

LÁVKA Z POHLEDU PROJEKTANTA

TEXT Lukáš Vráblík, Ondřej Matoušek, Petr Harazim

Nová komunikace je navržena a realizována v šířkovém uspořádání definovaném šířkou průjezdního/průchozího prostoru mezi obrubami 3 m. Na levém břehu komunikace navazuje na ulici 1. máje v Lužci nad Vltavou, odkud stoupá a po půdorysném levotočivém oblouku přechází do přímé směrem k lávce. Za lávkou na pravém břehu směrem k obci Bukol komunikace klesá a levým půdorysným obloukem a následujícím přímým úsekem se napojuje na stávající cestu. Na lávce je komunikace vedena v přímé a ve vrcholovém zakružovacím oblouku. Úhel křížení mezi osou komunikace a teoretickou osou toku řeky Vltavy je cca 83°.

Popis konstrukce lávky

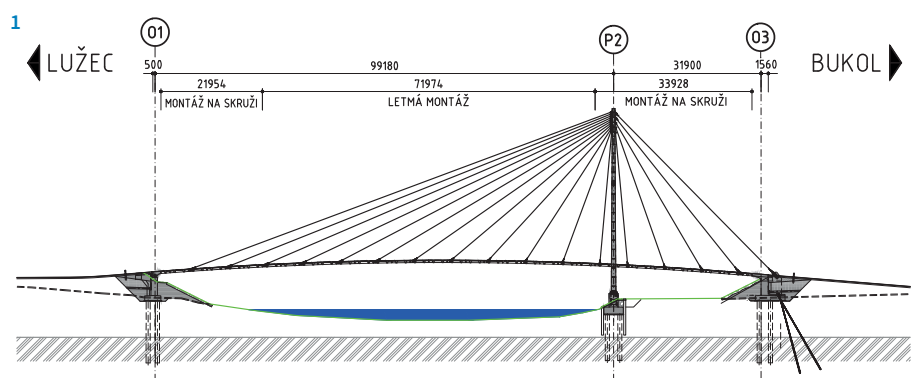
Založení lávky

Celá mostní konstrukce se nachází v zátopovém území, proto bylo při návrhu založení uváženo riziko podemletí a promývání hrubozrnných základových půd při zvýšených průtocích Vltavy. S ohledem na typ konstrukce (jedná se o lávku bez podpor v toku, obr. 1 a 2) a geotechnické podmínky v místě stavby bylo navrženo založení opěr i základu pylonu jako hlubinné, na pilotách Ø 880 mm, které jsou vetknuty do poloskalní horniny R4 nacházející se v hloubce cca 9 m pod stávajícím terénem.

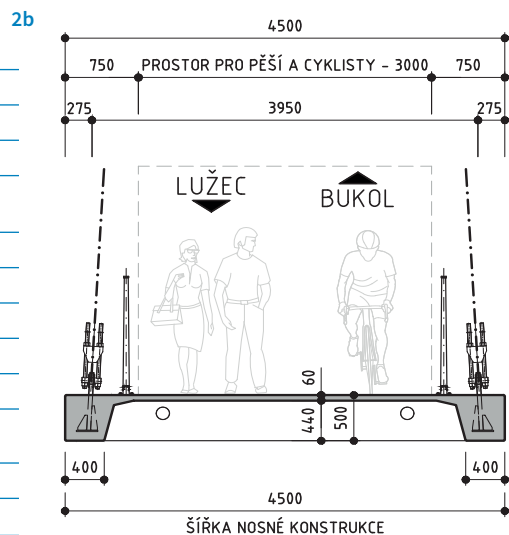
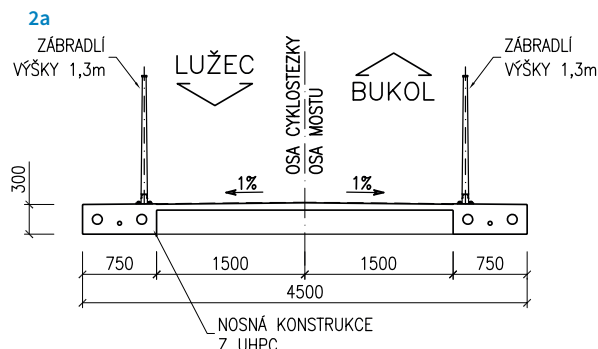
Zachycení tahových reakcí od reverzního závěsu u opěry O3 zajišťuje

