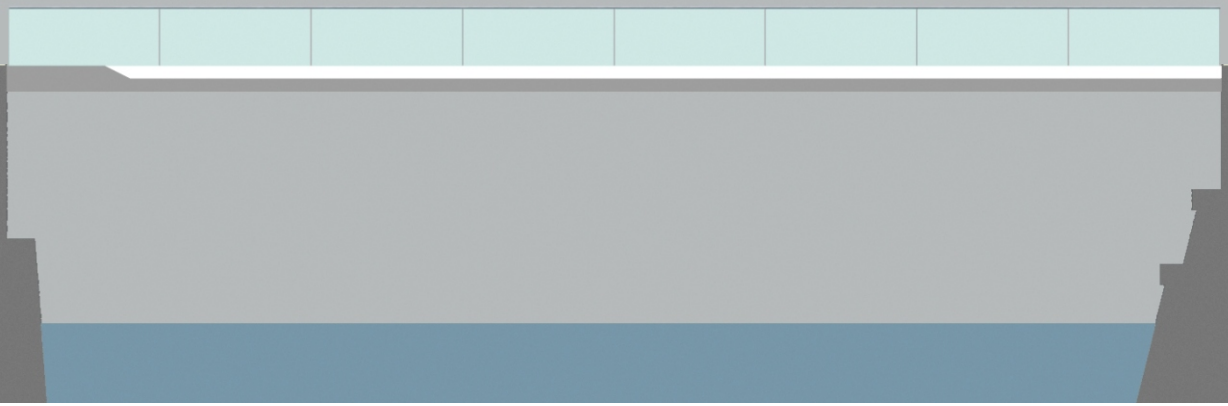
Footbridge over river Ljubljanica
Ljubljana, Slovenia

statické
pôsobenie

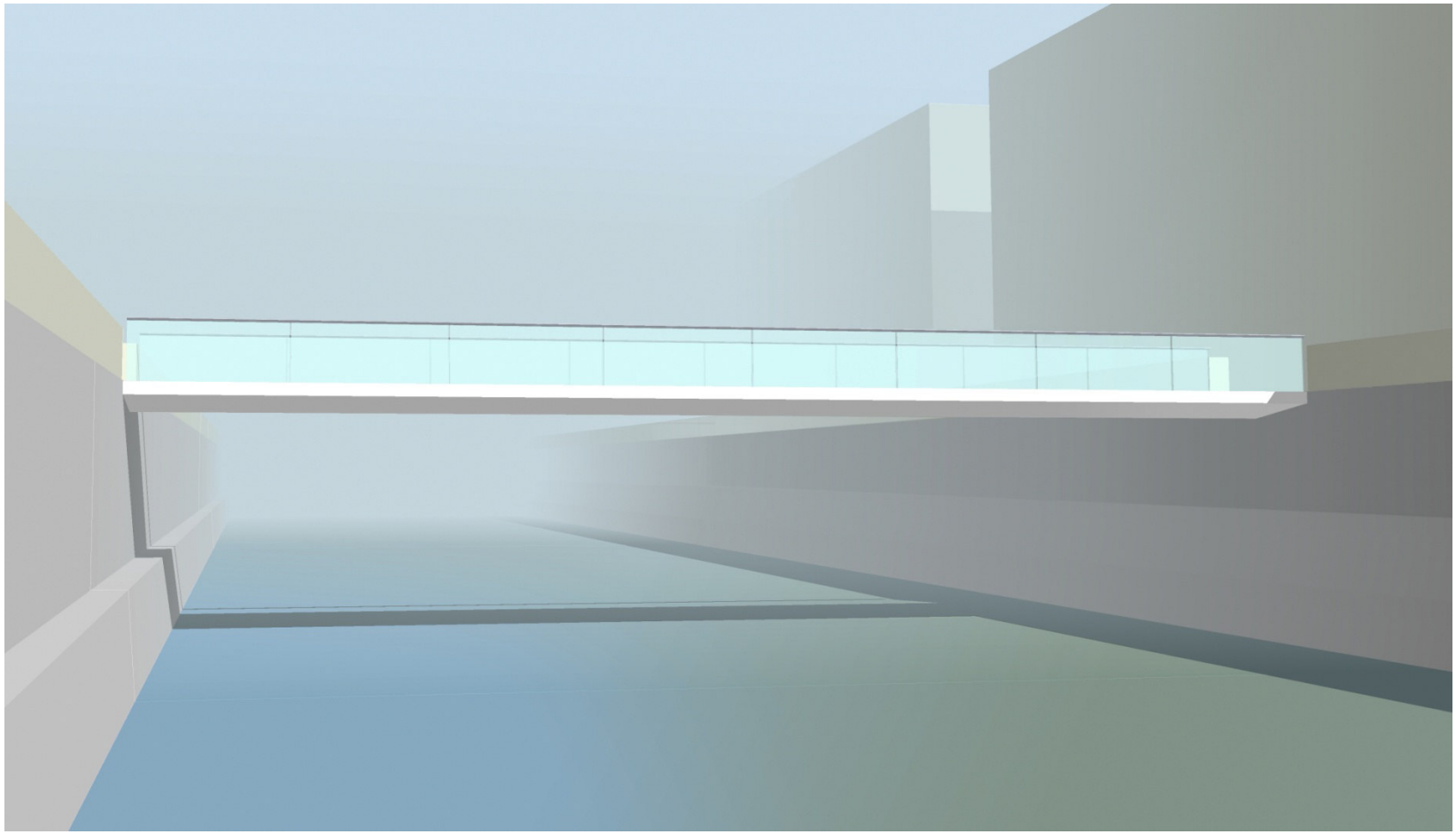
theory, analysis
Vladimír Budinský SSK



KEYWORDS : bridge, footbridge, ribja brv, pedestrian and bicycle bridge, computation, calculation, structural analysis, most, statický výpočet, SSK

ÚVOD (*Introduction*)

