



# KONSTRUKCE VYUŽÍVAJÍCÍ VYSOKOPEVNOSTNÍ BETON | STRUCTURES UTILIZING HIGH-STRENGTH CONCRETE

JIŘÍ STRÁSKÝ

Konstrukce z vysokopevnostního betonu jsou popsány s hlediska jejich architektonického a konstrukčního řešení i technologie jejich výstavby. Popsané konstrukce využívají inherentní vlastnosti vysokopevnostního betonu, kterými jsou nejen vysoká pevnost v tlaku a tahu, ale také vyšší modul pružnosti a mrazuvzdornost. U konstrukcí namáhaných převážně ohybem je vysokopevnostní beton navržen tehdy, kdy je nutno redukovat konstrukční výšku anebo omezit dlouhodobé deformace. Vysokopevnostní beton je však zejména využit u konstrukcí anebo konstrukčních prvků namáhaných normálovou silou, to je u oblouků, skořepin, předpjatého pásu, vzpěr a pylonů. | Structures from high-strength concrete are described in terms of their architectural and structural solution and technology of their erection. The described structures utilize inherent qualities of high-strength concrete, which are not only their high compression and tension strength, but also higher modulus of elasticity and frost resistance. Structures stressed primarily by bending are designed from high-strength concrete when it is necessary to reduce the structural depth or decrease the long-term deformations. However, high-strength concrete is mainly utilized in structures or structural members primarily stressed by normal force that is in arches, shells, stress ribbons, struts and pylons.

Současná technologie umožňuje výrobu vysokopevnostního betonu charakteristické pevnosti až 100 MPa bez podstatných problémů. V našich projektech se snažíme využívat inherentní vlastnosti vysokopevnostního betonu, kterými jsou nejen vysoká pevnost v tlaku a tahu, ale také vyšší modul pružnosti a mrazuvzdornost. Protože prvky z vysokopevnostního betonu mají, v porovnání s betonem normální pevnosti, menší duktilitu, snažíme se zvýšit duktilitu řádným příčným vyztužením – ovinutím. Tam, kde to není možné, jsme velmi opatrní při využívání vysoké pevnosti.

U konstrukcí, které jsou převážně namáhány ohybem, využíváme vysokopevnostní beton tehdy, pokud potřebujeme redukovat konstrukční výšku anebo omezit dlouhodobé deformace od dotvarování betonu. Je však zřejmé, že vysokopevnostní beton může být nejlépe využit u převážně tlakově namáhaných konstrukcí, to je u sloupů, vzpěr a pylonů. Zajímavé aplikace také představují betonové mostovky samokotvených visutých a zavěšených konstrukcí, které jsou namáhané nejen ohybem, ale i velkým tlakem.

Vysokopevnostní beton je také ideální materiál pro skořepiny, oblouky a pro předpjatý pás [1]. To je zřejmé z **obr. 1a**, který

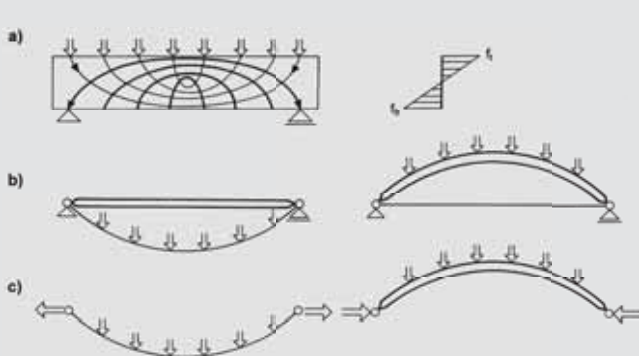
ukazuje trajektorie hlavních napětí v rovnoměrně zatíženém prostém nosníku. Maximální namáhání vzniká jen uprostřed rozpětí a jenom v horních a dolních vláknech. Nosník má mnoho „mrtvé“ váhy, která nepřispívá k přenosu účinků vnějšího zatížení. Je zřejmé, že tak plýtváme kvalitním materiálem. Pokud chceme redukovat tíhu nosníku, musíme co možná nejvíce redukovat jeho nenosnou, „mrtvou“ váhu a co možná nejvíce využít tahovou a tlakovou únosnost konstrukčních prvků. Z nosníku tak dostaneme visutý kabel nebo oblouk, v kterém je vodorovná síla přenášena vzpěrou anebo táhlem, **obr. 1b**. Jsou-li základy schopny přenášet vodorovnou sílu, lze vzpěru anebo táhlo nahradit tuhými základy, **obr. 1c**.

Tlakovou únosnost vysokopevnostního betonu lze také využít u tažených konstrukcí tvořených přímo pocházejícími kabely. Abychom mohli tyto konstrukce využít, musíme je ztužit,

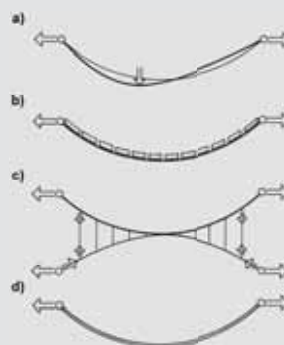
**Obr. 1** Oblouk a lano | **Fig. 1** Arch and cable

**Obr. 2** Ztužení lana | **Fig. 2** Cable stiffening

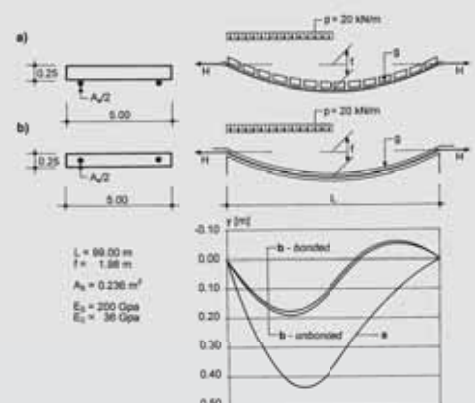
**Obr. 3** Ztužení předpjatého pásu | **Fig. 3** Stress ribbon stiffening



**Obr. 1**



**Obr. 2**



**Obr. 3**

**obr. 2a.** Je všeobecně známo, že kabely mohou být ztuženy zatížením stálým, **obr. 2b**, vnějšími kabely opačné křivosti, **obr. 2c**, nebo vytvořením betonového předpjatého pásu, jehož ohybová tuhost zajistí roznos zatížení a stabilitu tvaru, **obr. 2d**.

Výhoda ztužení kabelu předpjatým pásem je zřejmá z **obr. 3**, v kterém je porovnána deformace konstrukce ztužené zatížením stálým (a) a betonovým pásem (b). Počáteční stav obou konstrukcí je totožný. Z obrázku je zřejmé, že maximální deformace konstrukce tvořené předpjatým pásem je jen 48 % deformace konstrukce ztužené zatížením stálým. Rozdíl mezi deformací konstrukce vyztužené soudržnými (bonded) a nesoudržnými (unbonded) kabely je zanedbatelný. S ohledem na omezení trhlin je však nutné pás předepnout. Hodnota předpětí se volí tak, aby při maximálním zatížení v pásu nevznikl tah a tlakové napětí od předpětí nepřevýšilo jeho přípustné hodnoty.

U konstrukcí velkých rozpětí je tahové napětí od provozního zatížení a tomu odpovídající hladina předpětí příliš velká. Proto, abychom udrželi rozumné rozměry předpjatého pásu, je vhodné ho navrhnout z vysokopevnostního betonu.

Možnosti vysokopevnostního betonu jsou demonstrovány na dále uvedených příkladech konstrukcí. Jejich podrobný popis je uveden v publikacích [2] až [15].

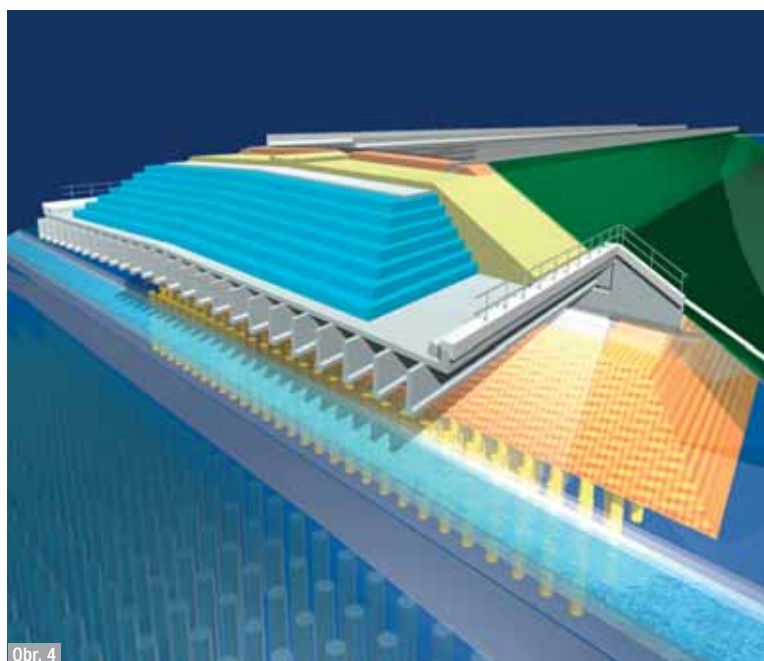
## KONSTRUKCE PŘEVÁŽNĚ NAMÁHANÉ OHYBEM

### Prefabrikované nosníky

Na dálnici D1 byly v letech 2003 až 2007 postaveny tři mosty, jejichž nosné konstrukce byly sestaveny z prefabrikovaných nosníků a spřažené mostovkové desky. Konstrukce byly navrženy tam, kde bylo nutno přenést velká zatížení anebo bylo nutné postavit konstrukci co možná nejmenší stavební výšky. Poprvé byly navrženy pro přemostění potoka, polní cesty a biokoridoru u Brněnských Ivanovic [2]. Protože v místě křížení má dálniční násyp výšku 14 m, byla navržena přesypaná konstrukce. S ohledem na velmi špatné geotechnické podmínky, charakterizované dlouhodobými deformacemi základové půdy, bylo nutno navrhnout konstrukci, která není citlivá na rozdílné sedání opěr a pilířů. Proto byla navržena staticky určitá konstrukce sestavená z prefabrikovaných nosníků délky 35,9 m, **obr. 4**. Na opěrách jsou nosníky ztuženy diafragmaty, které současně tvoří koncové stěny. Nosníky jsou uloženy na neoprenových ložiscích umístěných na nízkých opěrách. Opěry jsou založeny na násypu zpevněném geomříží, který je založen na podloží zlepšeném šterkopiskovými pilotami. 4,5 m vysoký násyp je vytvořen z polystyrenu. Prefabrikované nosníky výšky 1,5 m jsou navrženy z vysokopevnostního betonu C60/75, dva experimentální nosníky byly navrženy z betonu C90/105. Spřažená deska tloušťky 0,22 m byla zhotovena z betonu pevnosti C55/67.