šest trvalých zemních kotv: tři kotvy s odklonem od svislice o 15° a další tři kotvy s odklonem 30°, aby se nekoncentrovalo napětí v podloží. Zemní kotvy jsou vetknuty do skalního podloží, délka kořene ve skalním podloží je minimálně 8 m. Volná délka kotv je 10,33 m u kotv s odklonem od svislice 15°, resp. 11,33 m u kotv s odklonem

od svislice 30°. V každé zemní kotvě je šest lan Lp 15,7 (St 1640/1860 MPa), jednotlivá lana jsou v PE obalu vyplněném antikoročním tukem. Průměr kořene zemní kotvy je 156 mm. Všechny kotvy jsou opatřeny dopínací objímkou. Hlava kotvy je opatřena víkem, uzavřený prostor byl vyplněn pružnou protikorozní hmotou.



1 Podélný řez mostem **2** Vzorový příčný řez: a) původní návrh, b) skutečné provedení
1 Longitudinal section of the bridge
2 Typical cross-section: a) original design, b) actual implementation



Investor	Obec Lužec nad Vltavou
Architektonický návrh	Petr Tej, Marek Blank
Generální projektant RDS	Novák & Partner, s. r. o. a Valbek, spol. s r. o.
Projektant DSP, PDPS, výkon AD	Petr Tej, Marek Blank, Jan Mourek Architekti a inženýři Praha, s. r. o.
Výrobně technická dokumentace UHPC panelů	Petr Tej, Jan Mourek Bridge Structures, s. r. o.
Technický dozor stavebníka	IBR Consulting, s. r. o.
Generální zhotovitel stavby	Hochtief CZ, a. s.
Hlavní subdodavatelé	TBG Metrostav, s. r. o. a Lemonta, s. r. o.
Zhotovitel zakládání (piloty a zemní kotvy)	Hýčba, s. r. o.
Dodavatel a realizátor systému závěsů a předpětí	VSL Systémy CZ, s. r. o.
Projekt	červen 2019 až říjen 2019
Výstavba	červenec 2019 až září 2020 (předpoklad)



3

Na vybrané kotvě je sledován vývoj síly během výstavby pomocí dynamometru umístěného v přístupném místě. Výstup z dynamometru bude trvale přístupný a bude tak možné provádět kontinuální sledování vývoje síly v kotvě i během provozu a celé životnosti konstrukce.

Základy krajních opěr a pylonu tvoří masivní železobetonové bloky, jejichž horní povrch je v podélném střechovitěm sklonu.

Spodní stavba – krajní opěry O1 a O3

Opěra O1 je tvořena základovou deskou, úložným prahem, závěrnou zídou a částečně vetknutými křídly, opěra O3 základovou deskou, dříkem, křídly a kotevním blokem pro kotvení reverzního závěsu. V horní části opěry O3 je napojení (vetknutí) nosné konstrukce realizováno vykonzolovaným dříkem (obr. 4). Konzola dříku má základní výšku 500 mm, která se parabolickým náběhem zvětšuje směrem k vetknutí do dříku až na 1 000 mm. Samotný dřík má tloušťku stěny 1 560 mm, křídla mají šířku 675 mm a v místě „říms“ a v místě kotevního bloku jsou rozšířena na 750 mm. Obě opěry jsou bez přechodových desek. Vnitřní prostor opěry O3 mezi dříkem a křídly bude vyplněn materiálem násypového tělesa přiléhající komunikace. Tímto bude zvýšena již tak bezpečná úroveň zakotvení tahových sil a celková stabilita mostní konstrukce.