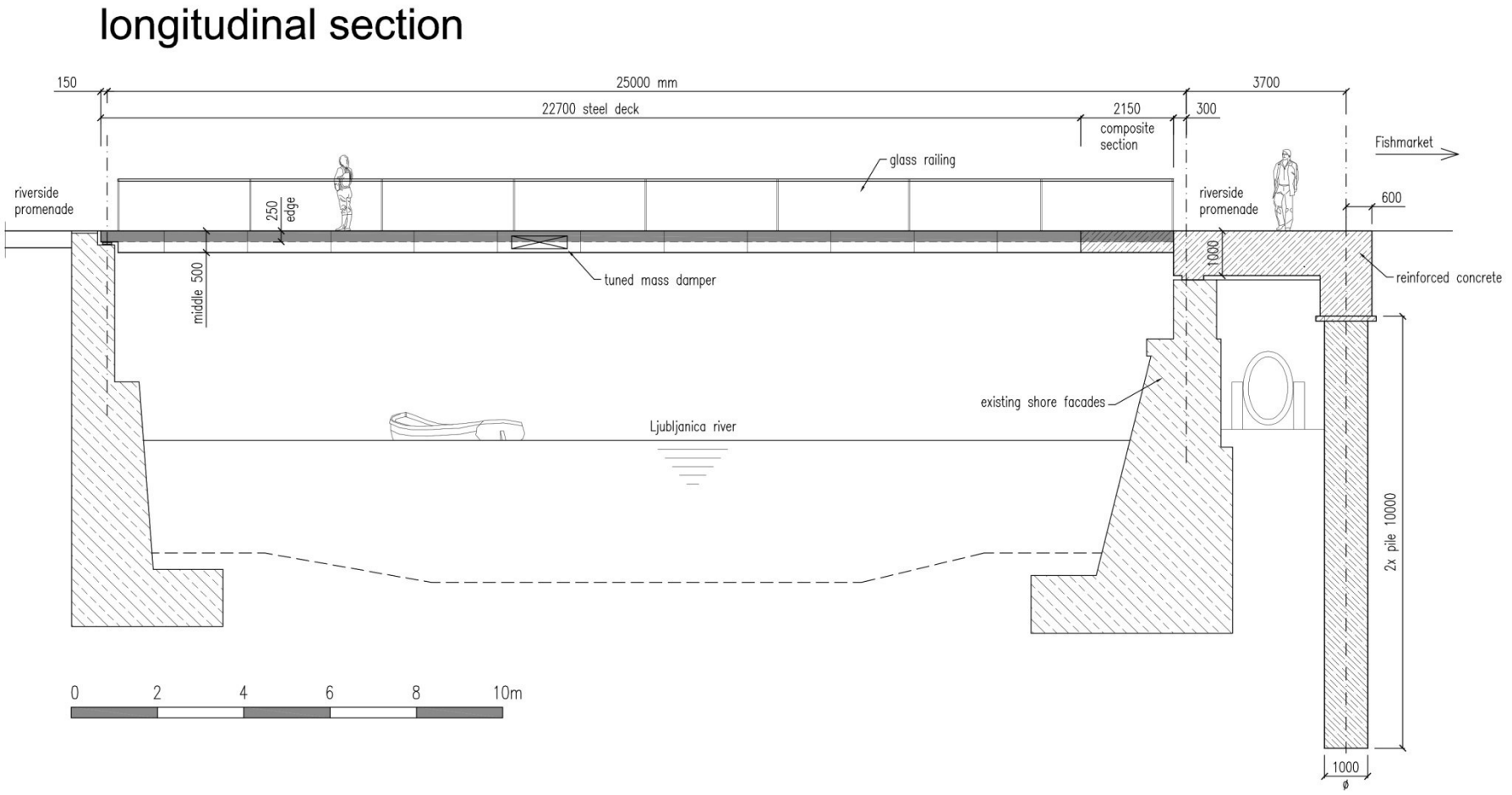
V historickom centre Ľubľany spája od roku 2014 oba brehy rieky *Ljubljanice* nový moderný minimalistický most pre peších. Nahradil starší dočasný drevený most, ktorý tam stál v rokoch 1991–2014. V roku 2012 mesto Ľubľana vyhlásilo medzinárodnú súťaž návrhov na novú lávku. Aby sa dosiahla extrémna štíhlosť mostovky (1:50), boli potrebné sofistikované

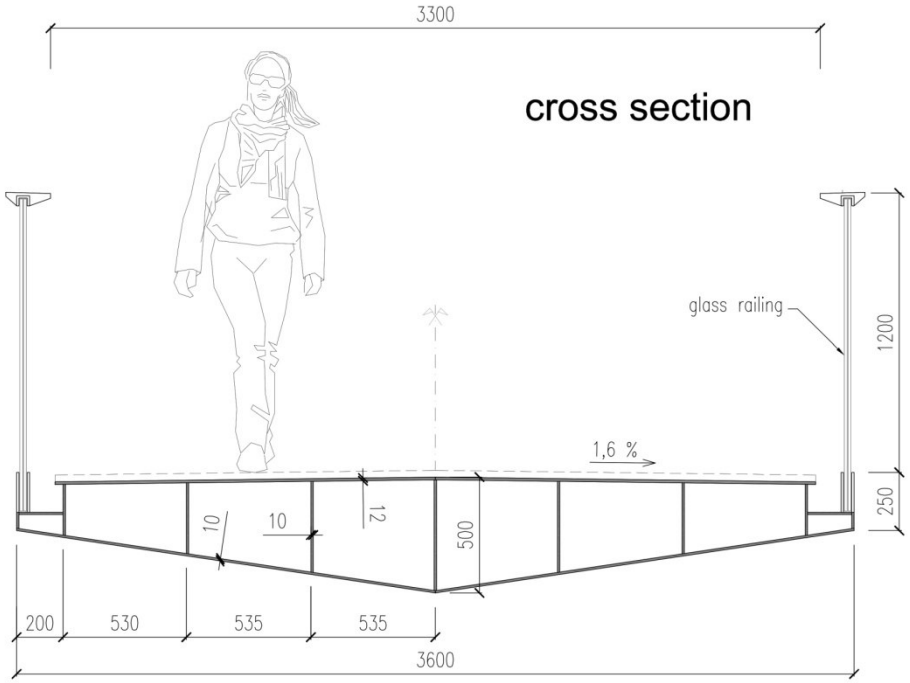


konštrukčné prístupy v návrhu lávky. Zároveň bolo nutné rešpektovať pomery pre zakladanie v stiesnenom mestskom prostredí. Prirodzene sa ponúka votknutie rozponu lávky z oboch strán. To však nebolo možné, lebo na ľavom brehu sa nachádza pod úrovňou promenády *Café Makalonca*. Preto na tejto strane je most jednoducho uložený na dve posuvné ložiská v smere osi mosta.

