

PROJEKT NOVÉHO MOSTU PŘES VLTAVU V PRAZE TROJI STRUCTURAL DESIGN OF THE NEW BRIDGE ACROSS VLTAVA RIVER IN PRAGUE TROJA

**LUKÁŠ VRÁBLÍK, VOJTĚCH HRUŠKA,
LIBOR KÁBRT, MILAN KODET,
ROMAN KOUCKÝ, LADISLAV ŠAŠEK**

Součástí stavby č. 0079 Městského okruhu v úseku Špejchar–Pelc-Tyrolka je i nové přemostění řeky Vltavy mezi Holešovicemi a Trojou. Prezentovaný projekt mostu vychází z vítězného návrhu architektonicko-konstrukční soutěže z roku 2006.

One part of the City Ring Road between Špejchar and Pelc-Tyrolka is also a new bridge across the river Vltava from Holešovice to Troja. The presented structural design is based on the winning architectural and construction competition design from the year 2006.

POPIS MOSTU, KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Nový most přes Vltavu v Praze Troji (obr. 1) převádí prodlouženou ulici Partyzánskou směrem ke křižovatce s městským okruhem na trojském břehu a dále k stávající ulici Povltavské. Ve střední části mezi táhly oblouku je vedena tramvajová trať, po stranách pak dvojice jízdních pruhů pro oba směry a na samostatných konzolách komunikace pro pěší a cyklisty.

Konstrukční řešení

Sdružený městský most překračuje koryto řeky Vltavy hlavním polem o rozpětí 200,4 m a inundačním polem o rozpětí 40,4 m. Celková šířka mostu je 35,25 m.

Konstrukce hlavního pole mostu působí staticky jako prostě uložený ocelový oblouk (S460 NL) s táhlem tvořeným podélným ocelovým nosníkem a předpjatou betonovou deskou (C50/60-XF2) podporovanou prefabrikovanými příčnicíky (C60/75-XF2). Mostovka je zavěšena na oblouku pomocí síťovitě uspořádaných závěsů, jež jsou tvořeny ocelovými uzavřenými lany kruhového průřezu $\varnothing 70$ mm v osových vzdálenostech cca

1,4 m. Spojité uspořádání závěsů (pavučinová síť) zaručuje rovnoměrnější roznesení zatížení, a tedy i snížení lokálních namáhání oblouku a desky mostovky.