Kotvení (přenos síly) reverzních závěsů je zajištěno pomocí zabetonovaného kotevního plechu (obr. 5) ob-



4

délníkového tvaru (700 × 1 300 mm) a tloušťky 60 mm, opatřené 46 spřahujícími trny. Celá oblast kotvení závěsů do opěry je silně vyztužena, aby byl zaručen bezpečný přenos tahových sil mezi závěsy a tělesem opěry. V rubové části opěry O3 je zároveň realizováno kotvení systému podélného předpětí.

Pylon

Konstrukce pylonu je tvořena spodním železobetonovým dříkem a horní ocelovou konstrukcí. Dřík je obdélníkový o rozměrech 9 × 2 m se zkosenými rohy 0,2 × 0,2 m, jeho výška je 2,95 m a výška úložných bločků přímo pod ocelovými stojkami pylonu je 0,1 m. Dřík je navržen jednak pro ukotvení samotné ocelové konstrukce pylonu (obr. 6) a jednak pro zvětšení tuhosti spodní části pylonu nacházející se v blízkosti řečiště Vltavy, kde v případě zvětšených povodňových průtoků hrozí kolize s unášenými předměty.

Nosnou ocelovou konstrukci pylonu tvoří dvě stojky obdélníkového průřezu nahoře spojené masivní hlavou, ve které jsou ukotvena nosná lana. Průřez stojky v patě má rozměry 1 000 × 600 mm, ve vrcholu pak 600 × 600 mm. Celková teoretická výška ocelové části pylonu je 39,85 m (obr. 7). Stojky jsou vetknuty do základu přes zabetonované kotevní šrouby M42-8.8 spojené montážními přírubami do kotevního přípravku. Stěny i pásnice stojek jsou vyrobeny z plechu tloušťky 20 mm, resp. 25 mm jakosti S355J2+N bez podélných i příčných výtuh. Osová vzdálenost stojek v patě je 7 060 mm, stojky se

směrem vzhůru sbíhají až na světlou vzdálenost cca 940 mm u hlavy pylonu. Do pylonu je ukotveno 12 dvojic nosných lan ve směru na Lužec a 5 dvojic nosných lan ve směru na Bukol. Lana jsou ukončena systémovými koncovkami a přes čepy ukotvena do ukloněného styčnickového plechu ve směru závěsů respektujících ve svislém směru orientaci jednotlivých lan. Pásnice hlavy pylonu jsou svařeny na plnou únosnost tupým svarem ke kotevnímu plechu. Vrchol i pata pylonu jsou ukončeny víčky zajišťujícími hermetičnost vnitřního prostoru pylonu. Spodní část nohou pylonu je vyplněna betonem do výšky cca 6 m nad jeho patou.

Nosná konstrukce

Lávka je teoreticky dvoupolová, jednotlivá pole jsou nesymetrická a mají rozpětí 99,18 m a 31,9 m. Nosná konstrukce je tvořena monolitickými koncovými příčnicí u krajních opěr O1 a O3 a 33 prefabrikovanými segmenty. Segmenty byly vyrobeny z UHPC, deklarovaná pevnostní třída vycházející z požadavku na statické fungování konstrukce je C110/130. Nosná konstrukce je uložena pouze v místě krajních opěr: u opěry O1 je uložena na dvojici podélně posuvných ložisek, u opěry O3 je tuze vetknuta do tělesa dříku. Toto konstrukční řešení umožnilo v tomto místě eliminovat mostní závěr a ložiska. Konstrukční výška je v místě příčnicku u opěry O1 proměnná od 750 do 500 mm. Na příčnicku navazují segmenty s konstantní výškou 500 mm, které se monoliticky



5



6

ky napojují na dřík krajní opěry O3. V místě rámového rohu se výška konzoly opěry zvětšuje náběhem od segmentů z 500 na 1 000 mm v místě teoretického vetknutí. Segmenty jsou zavěšeny pomocí celkem 16 dvojic závěsů Redaelli na ocelovém pylonu (12 v hlavním poli a 4 v poli vedlejším).

