

LÁVKA Z UHPC V LUŽCI NAD VLTAVOU

FOOTBRIDGE MADE OF UHPC IN THE VILLAGE OF LUŽEC NAD VLTAVOU

V současné době je v Lužci nad Vltavou dokončována výstavba nové 138 m dlouhé lávky z UHPC pro pěší a cyklisty. Zavěšená mostní konstrukce s jedním pylonem má rozpětí hlavního pole 99,18 m, vedlejší pole má délku 31,9 m. V článku je detailně popsán proces návrhu této unikátní konstrukce, jsou představeny segmenty z UHPC a jejich testování a podrobně je vyličen i výstavba mostovky. The construction process of a new footbridge made of UHPC in the village of Lužec nad Vltavou with a span of 138 m over the Vltava river is currently in its final stage. The cable stayed bridge is a structure with one pylon; the main span is 99.18 m and the secondary span is 31.9 m. The paper describes in detail the design process of this unique structure. Segments made of the UHPC and their testing are described and a detailed process of the construction of the main span is provided.

ARCHITEKTONICKO-KONSTRUKČNÍ NÁVRH

TEXT Petr Tej



Obec Lužec nad Vltavou leží nedaleko Mělníku na ostrově mezi nesplavným divokým tokem Vltavy a Vraňansko-hořínským plavebním kanálem. Tok zde bylo možné překonat pouze přívozem, a proto se obec rozhodla přes řeku vybudovat lávku, která bude společně s navazujícími komunikacemi sloužit pro potřeby pěší dopravy, cyklistů (lávka se nachází na dálkové cyklotrase EuroVelo 7) a v případě nutnosti i pro pojezd vozidel IZS a Povodí Vltavy do hmotnosti 3,5 t.

Architektonická studie byla zadána obcí Lužec nad Vltavou v roce 2012. Z předložených variant návrhů překonání řeky Vltavy, mezi nimiž byly např. zdvihaná nebo visutá varianta konstrukce lávky, byla na jednáni zastupitelstva v témže roce vybrána zavěšená konstrukce s ocelovým pylonem výšky cca 40 m a délkou polí

cca 100 m přes vodní tok a cca 30 m přes inundační pásmo s unikátní mostovkou z UHPC (viz vizualizace varianty určené pro navazující projektové stupně). UHPC je v současné době progresivní technologií a jeho aplikace na mostní konstrukce u nás jsou podrobně popsány v textech [1] a [2].

Náš tým se dlouhodobě věnuje aplikaci UHPC na mostní konstrukce. Jsme autory např. lávky ve Vrapicích (více v *Beton TKS 2/2018, pozn. red.*), lávky v Příboře (více v *Beton TKS 4/2019, pozn. red.*) a také lávek malého rozpětí (některé z nich v článku na str. 50, pozn. red.).

Lávku v Lužci nad Vltavou jsme projektovali do stupně prováděcí dokumentace. V rámci dokumentace RDS došlo k úpravám příčného řezu konstrukce, zejména z důvodu přesu-

Zdroje:

- [1] KALNÝ, M. a kol. Experience with UHPFRC applications in the Czech Republic. In: *UHPC 2017*. Montpellier, Francie.
- [2] CITEK, D. a kol. New UHPFRC footbridges in the Czech Republic. In: *Proceedings of HiPerMat 2020*. Kassel, Německo.

nutí podélného předpětí mostovky z vnitřku průřezu vně mezi žebra (obr. 2 na vedlejší straně). Tato změna byla vyvolána obecným přístupem k návrhům předpětí po pádu Trojské lávky z důvodu snadného přístupu k předpínacím lanům a jejich kontrole. Při návrhu systému výstavby společností Hochtief došlo navíc k redukci počtu závěsů cca na polovinu, a tím také ke zvětšení výšky žebra UHPC panelu mostovky. V rámci stavby jsme se podíleli na výrobně technické dokumentaci UHPC panelů a vykonávali autorský dozor stavby.

Chtěl bych poděkovat starostovi Patriku Rollovi a zastupitelům v Lužci nad Vltavou, všem projektantům jednotlivých částí a zejména realizační společnosti Hochtief, díky které se podařilo lávku úspěšně dokončit.



