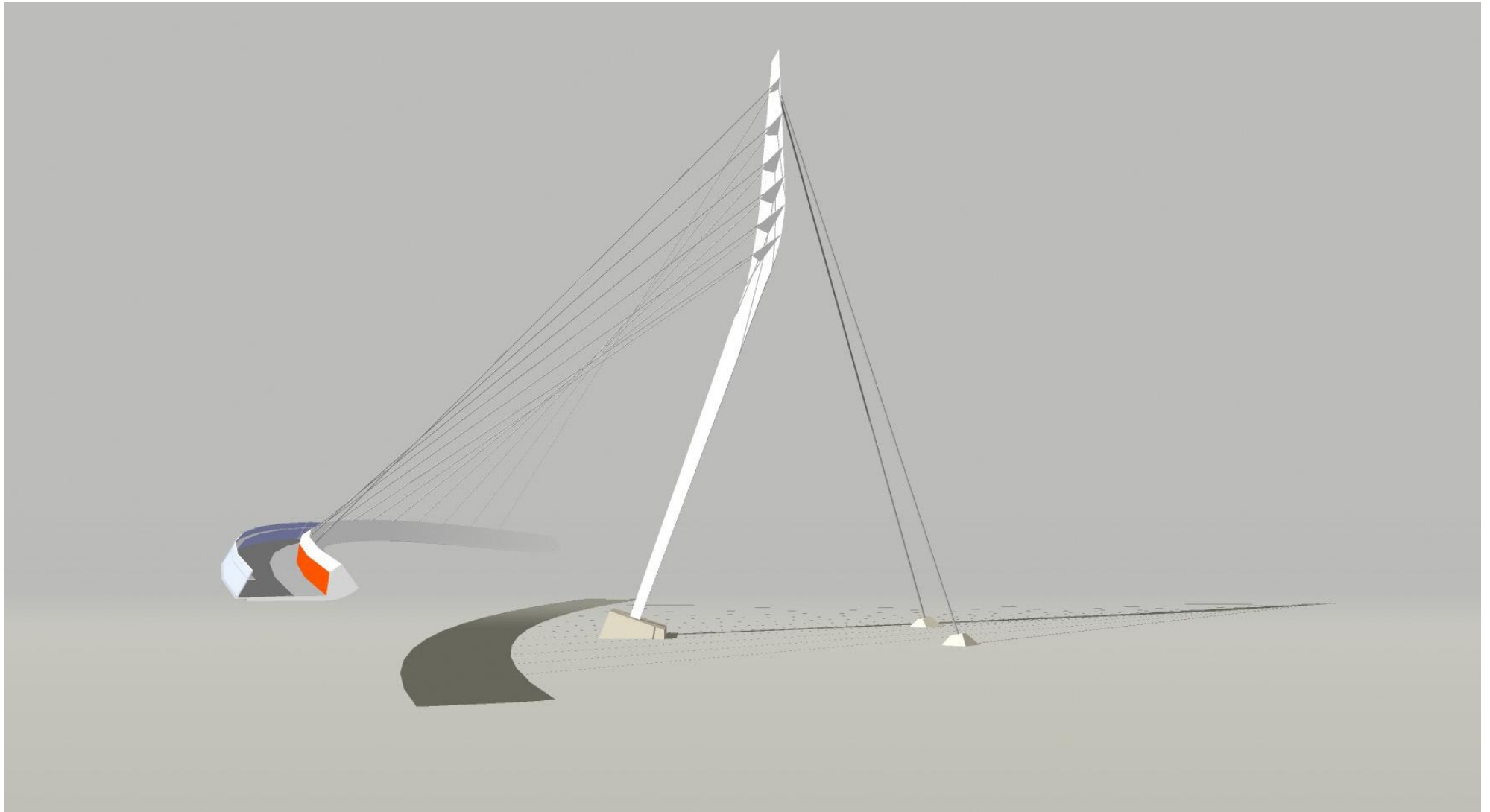
Most sa skladá z troch základných častí : z dvoch nástupných lávok na oboch koncoch v klasickom „betónovom“ prevedení a zo strednej ľahkej oceľovej časti rozponu cca 118 m, ktorá tvorí zavesenú konštrukciu na stredovom štíhlom oceľovom pylóne. Tento článok sa zaoberá len strednou zavesenou časťou.

