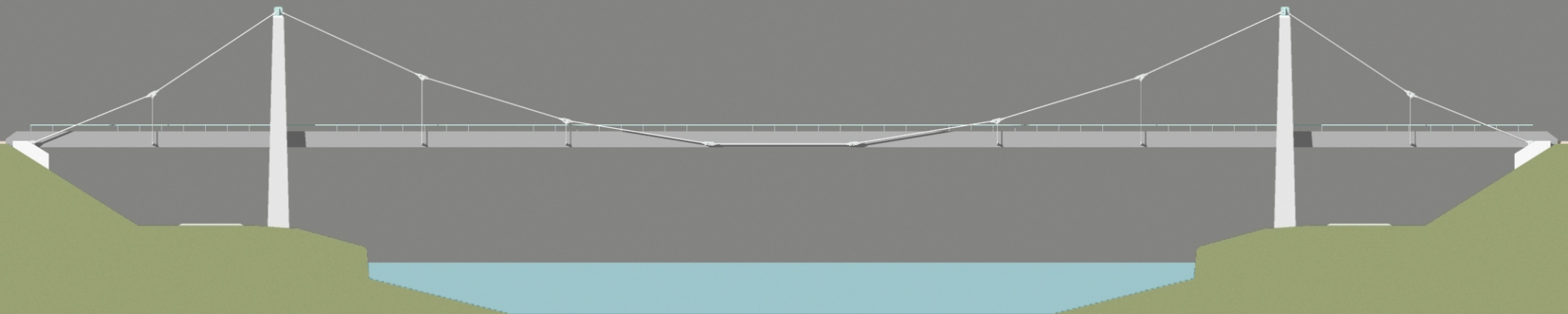


Pedestrian and bicycle bridge in Tilburg Netherlands

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

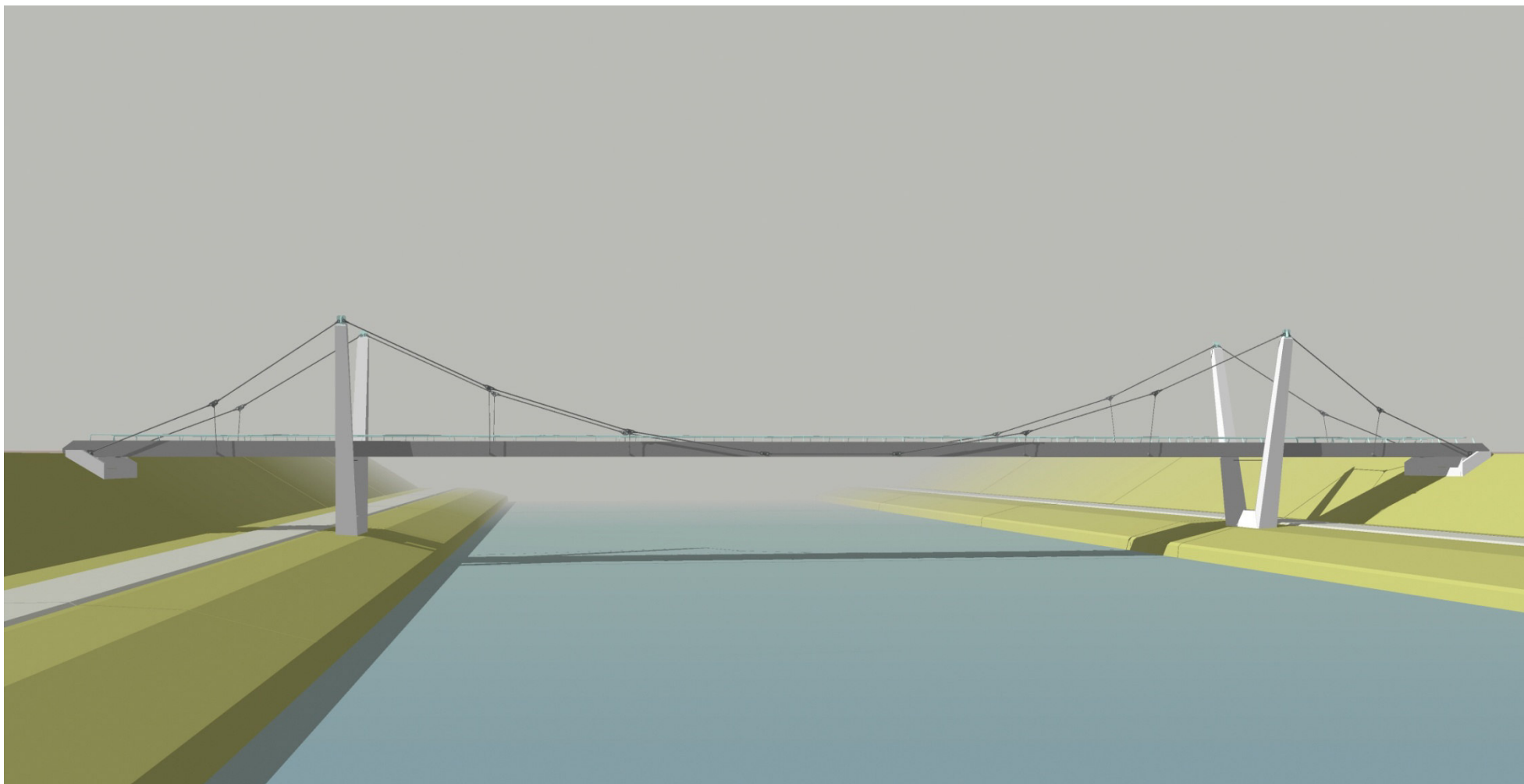
*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*



KEYWORDS : bridge, footbridge, pedestrian bridge, suspension bridge, computation, calculation, structural analysis, most, visutý most, statický výpočet, SSK

ÚVOD (Introduction)

Most pre peších a cyklistov prekraňuje *Wilhelmina Canal* v meste Tilburg. Slúži ako prepojenie medzi obytňou štvrťou *Reeshof* a priemyselnou zónou *Vossenbergh*. Je navrhnutý bez okázalosti tak, aby bol jednoduchý a decentný vo forme, zároveň cenovo výhodný a rýchlo postavitelný. Vzhľadom na krásne okolie s kanálom, zelenými brehmi a radmi stromov bol dizajn zostavený takým spôsobom, aby nedominoval prírode a poskytoval nerušený výhľad na okolie.