Ing. arch. MgA. Petr Tej, Ph.D.
Kfoknerův ústav ČVUT v Praze
petr.tej@cvut.cz

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

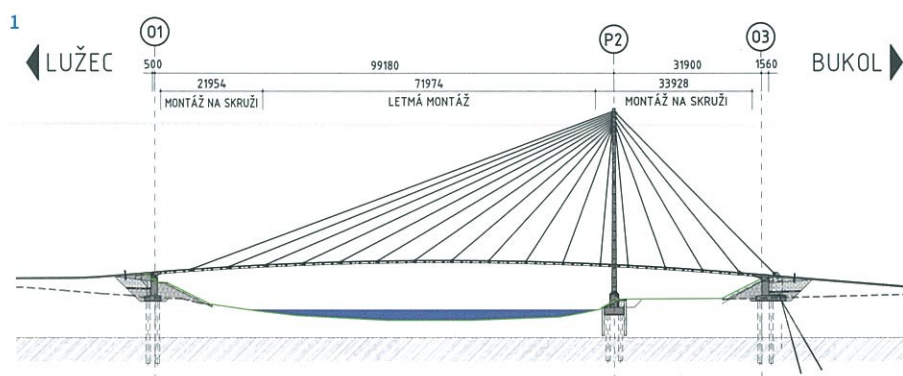
Založení lávky

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.

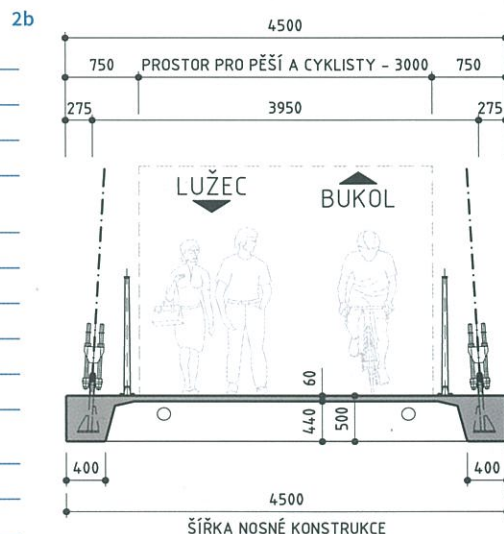
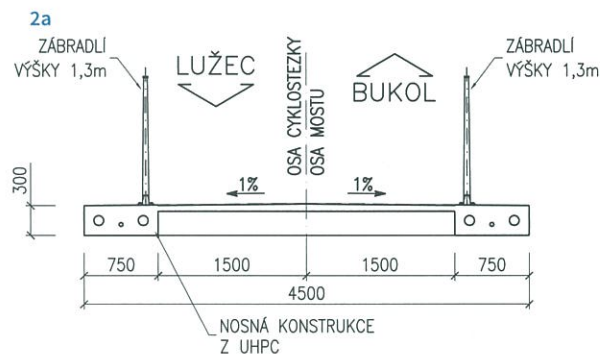
Zachycení tahových reakcí od reverzního závěsu u opěry O3 zajišťuje

šest trvalých zemních kotev: 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 kotev je 10,33 m u kotev s odklonem od svislice 15°, resp. 11,33 m u kotev 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 střechovitém 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, opatřeno 46 spráhujícími 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

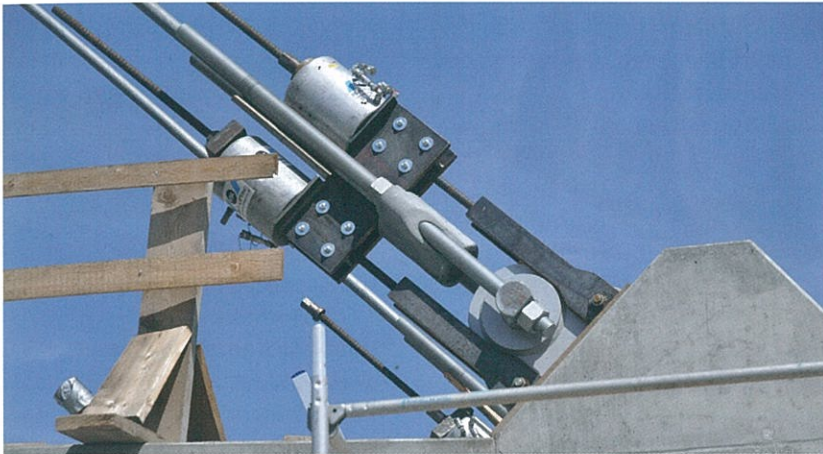
Konstrukce pylonu je tvořena spodním železobetonovým dříkem a horní ocelovou konstrukcí. Dřík je obdélníkový o rozměrech 9 × 2 m se zkosenými rohy 0,2 × 0,2 m, jeho výška je 2,95 m a výška úložných bločků přímo pod ocelovými stojkami pylonu je 0,1 m. Dřík je navržen jednak pro ukotvení samotné ocelové 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 dvupolová, jednotlivá pole jsou nesymetrická a mají rozpětí 99,18 m a 31,9 m. Nosná konstrukce je tvořena monolitickými koncovými příčníky 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 příčníku u opěry O1 proměnná od 750 do 500 mm. Na příčník 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-