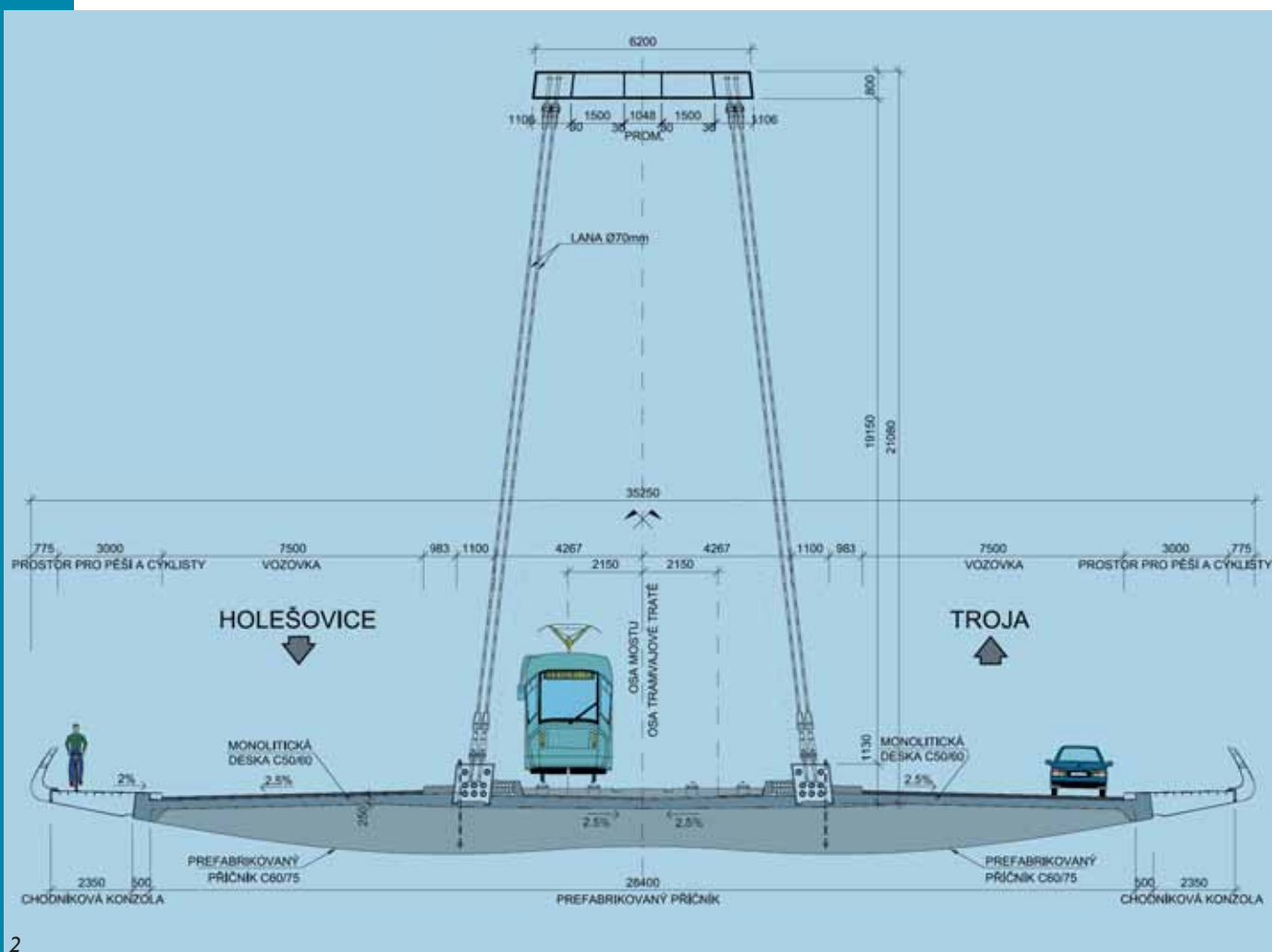
Plochy svařovaný ocelový oblouk vzeptěti 20 m (1/10 rozpětí hlavního pole) má neprůlezný komorový příčný průřez proměnné výšky od 800 do 4 500 mm a šířky od 1 100 do 6 200 mm ve vrcholu. V podélném směru je střední tramvajový pás lemován konstrukcí ocelových táhel (s vnitřním předpětím a vyplněním

betonem), která oddělují prostor vozovky a tramvajové těleso.

Táhla jsou spřažena s deskou mostovky na způsob ocelové lišty působící s výztuží desky – podílejí se tak společně na přenosu vodorovné obloukové síly (v definitivním uspořádání), vnášejí předpětí do desky a zároveň částečně eliminují podélná tahová napětí v desce. Předpětí se vnáší na obou koncích do ocelové konstrukce vyplněné samozhutnitelným betonem.



Obr. 1 Vizualizace mostu
Fig. 1 Bridge visualisation



2

Monolitická deska mostovky proměnné tloušťky 250 až 390 mm je předepnuta v příčném i podélném směru. V příčném směru je deska vyztužena prefabrikovanými předpjatými žebry v osové vzdálenosti 4 m. V podélném směru jsou pod vnějším okrajem vozovky navrženy

monolitické ztužující nosníky. V oblasti krajních podpor hlavního pole je navržen náběh střední části monolitické desky až na celou výšku příčnicku. Prefabrikované předpjaté příčnicky mají konstantní tloušťku 400 mm a proměnnou výšku maximálně 1500 mm. Montážní připojení

příčnicků k ocelovým táhlům mostovky je navrženo pomocí zabetonovaných předpínacích tyčí.

Komunikace pro pěší a cyklisty je umístěna na samostatné konstrukci tvořené ocelovými konzolami a přímo pochozí ocelovou deskou.

Inundační pole je navrženo jako předpjatá monolitická dvoutrámová konstrukce působící jako prostý nosník. Do bednění podélných trámů se vkládají prefabrikované předpjaté příčnicky stejné konstrukce jako v hlavním poli.