Visutý most je unikátny v spôsobe, akým vo svojej konštrukcii využíva napínacie tyče na to, čo je všeobecne známe ako hlavné lano a závesy, pričom na spojenie napínacích tyčí v rôznych uhloch používa sieť motýľových styčkových plechov, aby sa splnili požiadavky na zaťaženie visutého mosta.

Použitie napínacích tyčí môže mať oproti použitiu káblov v tejto aplikácii niekoľko výhod, vrátane väčšej tuhosti, kratších dĺžok pre uľahčenie inštalácie a často je nákladovo efektívnejším riešením ako použitie káblov. Sústava kruhových ťahiel nesie dva mohutné krajné nosníky uzavretého skriňového tvaru so skoseným priečnym rezom. Mostovku tvorí ortotropná oceľová doska s priečnymi lichobežníkovými žľabovými nosníkmi, ktoré sú navarené na pozdĺžne skriňové nosníky.

Napínacie tyče simulujúce hlavné lano visutého mosta sú "zavesené" na dvoch železobetónových pylónoch tvaru písmena "V". Celá sústava tvorí samokotvený most, keďže tlakové osovú sily sa vyrovnávajú v pozdĺžnych nosníkoch a nie sú potrebné mohutné krajné opory vzdorujúce vodorovným silám.

IDENTIFIKAČNÉ ÚDAJE MOSTA

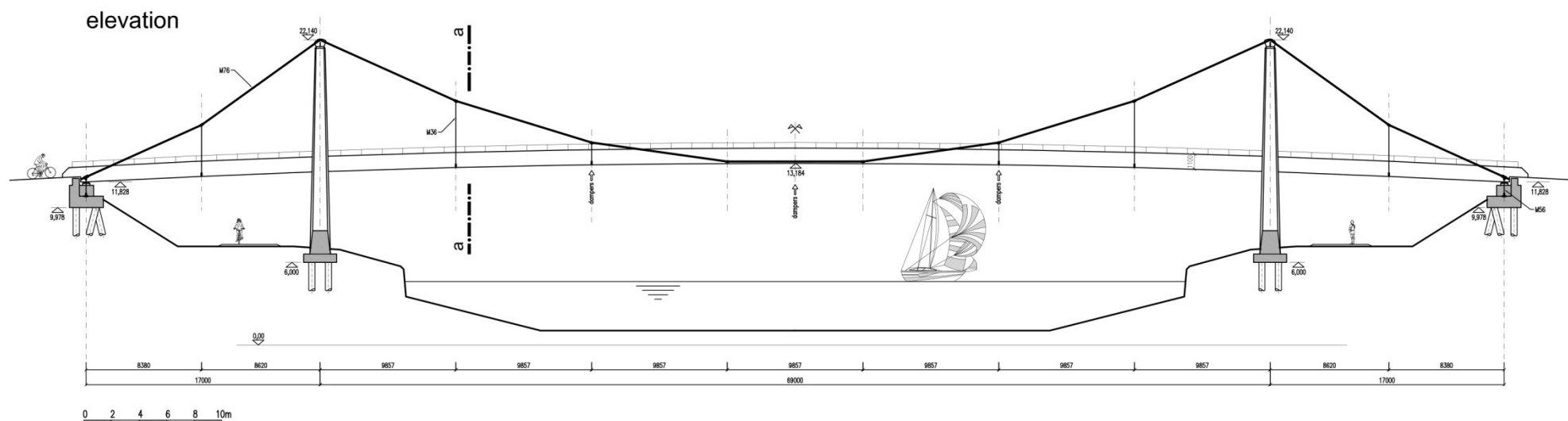
Client : Tilburg city
Design : Quist Wintermans Architekten (QWA), Rotterdam
Main contractor : Dura Vermeer Betonen Waterbouw, Barendrecht
Steel contractor : Staalbouw Weelde International, Ravels (B)
Structural design : ABT, Consulting engineers, Velp
Completed : project from 2012, erection IV / 2013 ÷ IX / 2013

Ďalšie údaje

Náklady : 2,03 mil. eur včítane nábehov
Rozpon : 17 m + 69 m + 17 m
Celková dĺžka NK : 103 m
Priečhodná šírka : 4,8 m
Výška ocel'. mostovky : 0,3 m ÷ 0,35 m
Typ mosta : visutý

UPOZORNENIE : Vo všetkých vizualizáciách a výpočtoch nie je zohľadnené zvislé zakrivenie mostovky (okrem pozdĺžneho rezu dole ↓)

NOTE : Views and calculations do not take into account the vertical curvature of the bridge deck (except elevation ↓)





POPIS KONŠTRUKČNÝCH PRVKOV

Vzopätie konštrukcie :	9,1 m
Základy opôr a pylónov :	pilóty $\approx \varnothing 450$ mm
Uloženie mostovky na pylónoch :	pohyblivé
Obmedzenie prútia v smere osi :	len jedna krajná opora
Hrúbka horného plechu ortotropnej mostovky :	10 mm
Materiál ocelevej konštrukcie :	S355JR
Materiál a typ napínacích tyčí :	S460 Macalloy
Priemery tyčí (hlavné, závesné, koncové zvislé a pylónové tiahlo) :	$\varnothing 76$, $\varnothing 36$, $\varnothing 56$ mm

Vzhľadom na to, že krajné rozpory sú pomerne krátke oproti strednému rozponu, pôsobí v niektorých zaťažovacích prípadoch značná zdvíhacia sila na krajné opory. Kvôli tomu sú na koncoch mosta inštalované zvislé tiahla $\varnothing 56$ v styčniku s hlavnými tiahlymi a okrajovými nosníkmi. Na spodku sú upevnené o železobetón krajných opôr. Ich dĺžka je upravená tak, aby umožňovala voľný pohyb v smere osi mosta od tepelnej rozťažnosti.