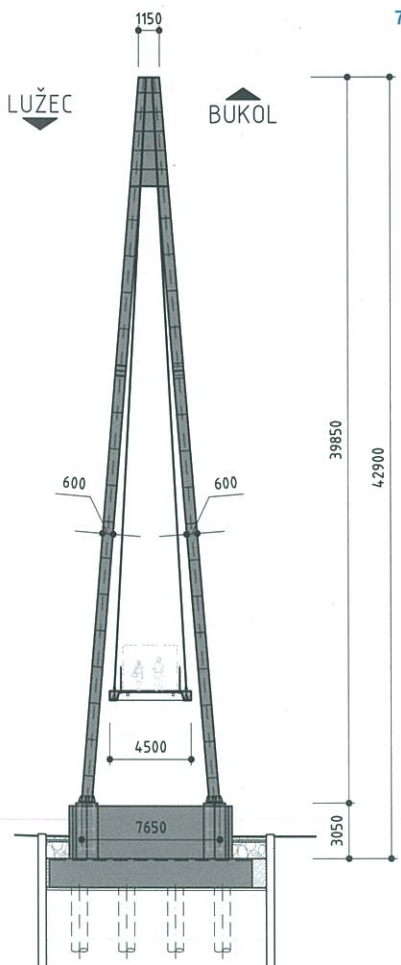
- 3 Výztuž základu krajní opěry O3 a zemní kotvy
- 4 Pohled na krajní opěru O3
- 5 Detail kotvení závěsů u krajní opěry O3
- 6 Detail kotvení ocelové části pylonu do železobetonového dříku
- 7 Celkové schéma konstrukce pylonu
- 8 Prefabrikovaný segment mostovky

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.

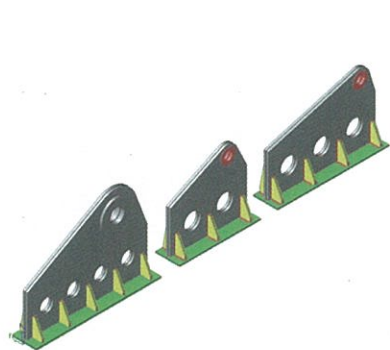
Závěsy

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 nepoměr 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



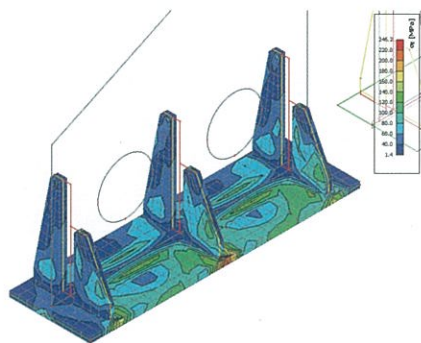


9a

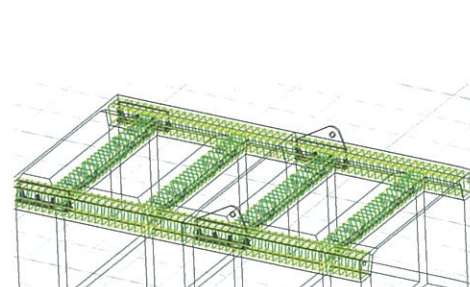
9 a), b), c) Výpočetní analýza kotvení závěsů v segmentech 10 Výpočetní model pro globální analýzu konstrukce

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

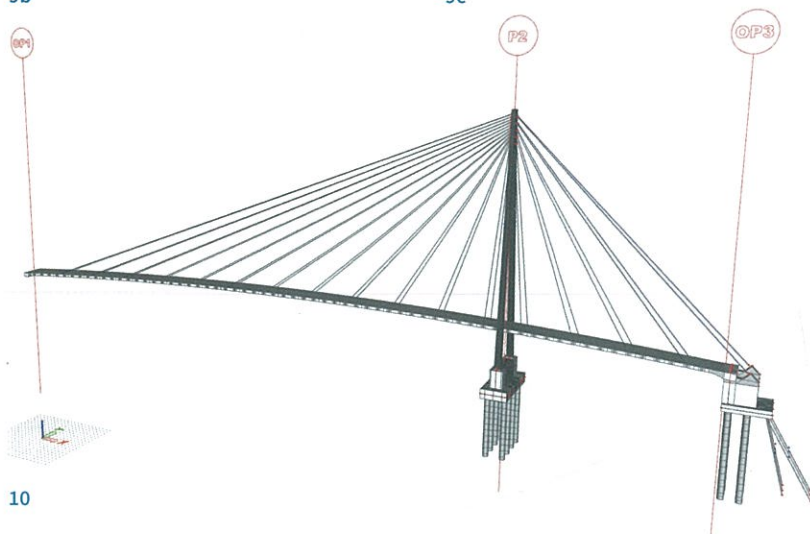
10 Computational model for global structural analysis of the structure



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 kotevnických 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 křídlech 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 pohozem 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 chodci 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 příčníky 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 průvės 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 navrhout 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 Vráblík, 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.