Založení mostu na obou březích řeky je hlubinné, použity budou vrтанé velko-průměrové piloty \varnothing 1,5 a 1,2 m vetknuté do navětralých břidlic v podloží třídy R3.

Architektonické řešení

Řešení nového trojského mostu vychází z těchto základních „předpokladů“:

- široký plavební profil situovaný u levého břehu prakticky vylučuje „klasické pražské uspořádání“ s lichým počtem polí a největším rozpětím uprostřed mostu,



3



- zadaná stavební výška mostu (2,1 m) daná nejnižší možnou kótou a stanovenou niveletou tramvajové trati v podstatě vylučuje použití konstrukce s horní mostovkou (pokud by nebylo v řece několik podpor, což je nemožné vzhledem k umístění plavebního profilu),
- nosná konstrukce nad niveletou mostu není sice pro pražské mosty typická, ale takové mosty se v historii v Praze objevovaly a existují.

Návrh proto „nepřímo“ navazuje na všechny dosavadní (historické) pražské mosty a to i při zcela jiném tvaru a konstrukčním uspořádání. Důslednost konstrukční i architektonické elegance je přímým pokračováním vývoje pražských mostů. Lehká oblouková konstrukce překlenuje celou šířku toku a svým charakterem rozděluje velkou šířku mostu tak, aby při přejezdu nebo přechodu přes most působil vnímaný profil užším dojmem. Střed toku řeky Vltavy je definován nikoli „nejširším lichým polem“, ale nejvyšší částí konstrukce. Síťové uspořádání závěsů působí jako transparentní, lehká, ale tuhá stěna. Tato vlastnost umožnila navrhnout velmi subtilní konstrukci s nízkou konstrukční výškou (přibližně 1/10 rozpětí). To při daném rozpětí mostu 200,4 m a celkové šířce převáděné komunikace 33,7 m vytváří světové unikátní konstrukci.

Plochý ocelový oblouk má v podélném směru tvar kružnicového oblouku (horní plocha – konstantní poloměr, dolní plocha – složený kružnicový oblouk). Přibližně ve čtvrtinách rozpětí se oblouk rozděluje na dva uzavřené komorové průřezy.

Krajní opěry jsou masivní železobetonové konstrukce tvarované v závislosti na celkovém uspořádání mostu. Na opěry pak navazují nejen schodiště nábrežních valů a pěší komunikace, ale také zejména ocelové konstrukce konzol

Obr. 2 Vzorový příčný řez hlavním polem mostu

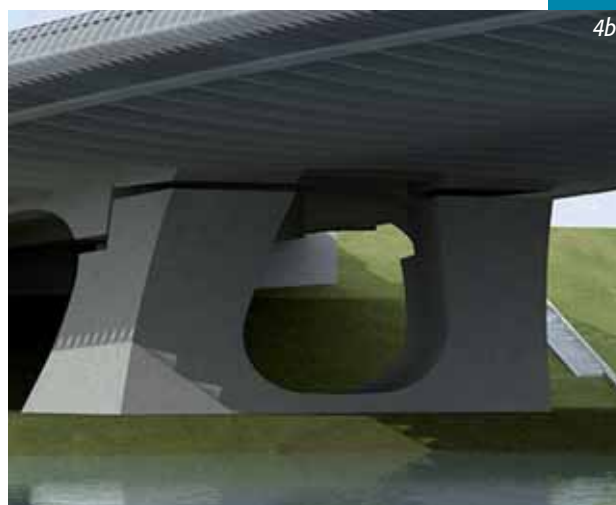
Fig. 2 Typical cross section

Obr. 3 Vizualizace mostu – uspořádání mostovky

Fig. 3 Bridge visualisation – superstructure arrangement

Obr. 4 Spodní stavba – a) krajní opěra, b) pilíř

Fig. 4 Bridge substructure – a) abutment, b) pier



chodníků na mostě a zábradlí s osvětlením, přecházející na nábreží.