Na pravej strane prechádza oceľová krabicová mostovka do krátkeho železobetónového nosníka, ktorý je ukrytý pod povrchom *Cankarjevovho* nábrežia. Prechod medzi oceľovou mostovkou a žb nosníkom je sprostredkovaný spriahnutou časťou v poslednom module mostovky, ktorý je vyplnený betónom, pričom spriahnutie je realizované tŕňmi typu *Nelson*. Predpokladám aj prepojenie hornou betonárskou výstužou. Železobetónový nosník na svojom konci zachytáva značnú zvislú ťahovú silu prostredníctvom dvoch pilót priemeru 1000 mm a dĺžky 10 m. Návrhári umiestnili do mostovky aj ladený hmotnostný tlmič (*TMD tuned mass damper*) do miesta vrcholu vlny prvej vlastnej frekvencie konštrukcie.

Zvarovaná mostovka z oceľových plechov S355 má v priečnom reze lichobežníkový tvar, v strede je výška nosníka 500 mm a na okrajoch 250 mm, čo jej dáva ilúziu mimoriadne štíhleho tvaru z bočného pohľadu na most. Povrch mostovky sa skladá z niekoľkých vrstiev : alumíniové protišmykové panely, elektrická vyhrievaná fólia a epoxidový náter. Vrstvené bezpečnostné sklené zábradlie je bez stĺpikov votknuté do puzdra z nerezovej ocele. V kovovom nehrdzavejúcom madle je ukryté osvetlenie chodníka. Všetky základné tvary sú zrejmé z pozdĺžneho a priečneho rezu.