VÝROBA SEGMENTŮ Z UHPC A VÝSTAVBA LÁVKY

TEXT Petr Vítek, Robert Coufal

Návrh konstrukce je ovlivněn řadou faktorů, kde kromě konstrukčního působení popsaného v předchozí části, je kladen důraz na dlouhodobou spolehlivost s minimálními požadavky na údržbu. Uvedenému vyhovuje konstrukce s mostovkou sestavenou ze segmentů zhotovených z ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého rozptýlenou ocelovou výztuží (označováno buď UHPFRC, nebo zkráceně jen UHPC).

Mostovka

Mostovka tvoří dva podélné nosníky výšky 500 mm a šířky 400 mm, mezi nimiž jsou příčná žebra po vzdálenostech 2 m, a vlastní deska mostovky, která má tloušťku pouhých 60 mm a není vyztužena betonářskou výztuží. Mostovka je sestavena z jednotlivých segmentů délky 4 m a šířky 4,5 m vyrobených z UHPC třídy C110/130 (obr. 1). V každém druhém segmentu jsou do podélných nosníků zabetonovány ocelové prvky pro připojení závěsu. Vzdálenost závěsů na mostovce je tedy 8 m. Mostovka je předepnutá po celé délce dvojicí externích kabelů uložených v plastových kanálcích, jež jsou polohově fixovány v průchodkách příčnými žebry, které zajišťují příčné ztužení a rovněž působí jako deviátory.

Zatímco životnost mostovky z UHPC se předpokládá až 200 let, závěsy a prvky podélného předpětí mají návrhovou životnost podstatně kratší, a proto jsou tyto prvky vyměnitelné. Závěsy lze jednotlivě odkotvit v koncových vidlicích a každý závěs lze nahradit novým. Kabely podélného předpětí mají navrženy speciální kotvy s dvojími pouzdry umožňujícími vyjmutí kabelu i s kotvou. Vyměnitelné prvky lze postupně měnit jeden po druhém, přičemž tato činnost nevyžaduje dočasné podepření lávky v prostoru řeky.

Použité UHPC

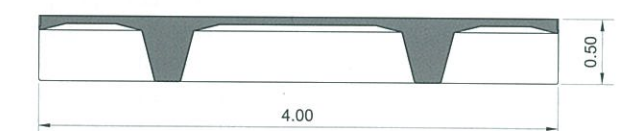
Parametry

UHPC pro segmenty bylo specifikováno pevnostní třídou v tlaku C110/130 a zbytkovou pevností v tahu za ohybu $f_{R,1}$ při CMOD1 (rozevření trhliny 0,5 mm) dle ČSN EN 14651+A1 minimálně 10 MPa. Maximální zrno kamenniva D_{max} bylo odsouhlaseno 8 mm. UHPC bylo vyráběno dle kombinace norem ČSN EN 206+A1, ČSN P 73 2404 a TN MTS 2019 UHPC. Konzistence byla samozhutnitelná, tj. vhodná pro ukládku bez použití vibrátorů. Použit byl materiál Top-Crete, vyráběný na betonárně TBG Metrostav v Praze na Rohanském os-

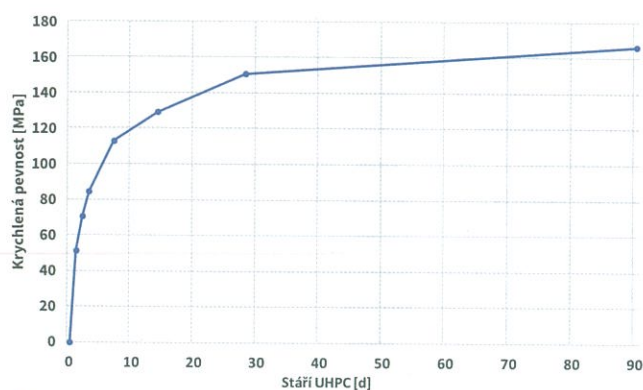
trově, kde probíhala i betonáž segmentů.