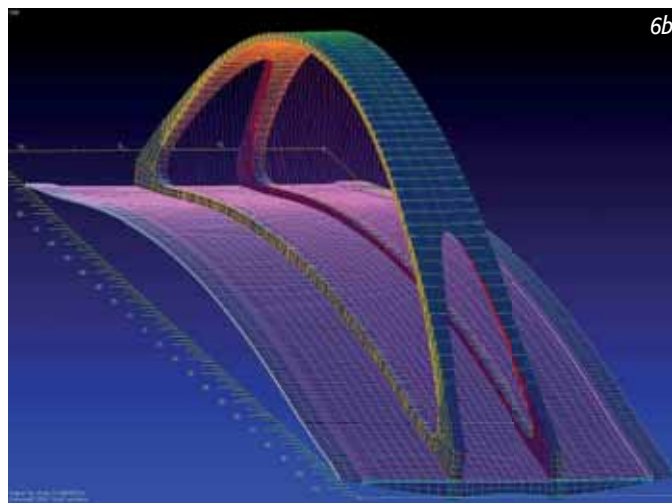
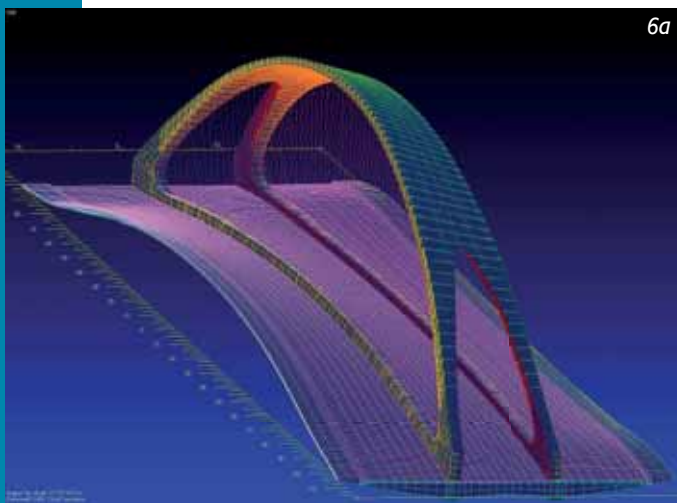
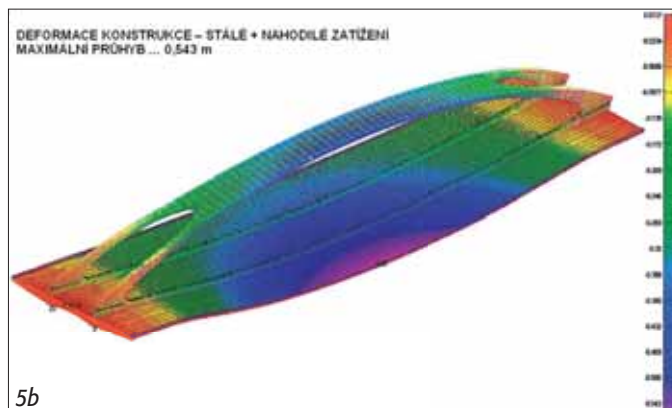
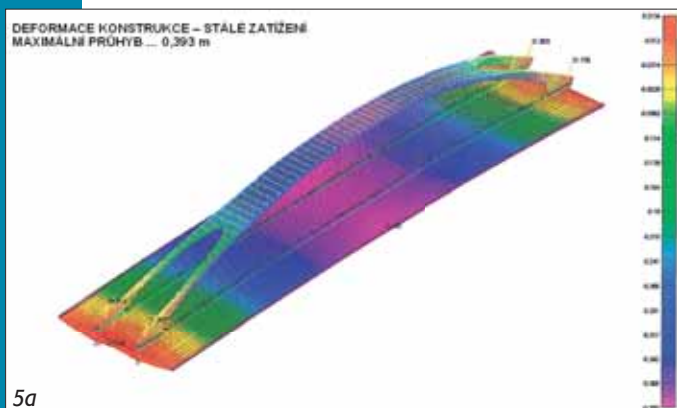
Pilíř je kolmý na most a tvarově navazuje nejen na oblouk, ale i na dvoutrámovou konstrukci krajního pole. Mohutná základna pilíře se nad povrchem terénu rozděluje obloukovou křivkou na dvě části. Každá část nese dvě ložiska (oblouku i inundačního pole). Pilíř je navržen tak, aby byl při bočním pohledu pokračováním tvaru oblouku a do jisté míry eliminoval asymetrické uspořádání mostu v podélném směru. To znamená, že tvarově je osově symetrický k levé opěře, která je zapuštěná do valu na holešovické straně. Tato symetrie vyrovnává i nestejnou výšku uložení mostu (jednotlivých ložisek oblouku) tím, že rozdělení pilíře je ve výšce shodné s výškou rozdělení levobřežní opěry. Tato výška je tak shodná pro obě místa ve vztahu k vodní hladině, nikoli k výšce ložisek.

