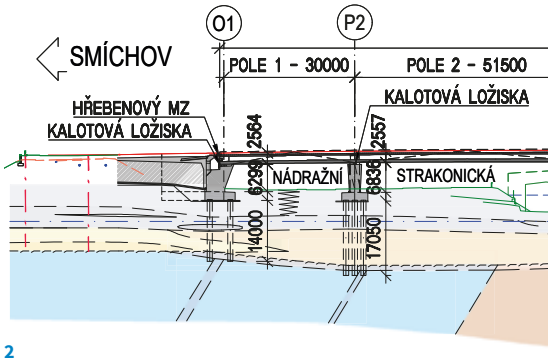


1

DVORECKÝ MOST – PROJEKT

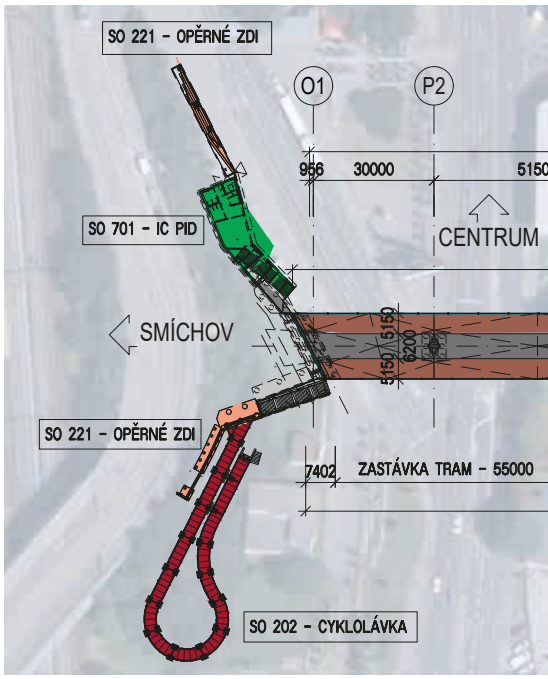
Petr Souček, Martin Blatský, Miroslav Seidl

Dvorecký most propojuje pražský Smíchov a Podolí šestipolovou předpjatou betonovou konstrukcí s proměnným tříkomorovým průřezem. Článek představuje celkovou koncepci mostní konstrukce, složité geologické podmínky v lokalitě, založení mostu, včetně jímek v řece, návrh spodní stavby, nosné konstrukce a příslušenství mostu. Pozornost je věnována zejména atypické, prostorově proměnné geometrii mostu, složitému vedení předpínacích kabelů a také ochraně konstrukce proti účinkům bludných proudů a monitoringu konstrukce. Článek zmiňuje i zásadní využití 3D modelů jak v projekční fázi (ve výkresech i výpočtech), tak při realizaci stavby.



2

3



Most je navržen jako spojitá trámová konstrukce délky 337,8 m komorového průřezu z předpjatého betonu o šesti mostních polích o rozpětích 30 + 51,5 + 62,5 + 87 + 62,5 + 42,5 m. Základní charakteristikou mostu je jeho neobvyklé tvarování přesně odpovídající architektonickému výrazu vítězného návrhu z architektonické soutěže. Veškeré viditelné povrchy jak spodní stavby, tak nosné konstrukce mostu využívají důsledně motivu trojúhelníků. Jejich hra v prostoru pak vytváří konstrukční zvláštnost – čistě trojúhelníkový tvar příčného řezu v polovině všech mostních polí. Veškeré viditelné části konstrukce jsou navrženy z bílého betonu. Šířka nosné konstrukce je poměrně skromných 16,5 m, a to právě z důvodu relativně úzké vozovky (jen 7 m mezi obrubníky), určené pouze pro tramvaje, městské autobusy a vozidla IZS. Naopak oboustranné chodníky široké 4,5 m umožňují komfortní pobyt a pohyb chodců a cyklistů.

Kvůli napojení trasy na předmostích vede osa mostu vůči řece šikmo, šířka řeky v tomto šikmém řezu přesahuje 180 m. V řece jsou umístěny dva hlavní stěnové pilíře (vodní pilíře P4 a P5), které respektují směr proudnice řeky, a jsou tak orientovány šikmo k ose mostu. Tyto pilíře jsou rámově spojeny s nosnou konstrukcí. Hlavní pole mostu mezi vodními pilíři má rozpětí 87 m a umožňuje plavbu na řece jediným plavebním profilem kolmé šířky 80 m.