Lávka získala viacero významných ocenení a nominácií, hlavne pre niektoré unikátne riešené oceľové konštrukčné detaily a tiež za jedinečný dizajn. Most pre peších a cyklistov má v pôdoryse oblúkový tvar, pričom stredná časť je čistá kruhová výseč a okrajové časti sú akési prechodnice nadväzujúce na existujúce komunikácie. Lávka tvorí v pomerne roztrieštenom okrajovom mestskom prostredí zjednocujúci a dominantný prvok, na ktorý sú teraz obyvatelia mestečka právom hrdí.

### Popis konštrukcie lávky (stredná časť)

Rozpon :	117,75 m
Priečhodná šírka :	3,5 m
Výška nad terénom :	~ 6,5m
Výška pylóna :	~ 50 m
Polomer oblúka :	~ 150 m

Základný nosný prvok mostovky tvorí nepravidelný štvorhranný skriňový (uzavretý) prierez o najväčšom priemere 1630 mm, zvarovaný z oceľových plástov hrúbky od 15 do 30 mm (oceľ S355). Do tohto prierezu je z vonkajšej strany oblúka navarená ortotropná mostovka, na konci ktorej je ľahké zábradlie. Skriňový prierez je excentricky zavesený na dvanástich oceľových



predpínaných káblov systému Pfeifer® PV 150  $\varnothing$ 40 mm s uzamknutými drôťmi. Prierez je na koncoch mosta votknutý na krútenie do koncových masívnych betónových blokov cez špeciálne upravený detail, pričom ostatné okrajové podmienky sú voľnejšie. Nehmotne pôsobiaci štíhly pylón je dominantou celého návrhu, jeho prierez meniaci sa od lichobežníka po trojuholník (oceľ S355) podľa intenzity namáhania je tiež uzavretý a krutovo tuhý, votknutý do základovej pätky. Celému systému ešte zozadu vypomáhajú dve kotevné laná (PV 420  $\varnothing$ 65 mm). Všetky laná sú zakončené čapovými spojami typ 700 PV (Gabelseilhülsen) z ocele S355 s kónickými napínákmi.

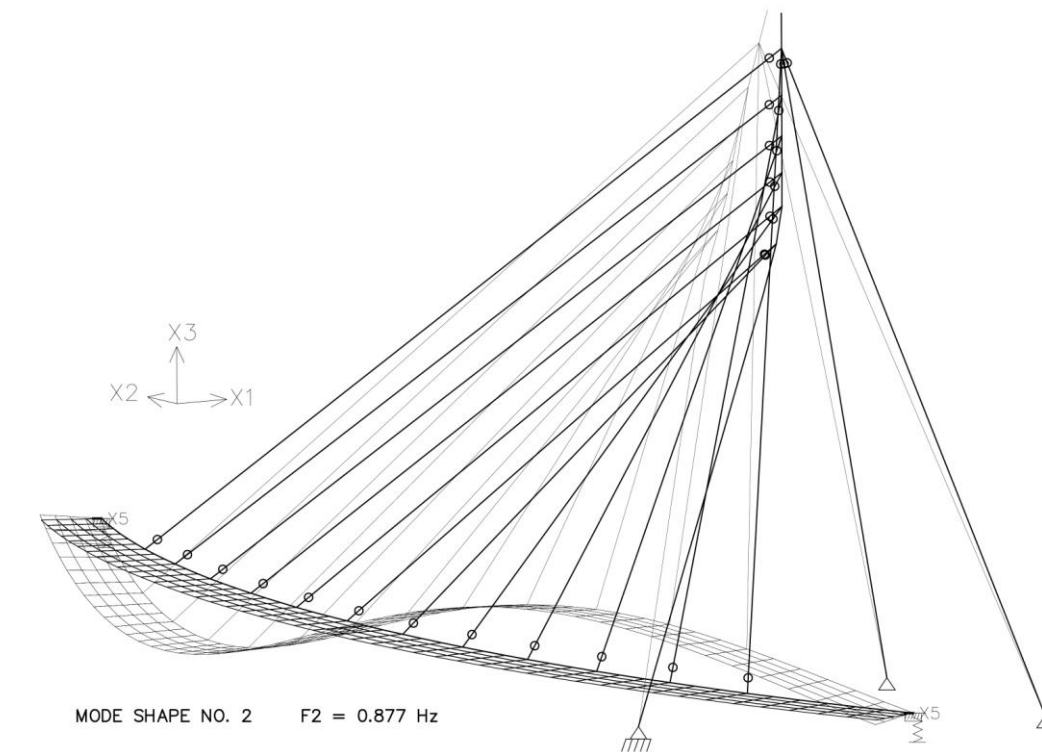
Železobetónové základové pätky sú podporované vŕtanými pilótami  $\varnothing$ 880 mm dĺžky 10 – 15 m, keďže únosnejšia zemina je až od hĺbky cca 5 m. Povrch chodníka je z epoxidovej opieskovanej živice.