Tvarování opěr i pilíře (obr. 4) je pro celkové řešení mostu zásadně důležité a bude nutné dbát zvýšené pozornosti při detailním řešení „spároveň“ bednění a jeho tvarování pro dokreslení celkového působení spodní stavby.

Postup výstavby

Ocelová konstrukce hlavního pole mostu bude svařena z montážních dílů (zhotovených ve výrobě) v ose mostu na trojském břehu. Montáž ocelového skeletu obloukového mostu bude probíhat symetricky směrem od konců do jeho středu. Během montáže oblouku a jeho výsuvu je nutné doplnit montážní ztužení pro zajištění dostatečné tuhosti systému. Hotová ocelová konstrukce bude následně pomocí soulodí vysunuta přes řeku a osazena na definitivní ložiska.

Realizace konstrukce mostovky bude probíhat nad řekou. Na vysunutou konstrukci budou přimontovány prefabrikované příčníky, které budou sloužit jako podpora pro bednění monolitické desky mostovky. Ta bude betonována symetricky od obou podpor současně pomocí dvou betonovacích vozíků délky 16 m. Střední část desky mezi táhly bude v jednotlivých etapách realizována s předstihem pro zaručení spolupůsobení s příčníky pro přenos zatížení od betonáže krajních částí desky. Po zatvrdnutí betonu desky budou předepnuty kabely příčného předpětí. Krajní podporové části desky



mostovky budou provedeny na pevné skruži na břehu. Po vybetonování celé mostovkové desky budou předepnuty kabely podélného předpětí.

Nosná konstrukce inundačního pole bude vybetonována na pevné skruži (prefabrikované příčnický vkládány do bednění) těsně po vysunutí ocelového oblouku, aby mohla sloužit jako přístupová cesta pro dovoz materiálu pro betonáž desky hlavního pole.

STATICKÁ A DYNAMICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCE

Popis výpočtu konstrukce

Pro detailní analýzu konstrukce bylo nutné vytvořit celou řadu výpočetních modelů pro stanovení účinků postupu výstavby, změny statického působení během výstavby, posouzení globálního chování konstrukce a pro posouzení aerodynamické stability konstrukce.

Ve výpočtech byla uvažována geometrická nelinearita – řešení podle teorie II. řádu a nelineární řešení závěsných prvků jako lan s průvěsem s osovou tahovou silou respektující tzv. tahové

zpevnění – „tension stiffening“. Veškeré výsledky jsou porovnávány se zjednodušenými výpočty na modelech, u kterých je známé přesné analytické řešení.

Závěsy mostu jsou modelovány jako nelineární prvky – lana s průvěsem schopná přenášet pouze tahové namáhání. Podstatou lanového působení prvku je malá ohybová tuhost. Prvek (lano) se působením zatížení (vlastní tíha lana) deformuje – prověsí. Vzhledem k velmi malé ohybové tuhosti lano nepřenáší ohybové momenty a je namáháno pouze axiální tahovou silou. Závěsy jsou v montážním stavu napnuté (při zvětšující se tahové síle v lanu je prvek tužší) na cca 0,1 meze pevnosti lana, což zaručuje jejich minimální průvěs (cca 1/1000 délky závěsu). Při takto malé hodnotě průvěsu je namáhání lana ohybovými momenty minimální (vznikající ohybový moment je dán součinem druhé derivace průhybové čáry a ohybové tuhosti lana). Pro jednotlivá lana byly vytvořeny jejich příčnickové plochy pro stanovení účinků pohyblivého zatížení a určena tzv. matice ovlivnění popisující vzájemnou interakci závěsných lan.