Nosníky mají jednoduchý  $\perp$  tvar. Jsou sestaveny ze tří kontaktně vyráběných segmentů. Kontaktní spáry, které jsou při předpínání vyplněny epoxidovým tmelem, jsou navrženy se smykovými ozuby. V koncových průřezech, kde jsou kotveny předpínací kabely, jsou stěny nosníku rozšířeny.

Stavba mostu byla zahájena na podzim roku 2003 a dokon-



Obr. 4



Obr. 5



Obr. 6

čena byla na podzim 2005. Podobný most byl v roce 2007 postaven u Kroměříže.

Nosníky z vysokopevnostního betonu byly také využity v roce 2007 na úseku dálnice u Běloutína, kdy pro přemostění potoka Velička, **obr. 5**, bylo nutno navrhnout konstrukci s co možná nejmenší stavební výškou. I u tohoto mostu byly nosníky sestaveny ze tří dílů při stavbě podepřených montážními podpěrami, **obr. 6**.

## MOST PŘES ŘEKU MORAVU A OBTOK V OLOMOUCI

Stavba obtoku, který zlepšuje povodňovou situaci v městě



Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11

Olomouc, vyvolala stavbu nového mostu [3]. Most je situován v místě, kde se obtok odděluje od řeky. Proto konstrukce přemostuje jak řeku, tak i obtok. Protože most je situován v sousedství historické tvrze, nebylo možné postavit konstrukci s nosným prvkem situovaným nad mostovkou. S ohledem na úroveň hladiny velké vody a výšku navazujících komunikací musela být nosná konstrukce co nejštíhlejší, obr. 7. Pro omezení dlouhodobých deformací bylo navrženo předpětí tak, aby vyrovnalo účinky zatížení stálého. S ohledem na malou konstrukční výšku však byla hladina předpětí velmi vysoká. Proto byla nosná konstrukce navržena z vysokopevnostního betonu C60/75.

Obr. 4 Most Brněnské Ivanovice | Fig. 4 Brněnské Ivanovice Bridge

Obr. 5 Most přes potok Velička | Fig. 5 Velička Creek Bridge

Obr. 6 Prefabrikované nosníky | Fig. 6 Precast girders

Obr. 7 Most Olomouc | Fig. 7 Olomouc Bridge

Obr. 8 Mostovka mostu Olomouc | Fig. 8 Olomouc Bridge deck

Obr. 9 Most Olomouc | Fig. 9 Olomouc Bridge

Fig. 10 Most Olomouc | Fig. 10 Olomouc Bridge

Fig. 11 Most Olomouc | Fig. 11 Olomouc Bridge



Obr. 12



Obr. 13



Obr. 14

Most o dvou polích je tvořen spojitým nosníkem proměnné výšky, který je vetknut do koncových opěr. Zatímco přemostění řeky je kolmé, křížení s kanálem je šikmé. Proto má střední široký pilíř lichoběžníkový půdorys. Světlost polí je 54,8 a 27,3 m.

Mostovka pole přes řeku má dvoutrámový průřez; trámy mají proměnnou výšku a šířku, která se směrem od středu mostu k opěrám spojitě rozšiřuje, **obr. 8**. Mostovka nad obtokem má plný deskovitý průřez proměnné výšky.

Na okrajích je mostovka ztužena okrajovými nosníky vystupujícími nad vozovku. V nosnicích jsou převážně situovány předpínací kabely s uspořádáním odpovídajícím průběhu ohybových momentů. Na vnějších konzolách jsou situovány inženýrské sítě a chodníky. Protože konzoly jsou rozděleny příčnými spárami, nepřispívají k přenosu zatížení.

Most je založen na vrtaných pilotách. Aby byl umožněn pohyb konstrukce od objemových změn, jsou piloty v horní části zeslabeny. Piloty krajní opěry, v které je kotveno větší rozpětí, jsou doplněny zemními kotvami. Protože tyto kotvy jsou předepnuty, jsou piloty vždy tlačeny.

Most byl betonován v bednění podporovaném ocelovou příhradovou skruží s jednou podporou v řece. Stavba mostu začala v roce 2006 a byla ukončena na podzim roku 2007, **obr. 9**, **obr. 10** a **obr. 11**.

## KONSTRUKCE S TLAČENÝMI KONSTRUKČNÍMI PRVKY – OBLOUKY, VZPĚRAMI A PYLONY

### Most přes řeku Willamette, Eugene, Oregon, USA

V univerzitním městě Eugene přechází dálnice I-5 přes řeku, místní komunikace a železnici po východním a západním mostě délek 604,9 a 536,1 m [4]. Mosty nahrazují původní mosty postavené v padesátých letech minulého století. Výsledné uspořádání vyplynulo z rozsáhlých architektonických, konstrukčních a ekonomických studií, které prokázaly, že betonová oblouková konstrukce představuje optimální řešení z hlediska estetiky i ceny. Ukázalo se, že vhodně navržená oblouková konstrukce může být dokonce levnější než trámová konstrukce betonovaná letmo.

Hlavní mosty přemostující řeku jsou tvořeny spojitou obloukovou konstrukcí o dvou polích délek 118,88 a 126,79 m a vzetpětí 16,764 a 18,002 m, **obr. 12**. Oblouky obou mostů jsou tvořeny dvojicí žeber, která podpírají dvoutrámovou mostovku šířky 20,47 m, **obr. 13**. Osová vzdálenost obloukových žeber je 14,33 m. Dvoutrámová mostovka je ve vzdálenostech 3,353 až 3,696 m ztužena příčnicí. Oblouková žebra přechází ve středu mostu v trámy. Mezilehlé sloupy obdélníkového průřezu jsou situovány ve vzdálenostech 13,106 až 15,392 m, **obr. 14**. Trámy, mostovková deska, oblouky a podpěry jsou



Obr. 15



Obr. 17



Obr. 16

železobetonové, příčnický, které jsou při stavbě osazovány jako prefabrikáty, jsou předem předpjaté.

Oblouková žebra mají konstantní šířku 2,134 m, jejich výška je proměnná, od 1,895 m v patce do 1,235 m v místě spojení s mostovkou. Žebra nejsou spolu vzájemně spojena, jejich příčná stabilita je dána rámovým spojením s podpěrami vetknutými do široké mostovky. Zatímco oblouková žebra jsou spojitá přes dvě pole, mostovka je nad vnitřní podpěrou a u přilehlých polí oddilátována. Trámy jsou rámově spojeny s dvojicemi sloupů. Vodorovná síla je do skalního podloží přenášena dvakrát dvěma pilotami průměru 2,4 m.

Návrh obloukové konstrukce byl ovlivněn dvěma protichůdnými hledisky. Na jedné straně musely být oblouky co nejštíhlejší, aby co možná nejvíce omezily statické účinky od návrhového seismického zatížení, na druhou stranu musely být dostatečně tuhé, aby zajistily bezporuchový provoz. Výsledné řešení je kompromisem obou požadavků. Aby mohla být konstrukce štíhlá, jsou oblouková žebra navržena z vysokopevnostního betonu charakteristické válcové pevnosti 65 MPa. Žebra jsou dále silně vyztužena podélnou výztuží dostatečně svázanou hustou příčnou výztuží zajišťující jejich duktilitu.

Mosty se staví na pevné skuzi. Po dokončení západního mostu v červnu 2011 byl na něj převeden veškerý provoz a prozatímní most byl demolován. Nyní se dokončuje východní most.

### Nadjezd nad rychlostní komunikací R35 u Olomouce

Most je tvořen vzpěradlovým rámem o třech polích 10,1 + 30 + 19,5 m, obr. 15 až obr. 17, [5]. Šikmé vzpěry jsou tvořeny dvojicí prefabrikovaných prvků konstantní šířky a proměnné výšky od 0,5 do 0,7 m. Protože základy šikmých vzpěr jsou spojeny s koncovými příčnicí tlačeny šikmými prvky, tvoří most samokotvený konstrukční systém, který zatěžuje základy jen svislými silami. Protože vzpěry jsou namáhány velkými tlakovými silami, jsou navrženy z vysokopevnostního betonu C60/75.

Obr. 12 Most Willamette River | Fig. 12 Willamette River Bridge

Obr. 13 Most Willamette River – konstrukce | Fig. 13 Willamette River Bridge – structure

Obr. 14 Most Willamette River – konstrukce | Fig. 14 Willamette River Bridge – structure

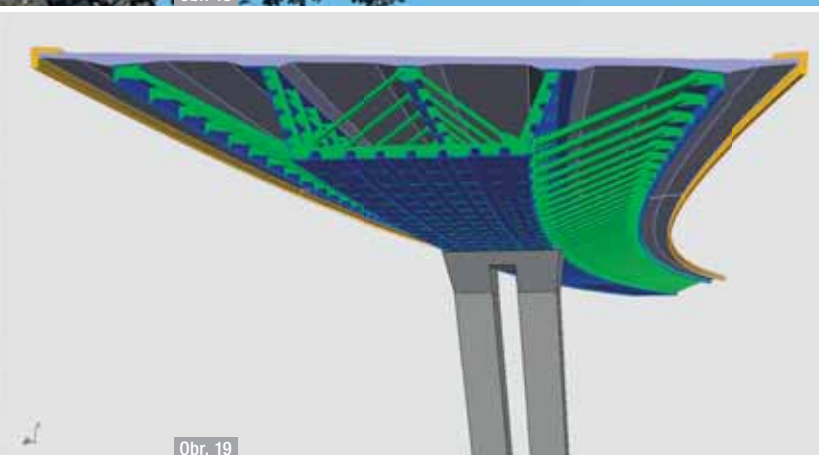
Obr. 15 Nadjezd nad komunikací R35 | Fig. 15 Overpass across R35 road

Obr. 16 Nadjezd nad komunikací R35 | Fig. 16 Overpass across R35 road

Obr. 17 Nadjezd nad komunikací R35 | Fig. 17 Overpass across R35 road



Obr. 18



Obr. 19

### Most přes Lochkovské údolí

Most přes Lochkovské údolí je situován na silničním okruhu kolem Prahy, v úseku spojujícím dálnici D1 s dálnicí D5. Most celkové délky 425,3 m přechází přes údolí ve výšce 65 m, [6]. Konstrukci mostu tvoří vzpěradlový rám s rozpětím 157,103 m, **obr. 18.**

Nosná konstrukce má pět polí s rozpětími 70 + 79,8 + 99,3 + 93,8 m + 80,5 m. Mostovka šířky až 35,425 m je tvořena spřaženým nosníkem sestaveným z ocelového koryta a betonové mostovkové desky, **obr. 19.**

Spodní stavba a diafragmata přenášející namáhání z ocelových prvků do skloněných pilířů jsou z betonu. Nosnou konstrukci tvoří spřažený jednokomorový nosník s velmi vyloženy konzoly sestavený z ocelového koryta a betonové desky. Šířka mostovky je proměnná od 33,6 do 53,425 m, výška nosníku v ose mostu je 4,8 m.