Při každé betonáži segmentů byl odebrán beton pro tři krychle o hraně 100 mm na kontrolní zkoušku pevnosti v tlaku po 7, 28 a 90 dnech. Zároveň byl pro kontrolu pevnosti v tlaku z každého segmentu odebrán i beton pro válec o výšce 200 mm a průměru 100 mm. Průměrná krychelná pevnost v tlaku z 33 výsledků činila ve 28 dnech stáří 150 MPa. Stejným způsobem získaná válcová pevnost činila 142 MPa. Je zřejmé, že vlivem drátků je poměr válcové a krychelné pevnosti UHPC odlišný od běžných betonů. Při zvyšování obsahu drátků se rozdíl mezi pevností na krychli a na válci zmenšuje a při dávkách drátků okolo 3 % je již poměr pevností 1 : 1. Je tak zřejmé, že je vhodnější pevnost UHPC specifikovat pouze jednou pevností, a to spíše pevností válcovou. Průměrný nárůst pevnosti ze všech betonáží je uveden v grafu na obr. 2. Pevnosti po 7, 28 a 90 dnech jsou průměrné hodnoty ze všech segmentů, pevnosti ve stáří 1, 2, 3 a 14 dní jsou z měření nárůstu pevnosti na prvním segmentu.

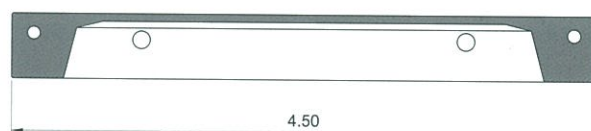
Pevnosti v tlaku stanovené na válci měly také menší rozptýl a směrodatnou odchylku, kdy se naměřená pev-



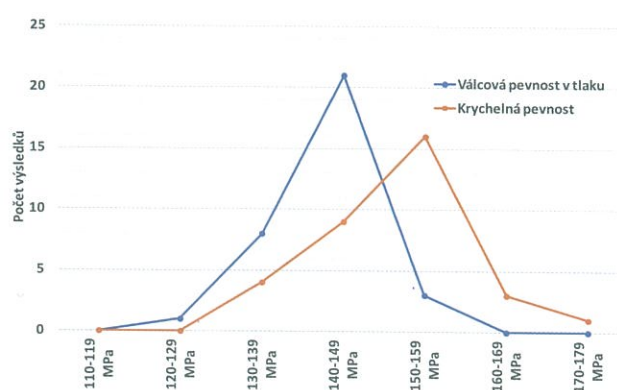
1a



2



1b



3



4

- 1 Segment: a) podélný řez, b) příčný řez
- 2 Nárůst krychelných pevností v čase
- 3 Histogram pevností stanovených na krychlích a válcích
- 4 Betonáž segmentu
- 5 Forma pro betonáž segmentu chráněná stanem
- 6 Uspořádání zkoušky únosnosti kotevního plechu



5



6

Tab. 1 Průměr z výsledků kontrolních zkoušek pevnosti v tahu za ohybu

Tab. 1 Average results from conformity tests of bending strength

Napětí v tahu při různých hodnotách rozevření trhliny dle ČSN EN 14651+A1 [MPa]				
$f_{ct,L}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
7,8	18,0	17,2	13,8	10,5

nost po 28 dnech stáří UHPC pohybovala v rozmezí 123 až 153 MPa. Oproti tomu se pevnost stanovená na krychlích pohybovala v rozmezí 134 až 173 MPa. Histogram výsledků stanovených na krychlích a na válcích je uveden v grafu na obr. 3.

Pevnost v tahu za ohybu se kontrolovala dle ČSN EN 14651+A1 [1] na trámci o rozměrech 700 × 150 × 150 mm se zářezem. V průběhu betonáže bylo odebráno celkem devět trámců pro kontrolní zkoušky. Průměr z výsledků je uveden v tab. 1.

Z uvedených výsledků je patrné, že použité UHPC splnilo s velkou rezervou požadavky projektu. Zároveň bylo dosaženo velmi kvalitních povr-

chů segmentů, a i přes samozhutnitelnou konzistenci byl materiál stabilní, bez segregace drátků nebo hrubého kameniva.

Výroba segmentů

Při návrhu tvaru segmentů a procesu betonáže se vycházelo ze zkušeností z jiných staveb v ČR i v zahraničí. Návrhu i realizaci byla věnována mimořádná pozornost a péče.

Segmenty o objemu necelé 4 m³ jsou tvarově upraveny tak, aby je bylo snadné vyrábět z UHPC, který má oproti běžným betonům poněkud nestandardní vlastnosti. Především se jedná o betonovou směs značně viskózní, lepivou a samonivelační, jejíž konzistenci lze přirovnat k medu (obr. 4). Při ukládání betonu se ze směsi uvolňuje poměrně velké množství vzduchu. Betonová směs je citlivá na vysychání během ukládání a následného tuhnutí.