## Výpočty

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie sme previedli zjednodušený výpočet lávky. Išlo hlavne o rozloženie predpínaných síl pozdĺž mosta a výpočet vlastných frekvencií. Použili sme spojité rovnomerné úžitkové zaťaženie  $q_{rk} = 2,0 + (120/(L+30)) = 2,816 \approx 3,0$  kN/m<sup>2</sup>. Výpočty sa robili na viacerých statických schémach, od prútových po doskostenové modely MKP (FEM).

Prvá zvislá vlastná frekvencia vychádzala približne okolo  $f_1 = 0,65$  Hz, čo je už mimo „zakázané“ frekvencie 1 ÷ 3 Hz. To znamená, že bežná premávka chodcov by nemala na takej mäkkej sústave vybudit' nepríjemné zrýchlenia. Avšak prvá vodorovná priečna frekvencia nám vyšla  $f_4 = 1,77$  Hz, čo spadá podľa našej STN EN 1991-2/NA do neodporúčanej oblasti 0,5 ÷ 2,5 Hz. A veruže sa realizátori nevyhli namontovaniu 4 tlmáčov medzi rebrá ortotropnej dosky mostovky.

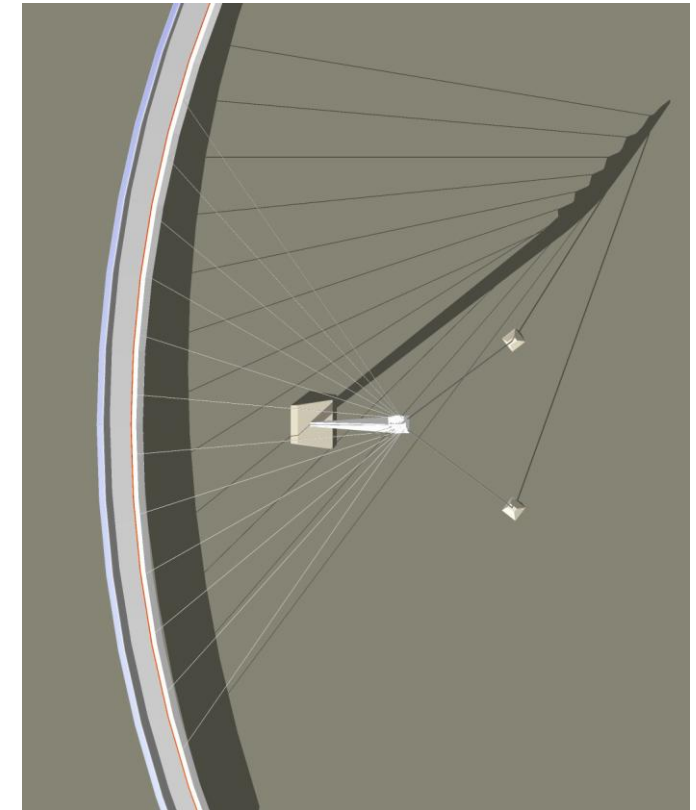
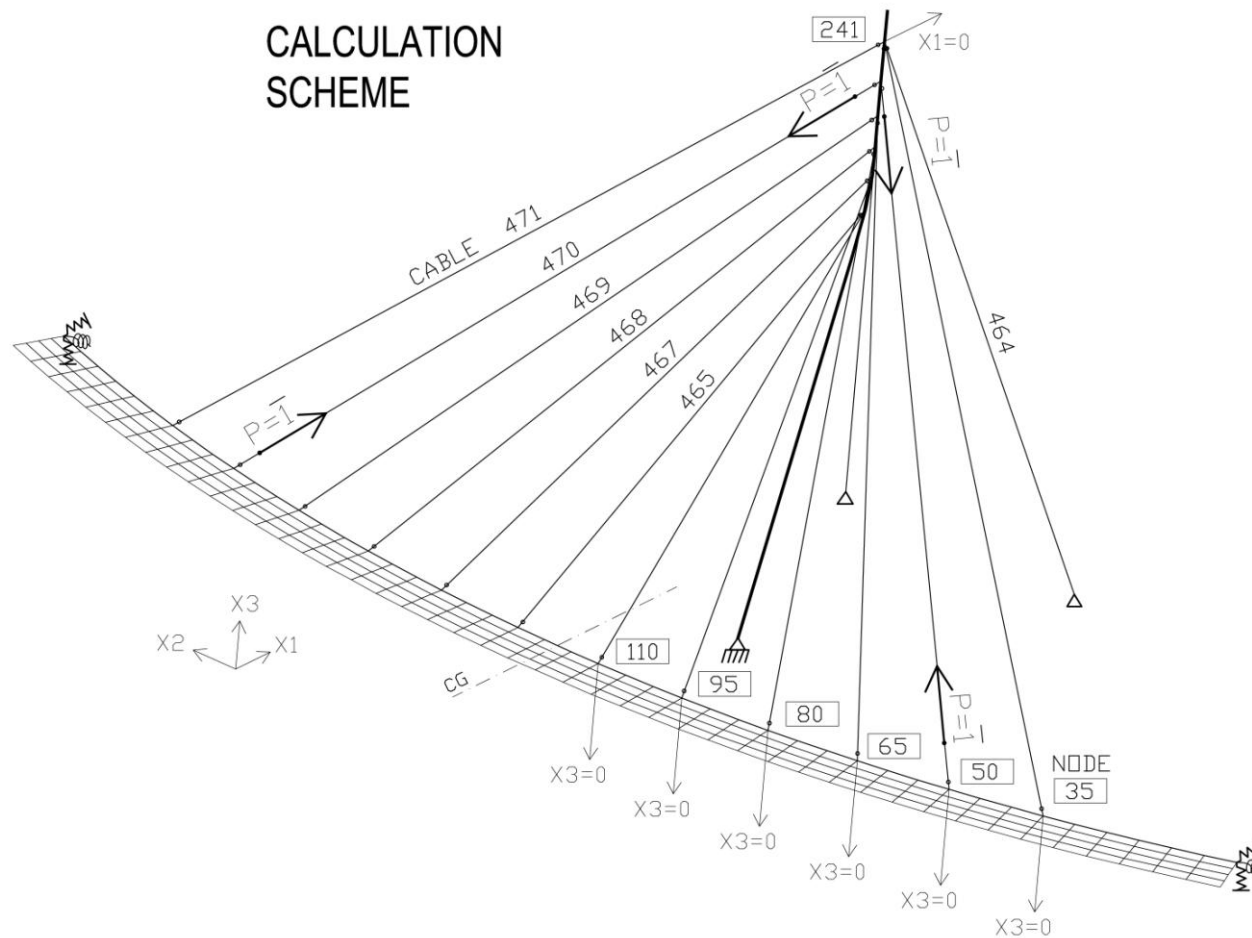
Závažným problémom pri zavesených mostoch býva prerozdelenie síl do jednotlivých káblov. Závisí to na množstve okolností, napr. počet lán, tuhosť mostovky, konštrukčné usporiadanie, postup výstavby, spôsob predpínania, kontrola napätia počas výstavby a pod. Vzhľadom na to, že zavesený most je vysoko neurčitý systém, neexistuje žiadne unikátne (jedinečné) riešenie vypočítať káblkové sily priamo. Zvyčajne ide o iteračný proces a o nájdenie ekonomického riešenia. Jednotkové virtuálne predpätie, aplikované na každý kábel, ovplyvňuje hodnoty všetkých cieľov, v našom prípade posuny uzlov. Existuje viacero spôsobov, ako sa dopracovať