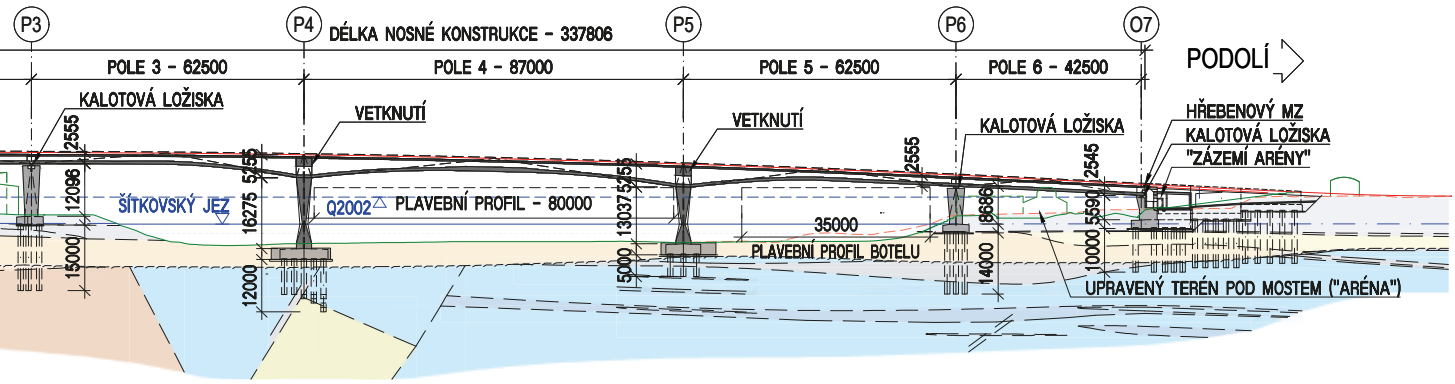


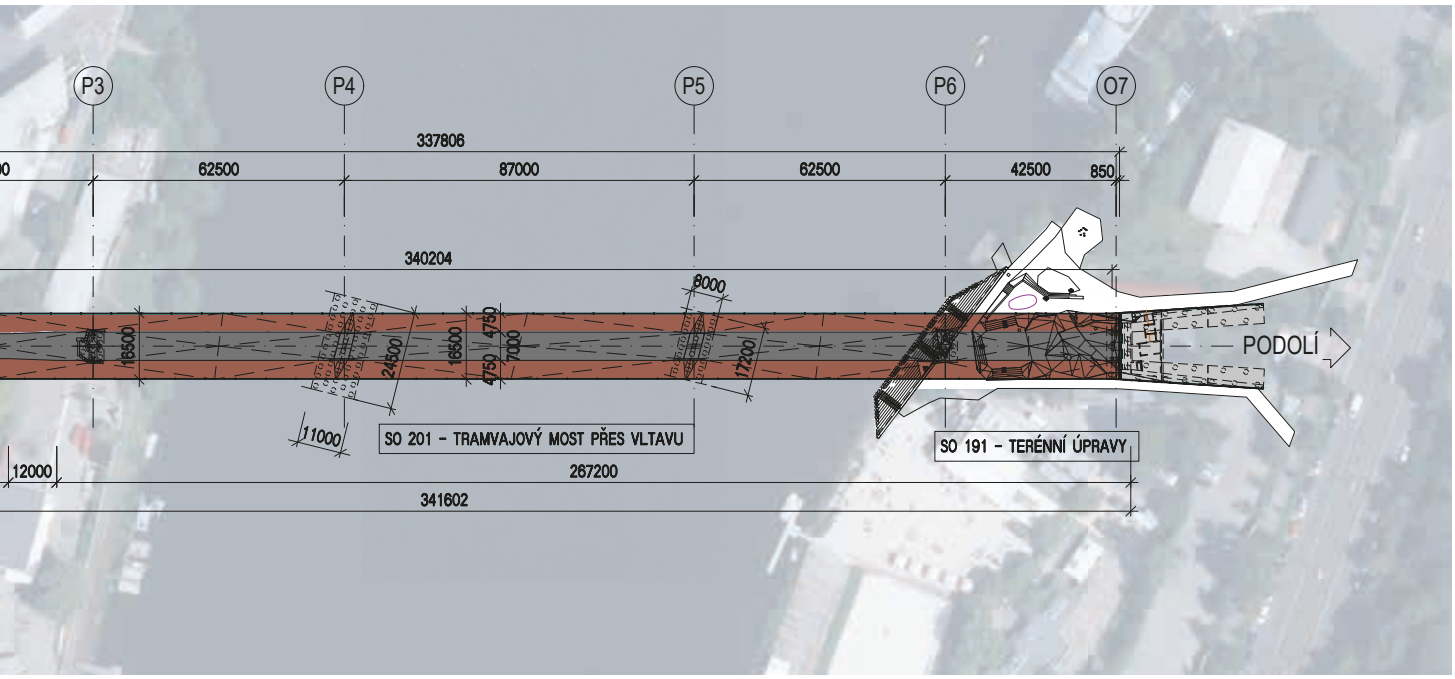
4



5

1 Hlavní pole mostu mezi vodními pilíři má rozpětí 87 m a umožňuje plavbu na řece jediným plavebním profilem kolmé šířky 80 m
2 Podélný řez: most je navržen jako spojitá trámová konstrukce délky 337,8 m komorového průřezu z předpjatého betonu o šesti mostních polích **3** Půdorys: dominantní vodní pilíře P4 a P5 jsou navrženy jako stěnové na celou šířku mostovky a svým natočením sledují proudnici řeky **4** Dvorecký most se stal 19. pražským mostem přes řeku Vltavu (resp. 21., pokud do souboru započteme i dvě lávky) (zdroj: mapy.cz)
5 Na pravém břehu most navazuje na Podolské nábřeží, na levém pak překračuje ulice Strakonickou a Nádražní a napojuje se na ulici Na Zlíchově, na mostě je umístěna nová tram/bus zastávka Lihovar





V sousedním poli při podolském břehu pak konstrukce mostu překračuje 35 m široký plavební profil pro manipulaci s botelem Racek. Na smíchovském břehu konstrukce ve svých prvních dvou polích překračuje ulice Nádražní a Strakonickou a také objekty loděnic umístěné na břehu, pod svahem Strakonické ulice. Za smíchovskou opěrou O1 se trasa výškově plynule napojuje na ulici Na Zlíchově se stávající tramvajovou tratí. Hlavní pole mostu nad řekou bezpečně překračuje 7 m vysoký plavební profil, směrem k pravému břehu pak niveleta mostu klesá tak, aby se plynule napojila na tramvajovou trať na Podolském nábřeží. Přes výrazné klesání nivelety na pravém břehu je i zde nosná konstrukce umístěna s předepsanou normovou rezervou nad úrovní hladiny Q_{2002} (úroveň hladiny Vltavy při povodni v roce 2002, odpovídající zde zhruba tisícileté vodě).

Geologické podmínky

Stavba se nachází v údolní nivě řeky, přičemž stávající břehy pokrývají mocné, často značně nehomogenní navážky, které zde byly historicky sypány jako ochrana před zaplavováním při zvýšených vodních stavech řeky Vltavy. Kvartérní pokryv tvoří zpravidla málo únosné písčitojílovité náplavy a relativně únosné zvodnělé terasové štěrky. Horninový masiv je tvořen břidlicemi s polohami tufů, při povrchu jsou břidlice nepravidelně zvětralé, masiv je zvrásněný s proměnným úklonem vrstev. (obr. 6)

Zásadním prvkem komplikujícím založení byl geologický zlom (výrazná poruchová zóna) v říční oblasti pilíře P4. Průzkum zde zjistil velice složité geologické podmínky s rychlým střídáním kvality horninového masivu pode dnem řečiště. Byly zde zastiženy silně tektonicky porušené břidlice i křemence, okrajově zde byla dokumentována i žíla minety. Výrazné tektonické porušení se v břidlicích projevuje lokální degradací na horninu s nízkou až extrémně nízkou pevností, častými ohlazy, podrcením, hojnou jílovitou výplní na četných puklinách. Často v takto výrazně porušené hornině „volně plavou“ nesouvislé kry výrazně pevnějších hornin (břidlice, křemence, příp. i minety) různých velikostí. V polohách křemenců se tektonika projevuje výrazným porušením a hornina má úlomkovitý rozpad, častá je i jílovitá výplň na puklinách.

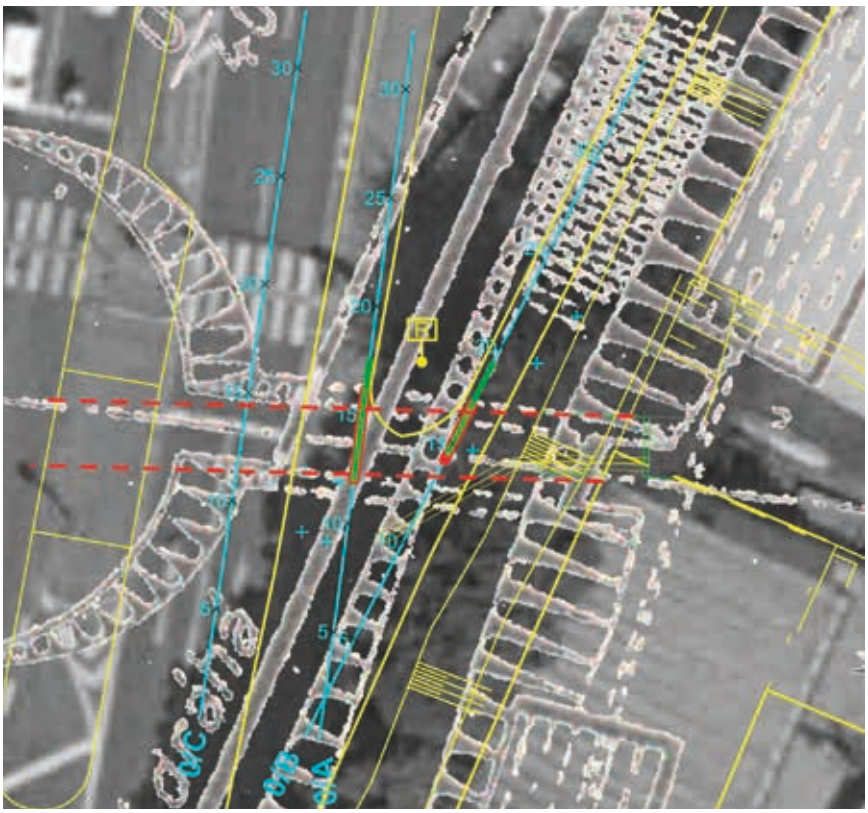
Založení mostu

Pilíře i obě opěry byly již od počátku navrženy k založení na pilotách ø 1 200 mm, zpravidla se zahloubením pat do horninového podloží třídy R4–R3 (R2). Výjimkou byl pilíř P4, jehož umístění vychází do poruchové zóny. Možnosti realizace prvků hlubinného zakládání u tohoto pilíře byly už během projekční přípravy předmětem mnoha konzultací s geotechniky a experty na zakládání. Některá doporučení navrhovala opuštění pilotového založení a jeho náhradu za založení plošné spolu s extenzivními injektážemi podloží, jiná založení na maloprofilových pilotách do ø 300 mm. Další naopak navrhovala použít piloty co největšího průměru, tak aby bylo možné případně zastižené balvany vyjmout nebo pevné kry rozpojit. V zadávací dokumentaci se projektant pro založení pilíře P4 nakonec přiklonil k použití většího množství pilot ø 900 mm tak, aby při realizaci zajistil přebytek výkonu vrtné soupravy. Vzhledem k výrazně horší kvalitě horniny (globálně třídy R5–R6) zde byla délka pilot navržena 20 m, zatímco u sousedního pilíře P5 mimo poruchovou zónu se počítalo jen s krátkými pilotami délky 5 m, vetknutými/opřenými do zdravého podloží třídy R3–R2.