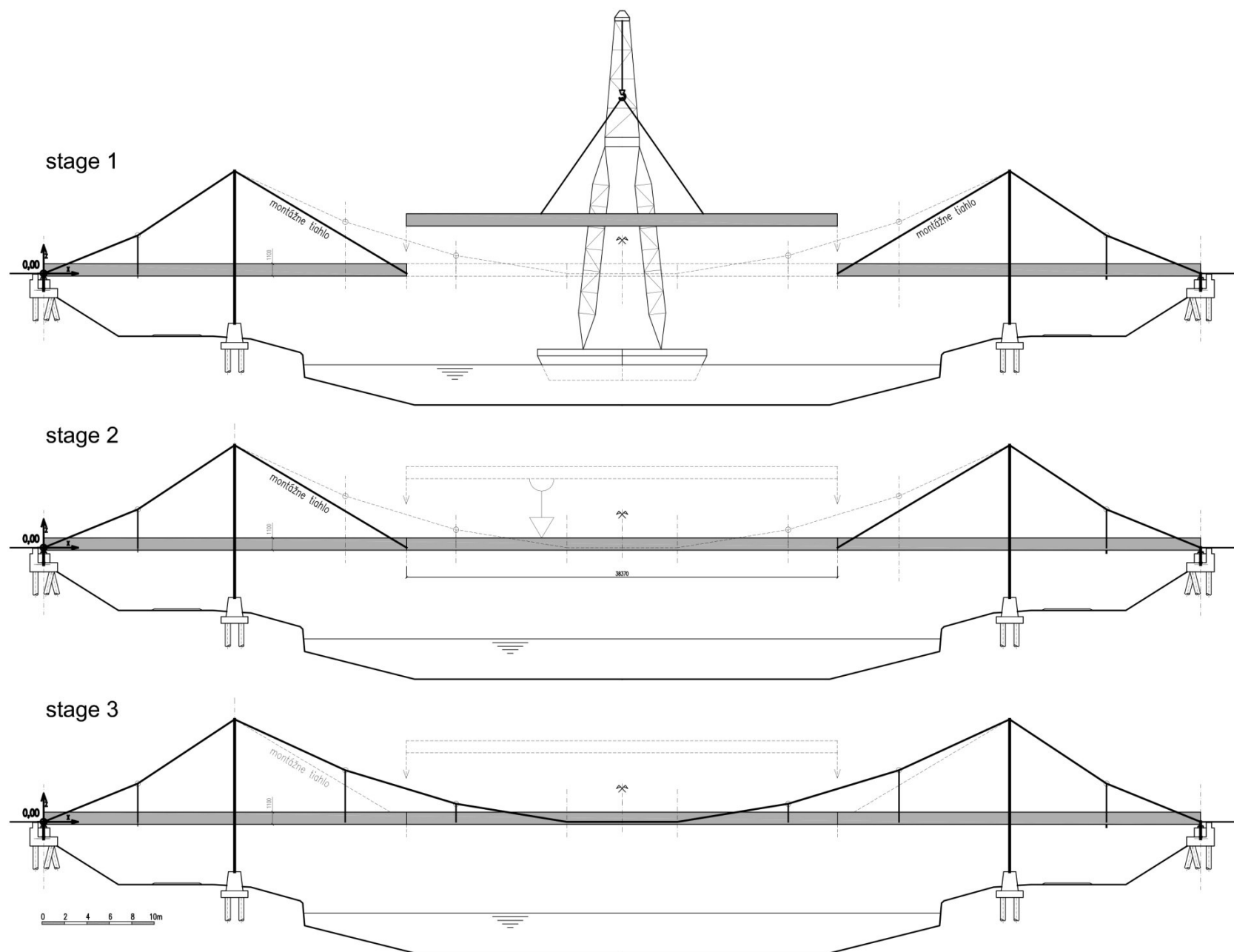
V projekte mosta boli vytýpované tri miesta na umiestnenie ladených hmotnostných tlmičov (TMD) pod