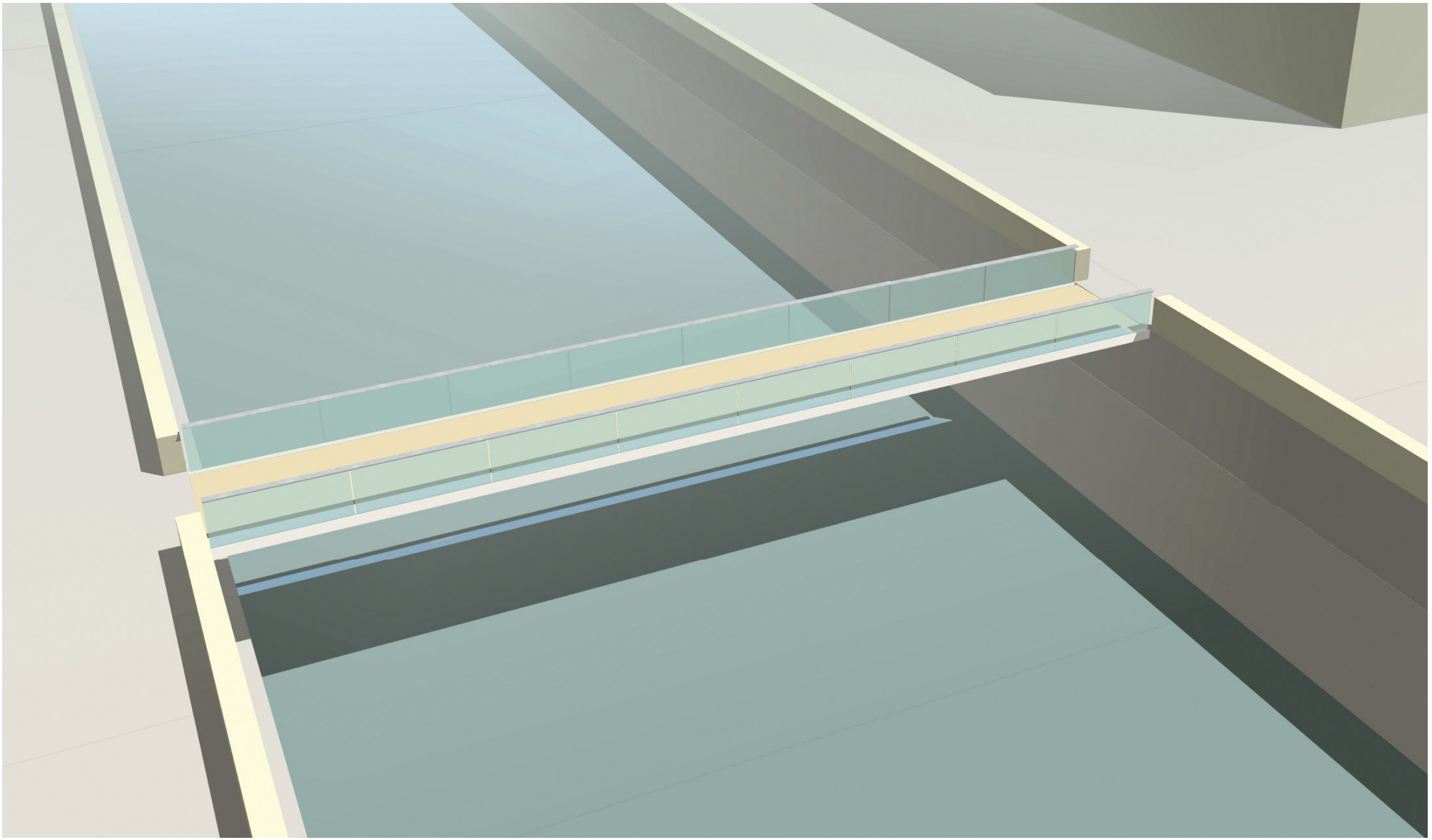
IDENTIFIKAČNÉ A TECHNICKÉ ÚDAJE MOSTA

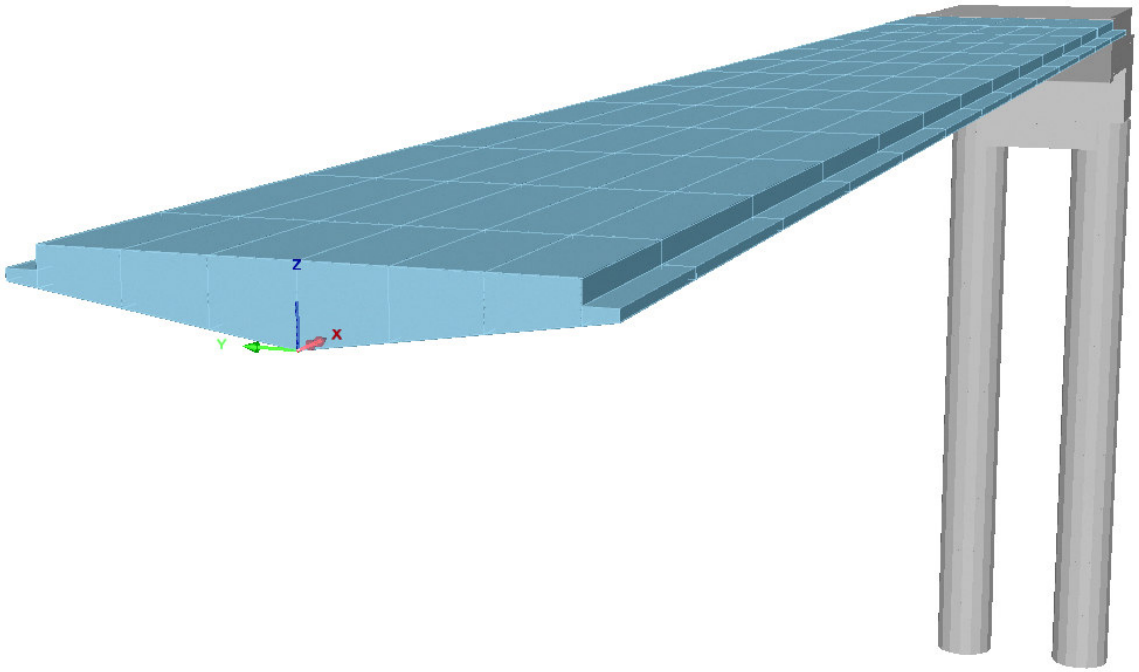
Názov mosta :	Ribja brv footbridge over Ljubljanica river
Investor :	mesto Ľubľana (City of Ljubljana)
Náklady :	660 000 eur
Ukončenie výstavby :	2014
Typ mosta :	rámový
Zakladanie :	opory, pilóty
Architekti :	Arhitektura d.o.o., Ljubljana Arch. Peter Gabrijelčič Arch. Boštjan Gabrijelčič
Konštrukcia :	Ponting d.o.o., Maribor Ing. Viktor Markelj, PhD. Ing. Gregor Cipot
Spolupráca :	Arch. Tomaž Budkovič Ing. Daniel Zorec Ing. Simon Sever
Zhotoviteľ :	Makro 5 gradnje d.o.o., Koper

VÝPOČTY

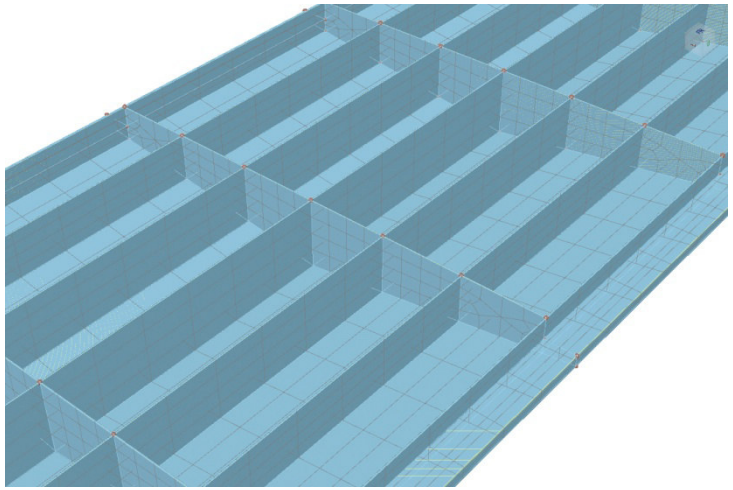
Na moste sme zrealizovali výpočty niektorých základných kombinácií, hlavne zaťaženie davom v hodnote 5,0 kN/m^2, lebo most sa nachádza v oblasti možného veľkého pohybu ľudí v centre hlavného mesta. Vybudovali sme pomerne podrobný model MKP (*FEM*) s nelineárnymi materiálovými vlastnosťami uloženia pilót v zemine. Zamerali sme sa na dynamické správanie lávky vzhľadom na vysokú štíhlosť lávky. Vstupné údaje pre ladený hmotnostný tlmič sme rozdelili do dvoch bodov, lebo sa nám to viac hodilo vzhľadom na výstavbu výpočtového modelu. Deklarované parametre TMD : 1500 kg, pružina 397 kN/m, tlmenie 6,9 kNs/m. Použité parametre TMD v tomto elaboráte : 2x750 kg, 2x195 kN/m, 2x17 kNs/m vychádzajú z odporúčaných vzorcov.