Během realizace založení se vyskytly některé obtíže. Při realizaci pilot pilíře P2 došlo při vytahování výpažnice u dvou pilot k masivnímu úniku betonové směsi mimo vrt. Piloty byly po dílčím zatuhnutí následující den zpětně odvrtány a realizovány znovu. Ukázalo se, že v prostoru ulice Strakonické jsou v podloží ve vrstvách mohutných navážek různé historické objekty, byť demolované a zasypané, ale stále i s nevyplněnými prostory, kam se rozlil čerstvý beton z realizovaných pilot. Dle později získané historické mapy Smíchova se v tomto prostoru nacházela pila na zpracování dřeva dopravovaného po Vltavě ve vorech, ke které vedl od řeky klenbový most jako tzv. výtah na dřevo. Tento historický klenbový most, nyní umístěný pod ulicí Strakonická, byl také v rámci stavby nalezen, navíc v poloze, která představovala překážku pro následné založení skruže pro výstavbu nosné konstrukce ve druhém poli. Skruž zde proto musela být založena na desce podporované dalšími pilotami mimo prostor historické klenby. (obr. 7 až 10)

Po zkušenostech s problémy při realizaci pilot pilíře P2 byl proveden dodatečný georadarový průzkum podloží v místě opěry O1 pro zjištění možných kaveren a heterogenity navážek. Na základě tohoto průzkumu se ve vytipovaných místech realizovaly obětní piloty z prostého betonu, které měly za cíl ověřit, zda při realizaci systémových pilot nebude docházet k zásadním únikům čerstvého betonu, jako se stalo u sou-

6





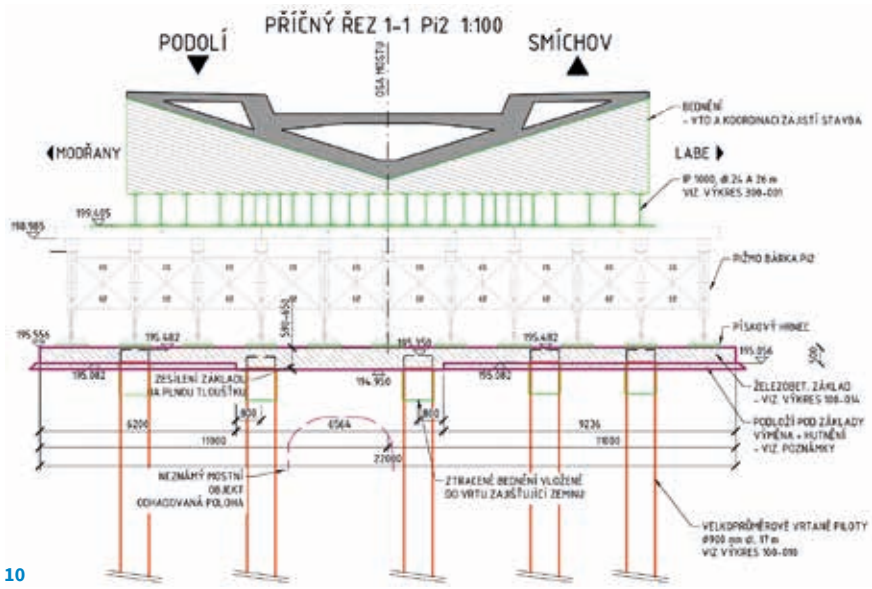
7



8

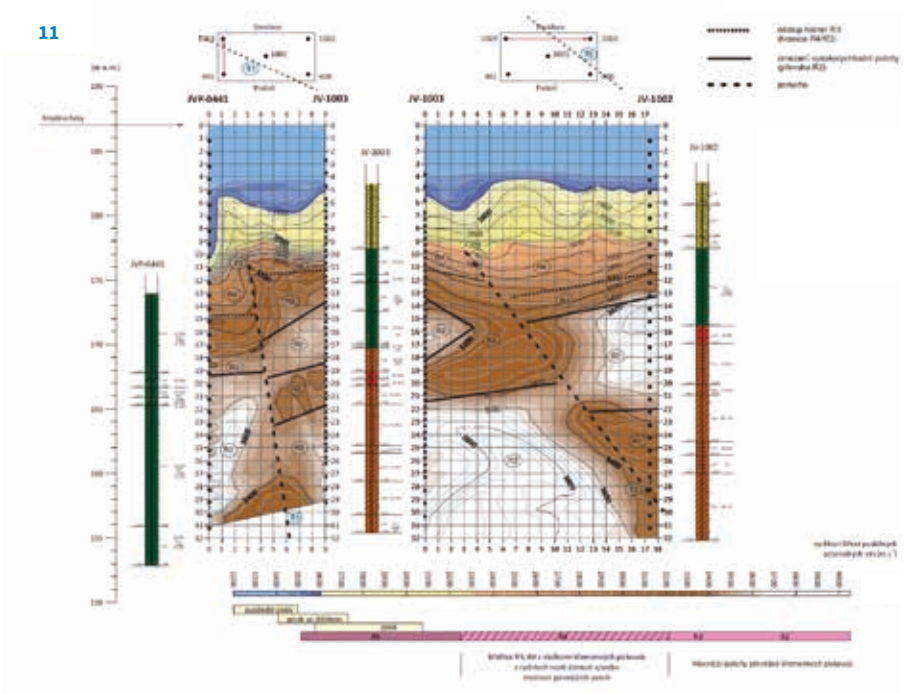


9



10

6 Výsledky georadarového průzkumu v prostoru veslařského klubu a Strakonické ulice **7** Historická mapa zachycující polohu Pily Löwy a Winterberg **8** Parní pila na Zlíchově – rok 1910 **9** Historický klenbový most – výtah na dřevo (čelo klenby skryto za žebříkem) **10** Založení bárky skruže nad historickou klenbou
11 Seismická tomografie skladby podloží pod základem pilíře P4



11

sedního pilíře P2. Obětní piloty však již zásadní heterogenitu nezastihly, a tak se následně jejich převrtáním realizovaly systémové piloty opěry O1 bez závažných problémů.

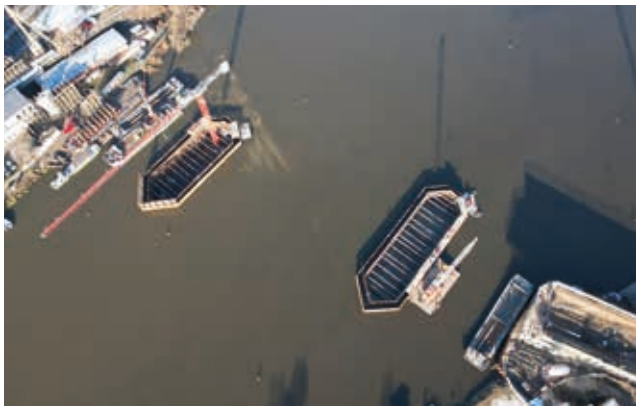
Nejnáročnější kapitolou zakládání mostu byla jednoznačně realizace pilot pro pilíře P4 a P5, stejně jako jejich stavebních jímek. Realizace vrtaných pilot pro oba pilíře v korytě řeky se prováděla z plovoucího pontonu (lodi Jantar), na němž byla umístěna vrtná souprava. Hloubka vody v místě pilířů byla cca 4 m.