Svislé pilíře jsou tvořeny dvěma sloupy plného obdélníkového průřezu 4 x 2,8 m, které jsou vzájemně spojeny příčně předepnutými příčlemi. Skloněné pilíře délek 52,5 m jsou tvořeny dvojicemi vzpěr komorového průřezu konstantní šířky 4,05 m a proměnné výšky od 3,4 do 5,3 m. Vzpěry jsou po 5 m vyztuženy prefabrikovanými diafragmaty. Síly ze vzpěr jsou přenášeny do základů zesílenými plnými průřezy.

V horní části pilířů jsou vzpěry vzájemně spojeny hlavicemi, které jsou svázány s podporovými příčnickými nosníky. S ohle-



Obr. 20

dem na koncentraci namáhání, které vzniká v místě spojení ocelového nosníku s betonovými vzpěrami, jsou hlavice navrženy z vysokopevnostního betonu C50/60 a jejich příčné deformace jsou omezeny podélným a příčným předpětím. Vlastní spojení hlavic pilířů s ocelovými stěnami a přírubami s betonovými příčnickami je provedeno prostřednictvím předpínacích tyčí, spřahovacích trnů, spřahovacích lišt a betonářské oceli.

Zatímco opěry a svislé podpěry byly postaveny tradičně, skloněné pilíře byly postupně betonovány v konzolách začínajících u jejich základů. Pilíře byly betonovány po 2,5 m dlouhých segmentech v betonářských vozících zakotvených v již vybetonovaných segmentech. Statické účinky v monto-



Obr. 21



Obr. 22



Obr. 23

vaných konzolách byly redukovány montážními kabely zakotvenými v dočasných základech se skalními kotvami. Most byl uveden do provozu v roce 2010, [obr. 20](#).

### Most přes Rybný potok

U hranic s Německem přechází dálnice D8 přes hluboké údolí Rybného potoka po mostě délky 356 m, [obr. 21](#), [7]. Most tvoří spojitý nosník o sedmi polích s rozpětími od 34 do 58 m. Nosnou konstrukci mostu šířky 30,5 m tvoří poměrně úzký komorový nosník s velmi vyloženými příčně předepnutými konzolami zhotovený z betonu C35/45, [obr. 22](#). Konzoly jsou po 4 m podpírány prefabrikovanými vzpěrami o rozměrech 0,4 x 0,5 m. Nosná konstrukce je v podélném směru předepnuta vnitřními soudržnými a volnými nesoudržnými kabely. Prefabrikované vzpěry byly navrženy z vysokopevnostního betonu C60/70. Most byl postupně betonován po segmentech délky 30 m a následně vysouván do projektované polohy.

Most byl uveden do provozu v roce 2007, [obr. 23](#).

### Zavěšený most přes řeku Odru a Antošovické jezero

Dálnice D47 přechází u Ostravy po mostě délky 605 m přes řeku Odru a přes Antošovické jezero [8]. S ohledem na vedení trasy a plavební profil plánovaného plavebního kanálu bylo

nutno navrhnout konstrukci s minimální stavební výškou. Protože most je situován v krásné rekreační oblasti, bylo nutno navrhnout estetickou konstrukci. Z tohoto důvodu byla přijata konstrukce zavěšená v ose mostu na jediném pylonu, [obr. 24](#), [obr. 27](#) a [obr. 30](#).

Most tvoří dva souběžné mosty, které jsou v zavěšených polích vzájemně spojeny a zavěšeny na jediném pylonu situovaném v ose mostu. Rozpětí polí je od 21,5 do 105 m, pylon má výšku 46,81 m. Závěsy mají semi-radiální uspořádání; v mostovce jsou kotveny po 6,07 m, v pylonu po 1,2 m. Nosnou konstrukci každého mostu tvoří dvoukomorový nosník výšky 2,2 m bez tradičních konzol. Spodní desky obou

Obr. 18 Most Lochkov | Fig. 18 Lochkov Bridge

Obr. 19 Most Lochkov – konstrukce | Fig. 19 Lochkov Bridge – structure

Obr. 20 Most Lochkov | Fig. 20 Lochkov Bridge

Obr. 21 Most Rybný potok | Fig. 21 Rybný potok Bridge

Obr. 22 Most Rybný potok – konstrukce | Fig. 22 Rybný potok Bridge – structure

Obr. 23 Most Rybný potok | Fig. 23 Rybný potok Bridge

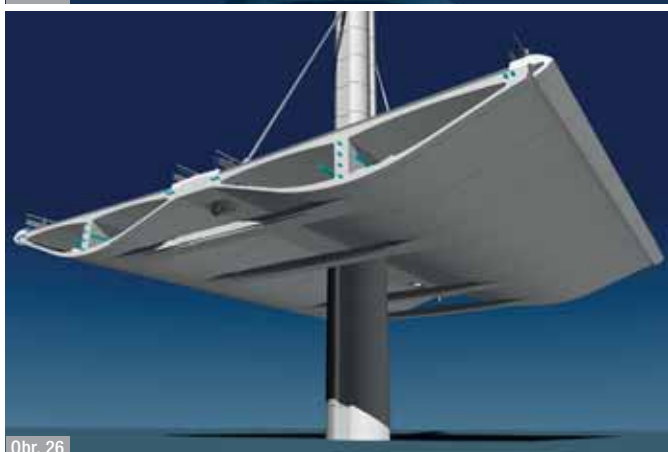




Obr. 24



Obr. 25



Obr. 26

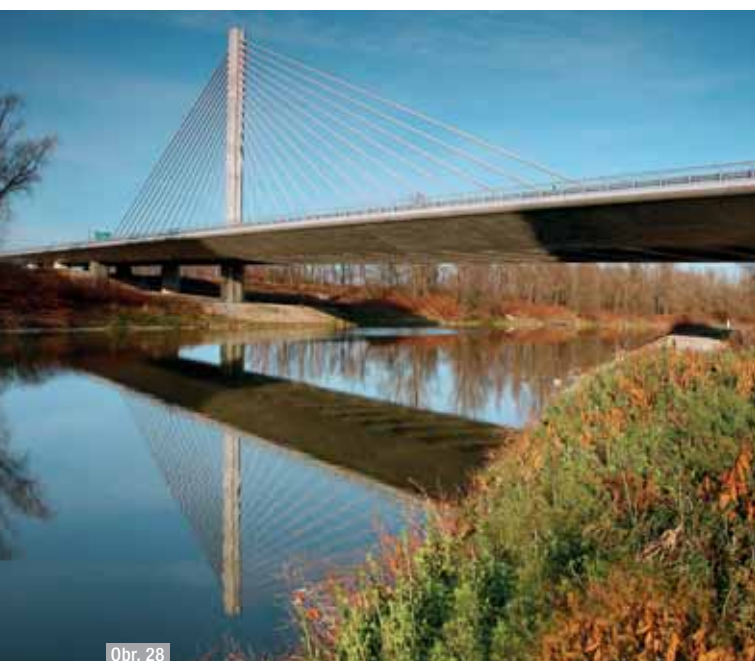


Obr. 27

komor jsou skloněny a v ose nosníků jsou zakřiveny. V zavěšených polích jsou komorové nosníky vzájemně spojeny příčně předepnutou mostovkovou deskou vybetonovanou mezi nosníky a osamělými vzpěrami umístěnými v místě závěsů, **obr. 25**. Závěsy jsou kotveny v kotevních blocích situovaných ve spojovací desce. Prefabrikované vzpěry, kloubově spojené s nálitky komorových nosníků, spojují spodní zakřivené části nosníku a spolu se skloněnými deskami tvoří čistý příhradový systém přenášející sílu ze závěsu do stěn nosníků. Mezi kotvami závěsů jsou ve spojovací desce navrženy kruhové otvory. Mostovka je spojena s pylonem horní deskou. Smykové síly jsou přeneseny z žeber do pylonu skloněnými kabely, které

příčně předpínají podporové příčníky. Ve spojení je příčný ohyb přenášen dodatečně předepnutou horní deskou a vzpěrami situovanými po obou stranách pylonu, **obr. 26**. S ohledem na velké namáhání byly vzpěry navrženy z vysokopevnostního betonu C60/75.

Pylon je tvořen ocelovým jádrem osmiúhelníkového průřezu spráženým s vnějším betonovým pláštěm. Uvnitř jeho horní části jsou kotveny závěsy, spodní část je vyplněna betonem. Pylon má konstantní tloušťku 3 m; jeho šířka pod mostovkou je 4,1 m, nad mostovkou je 2,4 m. Pylon je navržen z vysokopevnostního betonu C60/75. Pro závěsy je použit systém VSL SSI 2000. Závěsné kabely jsou sestaveny z 55 až 91 lan



Obr. 28



Obr. 29



Obr. 30

průměru 15,7 mm. Pasivní kotvy jsou v pylonu, aktivní kotvy jsou v mostovce.