Dynamické vlastnosti sme testovali pomocou skupiny šiestich vandalsky sa správajúcich chodcov (našťastie len v počítači), ktorí sa snažia synchronicky rozkmitať most v jeho najnepriaznivejšej frekvencii silou 280 N na jednu osobu. Určili sme zrýchlenia, ktoré tým vzniknú na moste a tie sa dajú porovnať s prípustnými tabuľkami normových predpisov. Výpočty prebiehali bez a za pomoci ladeného hmotnostného tlmiča.

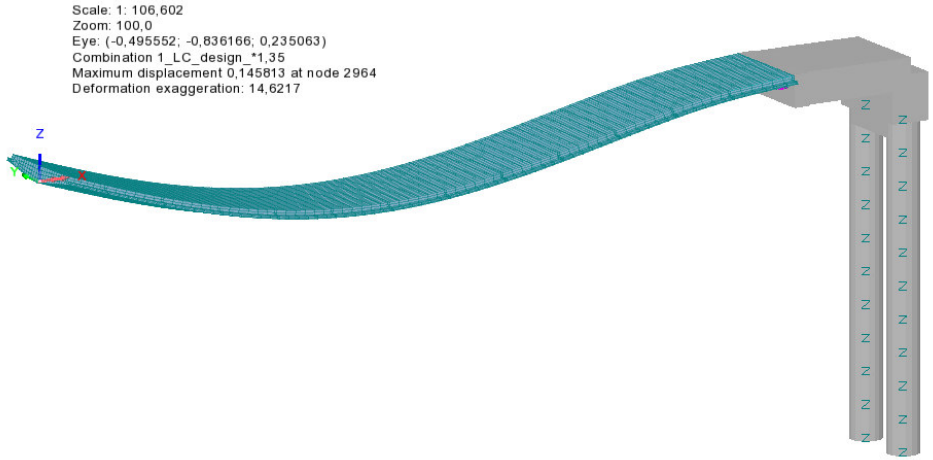