Pilíř P5 je založen na 23 ks vrtaných pilot ø 1 200 mm celkové délky 5 m. Základová spára pilíře P5 je v hloubce cca 3,5 m pod úrovní dna koryta řeky Vltavy, vrty ve dně tak byly dlouhé cca 8,5 m (s patou cca 12,5 m pod hladinou řeky). Přestože byly zastiženy tvrdé horniny až třídy R2 již cca 6 m pode dnem řeky, požadovaná minimální délka pilot 5 m byla nakonec se značným úsilím dodržena.

Po realizaci pilot pilíře P5 se ponton s vrtnou soupravou přesunul do místa pilíře P4 k realizaci pilot o délce 20 m.



12



13

14



12 Vrtání pilot pro pilíř P5 **13** Letecký záběr na jímky pro pilíře P4 a P5 **14** Těsněná jímka pilíře P5 a prostorová skruž na podolském břehu

Přestože se jednalo o poruchovou zónu, při samotné realizaci pilot se téměř opakoval scénář z realizace pilot u pilíře P5, kde se poměrně brzy narazilo na polohy tvrdé horniny, jen obtížně vrtatelné. Po několika pokusech na různých místech základu s obdobným výsledkem byly práce na pilotách pilíře P4 pozastaveny a bylo rozhodnuto o zpracování podrobnějšího doplňkového IGP. V jeho rámci bylo provedeno pět dalších jádrových vrtů v půdorysu základu pilíře P4 a další doplňkové zkoušky a měření (karotážní měření a seismická tomografie mezi vrty). Na základě výsledků prací byla zpřesněna interpretace geologické skladby podzákladí i charakteristika zastižených geotechnických typů, byly získány informace o rozložení oblastí tektonického narušení, a to i ve formě 3D modelu podzákladí. Základní charakteristika narušeného masivu byla upřesněna na horninu třídy R4. Na základě doplňkového průzkumu pak bylo přepočteno a upraveno technické řešení založení. Pilíř P4 je nakonec založen na 48 ks pilot ø 1 200 mm, piloty byly zkráceny na délku 8,0–12,0 m, kdy proměnná délka pilot je navržena s ohledem na zjištěné výrazné uklonění vrstev pevnějších hornin z 3D modelu podzákladí. S pomocí speciální vrtací hlavice se realizace pilot dle upraveného návrhu již zdařila. Zároveň byla navržena a následně provedena injektáž pat všech pilot pilíře P4 z důvodu eliminace možného dosednutí v patách, způsobeného možným rozvolněním horniny na kontaktní ploše paty piloty použitou technologií vrtání a obtížným dočišťováním pat v horninách rozdílné kvality, malé mocnosti a s podstatným úklonem vrstev. Tím bylo limitováno možné rozdílné sedání základů pilířů P4 a P5, nepříznivé pro rámovou konstrukci.

Piloty pro všechny podpěry mostu jsou z betonu C30/37-XA2. Na základě rozborů agresivity podzemních vod byla pro piloty opěry O1 a pilíře P2 receptura betonu navržena pro síranovou odolnost od 600 do 3 000 mg/l, pro ostatní podpěry (tj. pilíře P3 až P6 a opěru O7) pak pro síranovou odolnost od 200 do 600 mg/l. Piloty byly realizovány do pažených vrtů pod ochranou ocelové výpažnice, na všech pilotách byly provedeny zkoušky integrity.

Jímky v korytě řeky

Ještě před zahájením prací na pilotách vodních pilířů P4 a P5 bylo provedeno několik beranicích pokusů, které měly ověřit možnost realizace těsněných štětovnicových jímek pro výstavbu základů i dříků pilířů P4 a P5. Výsledky pokusů ukázaly, že původně v zadání uvažované těsněné dvouplášťové jímky, realizované klasickým beraněním, resp. vibroberaněním štětovnic s následným těsněním prostoru mezi oběma plášti jílocementovou směsí, jsou nerealizovatelné. Během pokusů se nepodařilo zarazit paty štětovnic až do navětralého okraje skalního podloží, což mělo znemožnit podtékání pat, a tím zajistit funkčnost těsnění jímky. Na základě tohoto zjištění bylo technické řešení jímek změněno na jímky jednoplášťové, avšak se štětovnicemi zaberaněnými do předem realizovaných předvrtů ø 1 200 mm s následnou výplní vrtu jílocementovou směsí až po úroveň dna řeky. Předvrty byly realizovány na hloubku cca 6,5 m od úrovně dna, štětovnice tak byly zapuštěny minimálně 1,5 m do skalního podloží pod štěrkovou terasou. Jímky pak byly během vyčerpávání vody postupně staticky zajišťovány masivními ocelovými rozpěrnými rámy ve dvou úrovních a opatřeny zesíleným podkladním betonem na dně jímky. Plášť jímek byl z vnější strany chráněn proti nárazu plavidel opeřením instalovaným na nezávislou sadu štětovnic. Jímky se během realizace stavby ukázaly jako dostatečně těsné, zbytkové přítoky do jámy byly snadno čerpatelné. Pouze jedenkrát po dobu stavby dosáhla hladina ve Vltavě takové výšky, že jímky musely být na základě povodňového plánu z bezpečnostních důvodů řízeně zaplaveny a po opadnutí hladiny pak znovu vyčerpány.

Spodní stavba

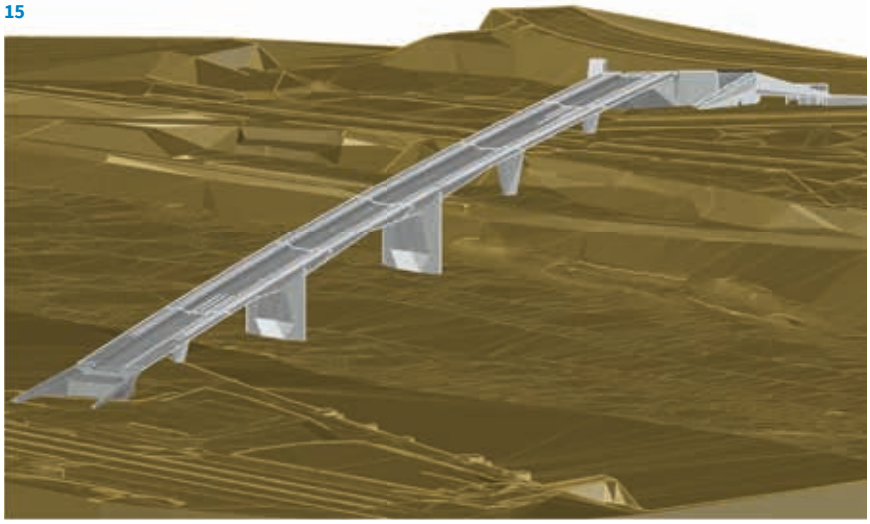
Všechny prvky spodní stavby jsou monolitické železobetonové. Tvary opěr i pilířů důsledně sledují architektonický návrh mostu, veškeré pohledové plochy jsou složeny z trojúhelníků se zvýrazněnými ostrými lomovými hranami.

Krajní opěry mostu tvarově navazují na přilehlou nosnou konstrukci, stejně jako na ně navazující křídla ve formě úhlových opěrných zdí. V plentách opěr, resp. v boční ploše křídla, jsou osazeny bezpečnostní dveře umožňující vstup do komory nosné konstrukce. Opěra O1 na smíchovské straně je výrazně půdorysně šikmá, svou šikmostí sleduje vedení ulice Nádražní pod mostem. Opěra O1 je tvořena mohutným dříkem s úložným prahem a plentovacími zídkami plynule navazujícími na dřík. Čelní lícová plocha dříku opěry je výrazně ukloněná vpřed a dále členěna na dílčí trojúhelníkové plochy. Podél obou křídel jsou pak jako samostatné konstrukční prvky vedena přístupová schodiště na most.