k prijateľnému riešeniu, my sme si konkrétne vybrali metódu nulových posunov pomocou vplyvovej matice. Výpočet sa robí pod stálym dlhodobým zaťažením, pričom sa predpokladá, že náhodilé premenné zaťaženie už bude prenesené nepravidelne z rezervy únosnosti v kábli.

Podobne ako pri *Øresund bridge* alebo *Bus Ramp Viaduct* v San Franciscu sme výrazne nelineárny problém nahradili riešením sústavy lineárnych rovníc. Vždy je nutné vhodné zvolit' nulové posuny, aby sme dostali kompatibilné riešiteľné matice. Avšak náš statický systém (most) je symetrický podľa osi X1, čo je problém, lebo dostaneme lineárne závislú, a tým pádom neriešiteľnú sústavu. Preto musíme urobiť malé zmeny v riešení. Symetriu využijeme v náš prospech a virtuálne jednotkové sily budeme aplikovať v symetrických dvojiciach prútov

namiesto jednotlivých prútov. Potom nám stačí sledovať len jednu (symetrickú) polovicu cieľov, v našom prípade posunov uzlov. Tým sa nám zníži veľkosť vplyvovej matice zo 14x14 na 7x7 (kde 14 je počet káblov). Voľba nulových posunov je zrejماً zo schémy na obrázku.



Pohľad z vtáčej perspektívy

Riešenie neznámych koeficientov násobkov jednotkových káblových síl  $\mathbf{T}$  potom bude vo forme  $\mathbf{T} = \delta^{-1} * [\mathbf{A} - \mathbf{I}]$ , kde  $\mathbf{A}$  je nulová matica  $\mathbf{A} = [0, 0, \dots, 0]^T$ ,  $\mathbf{I}$  je transponovaná matica posunov od stáleho zaťaženia *dead load* a  $\delta$  je vplyvová matica od jednotkových káblových síl.

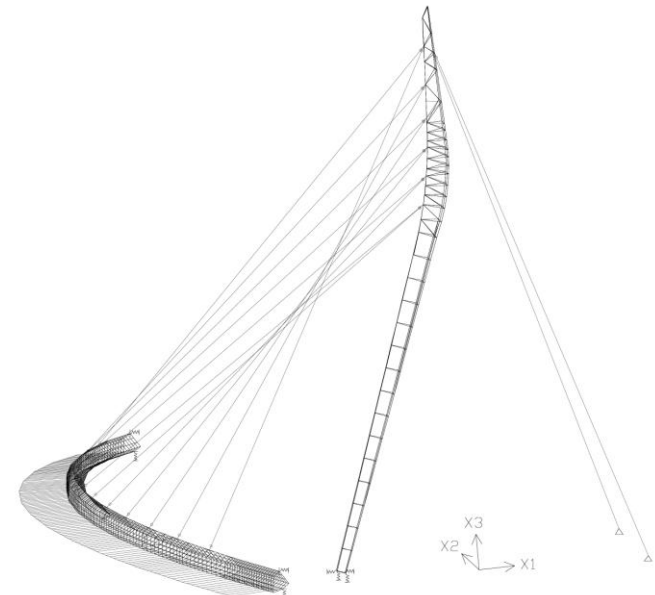
δ	prút (BEAM)							(NODE)				
	uzol	471	470	469	468	467	465	464	I	uzol	A	E
35	0,58595	0,59089	0,44336	0,26030	0,10114	-0,01451	0,38560	-0,18835	35	0	0,1884	
50	0,60810	0,74997	0,64604	0,42636	0,19890	0,01015	0,53937	-0,27173	50	0	0,2717	
65	0,54664	0,70880	0,76007	0,60149	0,34569	0,08571	0,65485	-0,34434	65	0	0,3443	
80	0,49379	0,59021	0,69416	0,71579	0,53122	0,23472	0,73468	-0,40394	80	0	0,4039	
95	0,47332	0,48793	0,57184	0,68126	0,69094	0,44833	0,78428	-0,44741	95	0	0,4474	
110	0,47229	0,43466	0,49151	0,62065	0,72896	0,63921	0,80805	-0,47076	110	0	0,4708	
241	-0,49685	-0,24620	-0,08762	0,00823	0,08042	0,15960	1,16296	-0,10509	241	0	0,1051	