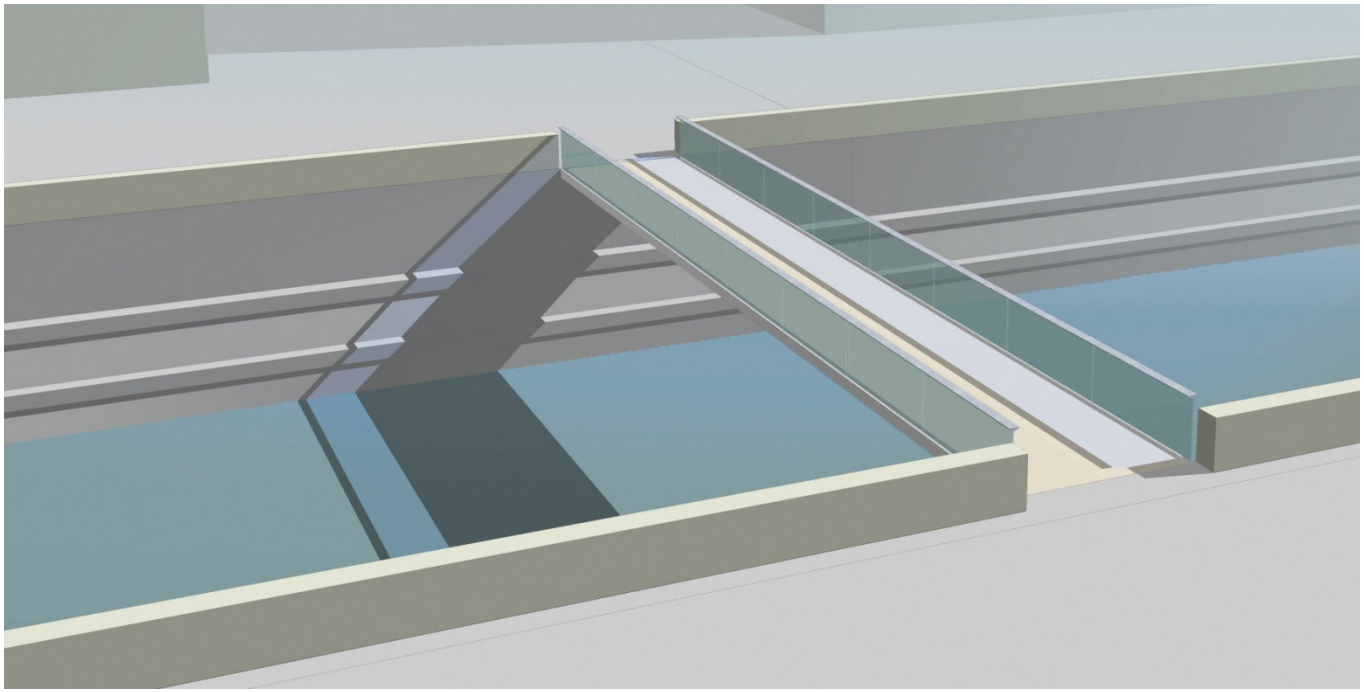
↑ Základný model MKP

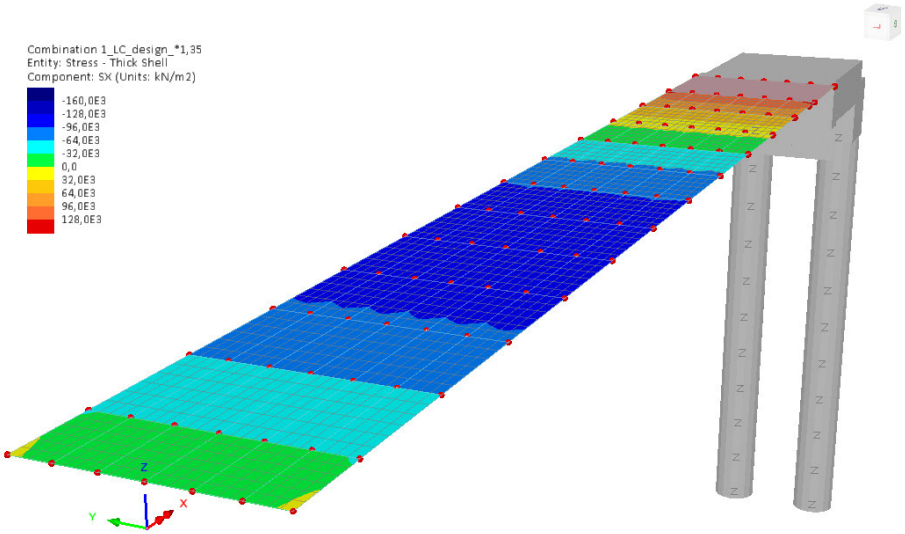


↑ Detail modelovania prvkov stuženia bez zobrazenia hornej platne

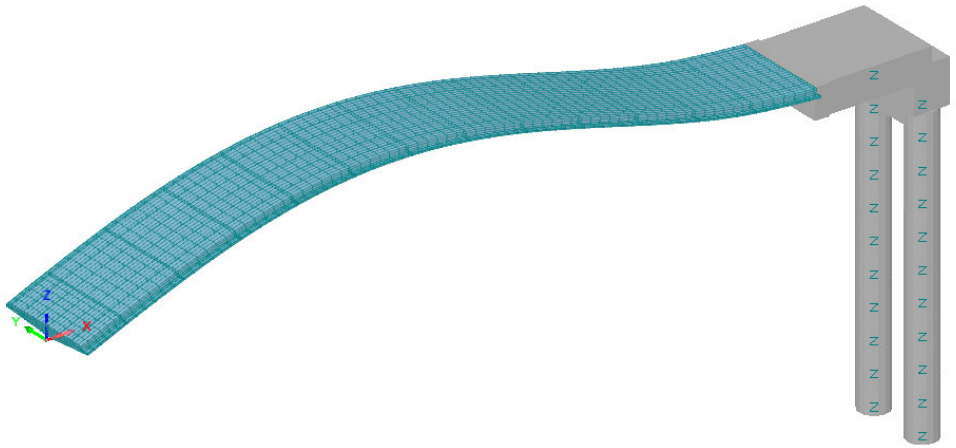


Tvar priehybovej krivky pre plné zaťaženie chodcami (prevýšené) →

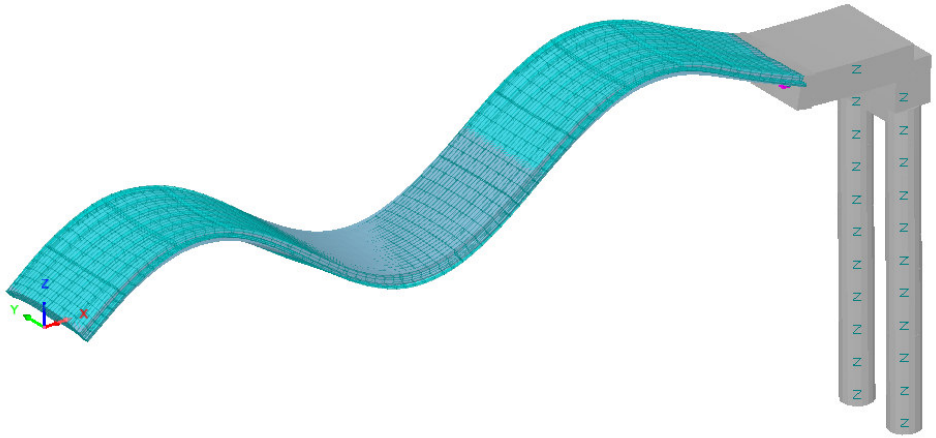




Napätie „σ„ Sx [kN/m^2] v hornej oceľovej platni pre návrhovú kombináciu s plnými chodcami →