Opěra O7 na podolském břehu je kolmá na osu mostu. Hlavní část opěry je tvořena mohutným dříkem s úložným prahem, krycími plentovacími zídkami plynule navazujícími na dřík a zárodky křídel. Čelní lícová plocha dříku opěry je složena z různě ukloněných trojúhelníkových ploch, tentokrát jsou prolomeny i boční stěny opěry a dále i lícní plochy navazujících křídel. Součástí opěry je i vnitřní členěný prostor za závěrnou zdí, který bude sloužit zčásti jako veřejně přístupné zázemí s toaletami, zčásti pak jako neveřejné (služební) prostory, užívané pro provoz arény pod posledním mostním polem. Úložný práh opěry má dvě výškové úrovně, vyšší v úrovni ložiskových bloků pro uložení nosné konstrukce a nižší umožňující vstup ze zázemí do vnitřní komory opěry k nosné konstrukci. Navazující křídla jsou tvořena samostatnými monolitickými železobetonovými úhlovými zdmi.

Pilíře P2, P3 a P6 situované na obou březích mají v zásadě jednotné konstrukční řešení: tvoří je jediný štíhlý dřík. Ve vodorovném řezu mají dříky sevřený kosodélníkový tvar, po výšce v obou směrech proměnný, příčně se dříky s výškou rozšiřují tak, aby na ně v hlavě mohla být umístěna ložiska. Povrchy dříků jsou opět tvořeny z trojúhelníkových ploch. U dříku pilíře P2 dochází navíc k jednosměrné rotaci

15



16



15 3D model mostu zasazený do terénu **16** Opěra O7 po odbednění

jednotlivých hran pilíře, čímž se vytváří dojem šroubovice. Pilíř tak ve vodorovném řezu není symetrický k žádné z os.

Pilíře P4 a P5 umístěné v korytě řeky Vltavy mají jiný tvar a charakter než pilíře umístěné na březích. Jsou orientovány paralelně s tokem řeky, a tedy šikmo k ose mostu. Jsou rámově spojeny s nosnou konstrukcí mostu a mají zásadní vliv na architektonický výraz mostu. Pilíře spočívají na mohutné základové desce uložené pod dnem řeky. Jedná se o stěnový dřík roztažený na celou šířku nosné konstrukce mostu. Plochy stěny jsou prolamované, opět tvořené trojúhelníky. Celkově jsou stěny těchto pilířů v podélném směru mostu velmi štíhlé, na návodní a povodní



17

17 Silné vyztužení pilíře P4 **18** Rámové spojení pilíře P4 s nosnou konstrukcí **19** Na obou opěrách a všech břehových pilířích (P2, P3, P6) jsou umístěna kalotová ložiska pro uložení nosné konstrukce



18

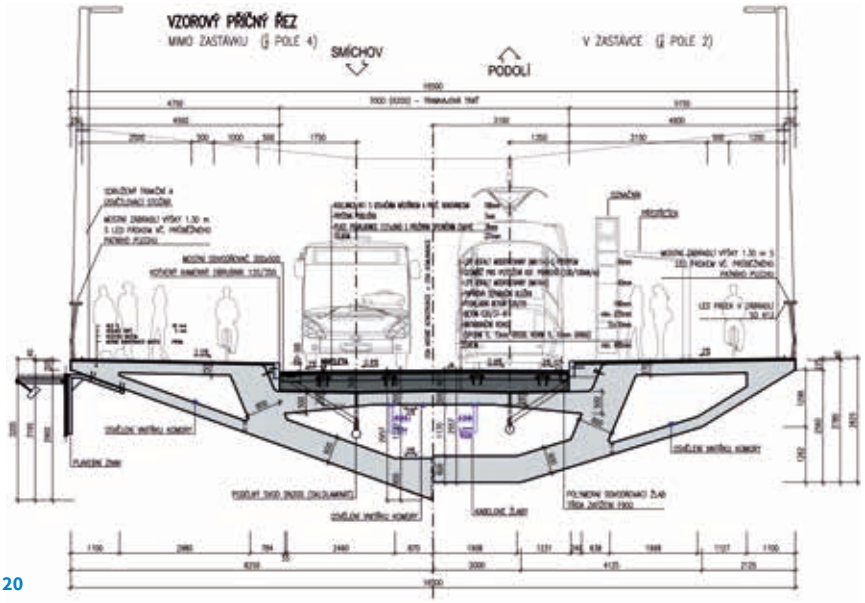
19



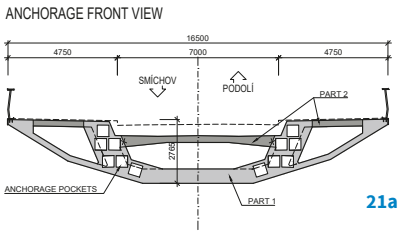
hraně se zužují téměř do špičky, čímž se dosahuje hydraulicky velmi příznivého tvaru. Centrální trojúhelníková plocha stěny má svůj hrot na úrovni běžné hladiny vody v řece Vltavě na kótě 187,00 m n. m. (dána vzdutím Šítkovského jezu), a přirozeně tak ukazuje stav hladiny vody v řece.

Na obou opěrách a všech břehových pilířích (P2, P3, P6) jsou umístěna kalotová ložiska pro uložení nosné konstrukce. Na nejvyšším z těchto pilířů (P3) je v horním povrchu pilíře nika (a nad ní otvor v příčníku nosné konstrukce). Tato úprava umožňuje přístup k ložiskům pilíře pro jejich inspekci a údržbu.

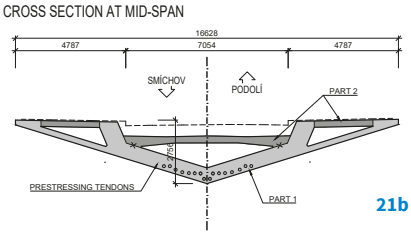
Veškeré konstrukce spodní stavby, opěry i pilíře byly podrobně modelovány ve 3D, modely byly využívány i pro tvorbu výkresů výztuže. Vzhledem ke značné proměnlivosti průřezů spodní stavby byla skladba výztuže, včetně tvarů jednotlivých vložek, komplikovaná, a tedy technicky i časově náročná, a to jak na straně projektanta, tak ve výrobně výztuže i na stavbě při samotné ukládce.



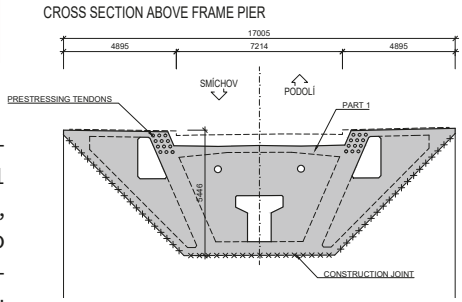
20



21a



21b



21c

20 Vzorový příčný řez mostem (vlevo střed hlavního pole, vpravo řez v místě zastávky MHD na smíchovské straně mostu) **21** Typické příčné řezy: a) kotevní čelo na styku taktů mimo hlavní pole, b) ve středu hlavního pole, c) nad rámovým pilířem (P4, P5) **22** Kotevní čelo taktu č. 5 v hlavním poli mostu

Nosná konstrukce

V příčném řezu tvoří konstrukci tříkomorový průřez s dvěma hlavními nosnými vnitřními stěnami proměnné výšky. Vnější skloněné stěny utváří vnější tvar konstrukce a staticky fungují jako vzpěry chodníkových konzol. Tyto vnější stěny jsou lomené, lineární posun tohoto lomu pak definuje změnu tvaru příčného řezu po délce mostního pole. Průřez se tak v rámci jednoho pole mostu plynule mění z lichoběžníkového nad pilíři až po čistě trojúhelníkový uprostřed pole. Vnější povrch nosné konstrukce je takto opět složen z trojúhelníků, jejichž délka je vždy polovinou délky pole. Betonové chodníkové desky jsou integrovány do nosné konstrukce a plně staticky využívají dostupné konstrukční výšky. Stropní deska střední komory totiž musí být umístěna ve snížené poloze tak, aby byl vytvořen prostor pro umístnění konstrukce nezávislé pevné betonové jízdní dráhy pro tramvajovou trať, a je tak staticky méně využitelná. Navíc tíha betonové jízdní tramvajové dráhy představuje pro konstrukci dodatečné navýšení zatížení. Výška nosné konstrukce v krajních polích (mimo profil řeky) je konstantní 2,7 m. Výška nosné konstrukce v polích nad řekou se plynule mění parabolickými náběhy z 3,1 m v hlavním poli (resp. 2,7 m v přilehlých polích) na 5,4 m nad hlavními pilíři. V polích s výškovými náběhy konstrukce se tak původně rovinné trojúhelníky vnějšího povrchu mění na trojúhelníky prostorově zakřivené.