Nosná konstrukce je tvořena 31 typickými a 2 atypickými segmenty. Celková šířka segmentů je 4,5 m, délka typického segmentu je 3,998 m (obr. 8) a krajní atypické segmenty mají délku poloviční, resp. 1,998 m. Šířka krajních trámů segmentu je v nejužším místě 400 mm, trámy se po výšce rozšiřují směrem k ose segmentu na 500 mm a přes lineární náběh přecházejí do desky segmentu, která má tloušťku 60 mm. Příčná žebra, která jsou v jedné a třetí čtvrtině délky segmentu (resp. v polovině délky u atypických segmentů), se po výšce plynule rozšiřují osově z 200 mm do 400 mm a přes lineární náběh přecházejí do horní desky seg-

- 3 Výztuž základu krajní opěry O3 a zemní kotvy
- 4 Pohled na krajní opěru O3
- 5 Detail kotvení závěsu u krajní opěry O3
- 6 Detail kotvení ocelové části pylonu do železobetonového dříku
- 7 Celkové schéma konstrukce pylonu
- 8 Prefabrikovaný segment mostovky

3 Reinforcement of the foundation block of abutment O3 with ground anchors

4 View of the abutment O3

5 Detail of hanger anchorage at abutment O3

6 Detail of the connection between steel and reinforced concrete part of pylon

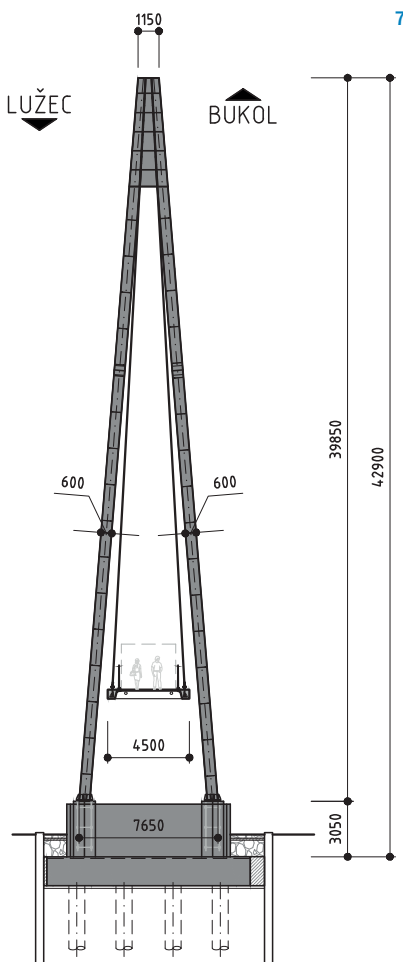
7 Overall layout of the structure of a pylon

8 Precast segment of the bridge deck

mentu. Horní povrch segmentů má v podélném i příčném směru nulový sklon. Podélný sklon celé lávky je definován průběhem polygonu, který nahrazuje skutečný průběh nivelety.

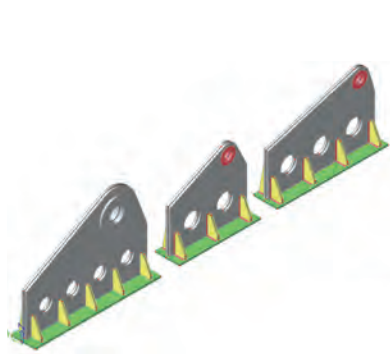
Závěsy

Na lávce je navrženo celkem 17 dvojic závěsů – 16 dvojic slouží přímo k podepření mostovky, jedna dvojice závěsů je navržena pro kotvení celé konstrukce do krajní opěry O3, čímž je s ohledem na výrazný nepochopitelný poměr délek hlavního a krajního pole zajištěna globální stabilita celé lávky. Použit byl systém závěsů (včetně koncovek) Redaelli typu FLC (full locked coil strands) se čtyřmi průměry nosných lan: FLC 32 pro všechny závěsy hlavního pole a pro první dvě dvojice (směrem od pylonu) pole vedlejšího, FLC 36 pro třetí dvojici závěsů vedlejšího pole, FLC 60 pro čtvrtou dvojici závěsů vedlejšího pole a FLC 64 pro hlavní stabilizační závěs kotvený do krajní opěry O3. Rozdělení závěsů vycházelo z detailní