↑ Tvar tretej vlastnej frekvencie f_3 = 2,57 Hz

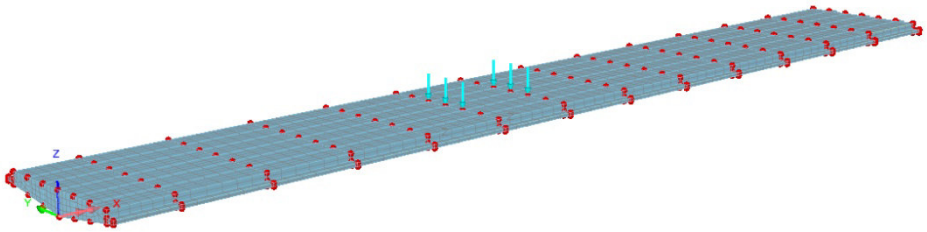


↑ Tvar piatej vlastnej frekvencie f_5 = 11,59 Hz

Mass participation factors

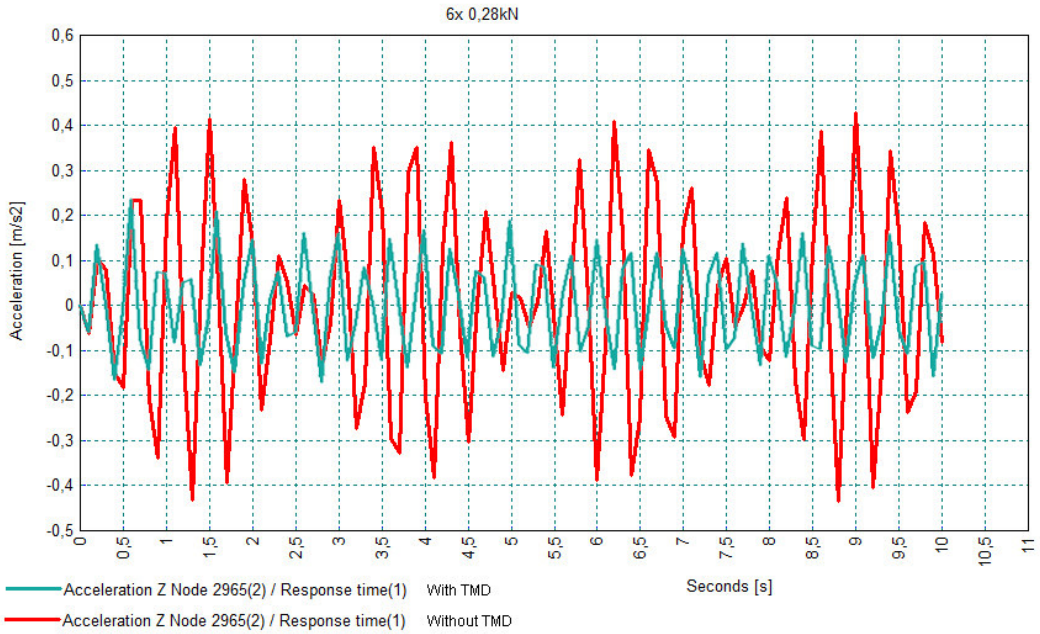
Mode	Mass PF X	Mass PF Y	Mass PF Z	Frequency [Hz]	Period
1	3,49169E-07	2,54504E-13	0,0448641	1,39597	0,716349
2	8,26524E-10	6,18593E-16	2,7284E-08	1,42329	0,702598
3	2,65961E-05	1,92925E-11	0,335869	2,57642	0,388135
4	0,000362613	2,03367E-09	0,00593746	7,83261	0,127671
5	4,32095E-08	0,0168044	2,0709E-06	11,5887	0,0862909

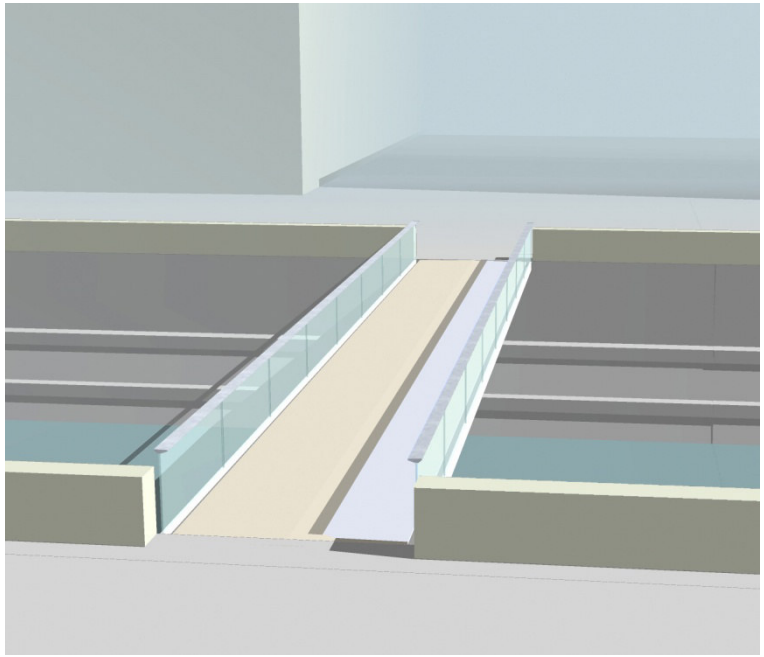
↑ Energetické vyhodnotenie dynamických vlastností



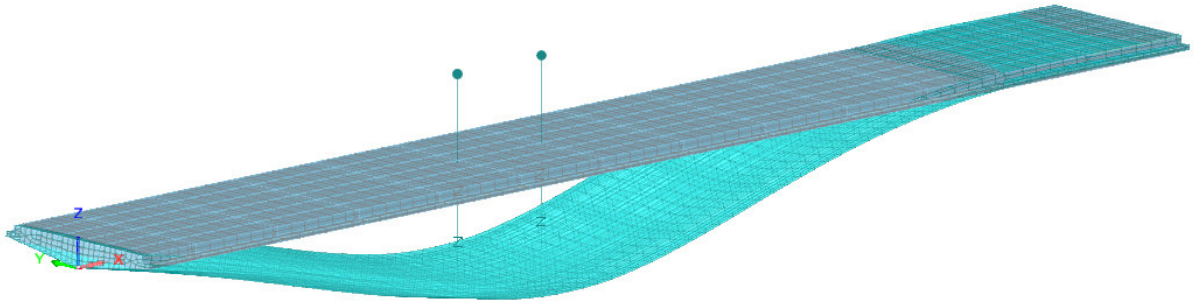
↑ Poloha šiestich chodcov pri synchronickom rozkmitávaní mostovky

Poznámka : Prvé dve vlastné frekvencie patria tlmiču, konštrukčné frekvencie začínajú od f_3





↑ Priebeh zrýchlení od excitácie 6 chodcov v synchronizovanom budení vo frekvencii 2,57 Hz .
Červená krivka predstavuje zrýchlenia bez tlmiča a zelená so zabudovaným tlmičom



↑ Tvar kmitania od excitácie 6 chodcov. Tmavozelené body predstavujú tlmič TMD, ktorý kmitá v protifáze voči mostovke

ZÁVER

Tvorcom mosta sa podarilo zrealizovať extrémne štíhlu konštrukciu. Oceľová mostovka s dĺžkou 25 m a celkovou hmotnosťou 26 ton bola zostavená v dielni v jednom kuse, prepravená na miesto a nainštalovaná do svojej konečnej polohy. Vzhľadom na exponovanú polohu mosta v centre historického jadra bolo logické využiť najlepšie materiály a poskytnúť riešiteľom priestor na sofistikované technické riešenia a architektonické stvárnenia.