Náročnost tvaru nosné konstrukce navíc umocňuje její různá šikmost v osách uložení nad jednotlivými podpěrami, kdy se uspořádání příčného řezu plynule mění z velmi šikmého uložení nad opěrou O1 po kolmé uspořádání nad pilíři P2 a P3, pak opět na šikmé uložení ve vetknutí do rámových pilířů P4 a P5 v korytě řeky Vltavy, aby se zpět tvarování příčného řezu dostalo do kolmého uložení nad pilířem P6 a opěrou O7. Kvůli průběžným změnám šikmosti nosné konstrukce v osách uložení, podélným výškovým náběhům konstrukce u vodních pilířů a kvůli rozdílnému vedení předpětí po délce mostu je ve svém důsledku téměř každý příčný řez nosné konstrukce na mostě unikátní.

22



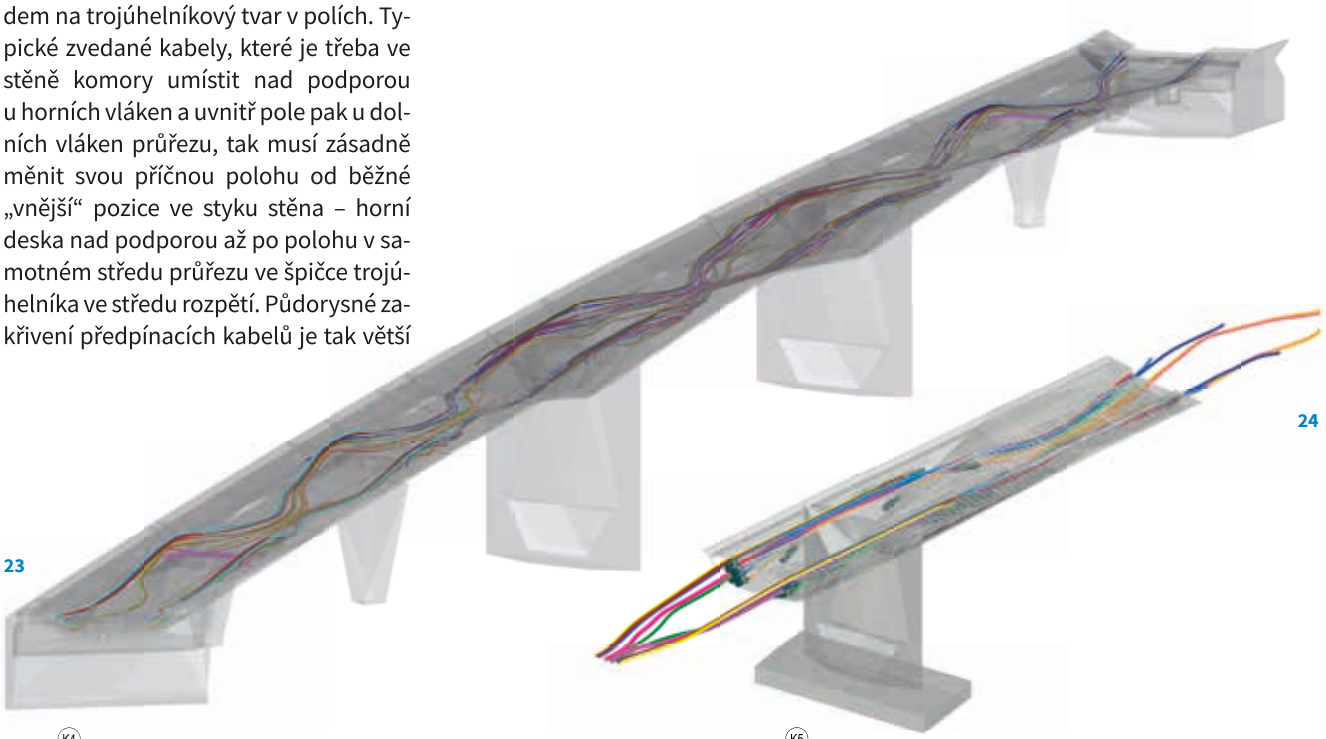
Předpětí nosné konstrukce

Nosná konstrukce je z betonu C45/55 a je podélně předepnuta předpínacími jednotkami s 27 lany Y1860 S7-15,7 se soudržností. Předpínací kabely jsou spojkovány ve spárách mezi jednotlivými takty nebo kotveny v nálitcích uvnitř komory. Geometrie vedení kabelů je mimořádně komplikovaná, zvláště v půdoryse, neboť kabely musí sledovat geometrii hlavních stěn, které se svým zalomením podílí na tvarování vnějšího povrchu nosné konstrukce s přechodem na trojúhelníkový tvar v polích. Typické zvedané kabely, které je třeba ve stěně komory umístit nad podporou u horních vláken a uvnitř pole pak u dolních vláken průřezu, tak musí zásadně měnit svou příčnou polohu od běžné „vnější“ pozice ve styku stěna – horní deska nad podporou až po polohu v samotném středu průřezu ve špičce trojúhelníka ve středu rozpětí. Půdorysné zakřivení předpínacích kabelů je tak větší a jejich půdorysné vedení komplikovanější než zakřivení a trajektorie kabelů ve svislé rovině. Celkově je trajektorie každého kabelu sestavena z obecných křivek, běžný analytický popis nebyl možný. O to náročnější bylo kontrolovat splnění některých požadovaných parametrů předpínacího systému, např. minimální poloměr zakřivení kabelu, v prostoru.

Nad pilíři P2, P3 a P6 je navíc navrženo příčné předepnutí příčníků zvedanými kabely se šesti lany, které kompenzuje zvýšené namáhání příčníků od nepřímého uložení konstrukce na ložiska.

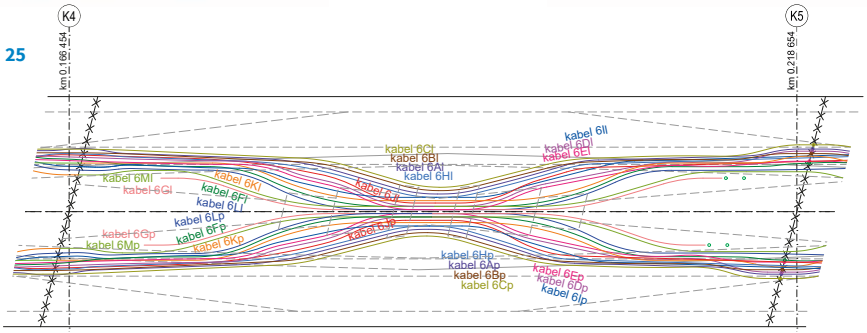
Na základě korozního průzkumu byl most určen k realizaci ochranných opatření proti účinkům bludných proudů stupně 4. I s ohledem na vedení tramvajové trati přímo na mostě, blízkosti železniční trati a trasy metra na smíchovském břehu byla na mostě navržena řada opatření pro omezení vlivu bludných proudů na konstrukci mostu, včetně použití plně elektricky izolovaného systému předpětí (PL3).