Mostovka byla betonována po polích v bednění zavěšeném na dvou výsuvných skružích situovaných nad mostovkou. S ohledem na rozpětí skruží bylo nutno v zavěšených polích postavit montážní podpěry. Nejdříve byl postupně betonován pravý most a po dokončení jeho prvních šesti polí začala postupná betonáž levého mostu. Jakmile byla vybetonována pole přilehlá k pylonu, bylo smontováno ocelové jádro pylonu a postupně vybetonovány jeho vnitřní a vnější části. Současně byly montovány vzpěry mezi nosníky a byla betonována a příčně předepnuta horní deska mezi nosníky.

Potom byly smontovány a napnuty závěsné kabely. Následně byly demontovány dočasné podpěry.

Most byl uveden do provozu v roce 2007, [obr. 28](#) a [obr. 29](#).

## MOSTOVKY SAMOKOTVENÝCH VISUTÝCH A ZAVĚŠENÝCH KONSTRUKCÍ

### Lávka přes Harbor Drive, San Diego, Kalifornie, USA

V březnu 2011 byla v kalifornském San Diegu otevřena lávka pro pěší, která převádí pěší dopravu přes příměstskou železnici, tramvajovou dráhu a komunikaci Harbor Drive [9]. Lávka spojuje nový Baseballový stadion situovaný směrem ke středu města s garážemi, hotelem Hilton a Kongresovým centrem, které jsou umístěny poblíž zátoky oceánu. S ohledem na prominentní polohu požadoval investor, aby konstrukce vytvářela významnou dominantu a lávka měla neobvyklé architektonické a konstrukční řešení, [obr. 31](#), [obr. 33](#) a [obr. 34](#).

Z řady navržených alternativ se investor se rozhodl pro půdorysně zakřivenou konstrukci s mostovkou zavěšenou jen na vnitřním okraji na visutém kabelu o dvou polích. Kabely jsou podporovány skloněným pylonem vztyčeným v prostoru mezi železnicí a silnicí. Na mostovku po obou stranách

Obr. 24 Most přes Odru | Fig. 24 Odra River Bridge

Obr. 25 Most přes Odru – konstrukce | Fig. 25 Odra River Bridge – structure

Obr. 26 Most přes Odru – konstrukce | Fig. 26 Odra River Bridge – structure

Obr. 27 Most přes Odru | Fig. 27 Odra River Bridge

Obr. 28 Most přes Odru | Fig. 28 Odra River Bridge

Obr. 29 Most přes Odru | Fig. 29 Odra River Bridge

Obr. 30 Most přes Odru | Fig. 30 Odra River Bridge



Obr. 31



Obr. 32



Obr. 33



Obr. 34

navazují schodiště. Pro handicapované jsou navrženy výtahy, jeden v garážích, druhý na parkovišti u stadionu.

Mostovku tvoří půdorysně zakřivený betonový nosník o třech polích s rozpětími 13,54 + 107,6 + 21,97 m, který je vetknut do krajních opěr. Poloměr zakřivení v ose chodníku je 176,8 m. Nosník je nad vnitřními podpěrami výškově zalomen. V krajních polích má nosník plný průřez a vytváří schodiště, v hlavním zavěšeném poli, má nesymetrický komorový průřez. Komorový nosník výšky 0,914 m a šířky 5,988 m je tvořen komorou s jednostranně vyloženou konzolou, **obr. 32**. Těžiště nosníku je tak situováno co nejbližší k jeho vnitřnímu okraji. Aby mohl být nosník co nešťihlejší, je navržen z vysokopevnostního betonu charakteristické válcové pevnosti 60 MPa. Mostovka je předepnuta vnitřními kabely vedenými v horní desce a vnějším radiálním kabelem vedeným v madle zábradlí. Kabel, který je tvořen devatenácti 0,6" lany zainjektovanými v trubce průměru 219 mm, je kotven v ocelovém sedle situovaném nad vnitřními podpěrami. Kabel se zde překrývá s vnitřními kabely předpínajícími krajní schodišťové nosníky. 39,8 m vysoký pylon je skloněn pod úhlem 59,6°. Jeho čokovitý průřez má konstantní šířku 1,78 m a proměnnou výšku od 4,27 do 1,59 m. Pylon je kotven dvěma vnějšími kabely a je předepnut vnitřními soudržnými kabely postupně kotvenými a napínanými v pracovních spárách. Jak vnější, tak i vnitřní kabely jsou kotveny v základu pylonu, který je založen

na čtyřech vrtaných pilotách průměru 2,13 m a délky 33 m. Piloty jsou doplněny dvanácti zemními kotvami napnutými tak, aby piloty byly od zatížení stálého namáhány rovnoměrným tlakem. Vnitřní podpěry čokovitého průřezu jsou rámově spojeny s mostovkou. Schodišťové nosníky jsou vetknuty do krajních opěr, které tvoří kotevní bloky visutých a předpínacích kabelů. Vnitřní podpěry i krajní opěry jsou založeny na vrtaných pilotách.

#### Lávka přes dálnici D1 u Bohumína

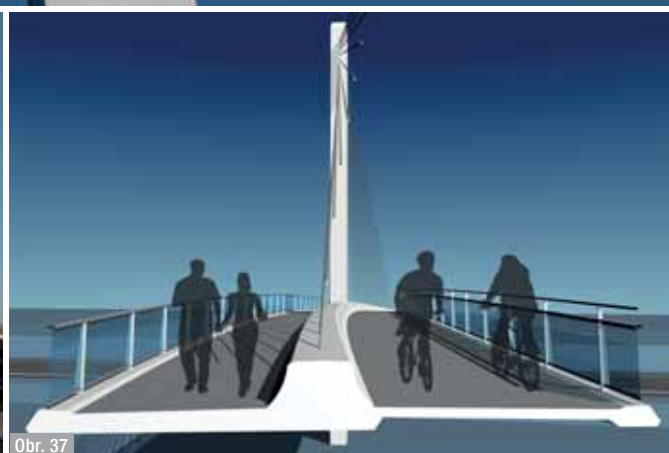
Lávka převádí pěší a cyklistickou dopravu přes dálnici D1, silnici I/67 a upravené koryto potoka Bajčůvky, **obr. 35** a **obr. 36**, [10]. Lávka celkové délky 115,26 m má dvě pole s rozpětími 54,94 + 58,29 m. Její osa je ve vrcholovém zakružovacím oblouku s poloměrem 500 m a ve výrazném půdorysném oblouku s poloměrem 220 m. Mostovka celkové šířky 7,6 m je tvořena páteřním nosníkem vystupujícím nad povrch komunikací a tvořícím přirozené rozhraní mezi částí pro pěší a cyklisty, **obr. 37**. Chodník šířky 2,25 m a cyklostezka šířky 3 m jsou vedeny po oboustranných konzolách. Aby nosník nebyl namáhán kroucením, je delší konzola vylehčena kasetou, **obr. 38**. Aby mohla být mostovka co nešťihlejší, je navržena z vysokopevnostního betonu C55/67. Mostovka je zavěšena na středním pylonu tvaru písmene V prostřednictvím mnohonásobných závěsů semi-radiál-



Obr. 35



Obr. 36



Obr. 37



Obr. 39



Obr. 38

Obr. 31 Lávka Harbor Drive | Fig. 31 Harbor Drive Pedestrian Bridge

Obr. 32 Lávka Harbor Drive – konstrukce | Fig. 32 Harbor Drive Pedestrian Bridge – structure

Obr. 33 Lávka Harbor Drive | Fig. 33 Harbor Drive Pedestrian Bridge

Obr. 34 Lávka Harbor Drive | Fig. 34 Harbor Drive Pedestrian Bridge

Obr. 35 Lávka Bohumín | Fig. 35 Bohumin Pedestrian Bridge

Obr. 36 Lávka Bohumín | Fig. 36 Bohumin Pedestrian Bridge

Obr. 37 Lávka Bohumín – konstrukce | Fig. 37 Bohumin Pedestrian Bridge – structure

Obr. 38 Lávka Bohumín – kazety | Fig. 38 Bohumin Pedestrian Bridge – waffle slab

Obr. 39 Lávka Bohumín | Fig. 39 Bohumin Pedestrian Bridge



Obr. 40

ního uspořádání. Pylon je ocelový, vyplněný betonem. Most tvoří integrální konstrukční systém, v kterém je mostovka rámově spojena s pylonem a vetknuta do krajních opěr. Protože v půdoryse konstrukce působí jako oblouk vetknutý do krajních opěr, vyvolávají objemové účinky změnu jeho vzeptění. Aby bylo namáhání pylonu co nejmenší, je pylon v příčném směru co nejštíhlejší.

Zavěšení mostovky na ocelobetonový pylon je realizováno sedmnácti symetrickými páry lanových závěsů. Jsou tvořeny uzavřenými lany systému Pfeifer. Ocelobetonový pylon tvaru písmene V má výšku 25,4 m a je tvořen dvojicí ocelových komůrkových průřezů 600 x 800 mm vyplněných betonem. Spojení pylonu s mostovkou je rámové. Most je založen na velkopřůměrových pilotách průměru 900 mm. Spodní stavbu tvoří krajní opěry integrované s nosnou konstrukcí a dvoustupňový základový blok pylonu. Mostovka byla betonována na pevné skruži navržené tak, aby umožnila její příčný pohyb vyvolaný napínáním závěsů.

Lávka byla uvedena do provozu v roce 2011, [obr. 39](#).

## LÁVKY PRO PĚŠÍ S MOSTOVKOU TVOŘENOU PŘEDPJTÝM PÁSEM NEBO PLOCHÝM OBLOUKEM

### Lávka v Českém Krumlově

V roce 2007 vypsalo město Český Krumlov konstrukčně architektonickou soutěž na návrh přemostění hlubokého údolí oddělujícího sídliště Mír od nádraží a středu města. Pro další zpracování projektové dokumentace vybralo město náš návrh. Ukázalo se, že přemostění nejlépe vyhovuje konstrukce z předpjetého pásu s poměrně velkým rozpětím 167,8 m, [obr. 40](#). Pro konstrukci je charakteristický proměnný podélný sklon přibližně odpovídající tvaru paraboly druhého stupně. Aby mohli lávku používat i spoluobčané se sníženou pohyblivostí, je parabola velmi plochá; maximální průvš uprostřed rozpětí je jen 2,685 m.