8



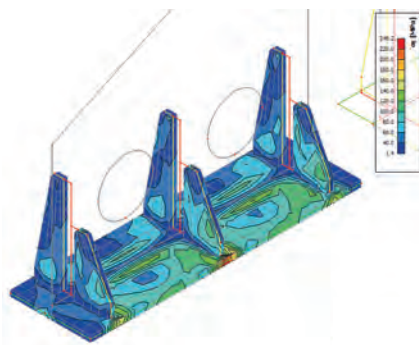


9a

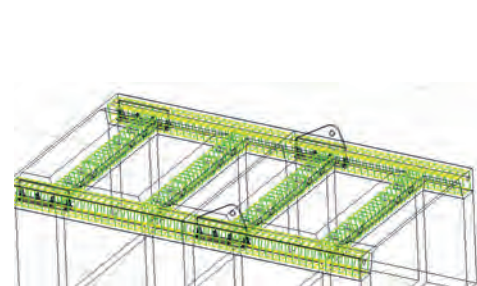
9 a), b), c) Výpočetní analýza kotvení závěsů v segmentech 10 Výpočetní model pro globální analýzu konstrukce

9 a), b), c) Structural analysis of the anchorage of the hangers in the segments

10 Computational model for global structural analysis of the structure



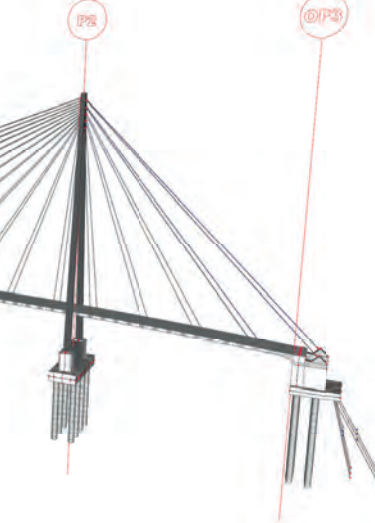
9b



9c



10



statické analýzy fungování lávky během výstavby a v průběhu celé životnosti. Respektuje přirozený tok sil na konstrukci a požadavky na rozdělení tuhosti.

Tvar kotevních přípravků závěsů na pylonu a v segmentech je navržen na základě použitého systémového kotvení Radaelli, daného průměru závěsu a jeho sklonu. Aktivace (napínání) závěsů byla realizována v jejich dolní úrovni – od mostovky –, na pylonu je navrženo pasivní kotvení bez možnosti rektifikace. Kotevní prvky ve vybraných segmentech mostovky jsou tvořeny hlavním styčnickovým plechem tloušťky 40 mm, který je opatřen otvory z důvodu betonáže, otvory pro průchod betonářské výztuže segmentů a otvory pro uchycení při betonáži. Otvory pro uchycení při betonáži jsou v rastru 180 mm a slouží pro uchycení montážního šroubu M24. Závěs je s hlavním styčnickovým plechem spojen pomocí čepového spoje. Pro zajištění výrobcem požadované šířky hlavního plechu jsou navrženy vymezující prstence. Na přenosu svislé a vodorovné síly působící

na kotvení se podílí patní plech a svislé výztuhy. Svislé výztuhy (z plechu tloušťky 20 mm) přenášejí vodorovné účinky a patní plech přenáší svislé účinky zatížení. Počty a rozmístění výztuh jsou určeny na základě velikosti působících sil. Celý systém kotvení závěsů v segmentech byl navržen tak, aby nebyl slabým místem. Vzhledem ke globálnímu působení celého kotvení bylo provedeno podrobné numerické posouzení únosnosti v programu Atena (obr. 9). Výsledky byly potvrzeny experimentem monitorujícím chování tohoto detailu, jehož správná funkce je stěžejní pro působení celé konstrukce.