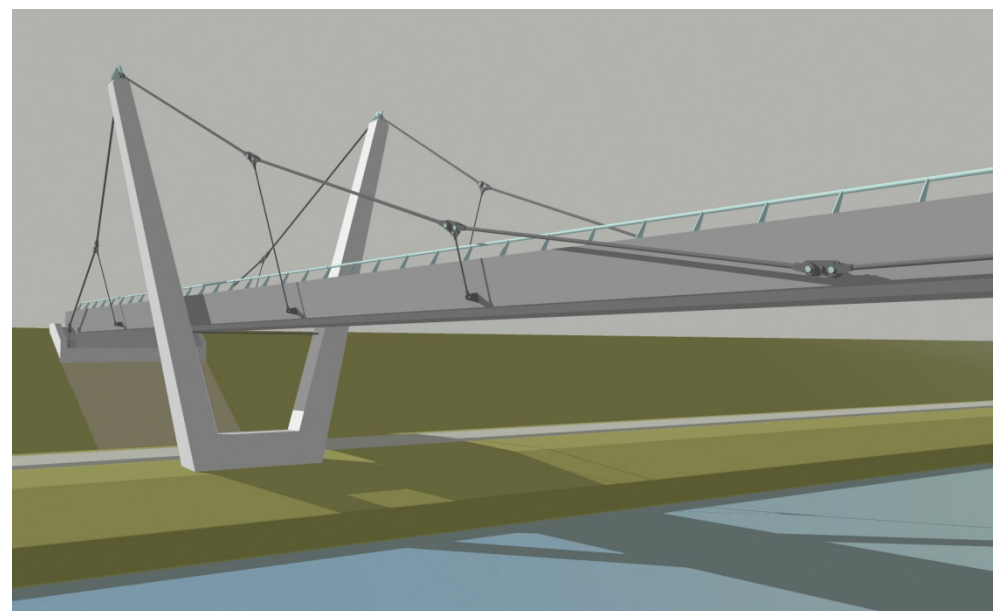
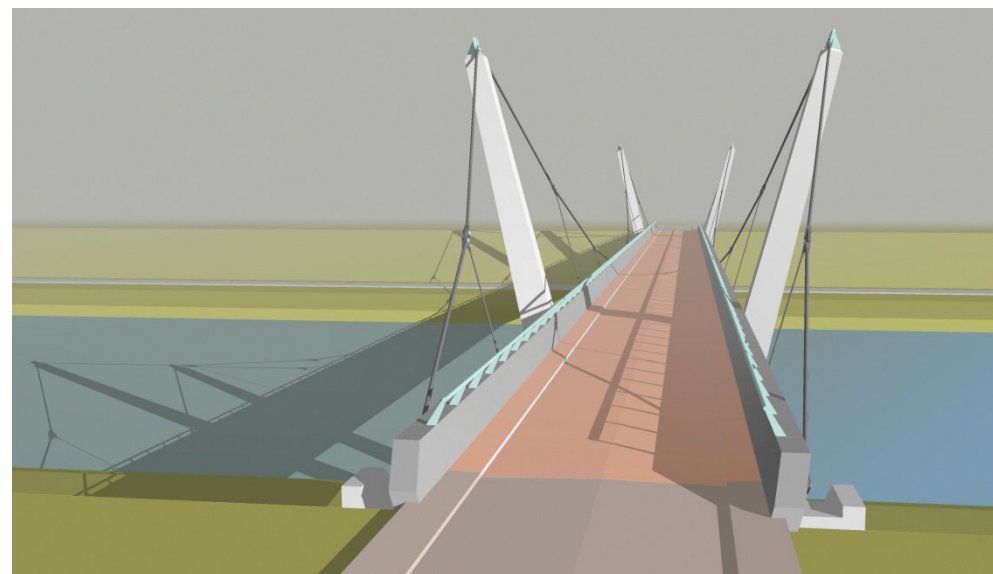
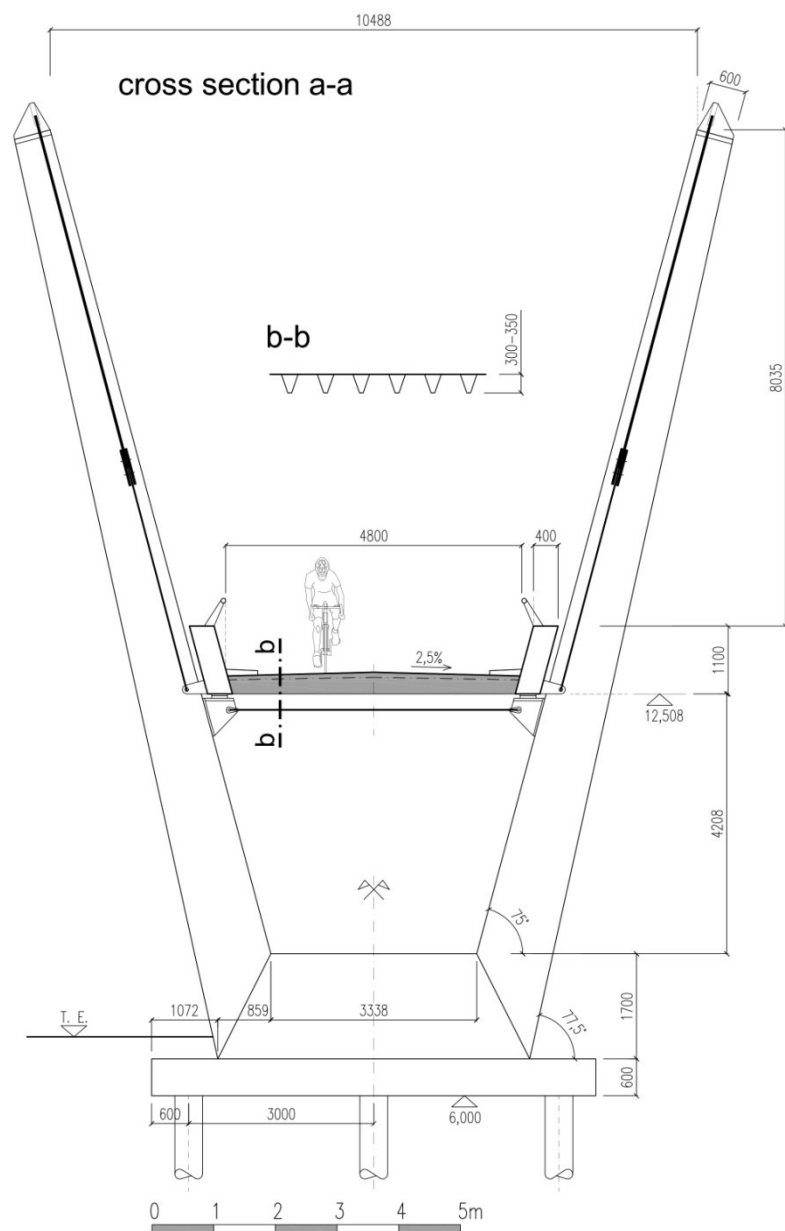
horným plechom ortotropnej mostovky medzi priečnymi lichobežníkovými profilmi. Avšak podľa našich výpočtov prípustného zrýchlenia nebola takáto inštalácia nutná. Zrejme podľa výsledkov merania zrýchlení in situ k tomuto záveru dospeli aj zainteresovaní, a tlmiče neboli namontované. Túto informáciu však nemáme priamo overenú.

POSTUP VÝSTAVBY

Postup výstavby je prehľadne znázornený na nasledujúcich obrázkoch. Po vybudovaní základových konštrukcií a vybetónovaní pylónov sa osadili spojené dielce podlahy z krajných krabicových nosníkov a ortotropnej mostovky. Z vrcholu pylónov viedli po oboch stranách k hlavným montážnym spojom osobitné pomocné rozoberateľné tiahla, ktoré boli nadimenzované na ťaž stredného dielu mostovky v dĺžke 38,37 m. Stredný montážny diel bol navádzaný a umiestňovaný pomocou lodného žeriavu. Po zvarení krajných nosníkov a mostovky sa osadili zvyšné stredové tiahla a závesy. Až potom bolo možné odstrániť pomocné montážne tiahla. Konce krajných mostoviek bolo treba osadiť s prevýšením od predpokladaného východzieho stavu o cca 8 cm vyššie.