Vzhledem k této geometrii je vodorovná síla, která namáhá předpjetý pás, mimořádně velká. S ohledem na její omezení

má předpjetý pás co možná nejmenší rozměry a je navržen z vysokopevnostního betonu C90/105. I přes to dosahuje vodorovná síla velikosti až 60 MN.

Aby byla zajištěna stabilita konstrukce ve vodorovném směru, je ztužena dvěma vnějšími horizontálními parabolickými kabely. Předpjetý pás je sestaven z prefabrikovaných segmentů, které jsou zavěšeny a předeptuty kabely situovanými v rýhách krajních nosníků. Každý segment je tvořen okrajovými nosníky a mostovkovou deskou a ve spárách je ztužen diafragmaty.

### Lávka pro pěší přes rychlostní komunikaci R35 u Olomouce

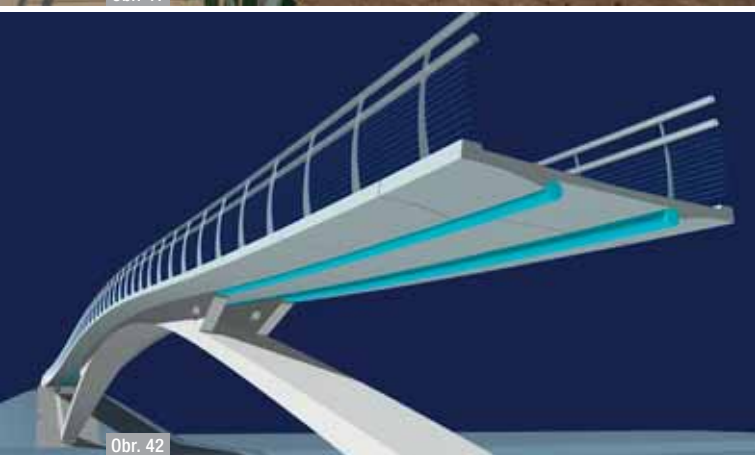
Lávka spojuje historické město Olomouc s rekreační oblastí situovanou za novou rychlostní komunikací [11]. Lávku tvoří předpjetý pás o dvou polích, který je podepřen obloukem s rozpětím 64 m, [obr. 41](#). Předpjetý pás je vetknut do kotevních bloků, které současně tvoří krajní opěry. Kotevní bloky a základy oblouku jsou spolu spojeny prefabrikovanými koncovými vzpěrami.

Tvar a počáteční napětí v předpjetém pásu a oblouku byly zvoleny tak, aby pro zatížení stálé a předpětí měla vodorovná síla v předpjetém pásu a oblouku stejnou velikost. Protože kotevní bloky předpjetého pásu jsou spojeny se základy oblouku tlačeními vzpěrami, je vodorovná složka tahové síly přenesena do oblouku. Proto konstrukce tvoří samostatný konstrukční systém, který namáhá základy jen svislými silami. Moment vyvolaný dvojicí vodorovných sil je přenášen momentem svislých sil vznikajících v kotevních blocích předpjetého pásu a základech oblouku.

Předpjetý pás délky 76,5 m je sestaven z prefabrikovaných segmentů délky 3 m nesených a předeptných dvěma vnějšími kabely, [obr. 42](#). Prefabrikované segmenty jsou z vysokopevnostního betonu C70/85. Monolitický oblouk a koncové vzpěry jsou z betonu C60/75. Ve středu mostu jsou předpjetý pás a oblouk vzájemně spojeny ocelovými hmoždinkami přenášejícími smykové namáhání z pásu do oblouku. Patky oblouku jsou založeny na vrтанých pilotách, krajní opěry na mikropilotách.



Obr. 41



Obr. 42



Obr. 43



Obr. 44

Most byl postaven v několika krocích. Po provedení zemních prací a pilot byly smontovány koncové vřpěry a vybetonovány krajní opěry. Oblouk byl vybetonován do bednění podporovaného lehkou skruží. Když beton dosáhl dostatečnou pevnost, byly smontovány a napnutý vnějšší kabely. Potom byly na kabely osazeny prefabrikované segmenty, **obr. 43**. Po úpravě napětí v kabelech byly vybetonovány spáry mezi segmenty a po dosažení 80% pevnosti betonu spár byly kabely dopnutý na projektovanou hodnotu.

Stavba mostu byla zahájena na podzim 2006, dokončena byla na podzim roku 2007, **obr. 44**.

Obr. 40 Lávka Český Krumlov | Fig. 40 Český Krumlov Pedestrian Bridge

Obr. 41 Lávka Olomouc | Fig. 41 Olomouc Pedestrian Bridge

Obr. 42 Lávka Olomouc – konstrukce | Fig. 42 Olomouc Pedestrian Bridge – structure

Obr. 43 Lávka Olomouc – prefabrikovaný segment | Fig. 43 Olomouc Pedestrian Bridge – precast segment

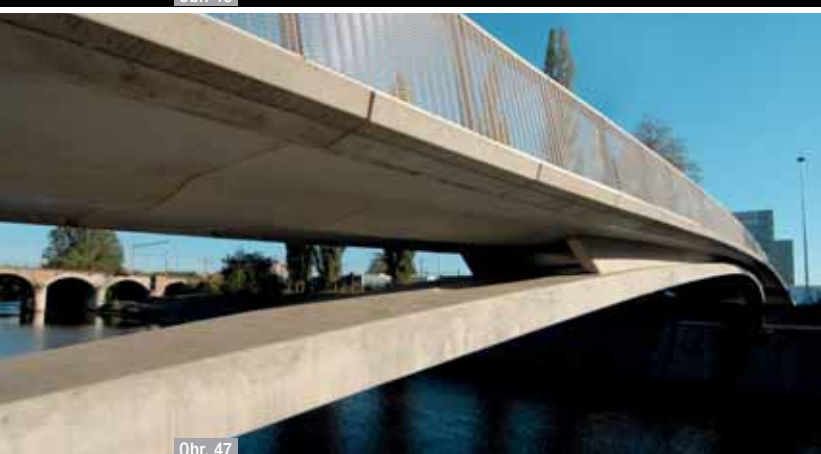
Obr. 44 Lávka Olomouc | Fig. 44 Olomouc Pedestrian Bridge



Obr. 45



Obr. 46



Obr. 47



Obr. 48

### Lávka pro pěší přes řeku Svatku v Brně

Lávka pro pěší spojuje nově budované obchodní centrum (Spielberk Office Centre) se starým centrem města [12]. Je situována v blízkosti nového mezinárodního hotelu a prestižních kancelářských budov. V blízkosti mostu stojí starý více-polový obloukový most s pilíři umístěnými v řece. Bylo zřejmé, že nový most by měl být také tvořen obloukovou konstrukcí, avšak se smělym rozpětím bez podpěr v řece. S ohledem na špatné geologické podmínky by tradiční oblouková konstrukce, která vyžaduje přenesení velkých vodorovných sil, byla příliš drahá. Proto byla navržena samokotvená konstrukce tvořená obloukem a předpjatým pásem, [obr. 45](#) a [obr. 47](#).

Jak předpjatý pás, tak i oblouk jsou sestaveny z prefabrikovaných segmentů z vysokopevnostního betonu a byly na místě sestaveny bez montážních podpěr. Hladké křivky, které jsou charakteristické pro konstrukce z předpjatého pásu, umožnily také jemné navázání mostovky na obou březích.

Mostovku mostu tvoří předpjatý pás podepřený plochým obloukem, [obr. 46](#). Protože předpjatý pás a plochý oblouk jsou vetknuty ve společných koncových opěrách, konstrukce tvoří samokotvený systém, který namáhá základy jen svislými silami. Poněvadž nábřeží jsou tvořena starými kamennými zdmi, jsou opěry situovány za těmito zdmi. Opěry jsou podepřeny dvojicemi vrtaných pilot. Koncové opěry působí jako

tlakové vzpěry přenášející tahovou sílu z předpjatého pásu do tlačného oblouku.

Oblouk má rozpětí  $L = 42,9$  m, vzepětí  $f = 2,65$  m a poměr vzepětí k rozpětí  $f/L = 1/16,19$ . Oblouk je tvořen dvěma větvemi, které mají proměnnou vzdálenost a spojují se v patce oblouku. 43,5 m dlouhý předpjatý pás je sestaven z prefabrikovaných segmentů délky 1,5 m. Ve střední části mostu je pás podporován nízkými stěnami proměnné výšky. Oblouk a předpjatý pás jsou vzájemně spojeny ocelovými hmoždinkami přenášejícími smykové namáhání z pásu do oblouku. Předpjatý pás je nesen a předeprnut čtyřmi vnitřními kabely. Segmenty mají proměnnou tloušťku se zakřiveným podhledem. Oblouk a předpjatý pás jsou z vysokopevnostního betonu C60/75.

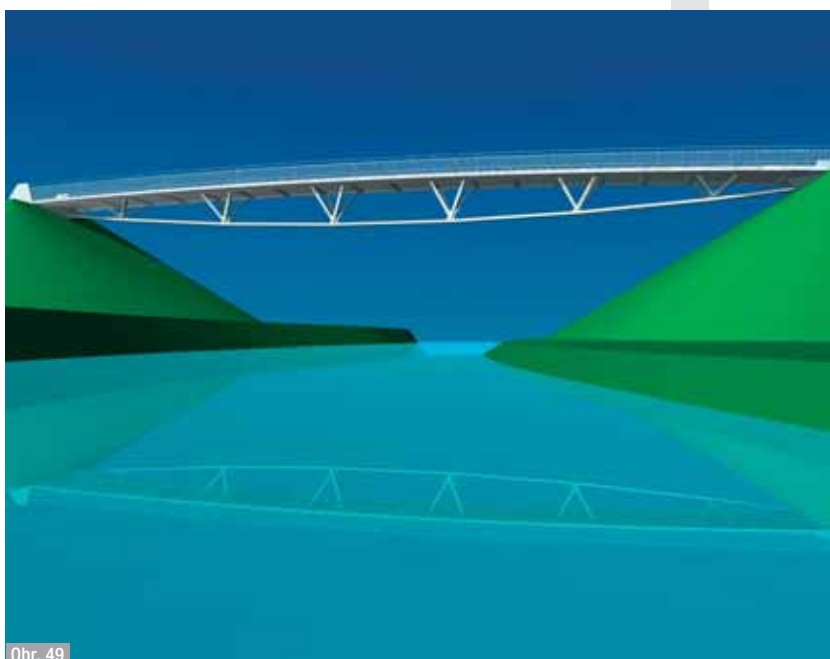
Oblouk byl sestaven ze dvou obloukových segmentů, které byly montážně zavěšeny na montážních kabelech zakotvených v koncových opěrách, **obr. 48**. Po vybetonování střední spáry byly montážní kabely nahrazeny vnějšími kabely spojujícími opěry. Následovala betonáž nízkých stěn a montáž segmentů. Po osazení a napnutí kabelů získala konstrukce navrženou geometrii. Následovalo odstranění vnějších kabelů, vybetonování spár mezi segmenty a dopnutí kabelů na požadované napětí. Tím získala konstrukce požadované předpětí. Lávka byla postavena v roce 2007.