Vybavení lávky

Na vnější straně nosné konstrukce a na římsách krajních opěr je osazeno ocelové zábradlí výšky 1,3 m se svislou výplní. Dilatační díl zábradlí u krajní opěry O1 umožňuje posun 120 mm (pro návrhovou životnost zábradlí 30 let s ohledem na dotvarování a smršťování konstrukce).

Krajní římsy jsou pouze na kídlech na opěře O1 a tvarově kopírují geometrii prefabrikovaných segmentů,

čímž je zaručena kontinuita lávky při bočním pohledu.

U opěry O1 je navržen dilatační závěr pro celkový rozsah posunu 160 mm.

Na krajní opěře O1 je dvojice podélně posuvných hrncových ložisek s celkovou kapacitou posunu 225 mm.

V rámci terénních úprav bude před krajními opěrami násypový svah zpevněn na šířku mostovky odlážděním z lomového kamene do betonu. U opěry O1 bude zhotovena revizní lavička pro umožnění přístupu a kontrolu ložisek, revizní schodiště nejsou vzhledem k charakteru terénu navržena. Na lužecké straně (u opěry O3) bude vytvořeno násypové těleso, které bude mít čelo zpevněné pohozelem z těžkého kamene. Štětovnicová jímka kolem základu pylonu P2 bude vyplněna těžkým kamenným záhozem s prolitím betonem. Povrch bude odlážděn lomovým kamenem do betonu.

Výpočetní analýza konstrukce

Základním principem návrhu konstrukce bylo zaručení dostatečného tlaku ve spárách mezi segmenty pro rozhodující návrhové kombinace.

Dle předchozích stupňů projektové dokumentace je konstrukce navržena pro přenos normového zatížení chodců a pro pojezd vozidla IZS do 3,5 t.

Výpočetní analýza konstrukce byla provedena na kombinaci několika výpočetních modelů. Pro analýzu globálního prostorového působení konstrukce byl použit prostorový deskostěnový model přesně respektující reálnou geometrii konstrukce v souladu s projektem RDS. Pro zjištění vnitřních sil na konstrukci v podélném směru, na základě kterých byl následně prováděn globální návrh konstrukce, sloužil prostorový prutový model. Ve všech modelech byly definovány veškeré rozhodující konstrukční části lávky včetně montážního vozíku a závěsu použitého pro uložení segmentů během letmé montáže. (obr. 10)

S ohledem na postup výstavby znamenající násobné změny statického systému a změny zatížení byl použit také fázovaný výpočetní model umožňující časově závislou analýzu konstrukce. Výsledky analýzy na tomto výpočetním modelu byly použity pro sledování vývoje namáhání během celého postupu výstavby a pro návrh nadvýšení konstrukce, resp. vyhodnocování tvaru nosné konstrukce během výstavby.

Výpočetní analýza konstrukce, jejímž cílem bylo vystihnout v maximální možné míře reálné chování konstrukce ovlivněné postupem výstavby, probíhala v několika úrovních. Při řešení konstrukce bylo vzhledem k jejím dimenzím a statickému působení zohledněno geometricky a fyzikálně nelineární chování. Vytvořeno bylo celkem více než 100 výpočetních modelů různých fází výstavby a působení konstrukce. Závěsy mostovky byly ve statickém posouzení uvažovány jako lana. Pro každé lano byla vzhledem k jeho geometrii a průřezovým charakteristikám stanovena minimální tahová síla, která zaručuje jeho téměř lineární chování.

Vzhledem k relativně malé hmotnosti mostovky a velkému sklonu závěsů tak bylo nutné závěsy v průběhu výstavby napínat a následně po dokončení výstavby provést jejich rektifikaci.

Samostatně byly řešeny rozhodující detaily nosné konstrukce jako kotvení závěsů do segmentů (viz výše), kotvení pylonu, koncové monolitické příčnický nebo spáry mezi segmenty.