Beton se ukládal do ocelové formy s volným vodorovným povrchem. Tím se proces betonáže značně usnadnil, neboť se využil samonivelační efekt

a rovněž tím byl umožněn odvod vzduchu z betonu volným povrchem. Bezprostředně po uložení směsi se povrch betonu ošetřil ochranným nástřikem vosku a ihned po skončení činnosti se ještě zakryl polyetylenovou fólií. Betonáž probíhala v Praze ve venkovním prostředí během zimního období, proto se forma s betonem ještě uložila do stanu, ve kterém se udržovala stálá teplota, aby se předešlo vzniku trhlin (obr. 5).

Betonová směs obsahuje rozptýlenou výztuž z tenkých ocelových drátků. Konzistence směsi je navržena tak, aby nedocházelo k segregaci drátků a jejich sedání a zároveň aby byla směs zpracovatelná. Beton se přivážel od betonárny k formě autodomíhávačem. Kromě odběru dalších vzorků se bezprostředně před každou betonáží testovala konzistence směsi, aby se prokázala požadovaná hodnota a zjistila se tak případná kontaminace betonu vodou, která by mohla zbyť v autodomíhávači. V případě kontaminace směsi totiž nelze garantovat po-



7



8



9



10

7 Montáž pylonu 8 Segmenty na skruži a montážní vozík ve startovací pozici pro letmou montáž 9 Prvky pro vertikální a horizontální rektifikaci segmentu 10 Úprava síly v závěsu 11 Schéma postupu výstavby 12 Letmá montáž - 2. postup 13 Letmá montáž nad tokem Vltavy

7 Assembly of a pylon 8 Segments placed on the formwork and an installation-trolley in its starting position for the cantilevered assembly 9 Items used for the vertical and horizontal positional adjustment of a segment 10 Adjustment of the force in a hanger 11 Diagram of the construction sequence 12 Cantilevered assembly - 2, the sequence 13 Cantilevered assembly over the Vltava River

žadované mechanicko-fyzikální vlastnosti materiálu ani zabránit segregaci rozptýlené výztuže.

Test segmentu

UHPC je sice poměrně nový materiál, ale dosud již byla realizována řada zkoušek, které prokázaly jeho odol-

nost proti základním druhům namáhání. Určitá nejasnost nastala u odolnosti proti vytržení ocelového kotevního prvku pro závěs.

Jak již bylo zmíněno, do každého druhého segmentu je zakotven závěs prostřednictvím ocelového prvku zabetonovaného do segmentu. Stanovení únosnosti takového detailu výpočetní metodou je poněkud problematické a nespolehlivé. Numerické metody dávají obvykle spolehlivé výsledky pro větší konstrukční celky, zatímco dostatečně přesně namodelovat malý detail bývá problematické. Proto byla únosnost uložení plechu do prvku z UHPC testována na vzorku, jenž tvarově odpovídal podélnému žebro segmentu, do kterého byl zabetonován kotevní plech skutečných rozměrů.

Vzorek z UHPC byl vybetonován na silně vyztužený základ z betonu C50/60, na kotevní plech byla přivařena hlavice

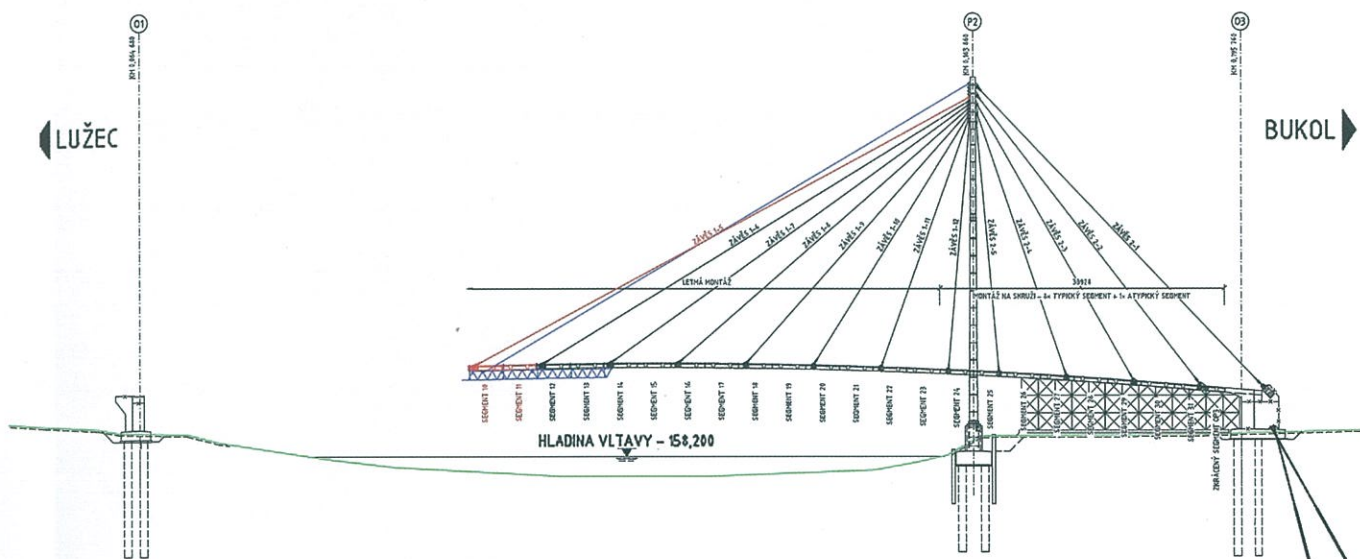
z válcovaných profilů. Mezi základ a hlavici byly vloženy hydraulické lisy, které vyvodily vertikální sílu (obr. 6).