#### Lávka přes Johnson Creek, Oregon

Navrhovaná lávka je tvořena částečně samokotvenou visutou konstrukcí s rozpětím 60,8 m, u které je tahová síla zachycena tlakovou únosností přímopocházejícího plochého oblouku [13], **obr. 49**. Plochý oblouk a visutý kabel jsou spolu vzájemně spojeny vzpěrami tvaru písmene V zajišťujícími tvar kabelu a přenos radiálních sil do oblouku. Jak plochý oblouk, tak i kabel mají parabolický tvar; vzepětí oblouku 1,52 m je stejné, jako je průvěsu kabelu. Mostovka je sestavena z prefabrikovaných segmentů a spřažené desky, v které jsou situovány nosné kabely, **obr. 50**. Aby konstrukce mohla být co nejúspornější, je mostovka z vysokopevnostního betonu charakteristické válcové pevnosti 60 MPa.

Popsaný most, bohužel, nebyl postaven. Protože jeho konstrukce byla navržena jako velmi úsporný konstrukční systém, rozhodli jsme se ji podrobně studovat a ověřit její chování na modelu postaveném v měřítku 1:10. Plochý oblouk byl sestaven z prefabrikovaných segmentů a spřažené desky C60/75, visutý kabel byl tvořen dvěma monostrandy průměru 15,5 mm. Vzpěry byly ocelové, úmyslně předdimenzované, aby neovlivnily únosnost základních nosných prvků.

Model byl postaven podobně jako navrhovaná konstrukce. Montáž byla vyvinuta z montáže konstrukcí z předpjatého pásu. Nejdříve byly napnuté nosné kabely, které jsou situovány ve spřažené části mostovky. Na kabely byly zavěšeny segmenty s již osazenými ocelovými vzpěrami. Potom byly nataženy a napnuté visuté kabely. Jejich napnutím se konstrukce vzdvihla do projektované polohy. Byly vybetonovány spáry mezi segmenty a spřažená deska. Dopnutím visutých kabelů byla mostovka předeprnuta a konstrukce získala potřebnou tuhost. Konstrukce byla zkoušena pro tři polohy nahodilého zatížení rozmístěného po celé délce, uprostřed a na jedné polovině délky mostovky. Zkouška mezní únosnosti byla provedena pro pozici nahodilého zatížení situovaného na jedné polovi-



Obr. 49



Obr. 50



Obr. 51

Obr. 45 Lávka přes Svratku | Fig. 45 Svratka River Pedestrian Bridge

Obr. 46 Lávka přes Svratku – konstrukce | Fig. 46 Svratka River Pedestrian Bridge – structure

Obr. 47 Lávka přes Svratku | Fig. 47 Svratka River Pedestrian Bridge

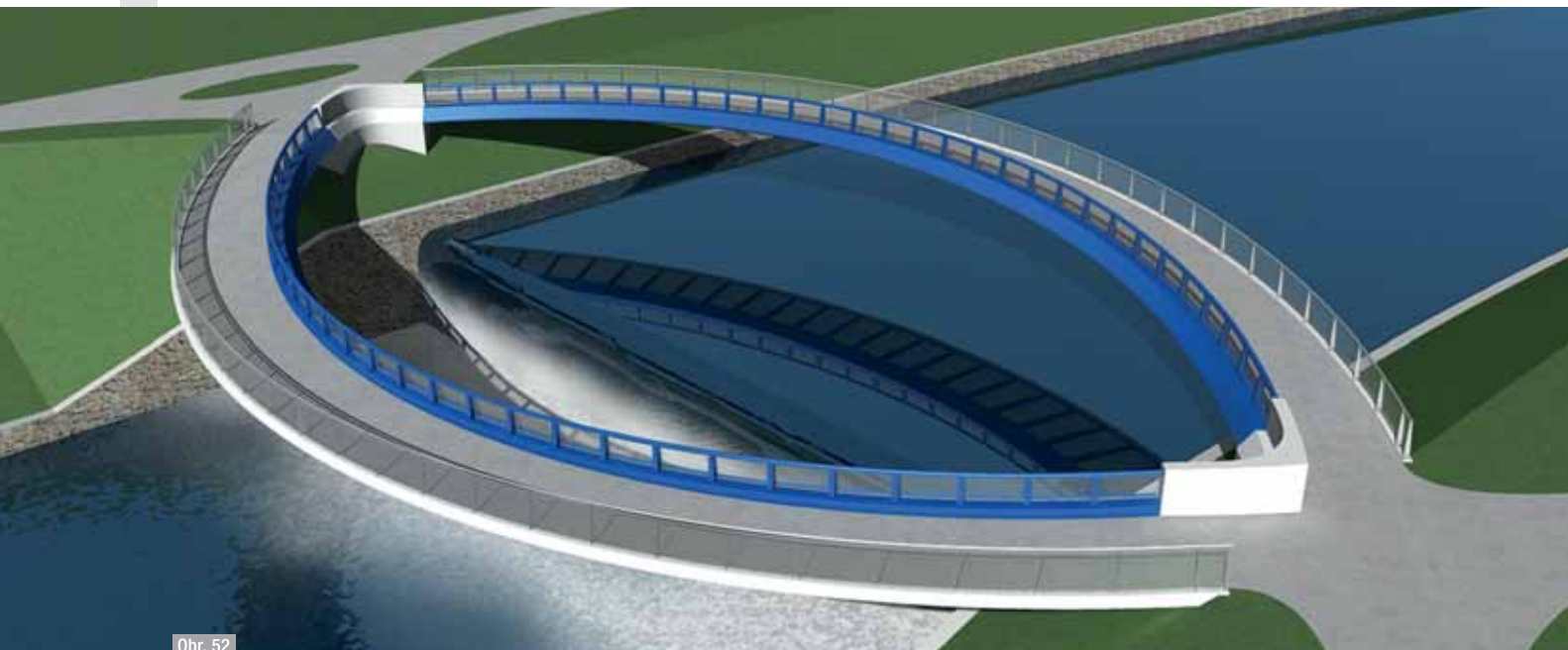
Obr. 48 Lávka přes Svratku – montáž obloukového segmentu | Fig. 48 Svratka River Pedestrian Bridge – erection of the arch segment

Obr. 49 Lávka Johnson Creek | Fig. 49 Johnson Creek Pedestrian Bridge

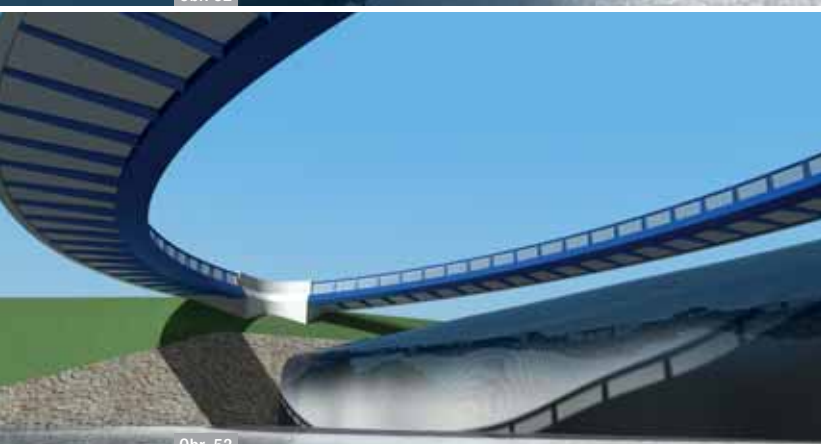
Obr. 50 Lávka Johnson Creek – konstrukce | Fig. 50 Johnson Creek Pedestrian Bridge – structure

Obr. 51 Lávka Johnson Creek – zkouška modelu | Fig. 51 Johnson Creek Pedestrian Bridge – model test





Obr. 52



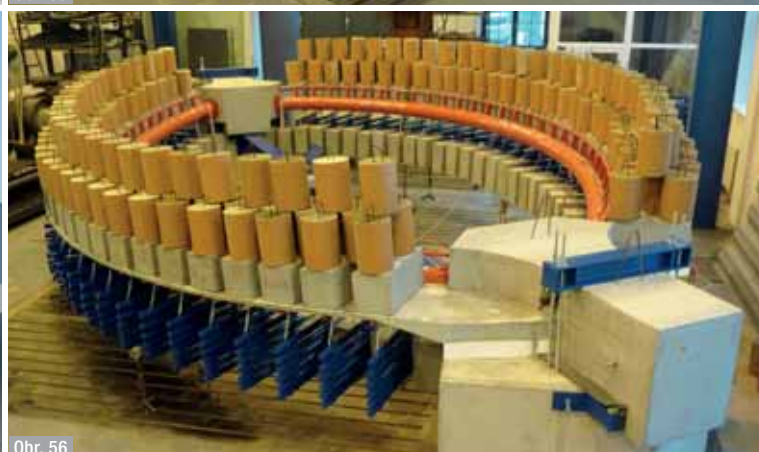
Obr. 53



Obr. 54



Obr. 55



Obr. 56

ně délky, **obr. 51**. Konstrukce se porušila smykem v podélné spáře mezi prefabrikovanými segmenty a monolitickou deskou při zatížení větším, než je zatížení mezní.