↓↓ Nasledujúca strana – schéma postupu výstavby v troch fázach



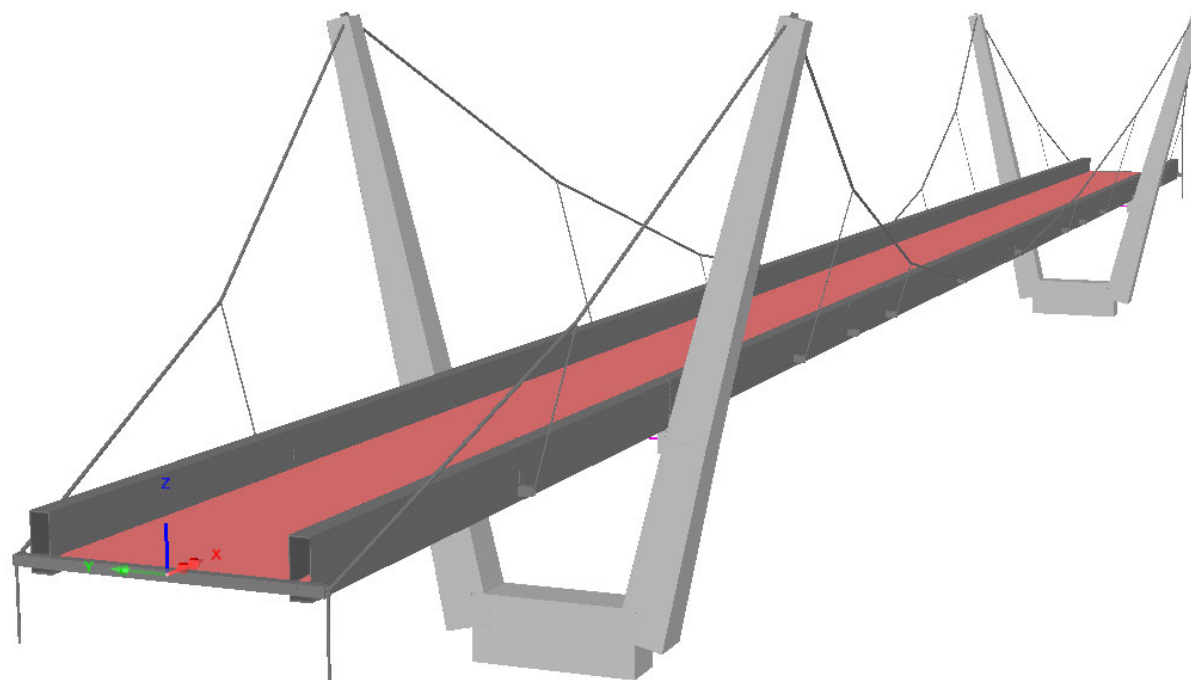


VÝPOČTY

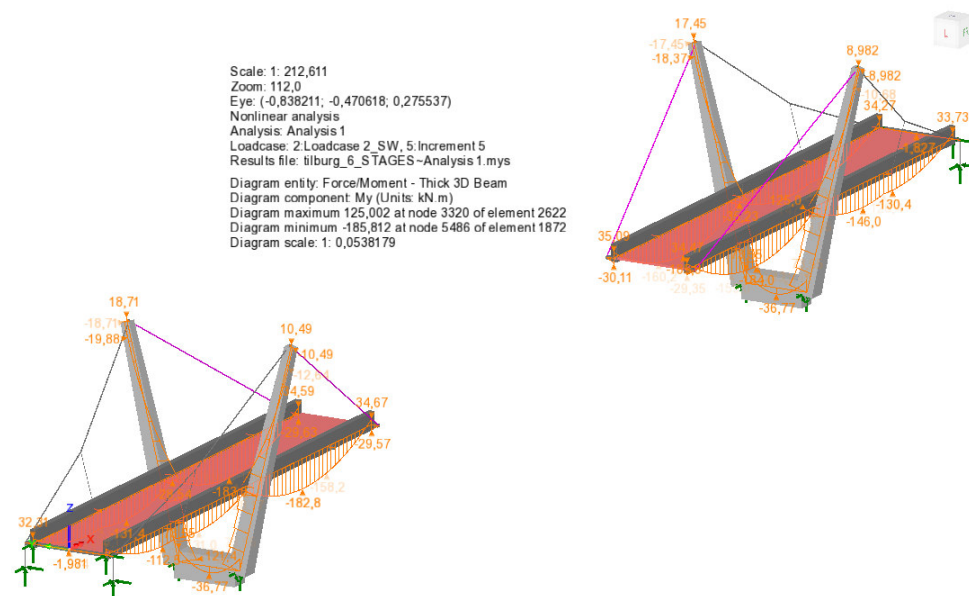
Na základe niektorých veľmi zjednodušených predpokladov a prepočtov sme sa pokúsili interpretovať pôsobenie sústavy. Zjednodušenie spočívalo v zanedbaní pozdĺžneho spádu a prevýšenia mosta a hlavne v nahradení ocelevej ortotropnej mostovky spojitou doskou s rôznymi vlastnosťami v dvoch hlavných smeroch X a Y. Touto náhradou sa veľmi zjednodušil výpočtový model a sprehľadnila sa výsledková databáza a predovšetkým nám výpočtový program umožnil vybrať taký konečný prvok, ktorý takúto náhradu umožní aj pri nelineárnych a dynamických výpočtoch. Takže v smere hlavnej tuhosti mostovky (kolmo na os mosta) sme upravili hrúbku dosky na ekvivalentný moment zotrvačnosti. V smere vedľajšej tuhosti je moment zotrvačnosti rádovo nižší, pôsobí tu len oceľová doska hrúbky 10 mm. V pomere momentov zotrvačnosti sa následne upravil modul pružnosti "E_y". To však spôsobuje divergenciu v iteračných cykloch pre kolabujúcu maticu tuhosti. Preto bolo treba upraviť Poissonovu konštantu z 0,3 na nulu. Rovnako sme upravili mernú tiaž ocelevej konštrukcie, aby sa zachovala hmotnosť dosky na m². Tieto úpravy sme si mohli dovoliť preto, lebo normálové napätia od osových síl nie sú rozhodujúce pri danom type konštrukcie. Väčšinu osových síl preberú krajné nosníky. Pred budovaním hlavného modelu sme si urobili niekoľko testov na jednoduchých modeloch.

Ako základné zaťaženia sme uvažovali vlastnú tiaž konštrukcie a zaťaženie mostov dopravou – v tomto prípade *zaťaženie lávok pre chodcov*, a konkrétne *rovnorné spojité zaťaženie*, ktoré vykazuje globálne a na most najnepriaznivejšie účinky.