Výsledky prokázaly více než dostatečnou únosnost zakotvení ocelového prvku do UHPC. Je-li to možné, zkoušky provádíme až do úplného porušení. Ani v tomto případě jsme neudělali výjimku, ale porušení nastalo v testovaném prvku z UHPC, nikoli v betonovém základu. Při maximální dosažené síle 256 t byl testovaný prvek z UHPC porušen jen několika velmi tenkými trhlinkami. Mezní únosnost závěsu je stanovena na 167 t.

Výstavba

Pylon

Ocelový pylon výšky 40 m se vyráběl v mostárně a na stavbu se dovezl rozdělen na tři montážní díly (dvě samostatné stojky délky cca 24 m a horní



11



12

montážní díl délky cca 16 m). Díly byly na staveništi svařeny do celku, následně byla v místě svarů aplikována protikorozi ochrana. Pylon byl vztyčen dvěma jeřáby (obr. 7). Pylon je konstrukce samostatně stojící, připojená k základu šrouby a nebylo třeba jej montážně kotvit. Závěsy se instalovaly postupně až při montáži mostovky.

Mostovka

Mostovka byla v břehové části mezi opěrou a pylonem smontována klasickým postupem ukládání segmentů na pevnou skruž.

Následovala první fáze zavěšení závěsů na pylon, kdy se ke kotevním plechům na pylony připojily všechny zpětné závěsy a jedna dvojice závěsů velkého pole přes tok. Jelikož by bylo náročné zřizovat na pylon lešení, závěsy se osazovaly vždy po skupinách (během čtyř dnů)



13

v průběhu montáže. Zpětné závěsy se poté připojily i na dolním okraji k mostovce.

Mezi stojky pylonu byl osazen montážní vozík délky 16 m. Zadní strana vozíku byla podepřena a zakotvena a následně byly na zadní polovinu vozíku osazeny další dva segmenty. Tyto segmenty byly ještě zavěšeny na závěsy (obr. 8).

Mezi segmenty byly navrženy prostorové spáry šířky 25 mm, které se zaplnily vysokopevnostní maltou. Tvar spáry byl upraven tak, že zesponu a z boků segmentů je výstupek a těsnění, zabraňující závlivce vytékat ze spáry.

Celý vybudovaný úsek byl montážně centricky předepnut dvěma závitovými tyčemi $\varnothing 32$ mm.

Dále následovala fáze letmé montáže mostovky. Na pylon byly s pomocí plošiny osazeny další závěsy. Horní kotevní oka se využila pro in-

stalaci montážních závěsů, které stabilizují montážní vozík.

Letmá montáž probíhala v krocích po dvou segmentech. V rámci kroku, který trval dva dny, se smontovalo 8 m mostovky.

Vzhledem k nespavnosti toku divoké Vltavy nebylo možné, jak by se nabízelo, dopravovat segmenty lodí pod lávku, proto byly segmenty ukládány jeřábem. S ohledem na limitovanou nosnost jeřábu byla hmotnost segmentu omezena na 10 t.