#### Půdorysně zakřivený plochý oblouk a předpjatý pás

V nedávné době bylo postaveno několik pozoruhodných půdorysně zakřivených lávek pro pěší, které jsou na vnitřním okraji zavěšeny na visutých anebo závěsných kabelech. Půdorysně zakřivené konstrukce tvořené předpjatým pásem anebo plochým obloukem však dosud nebyly realizovány. Proto jsme se rozhodli tyto konstrukce studovat analyticky a ověřit jejich chování na statickém modelu [13].

Půdorysně zakřivené konstrukce je vhodné navrhnout tak, aby konstrukce nebyla od zatížení stálého kroucena. Jednou z možností je doplnit průřez tuhými prvky tvaru L a zakotvit závěsy v jejich horní části. Geometrie kabelů se pak navrhuje tak, aby závěsy směřovaly do středu kroucení průřezu. Tento přístup byl zvolen při návrhu konstrukce z předpjatého pásu. Konstrukci pásu tvoří zakřivená betonová deska z vysokopevnostního betonu C70/85 doplněná o zalomené ocelové L rámy podpírající desku. Horní části rámu jsou spojeny trubkou, v které je veden vnější předpínací kabel zatěžující konstrukci radiálními silami. Svislá složka radiálních sil vyrovnává zatížení stálé, horizontál-

ní složka vyrovnává krouticí moment a zatěžuje konstrukci vodorovnými radiálními silami. Protože pás je vetknut do opěr, vyvolává tato složka v předpjatém pásu centrický tlak.

Abychom omezili smyková namáhání od kroucení vyvolaného nahodilým zatížením, doplnili jsme konstrukci o torzně tuhý prvek pětiúhelníkového řezu. Výsledné řešení je zřejmé z **obr. 52** až **obr. 54**. Lávka s rozpětím 45 m je v půdorysném oblouku s poloměrem 32,212 m. Maximální průvės je 0,9 m, podélný sklon u opěr je 7 %. Jak betonová deska, tak i ocelový nosník jsou vetknuty do kotevních bloků. Vnější kabely jsou vedeny v madle zábradlí a jsou kotveny v koncových betonových zídkách vetknutých do kotevních bloků. Vodorovná síla je přenášena šikmými mikropilotami.

Podobně je navržena konstrukce tvořená plochým obloukem, který je ve stejném půdorysném oblouku. Vzepětí oblouku uprostřed rozpětí je 0,9 m, podélný sklon u opěr je 7 %.

Funkce obou konstrukcí jsme ověřili na statickém modelu konstrukce postaveném v měřítku 1:6, **obr. 55**. Abychom omezili podélnou vodorovnou sílu, byl zakřivený pás zkoušen společně s konstrukcí tvořenou zakřiveným plochým obloukem podobného uspořádání.

Je zřejmé, že skutečná konstrukce může být postavena podobně. Vodorovná síla z předpjatého pásu může být vyrovnána vodorovnou silou působící v plochém oblouku. Tímto způsobem může být vytvořen velmi ekonomický konstrukční systém.

Obě konstrukce byly zkoušeny pro tři polohy nahodilého zatížení a pro zatížení mezní. Nahodilé zatížení bylo umístěno na levou polovinu konstrukce, na pravou polovinu a následně na celou délku mostovky. Naměřené deformace a poměrná přetvoření byly v dobré shodě s výsledky statické analýzy. Na závěr byl model zatížen mezním krouticím zatížením situovaným po celé délce obou konstrukcí, **obr. 56**. Zkoušky potvrdily, že obě konstrukce mají dostatečný stupeň bezpečnosti. Vysokopevnostní betonu umožnil návrh lehké a transparentní prostorové konstrukce.

## SKOŘEPINOVÉ A MEMBRÁNOVÉ KONSTRUKCE

Správně navržena skořepinová konstrukce má tzv. výslednicový tvar, tzn. že má tvar, který zajistí, že od zatížení stálého je namáhána jen tlakem. S ohledem na povahu zatížení jsou mostní skořepinové konstrukce navrhovány jen zřídka. Vzhledem k zatěžování mostů těžkými vozidly je nutno kombinovat skořepiny s ohybově tuhými prvky – trámy. To však neplatí u lávek pro pěší, které jsou navrhovány na spojitě zatížení lidmi a na poměrně malé zatížení vozidel údržby, anebo záchranné služby. Proto je při jejich návrhu vhodné využít prostorové působení skořepin. I když jsou navrhovány zřídka, je vhodné studovat jejich působení a snažit se je navrhnout všude tam, kde je to vhodné.

V minulých letech jsme se zúčastnili dvou architektonicko-konstrukčních soutěží na návrh lávek, ve kterých jsme pro nosnou konstrukci navrhli skořepiny z hliníku.

První soutěž, na které jsme pracovali s architektem Cezary Bednarskim z Londýna, byla pro návrh přemostění městské komunikace na ostrově Jersey, který je součástí Spojeného

Království. Konstrukci lávky tvořila skořepina s rozpětím 49 m, která vznikla průnikem dvou válcových skořepin. Skořepina byla tvořena hliníkovým roštem spolupůsobícím s krycími hliníkovými plechy. Ve středu rozpětí byla na skořepině zavěšena ocelobetonová mostovka. Protože průnikem válcových skořepin vyniká v konstrukci diagonální obloukové žebro, používáme pro tuto konstrukci dále termín **diagonální oblouková skořepina**.

Druhá soutěž, na které jsme pracovali s architektem Janem Kaplickým z Londýna, byla pro návrh přemostění řeky Leamouth v Londýně. Konstrukci lávky tvořil přímo pocházející půdorysně zakřivený tříkloubový oblouk s příčně zakřiveným parapetním průřezem. Protože ve spodní části oblouku bylo nutno navrhnout schody, byl pro handicapované navržen výtah. Boční stěny skořepiny byly odlehčeny elipsoidními otvory, které byly také navrženy ve spodní desce. Otvory byly kryty skleněnými panely. Vlastní konstrukci tvořil opět hliníkový rošt, který spolupůsobil s krycími hliníkovými plechy. Pro tuto konstrukci používáme dále termín **parapetní oblouková skořepina**.

Po zpracování soutěžních návrhů jsme si uvědomili, že obě konstrukce by bylo možné navrhnout jako hladké betonové skořepiny bez žebor a krycích plechů a že tyto konstrukce přímo volají po využití plastické tvárnosti betonu. Proto jsme se těmito konstrukcemi podrobně zabývali. Konstrukce jsme nejen detailně analyzovali, ale také ověřili na modelech.

Skutečnost, že cena práce je v porovnání s cenou základních stavebních materiálů neustále vyšší a vyšší, vede k tomu, že skořepinové konstrukce vyžadující náročné skruže jsou nyní navrhovány jen zřídka. Proto je vhodné hledat způsob, jak je stavět hospodárně. Jednou z možností je vytvořit membránové konstrukce tvořené lanovou sítí, na kterou se zavěsí jednoduché betonové prvky. Tuhost konstrukce se zajistí předepnutím kabelů vedených ve spárách mezi těmito prvky. Velmi úsporné jsou rotačně symetrické konstrukce a konstrukce tvaru hyperbolického paraboloidu navržené nad kruhovým půdorysem. Zatímco prefabrikované prvky tvořící membránu je vhodné navrhnout z lehkého betonu, kotevní prsteneček, který je namáhán čistým tlakem, je vhodné navrhnout z vysokopevnostního betonu.

### Diagonální oblouková skořepina

Pro studijní návrh jsme vypracovali projekt konstrukce lávky o jednom poli s rozpětím 62 m; její šířka je 7,5 m, **obr. 57** a **obr. 58**, [14]. Skořepina, která vznikla průnikem dvou válcových

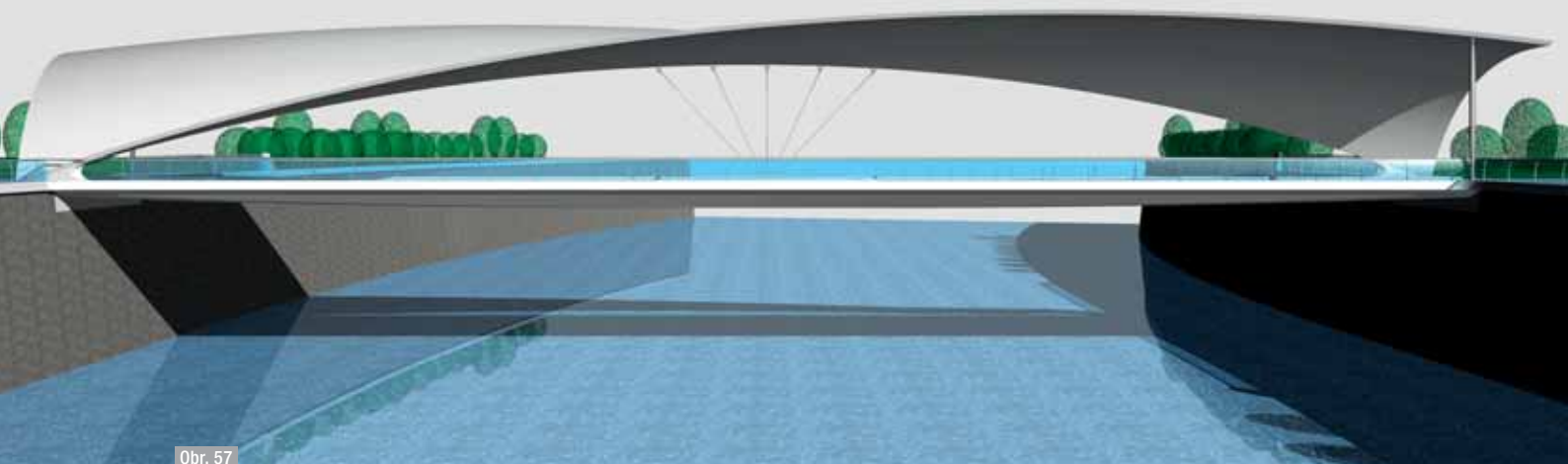
**Obr. 52** Plochý oblouk a předpjatý pás | **Fig. 52** Flat arch and stress ribbon