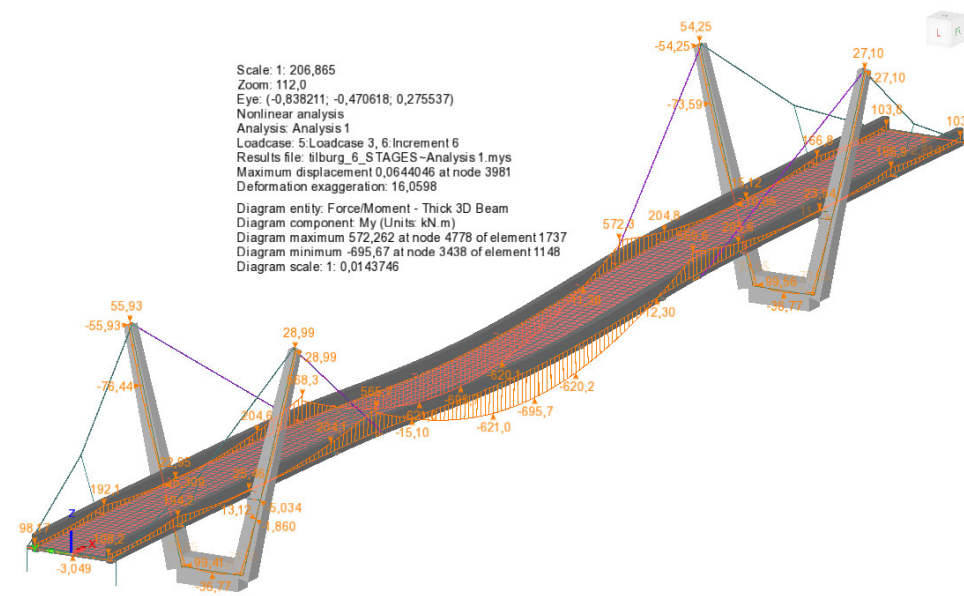
Rovnomerné zaťaženie je uvažované v hodnote $q_k = 2,0 + (120 / (L + 30)) = 3,21 \text{ kN/m}^2$ pre $L = 69 \text{ m}$. Pretože ortotropná doska v smere svojej väčšej tuhosti je pre lávkové zaťaženie predimenzovaná, uvažovali sme aj o možných alternatívnych zadávacích údajoch. Most by s rezervou preniesol dvojnápravový TS systém zo zaťažovacieho modelu LM1 (celkom 0,9*600 kN) bez uvažovania UDL. Čiže v kritických situáciách môže cez most prejsť jediné takéto vozidlo. Toto predimenzovanie má tiež priaznivý vplyv na priečnu tuhosť a dynamické vlastnosti sústavy, a preto sa možno upustilo od montáže TMD.



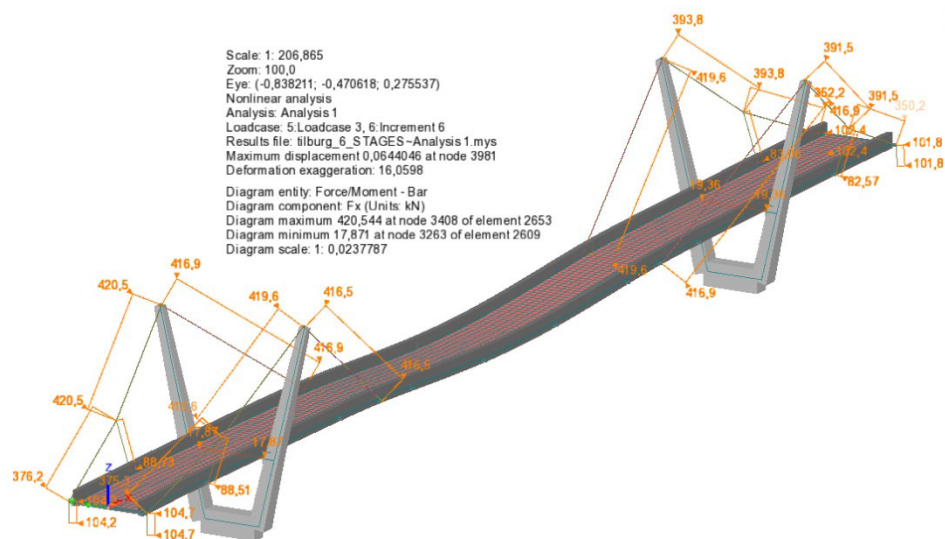
Základný model FEM zložený z prútových a plošných prvkov



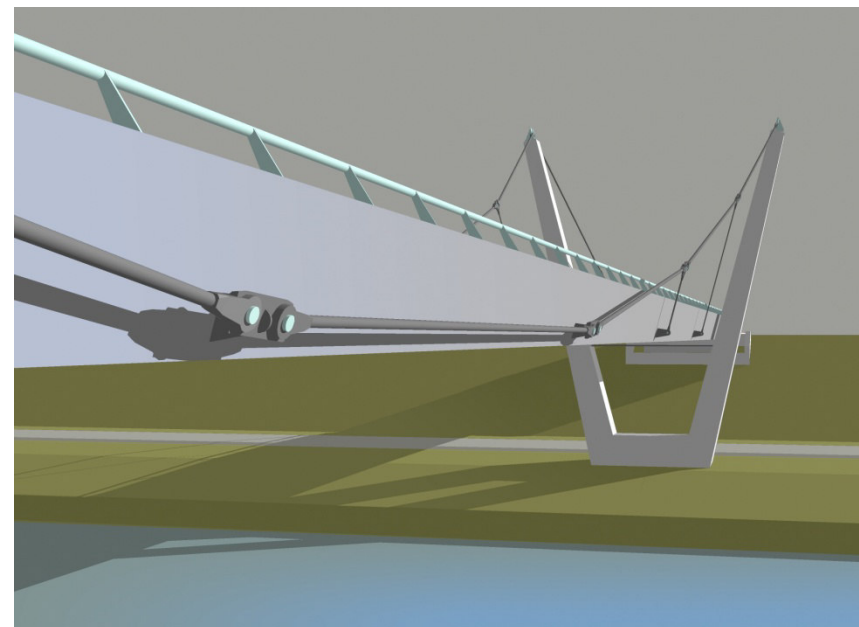
↑ Priebeh momentov M v krajných nosníkoch v 1. fáze výstavby (stage 1)



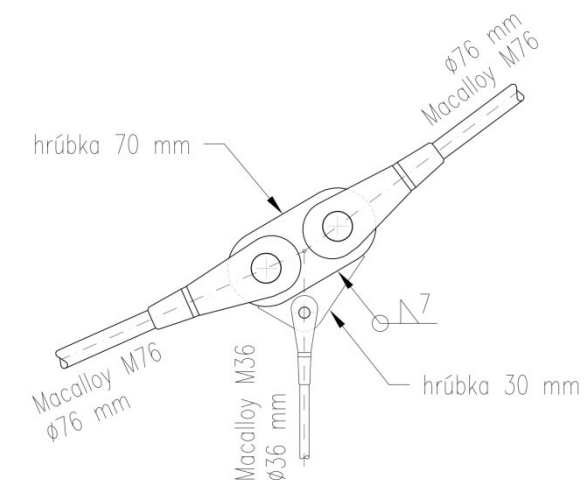
↑ Priebeh momentov M a priebeh v krajných nosníkoch v 2. fáze výstavby (stage 2)
po zvarení stredného dielu a uvoľnení z lodného žeriavu