Veškeré výsledky z globálních výpočetních modelů byly vždy konfrontovány s výsledky analýz prováděných zjednodušenými „ručními“ výpočty na modelech s přesným analytickým řešením. Kontrolovány tak byly předpoklady působení konstrukce a výstižnost matematických modelů.

Stejně tak docházelo k „online“ kontrole mezi předpoklady projektu a skutečným chováním konstrukce zjištěným během výstavby. Jednalo se zejména o kontrolu vývoje sil v závěsech a geometrie nosné konstrukce a pylonu. Výsledek každé etapy výstavby byl použit pro zpřesnění predikce působení konstrukce v další fázi, a tím i pro návrh nadvýšení dalších segmentů, resp. velikosti sil v závěsech.

Průhyb konstrukce mostu od nahodilého zatížení byl posouzen pro častou kombinaci zatížení, při které je hustota chodců 1,37 chodce/m² (velice hustý provoz). Průhyb mostovky odpovídající této hodnotě zatížení je 120 mm, což při rozpětí hlavního pole 99,18 m odpovídá $L/826$. Při připočtení i extrémního průhybu od teploty (82 mm) vychází celkový průhyb 202 mm, což odpovídá $L/490$. Limitní průhyb předpjaté betonové lávky pro chodce je dle ČSN 73 6214 [1] stanoven jako $L/600$ pro dominantní proměnné zatížení a konstrukce tak toto kritérium bezpečně splňuje.

V rámci dynamického posouzení byla provedena modální analýza a následně pak analýza vynuceného kmitání konstrukce pro zatížení chodci. Posouzení bylo provedeno vzhledem k maximální velikosti zrychlení s ohledem na pohodu chodců. Konstrukce vyhovuje z hlediska pohodlí chodců bez dalších konstrukčních úprav, není zapotřebí instalace tlumičů kmitání.

Monitoring konstrukce během výstavby, dlouhodobé sledování lávky

Mostní konstrukce svým statickým působením, geometrickými parametry a složitým postupem výstavby patří do skupiny významných mostních konstrukcí, u kterých je nutné zajistit jejich dlouhodobé sledování. Jedná se zejména o kontinuální dlouhodobé měření jejich geometrie (deformace nosné konstrukce a pylonu) a vývoje sil v závěsech.

Během procesu výstavby byla sledována geometrie konstrukce pomocí geodetického měření polohy definovaných bodů na nosné konstrukci a pylonu. Pro dlouhodobé sledování se počítá opět s geodetickým monitoringem vybraných bodů na konstrukci a dále pak s 3D skenováním kompletní konstrukce.

Síly v závěsech byly během výstavby sledovány pomocí frekvenční analýzy a pomocí inklinometrického měření, na základě kterého byl vyhodnocován průběh jednotlivých sledovaných závěsů, a následně byla pomocí vyvinutého softwaru dopočtena aktuální velikost síly v závěsu s respektováním teploty a deformace pylonu a mostovky. Data z tohoto monitoringu jsou všem zúčastněným přenášena online a na základě stanovených kritérií je kontrolováno aktuální chování konstrukce.

Závěr

Podařilo se navrhnout a realizovat unikátní mostní konstrukci, která se může stát důstojnou vizitkou schopností všech účastníků výstavby. Z pozice projektanta si velmi vážíme úzké spolupráce se všemi zúčastněnými, která je vždy u mostů takového rozsahu předpokladem zdárného dokončení díla.

V rámci návrhu konstrukce a jejího monitoringu byly použity výsledky získané v rámci řešení projektu TH 04020509 podporovaného Technologickou agenturou ČR.



doc. Ing. Lukáš Vráblik, Ph.D., FEng.
lukas.vrablik@valbek.cz



Ing. Ondřej Matoušek
ondrej.matousek@valbek.cz



Ing. Petr Harazim
petr.harazim@valbek.cz

všichni: Valbek, spol. s r. o.

Literatura:

- [1] ČSN 73 6214. *Navrhování betonových mostních konstrukcí*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [2] *Projektová dokumentace RDS*. Novák & Partner, s. r. o. 19/2019.