Inverzná matica								prút		
δ <sup>-1</sup>	10,67641	-13,3911	6,1234606	-1,2749488	0,318098	-0,09012	-0,12381	T	0,05257	471
	-13,32326	25,036831	-19,25007	7,4214321	-1,78177	0,443017	-0,14937		0,05874	470
	5,331528	-18,5151	27,132709	-19,622781	7,050415	-0,91783	-0,17936		0,09304	469
	-2,386346	8,1751889	-19,82688	27,583805	-20,1765	6,548232	-0,20483		0,12095	468
	-1,440671	-0,117358	7,0505198	-19,272285	25,04472	-11,409	-0,22555		0,15036	467
	-2,206657	2,0088839	-1,67892	6,4280691	-14,2441	9,397358	-0,23903		0,17453	465
	2,561752	-2,141137	0,4682619	-0,1966595	0,655604	-0,56092	0,811693		0,09706	464

$\Delta L_i = -N * T_i * L_i / (E * A_i)$  predstavuje už rovno skrútenie káblov pod predpínacím zariadením, kde  $L_i$  je dĺžka kábla a  $A_i$  jeho plocha.  $N$  je zavedená virtuálna kábovová sila (tu 10000 kN).

prút	$L_i$ [m]	$A_i$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta L$ [m]
471	63,545	0,0012566	-0,13633
470	57,727	0,0012566	-0,13839
469	52,602	0,0012566	-0,19972
468	48,242	0,0012566	-0,23813
467	44,761	0,0012566	-0,27466
465	41,695	0,0012566	-0,29697
464	51,129	0,0038485	-0,06613

Jeden z modelov FEM



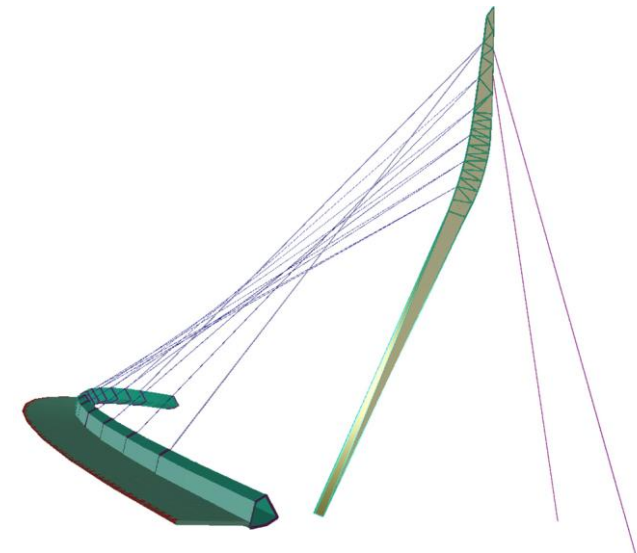


Niektoré **zdroje**, použité pri tvorbe článku:

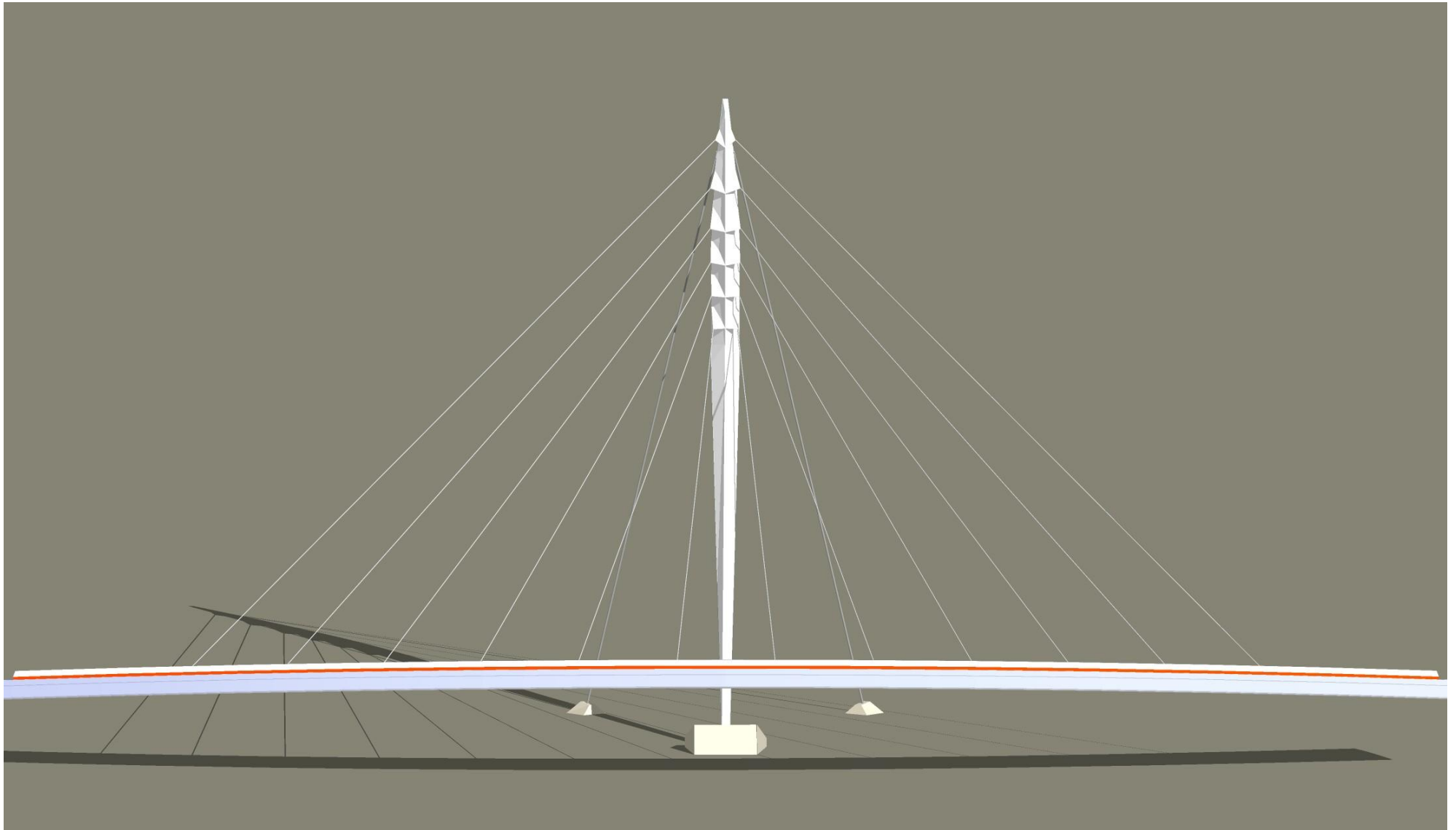
- [1] Christoph Gunßer : Elegant übers Getöse, Fußgänger– und Radfahrerbrücke in Lahr, deutsche bauzeitung, db 5/2019
- [2] STN EN 1990 Zásady navrhovania konštrukcií
- [3] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
- [4] STN EN 1991–2 Zat'aženie mostov dopravou
- [5] [www.henchion-reuter.de](http://www.henchion-reuter.de)
- [6] [www.eisat.de](http://www.eisat.de)

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, Corel Draw



Jeden z doskostenových modelov FEM (program STRAP)



© Ing. Vladimír Budinský SSK, Banská Bystrica, IV/2020