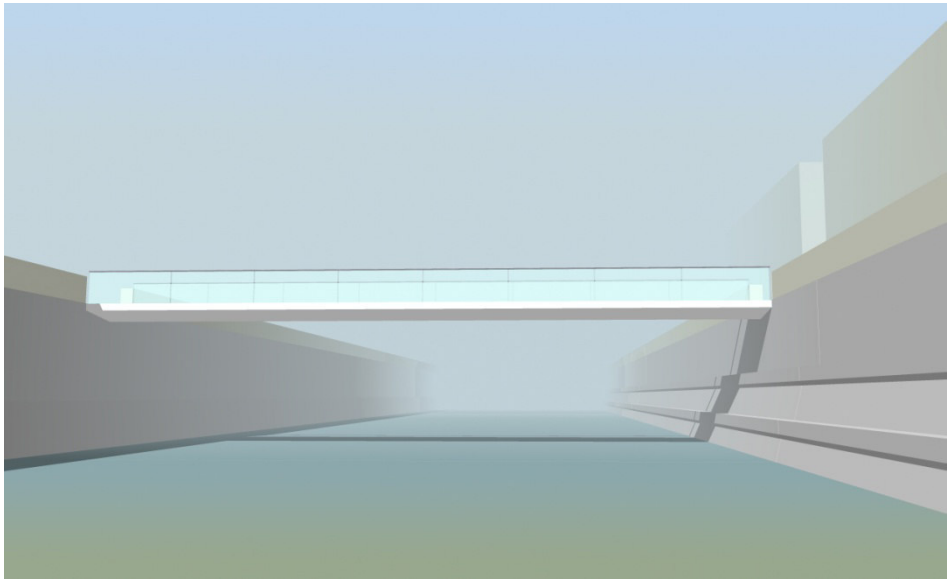
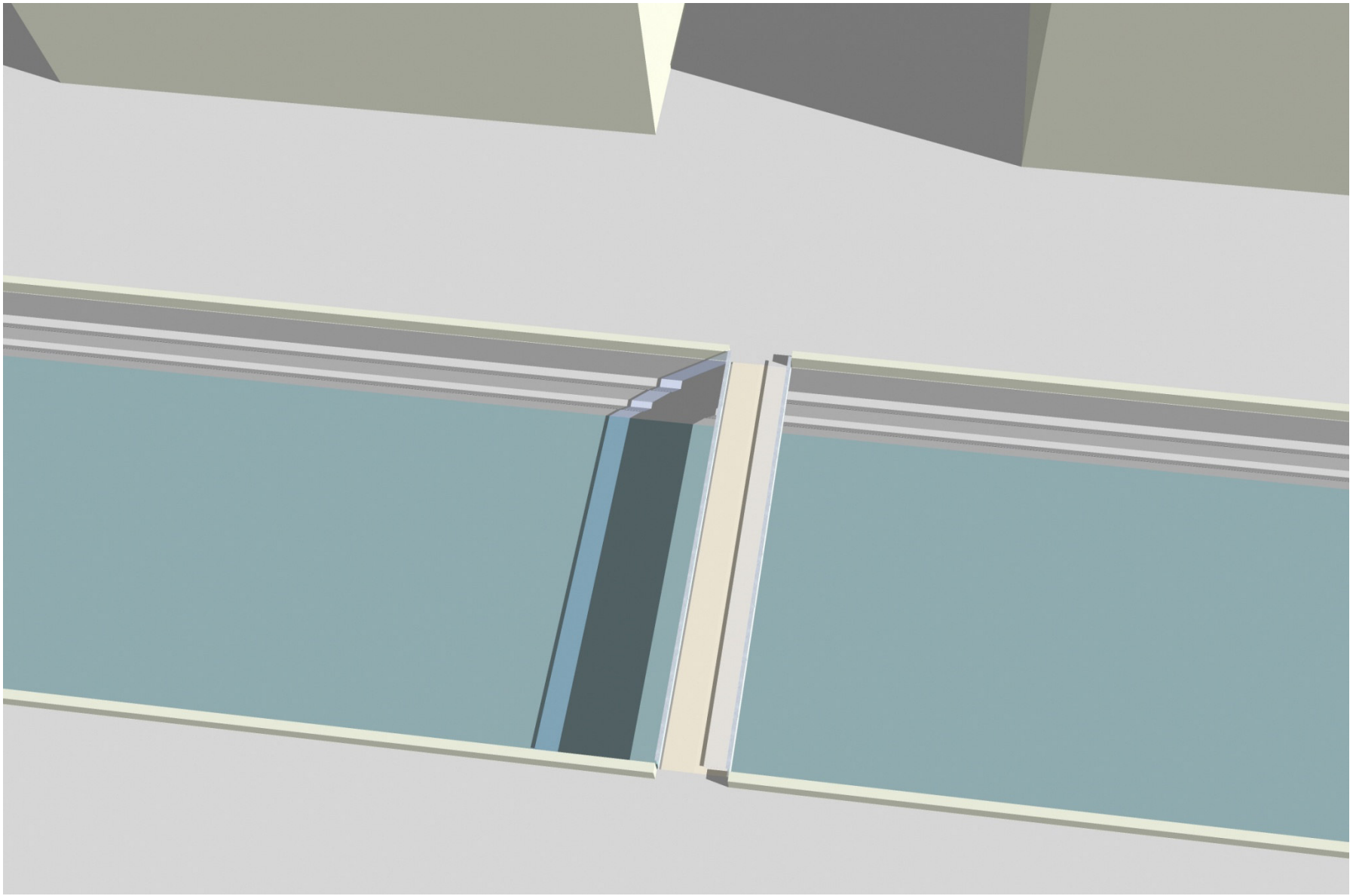
Niektoré ZDROJE, použité pri tvorbe článku :

[1] Viktor Markelj, Peter Gabrijelčič: Footbridge in the old centre of Ljubljana or how thin can bridge be | Footbridge, Conference 6.–8.9.2017, TU – Berlin
[2] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
[3] STN EN 1991–2 Zaťaženie mostov dopravou
[4] Fish market footbridge, Ljubljana, ARQUA, 2015
[5] Footbridge in the old centre of Ljubljana, 3/2022 e–mosty.cz

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, Microsoft Excel, PDF Creator, IrfanView, Corel Draw



© Ing. Vladimír Budinský SSK, Banská Bystrica, VIII/2026