Obr. 5 Deformace nosné konstrukce – stálé a náhodilé zatížení

Fig. 5 Superstructure deformation – dead and live load

Obr. 6 Modální analýza konstrukce – 1. a 2. vlastní tvar

Fig. 6 Modal analysis – 1st and 2nd natural mode

Namáhání a deformace konstrukce

Základní koncepce mostu je založena na nosném ocelovém oblouku a betonové mostovce, která je spojitě podepřena pomocí síťových závěsů. Nesymetrické zatížení je přenášeno kroucením oblouku mostu.

Z hlediska namáhání konstrukce splňuje požadavky pro jednotlivá zatížení a jejich kombinace dle příslušných norem – pro ocelový oblouk a táhla ČSN 73 1401 a ČSN 73 6205, pro betonovou předpjatou mostovku (deska a příčnický) pak napětová omezení dle ČSN 73 6207 (konstrukce je navržena jako omezeně předpjatá).

Nedílnou součástí výpočetní analýzy jsou i montážní stavy – návrh a posou-

zení montážního ztužení, výsuv konstrukce, připojování prefabrikovaných příčníků atd.

Výpočet deformací je proveden na prostorových modelech – geometrická (teorie II. řádu) i fyzikální (závěsy zadány jako lanové prvky s průvěsem, přenášeji pouze tahové namáhání) nelinearita je ve výpočtu zohledněna. Ve smyslu normy ČSN 73 6207 je maximální přípustná deformace předpjaté betonové konstrukce v podélném směru mostu pro účinky nahodilého zatížení $w_{dov} = L/600 = 200,4/600 = 0,334$ m. Průhyby od stálého zatížení (0,393 m) budou dle projektu eliminovány nadvýšením. Pro maximální symetrické nahodilé zatížení na obou polovinách mostu je hodnota maximálního průhybu **0,098 m**; pro nesymetrické pak **0,150 m**.

Dynamická a stabilitní analýza konstrukce

Dynamická analýza byla provedena ve třech základních etapách – modální analýza (zjištění vlastních frekvencí a tvarů konstrukce), účinky pohyblivého zatížení (numerické řešení vzájemné interakce kmitání konstrukce a přejezdějících vozidel) a řešení aerodynamického chování konstrukce.

Frekvence f [Hz]	Popis
0,751	1. kroucení – oblouk a mostovka ve fázi
0,940	1. ohyb
1,005	1. kroucení – oblouk a mostovka v protifázi
1,298	2. kroucení – oblouk a mostovka v protifázi
1,420	2. kroucení – oblouk a mostovka ve fázi

Z výsledků modální analýzy (obr. 6) vyplynulo, že je nutné z důvodů nižší velikosti torzní frekvence věnovat zvýšenou pozornost možné ztrátě aerodynamické stability. Byly provedeny zjednodušené výpočty založené na empirických vztazích a odhadech derivací součinitele vztaku (pro takovéto výpočty vychází kritická rychlost pro ztrátu stability torzním flutterem 108 m/s), zároveň proběhla detailní analýza ve spolupráci s VZLÚ – měření charakteristik na sekčním modelu a následně numerické výpočty, které potvrzují, že ke ztrátě aerodynamické stability nedojde při rychlosti nižší než 100 m/s (360 km/h). Připomeňme jen, že by měla být splněna normou definovaná podmínka, aby kritická rychlost

větru byla vyšší než 1,25násobek referenční rychlosti větru v místě posuzovaného mostu. Toto je pro navrhovanou konstrukci dle výsledků výpočtů a měření bezpečně splněno.

Výpočet stability konstrukce probíhal ve dvou krocích. Nejdříve byl proveden výpočet klasickým způsobem dle Eulerovského pojetí stability způsobené bifurkací rovnováhy (bifurkace = rozdvojení). Při tomto způsobu se hledal násobitel daného zatížení (tzv. kritický násobek), při kterém dojde ke ztrátě stability. Přitom však bylo uvažováno, že stálé zatížení (vlastní tíha, ostatní stálé, předpětí) zůstává beze změny.