Segmenty se ukládaly na montážní vozík, který byl vetknut do hotové konstrukce v délce 8 m a dalších 8 m přečníval nad tok. V přední části byl ještě stabilizován montážním závěsem k pylonu. Na vozíku byly připevněny pro každý segment čtyři vertikálně rektifikovatelné úložné plochy. Každý segment měl další čtyři prvky pro příčnou rektifikaci (obr. 9). Podél-



14a

14 a), b) Osazování segmentu na montážní vozík 15 a), b) Lávka před dokončením (1. 8. 2020) 16 Podhled lávky s vedením podélného předpětí

14 a), b) Segment being placed onto the installation-trolley 15 a), b) Footbridge before completion (August 1, 2020) 16 Underside view of the footbridge showing the longitudinal prestressing

14b



ná rektifikace se zajistila pomocí dvou předpínacích tyčí, které se instalovaly spolu se segmentem a ve spárách se napojovaly spojku. Každý segment byl samostatně ustaven do požadované polohy s milimetrovou přesností.

V rámci dvoudenního montážního kroku proběhly tyto činnosti:

- zaměření polohy lávky s vysunutým vozíkem,
- postupná montáž dvou segmentů s jejich pečlivým ustavením a rektifikací,
- zajištění polohy pomocí dotažení předpínacích tyčí (nikoliv předepnutí),
- zaplnění spár a následné tvrdnutí hmoty přes noc,
- protažení kanálků externího předpětí,

- předpětí montážních tyčí,
- instalace a napnutí závěsů s případnou úpravou sil v předchozí dvojici závěsů (obr. 10),
- odkotvení montážního závěsu vozíku, odpojení vozíku od konstrukce a spuštění na válečky určené pro jeho přesun,
- přesun vozíku do nové montážní polohy o délku 8 m,
- připojení vozíku k hotové konstrukci a napnutí montážního závěsu vozíku.

Tímto postupem bylo v devíti krocích sestaveno nad vodním tokem 72 m mostovky lávky (obr. 11 až 14).

Během posledního přístupu k vrcholu pylonu se demontovaly montážní závěsy vozíku a naistalovaly se poslední dvě dvojice závěsů,

na které je zavěšena břehová část mostovky.

Zbývající část hlavního pole nad lužeckým břehem se smontovala na vysunutém a podepřeném montážním vozíku a dále na pevné skruži.

Následně se vybetonoval koncový příčník v Lužci a poté se předepnuly a zainjektovaly externí kabely podélného předpětí – dvojice 19lanových kabelů délky 133 m, čímž se zajistila dostatečná tlaková rezerva ve spárách při všech zatěžovacích stavech a rovněž se zvýšila tuhost mostovky. (obr. 16)

Po demontáži skruže a snesení vozíku následovala kontrola sil v závěsech, přeměření geometrie a rektifikace sil v některých závěsech.



15a

15b

16



Dokončení

Po zhotovení mostovky se přistoupilo k montáži zábradlí a osvětlení, k dosypání násypů navazujících na lávku a k vybudování vozovek v předpolích. Za zmínku stojí fakt, že se povrch segmentů podařilo udělat v takové kvalitě, že bude přímo pocházen a nebude opatřen původně předpokládanou vrstvou pochozí izolace.

V současné době (konec července 2020) je kompletně dokončena výstavba nosné konstrukce. Následovat bude postupná montáž zábradlí včetně prvků osvětlení, osazení mostních závěrů, realizace říms na krajní opěře O1 a úpravy pod lávkou. Souběžně probíhají práce na realizaci komunikace před a za lávkou. Celá stavba by měla být uvedena do provozu v průběhu září letošního roku.

Závěr

Materiál UHPC vzhledem ke svým unikátním vlastnostem nachází stále častější využití na moderních stavbách. Vysoká pevnost spolu s dlouhodobou životností umožňuje navrhování velmi štíhlých konstrukcí. Na druhou stranu výroba konstrukčních prvků vyžaduje přísné dodržování technologických postupů. Rovněž je přínosné tvar prvků přizpůsobit tak, aby umožňoval snadný proces betonáže UHPC se svými specifiky.

Výstavba technologií letmé montáže vyžadovala vyřešit řadu konstrukčních detailů, aby bylo možné dostatečně rychle a precizně ustavovat segmenty a dodržet požadovaný tvar konstrukce.

Závěrem si dovolueme konstatovat, že se jak výrobu segmentů, tak vlastní montáž podařilo zvládnout ve vysoké kvalitě a s velkou přesností bez závažnějších komplikací. I přes jisté obtíže zaviněné vyšší mocí se požadovaný termín výstavby podařilo dodržet.

Fotografie:
4 – archiv společnosti TBG Metrostav,
5 až 10, 12, 13, 14, 16 – archiv společnosti
Hochtief, 15 – Petr Tej



Dr. Ing. Petr Vitek
Hochtief CZ, a. s.
petr.vitek@hochtief.cz



Ing. Robert Coufal, Ph.D.
TBG Metrostav, s. r. o.
robert.coufal@tbg-beton.cz