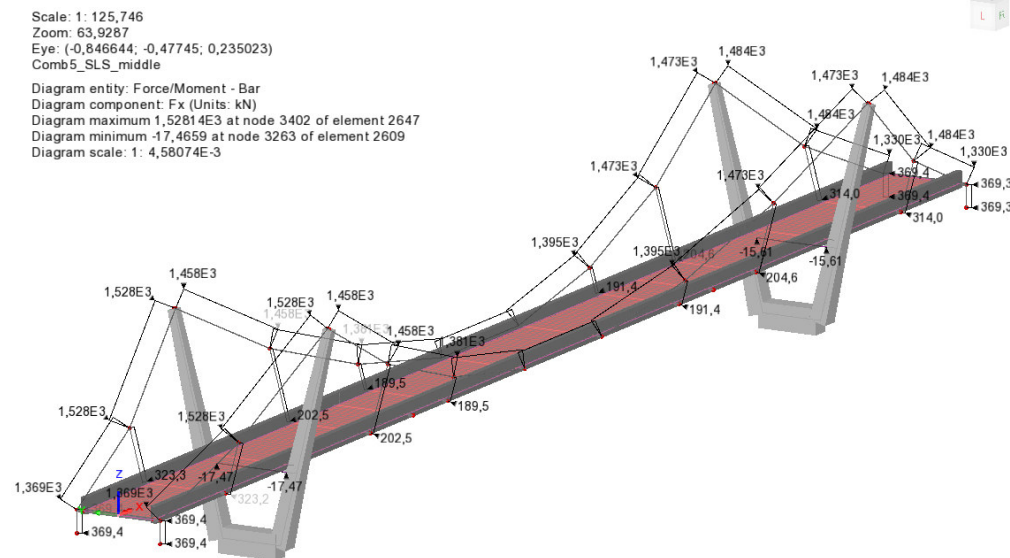


← Priebeh osových síl F_x v ťahoch v 2. fáze výstavby (stage 2) po zvarení
stredného dielu a uvoľnení z lodného žeriavu