23



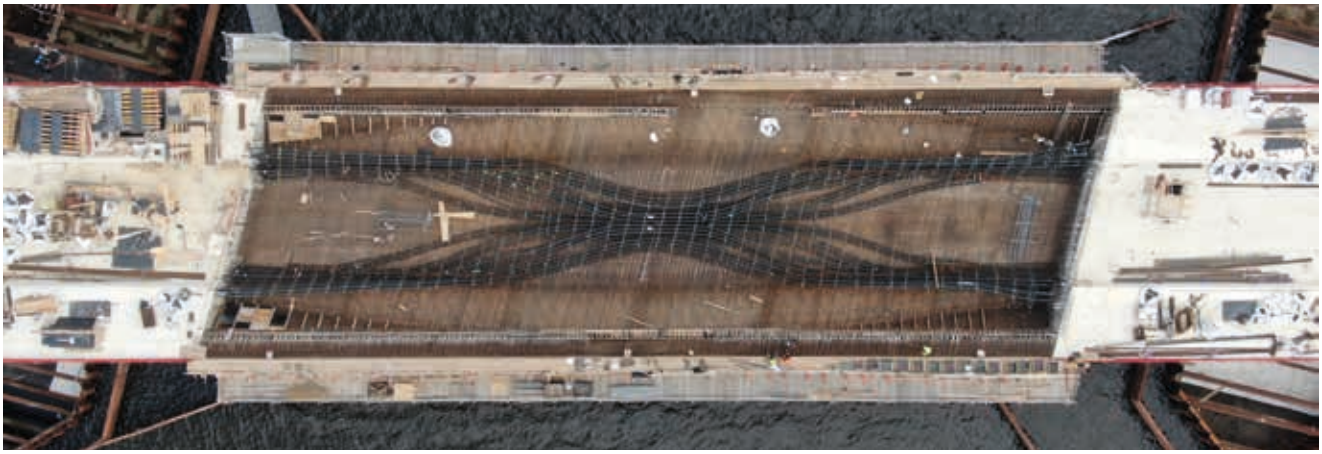
24

25



23 Základním nástrojem při navrhování byl komplexní a podrobný 3D model celé nosné konstrukce, včetně veškerých detailů vedení předpětí **24** 3D model s předpětím – výřez taktu č. 5 **25** Výkres předpětí – půdorys taktu č. 6 (ve středu hlavního pole) **26** Letecký záběr na vedení předpínacích kabelů – takt č. 6 v hlavním poli

26

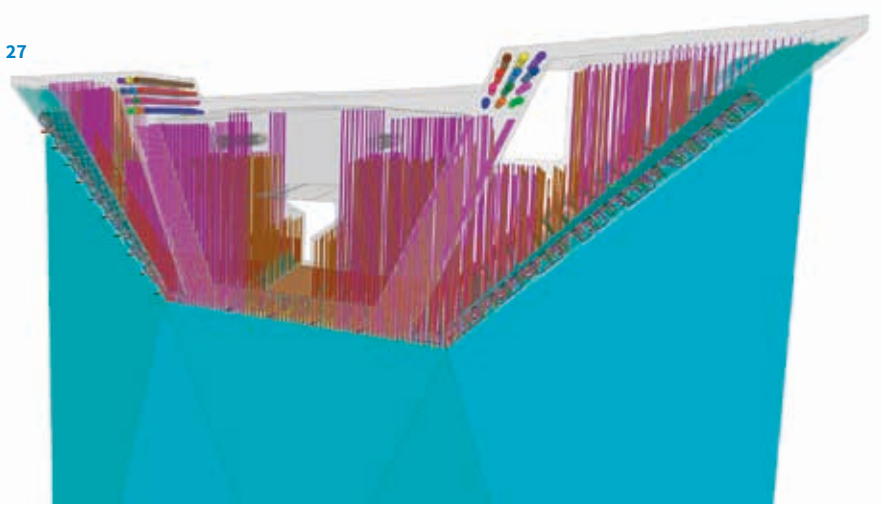


3D modelování

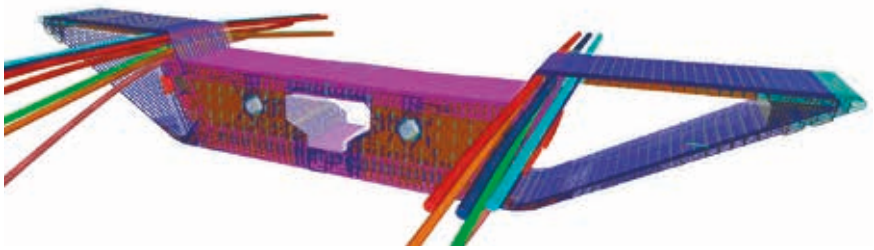
Během projekčních prací na realizační dokumentaci nosné konstrukce se prokázala potřeba vysokého množství betonářské výztuže, dosahující hodnot kolem 300 kg/m^3. Mezi důvody této vysoké spotřeby patří zejména snížená ohybová i torzní tuhost trojúhelníkového průřezu ve středních sekcích mostních polí a vyšší potřeba přenášení radiálních sil od výrazně zakřiveného vedení kabelů. Dalšími důvody jsou vyšší množství lomů tvaru průřezu v příčném, ale i podélném směru, které musí jednotlivé vložky výztuže tvarově sledovat (z důvodů proveditelnosti bylo třeba tvar vložek zjednodušit, vložky zkracovat, a proto systematicky stykovat přesahem).

Vzhledem k vysokému stupni vyztužení nosné konstrukce, komplikovanému vedení předpětí a jeho požadované elektroizolační funkci a zároveň s ohledem na probetonovatelnost průřezu bylo třeba projekčně řešit sestavu předpětí a vložek betonářské výztuže v každém jednotlivém řezu s neobvyklou podrobností a přesností. Množství projekčně zpracovaných řezů i různých položek výztuže bylo oproti standardu mnohonásobně větší, projekčně byly zpracovány v zásadě všechny příčné řezy na nosné konstrukci po 150 mm. Z důvodů možných kolizí a styků předpětí a betonářské výztuže byl i tvar průřezu uvnitř komory lokálně dále upřesňován, např. ve středu tří hlavních polí byla doplněna dolní výztužná příčná žebra pro umístění dostatečného množství výztuže zachycující půdorysné radiální síly od předpětí apod.

27



28



27 3D model vyztužení nadpodporového příčníku P4 **28** 3D model vyztužení příčníku P2 včetně předpínacích kabelů **29** Pohled na skruž s bedněním taktu č. 4 během jeho betonáže

Základním nástrojem pro všechny tyto práce byl komplexní a podrobný 3D model celé nosné konstrukce, včetně veškerých detailů vedení předpětí. 3D model sloužil také jako přímý podklad pro návrh bednění, podpůrných konstrukcí i pro vytyčování konstrukcí a jejich prvků na staveništi. Pro některé složité části konstrukce (např. nadpodporové příčníky) byla i samotná výztuž projektována přímo ve 3D. Mimořádně obtížné bylo i modelování pro nezbytná statická posouzení. Zvláště náročné bylo vytvoření podrobných prostorových deskostěnových modelů včetně zatížení od předpětí pro posouzení konstrukce v příčném směru a kroucení, kde jsme se často blížili k technickým limitům softwaru i hardwaru.

29





30

Spotřeba materiálů

Architektonicky výrazná podoba mostu odlišuje Dvorecký most od běžných komorových mostních konstrukcí obdobných rozměrů a má významné dopady jak na rozsah a pracnost projekčních prací, tak na pracnost samotné výstavby. Nicméně spotřebu základních materiálů nosné konstrukce se podařilo udržet na běžných hodnotách (beton 1 m^3/m^2, předpínací výztuž 36 kg/m^2). Pokud vezmeme v úvahu náročné požadavky zadání, zejména zatížení provozem tramvají, předepsanou konstrukci tramvajové trati s nezávislou pevnou jízdní dráhou na mostě a relativní štíhlost nosné konstrukce danou omezeným prostorem mezi předepsanou niveletou a překračovanými překážkami, pak lze návrh nosné konstrukce a předpětí z pohledu spotřeby betonu považovat za celkově velmi úsporný. Naopak výše popsané navýšení spotřeby betonářské výztuže oproti běžným komorovým konstrukcím je značné, nicméně z pohledu celkových nákladů stavby není nikterak významné. Celková náročnost projektu se tak spíše než v samotné spotřebě materiálů projevila zejména ve zvýšené pracnosti, jak ve fázi projekčních prací, tak posléze i na stavbě.