Druhý výpočetní postup vycházel z řešení konstrukce podle teorie II. řádu a určení rezervy v napětí pro dané zatížení k dosažení meze kluzu použité oceli v rozhodujících částech mostu. Pro výpočet byly uváženy možné výrobní nepřesnosti. Jejich zadání bylo vždy vztaženo k příslušnému vlastnímu tvaru (normování vlastních tvarů dle maximálních hodnot imperfekcí). Samotný výpočet pak probíhá jako iterační proces, kdy je nezbytné stále kontrolovat a porovnávat výsledky dle teorie II. řádu s výsledky přibližné metody (stanovení účinků II. řádu z výsledků statického výpočtu dle teorie I. řádu pomocí součinitele $\varphi = 1/(1-H/H_{kr})$).

Vzhledem k malému vzepětí je nutné konstrukci řešit jako **ploché oblouk s uvážením stlačení střednice**.

ZÁVĚR

Představovaná mostní konstrukce směle překračuje řeku Vltavu v Tróji jedním polem o délce více než 200 m. Bude významným architektonickým prvkem nejen stávající zástavby, ale hlavně plánované zástavby luxusními bytovými a kancelářskými komplexy. Most samozřejmě zvýší počet významných pražských mostů a bude bezpochyby jedním z nejzajímavějších.

Navržený systém – oblouk přes celou šířku řečiště se síťovými závěsy – zohledňuje zároveň v porovnání s jinými aplikovatelnými systémy neopominutelné bezpečnostní požadavky v nejvyšší míře – žádné podpory v řečišti (napadnutelné po řece), množství šikmých závěsů (kdy při ztrátě funkce i několika z nich nedochází k závažné ztrátě únosnosti celé konstrukce a kdy takové narušení je snadno opravitelné), stabilizující úči-

nek soustavy šikmých závěsů na mostní systém.

Konstrakční uspořádání, konfigurace mostu a použité materiály předurčují ojedinelost této konstrukce v celosvětovém měřítku.

Taková konstrukce samozřejmě vyžaduje zvýšenou pozornost při detailní statické a dynamické analýze. Je nutné respektovat účinky nelineárního chování konstrukce a provést analýzy všech možných (a identifikací nemožných) návrhových a havarijních situací. Výsledky těchto analýz jasně prokázaly, že navržená konstrukce splňuje veškerá normová kritéria z hlediska přípustných hodnot napětí i velikostí deformací.

Široké spektrum provedených analýz opět poukázalo na samozřejmou nutnost korelovat výsledky z komplexních MKP modelů s exaktními analytickými přístupy, které však dávají nejpřesnější řešení. Složitě MKP modely se stávají slabinou rozsáhlých analýz v případech, kdy nejsou respektovány základní okrajové podmínky, zvláště ve vztahu k navrhovaným konstrukčním detailům. Proto je nanejvýš nutné opatrně zacházet s moderními výpočetními nástroji a vyloučit tak možné fatální desinterpretace výsledků.

V rámci výpočtových analýz byly použity výsledky řešení projektu č. 103/06/0674 Grantové agentury České republiky.

*Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.
e-mail: lukas.vrablik@mottmac.com*

*Ing. Milan Kodet
e-mail: milan.kodet@mottmac.com*

*Ing. Vojtěch Hruška
e-mail: vojtech.hruska@mottmac.com*

*Ing. Ladislav Šašek, CSc.
e-mail: ladislav.sasek@mottmac.com*

*všichni čtyři:
Mott MacDonald Praha, spol. s r. o.*

*Národní 15, 110 00 Praha 1
tel.: 221 412 876*

*Ing. akad. arch. Libor Kábrt
e-mail: libor.kabrt@koucky-arch.cz*

*Doc. Ing. arch. Roman Koucký
e-mail: roman@koucky-arch.cz*

oba:

*Roman Koucký architektonická kancelář, s. r. o.
Bruselská 13, 120 03 Praha 2
tel.: 222 515 754*