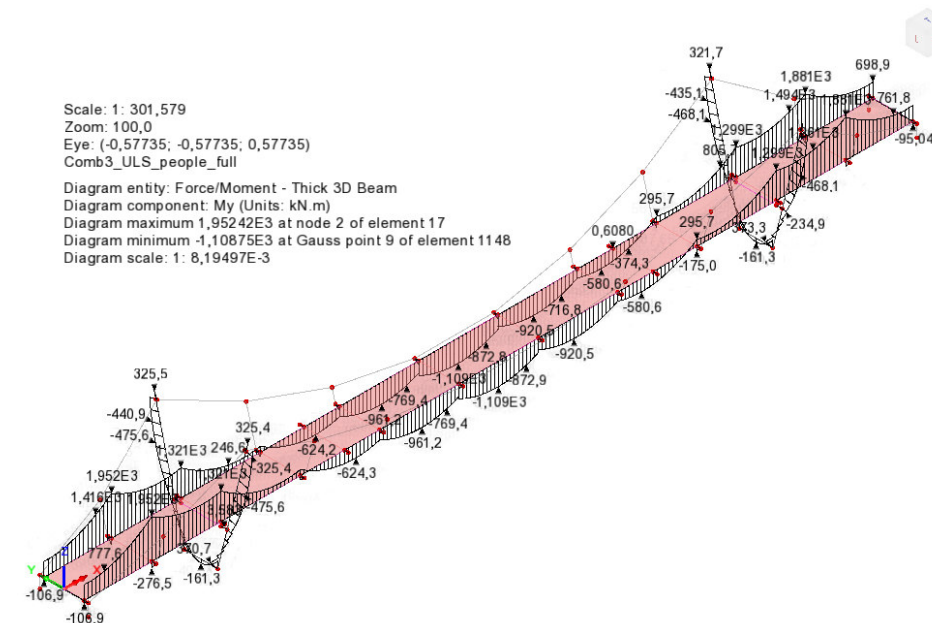


detail of the bars connection

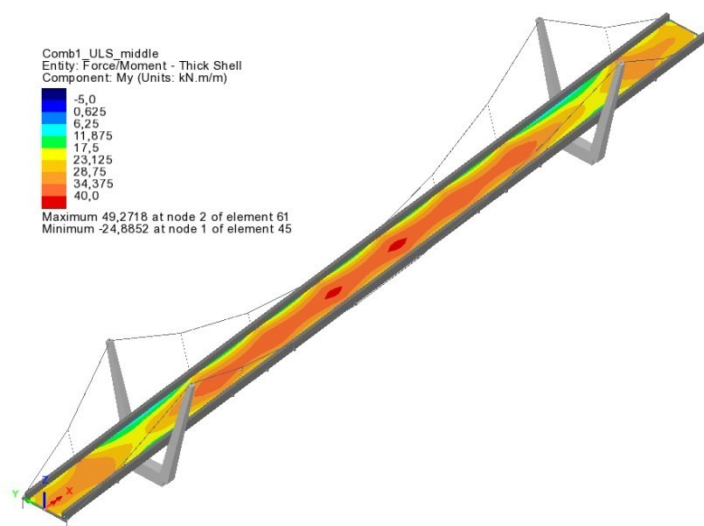




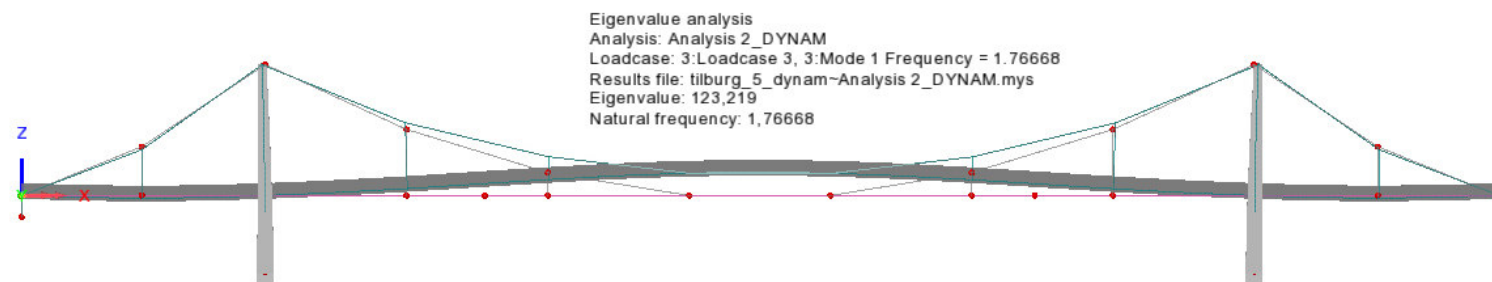
↑ Priebeh osových síl v ťiahľach, kombinácia SLS, zaťaženie chodcami v strednom poli



↑ Priebeh momentov M v krajných nosníkoch, kombinácia ULS, zaťaženie chodcami na celom moste, $M_{\max} = 1952 \text{ kNm}$

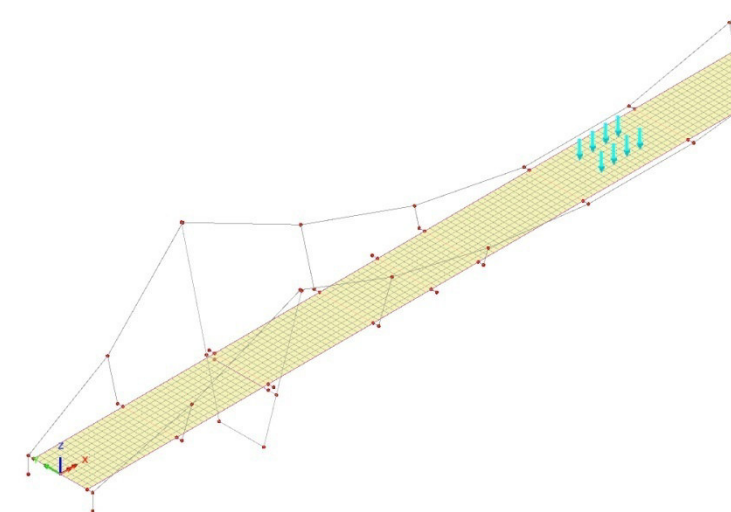
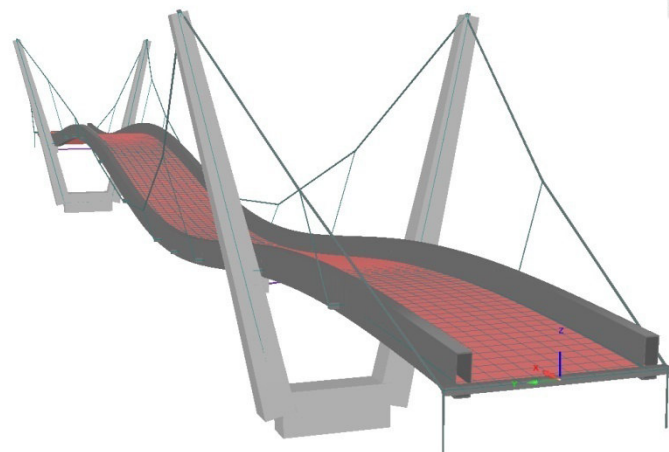


← Priebeh priečných momentov M_y v mostovke, kombinácia ULS, zaťaženie chodcami v strednom poli mosta, $M_{y,\max} = 49,27 \text{ kNm}$

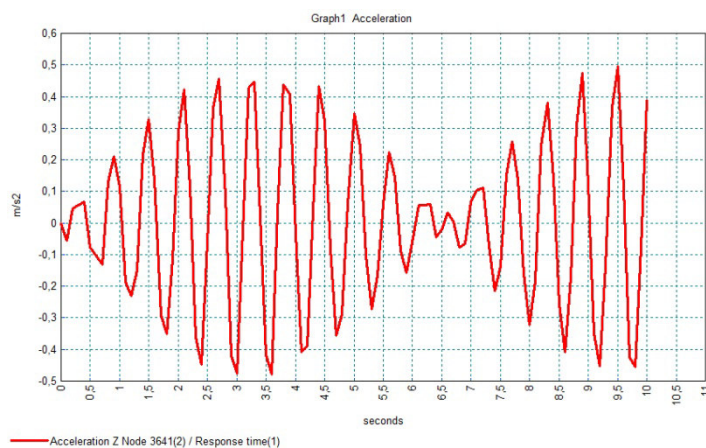


↑ Prvý vlastný tvar kmitania $f_1 = 1,76 \text{ Hz}$
s najvyššou participáciou hmoty

← Tretí vlastný tvar kmitania $f_3 = 2,84 \text{ Hz}$



Situovanie hojdania chvých chodcov $8 \times 280 \text{ N}$ ↑



← Zvislé zrýchlenie stredu mosta od koordinovaného budenia ôsmich chodcov vo frekvencii 1,76 Hz. Zrýchlenie je menšie ako $0,5 \text{ m/s}^2$, čo radí most do kategórie maximálneho komfortu

ZÁVER

Pri výstavbe mosta bola obdivuhodná jeho rýchlosť (cca 6 mesiacov), ako aj projektová príprava (cca 1 rok). Využila sa maximálna predvýroba dielcov v montážnych výrobniciach, ako aj možnosť montáže riečnym žeriavom. K tomu prispela aj zámena klasickej visutej lanovej konštrukcie za tyčové prvky popredného výrobcu.

Niektoré ZDROJE, použité pri tvorbe článku :

- [1] Jens Håkansson, Henrik Wallerman : Finite Element Design of Orthotropic Steel Bridge Decks, Göteborg 2015
- [2] Technical guide Footbridges Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, SÉTRA, 2006
- [3] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
- [4] STN EN 1991–2 Zaťaženie mostov dopravou
- [5] Macalloy's Tension Structures, 2017

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

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné POČÍTAČOVÉ PROGRAMY :

LUSAS Bridge Plus, SketchUp, AutoCad LT, Microsoft Word, PDF Creator, IrfanView, Corel Draw

© Ing. Vladimír Budinský SSK, Banská Bystrica, VI/2025