30 Bezsloupkové zábradlí je v určených místech lokálně přerušeno ocelovými sloupy trakčního vedení tramvajové trati, které zároveň slouží pro osazení svítidel veřejného osvětlení **31** V lednu letošního roku úspěšně proběhla statická zatěžovací zkouška mostu za pomoci osmi nákladních vozidel – snímek hlavního pole

31



Příslušenství a vybavení mostu

Vozovka s tramvajovou tratí na mostě je navržena pojížděná s krytem z litého asfaltu tak, aby mohla být zároveň pojížděna silniční dopravou. Konstrukce nezávislé tramvajové dráhy (pevná betonová jízdní dráha s upevněním kolejnic typu W-tram) je zapuštěna do mostu a leží na snížené horní desce mostovky, od které je oddělena izolací z asfaltových pásů (NAIP) a antivibrační kaučukovou rohoží. Přechod tramvajové dráhy z mostu na obě předpolí je s ohledem na délku mostu řešen pomocí kolejových dilatačních zařízení. Vlastní mostní závěry jsou hřebenového typu. Izolace mostu je celoplošná, z vany pod vozovkou je izolace plynule vytažena na chodníkové konzoly. Povrch chodníků je opatřen probarvenou asfaltovou pochozí vrstvou z ACO, obrubníky jsou kamenné. Z povrchu vozovky a chodníků na mostě je voda odváděna podélným a příčným sklonem do mostních odvodňovačů umístěných po obou stranách vozovky, v oblasti nulového podélného sklonu mostu jsou odvodňovače nahrazeny průběžným odvodňovacím žlabem podél obrubníku. Voda z mostu je pak podélnými svody v komoře mostu odvedena přes závěrné zídky do kanalizace na obou předmostích.

Na obou vnějších okrajích mostu u chodníkových částí je osazeno bezsloupkové zábradlí, které je v určených místech lokálně přerušeno ocelovými sloupy trakčního vedení tramvajové trati, které zároveň slouží pro osazení svítidel veřejného osvětlení. Samotná konstrukce zábradlí s masivním madlem z umělého kamene bílé barvy ve výšce 1,30 m nad povrchem chodníku i tvary stožárů trakčního vedení čtverhranného průřezu, kónicky zužujícího se tvaru po výšce sloupu, jsou tvarovány dle požadavků architekta a navazují na trojúhelníkové plochy nosné konstrukce. Bílé madlo zábradlí je z podhledu prosvětleno vloženým průběžným osvětlovacím páskem s bodovými LED prvky, které nasvěcují přilehlý povrch chodníku a slouží pro slavnostní osvětlení mostu a doplnění hlavních svítidel veřejného osvětlení na sloupech trakčního vedení.

Monitoring mostu

Značná pozornost byla věnována vybavení mostu pro sledování jeho chování během provozu, a to i s ohledem na náročné korozní podmínky prostředí, ve kterém se most nachází, zvlášť se zřetelem



32

k možnému vlivu bludných proudů. Most je proto vybaven zařízeními a systémy pro monitoring, které umožňují sledovat:

- teploty a deformační chování konstrukce,
- průnik agresivních látek do betonu,
- poměrná přetvoření konstrukce,
- napětí v předpínacích kabelech (přímo – dynamometry – i nepřímo – EM snímači),
- elektroizolační vlastnosti systému předpětí,
- korozní potenciál betonářské i předpínací výztuže.

Část snímačů je prostřednictvím systému IoT připojena k dataloggeru a umožňuje průběžný dálkový přenos a vyhodnocování dat.

Provozní a zatěžovací zkoušky

V lednu letošního roku úspěšně proběhla statická zatěžovací zkouška mostu za pomoci osmi nákladních vozidel. Shoda naměřených průhybů s hodnotami z výpočetních modelů se ukázala jako velmi dobrá. V únoru pak na mostě probíhaly provozní zkoušky tramvajové trati, kdy měřicí tramvajový vůz ověřoval průjezdnost trati, výhybek, kolejových dilatačních zařízení a trolejového vedení. Před otevřením mostu pak na mostě ještě proběhla ověřovací dynamická zkouška s využitím budičů kmitání.

32 Výrazně atypické tvarování mostu, jak spodní stavby, tak nosné konstrukce, plně respektuje návrh vzešlý z architektonicko-konstrukční soutěže **33** Veškeré viditelné povrchy jak spodní stavby, tak nosné konstrukce mostu jsou navrženy z bílého betonu a důsledně využívají motivu trojúhelníků – na snímku rámové spojení pilíře P4 a nosné konstrukce

33





34

Závěr

Výrazně atypické tvarování mostu, jak spodní stavby, tak nosné konstrukce, plně respektuje návrh vzešlý z architektonicko-konstrukční soutěže. Toto tvarování představovalo již od samého počátku mimořádnou výzvu. Vedle samotného tvaru mostu bylo třeba se vypořádat s přísnými nároky na kvalitu pohledových ploch z bílého betonu a atypickým řešením mnoha detailů. Mezi nejnáročnější prvky projektu a stavby patřily návrh a realizace předpínací výztuže při dané geometrii a zachování předepsaných elektroizolačních vlastností předpínacího systému v silně vyztužené nosné konstrukci či zakládání vodních pilířů ve dně řeky v náročných podmínkách geologického zlomu. To vše se výrazně promítlo do technické i časové náročnosti projekčních prací i stavebních činností.

A to vše v intravilánu metropole, kdy byla stavba realizována v bezprostřední blízkosti zástavby, dopravně vytížených komunikací a tratí, frekventované říční plavební dráhy a značného počtu různých inženýrských sítí. K dispozici byl jen omezený prostor pro staveniště i přístupy na stavbu. Zároveň bylo nutné koordinovat postup prací, minimálně na úrovni dopravních opatření a výluk, s okolními stavbami, jako byla např. rekonstrukce blízkého Barrandovského mostu a probíhající výstavba rezidenčního komplexu Lihovar. Pro realizaci mostu takového rozsahu a v těchto podmínkách bylo třeba využít řadu invenčních řešení – zmiňme zde např. zaplavování podpěrných skruží pro realizaci hlavních polí nad řekou pomocí pontonů.

Dvorecký most se stal nejnovějším přírůstkem mezi pražskými mosty přes Vltavu. Většina z nich jsou přitom konstrukce výjimečné, ikonické. Pro výrazné tvarování a díky svému umístění na dohled historických památek není snadné Dvorecký most mezi pražskými mosty přehlédnout. Navzdory z části kontroverznímu zadání kvůli vyloučení individuální automobilové dopravy na mostě se již dnes ukazuje jeho přínos pro veřejnou dopravu ve městě i pro pěší provoz jako neoddiskutovatelný. Z širokých chodníků mostu se otevřel nový pohled na Pražský hrad a zároveň na Vyšehrad. Po dokončení uměleckých instalací na obou březích má nový most a jeho bezprostřední okolí potenciál k vytvoření atraktivního veřejného prostoru jak pro místní, tak pro návštěvníky Prahy.

Autoři doufají, že dosavadní, ve velké většině kladné přijetí, kterého se Dvoreckému mostu dostalo mezi laickou i odbornou veřejností, přetrvá a že most bude v budoucnu vnímán jako důstojný příspěvek k souboru mimořádných pražských mostů přes Vltavu.

34 Pro výrazné tvarování a díky svému umístění na dohled historických památek není snadné Dvorecký most mezi pražskými mosty přehlédnout – pohled od branické skály na most a Pražský hrad **35** Pohled podél řeky na most s Vyšehradem v pozadí

35



Fotografie: 1, 30, 32 až 35 – Jiří Šebek, ostatní – archiv autorů



Ing. Petr Souček
Pontex, spol. s r.o.
soucek@pontex.cz



Ing. Martin Blatský
Pontex, spol. s r.o.
blatsky@pontex.cz



Ing. Miroslav Seidl
PRAGOPROJEKT, a.s.
miroslav.seidl@pragoprojekt.cz