**Obr. 53** Plochý oblouk a předpjatý pás | **Fig. 53** Flat arch and stress ribbon

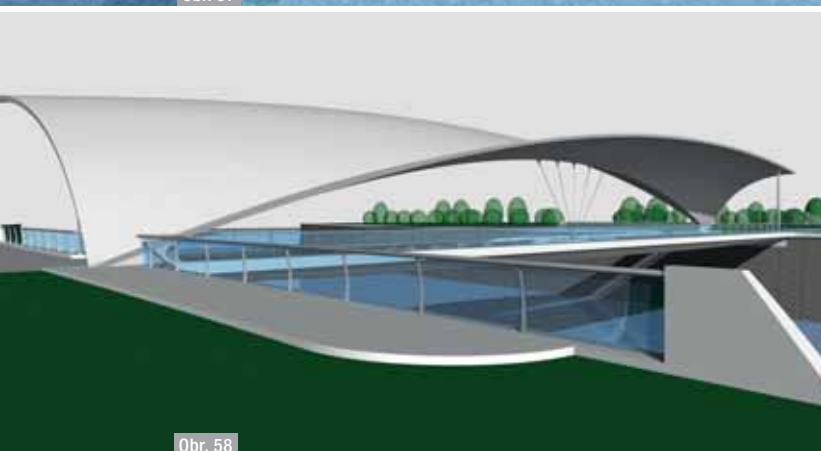
**Obr. 54** Plochý oblouk a předpjatý pás – konstrukce | **Fig. 54** Flat arch and stress ribbon – structure

**Obr. 55** Plochý oblouk a předpjatý pás – zkouška modelu | **Fig. 55** Flat arch and stress ribbon – model test

**Obr. 56** Plochý oblouk a předpjatý pás – zkouška modelu | **Fig. 56** Flat arch and stress ribbon – model test



Obr. 57



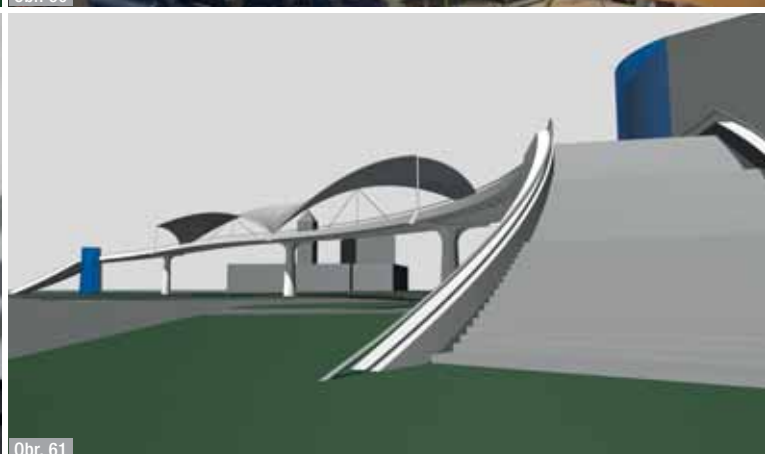
Obr. 58



Obr. 60



Obr. 59



Obr. 61

vých ploch, má uprostřed rozpětí vzepětí 5,2 m a její maximální výška na koncích mostů je 7,55 m. Tloušťka skořepiny je od 80 do 250 mm. Průnikem válcových skořepin vzniká základní obloukové žebro, které diagonálně spojuje mostovku. Na koncích lávky je na jednom okraji žebro přímo spojené s mostovkou, na druhém okraji je podepřeno kyvnou stojkou z nerezavějící oceli.

Mostovku lávky tvoří dva diagonální nosníky podporující mostovkovou desku ztuženou okrajovými žebry tloušťky 400 mm. Diagonální nosníky mají od opěr ke středu lávky proměnnou tloušťku od 800 do 1 200 mm. U opěr jsou ukončeny koncovým příčnickem tvořícím současně opěru podepřenou vrtanými

pilotami. Konstrukce tak vytváří integrální systém bez ložisek a dilatačních závěrů.

Uprostřed rozpětí je mostovka zavěšena na pěti závěsech zakotvených v diagonálním žebro tloušťky 400 mm. Protože závěsy jsou kotveny po 1,5 m, je zatížení z nosné konstrukce rozneseno do skořepiny na vzdálenost přibližně 7,5 m. Diagonální nosník, do kterého je vetknuto diagonální obloukové žebro, je předepnut. Je tedy zřejmé, že konstrukce vytváří úsporný samokotvený obloukový systém tvořený diagonálním obloukem, s kterým spolupůsobí skořepina, a diagonálním nosníkem, s kterým spolupůsobí mostovka.

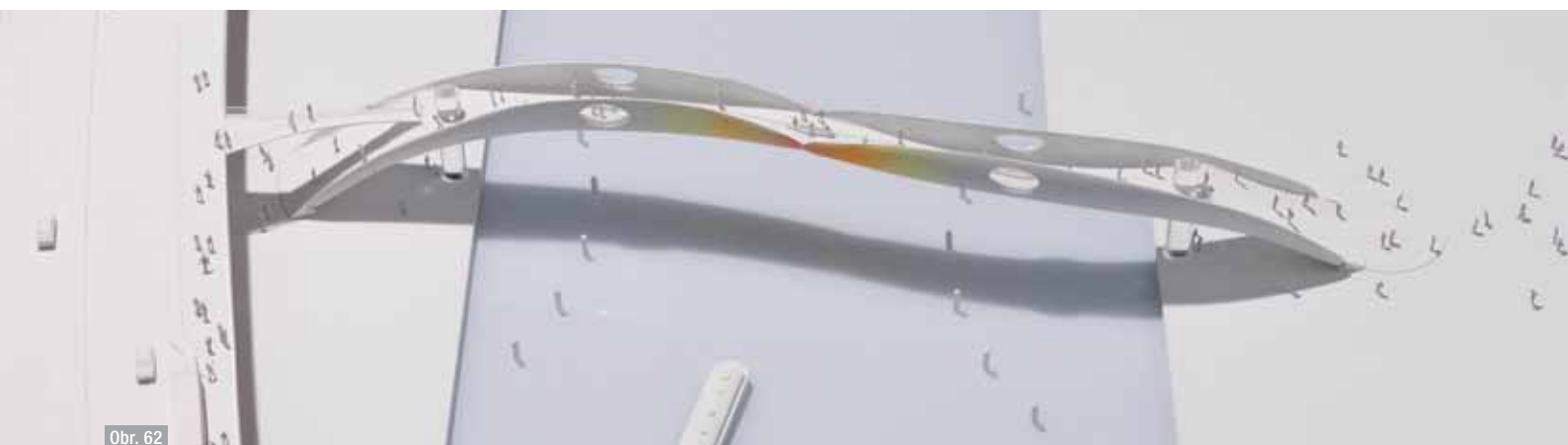
Architektonické působení konstrukce a teoretické předpokla-

dy analýzy byly také ověřeny na architektonickém a statickém modelu konstrukce postaveném z betonu charakteristické krychelné pevnosti 150 MPa v měřítku 1:20. Model je na rozdíl od skutečné konstrukce, která bude vyztužena sítí z betonářské výztuže, vyztužen jen ocelovými vlákny.

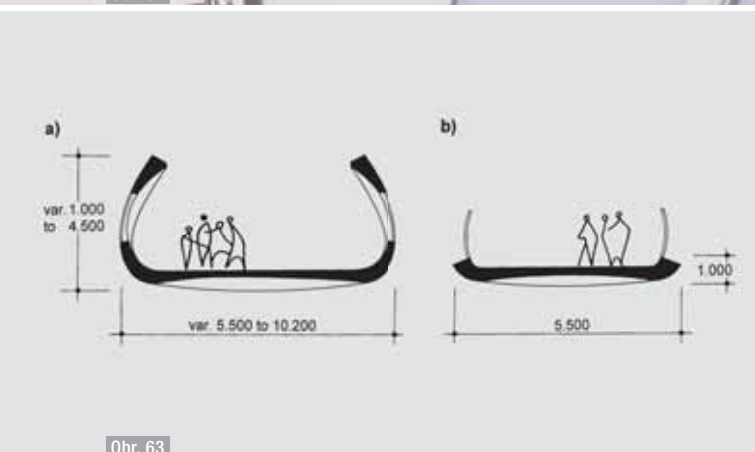
Architektonický model, který je vystaven v zasedací místnosti ústavu, má skořepinu podepřenou betonovým roštem tvořeným diagonálními nosníky a koncovým příčnickem, **obr. 59**. Mostovková deska je tvořená skleněnou tabulí.

Statický model byl podepřen ocelovým rámem ztuženým diagonálními ocelovými nosníky, **obr. 60**. Nosník působil současně jako táhlo a jako zatěžovací rám. Zavěšení mostovky na skořepině bylo vystiženo zatížením skořepiny osamělou silou působící ve vrcholu skořepiny. Zatížení bylo vyvozeno tahem předpínacího lana zakotveného do ztužujícího přípravku, který byl uložen ve vrcholu skořepiny. Tah lana byl vyvozen předpínací pistolí podepřenou ztužujícím rámem. Zatížení bylo postupně zvětšováno do porušení skořepiny. Při zkoušce byly

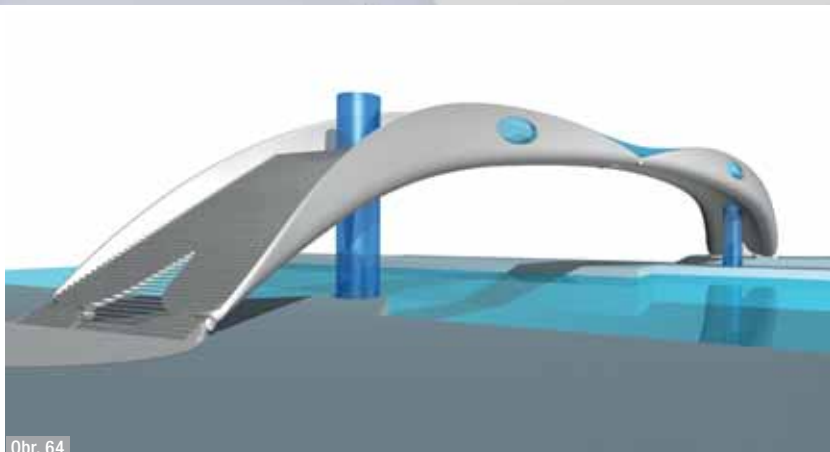
je v půdoryse tvořen dvěma protisměrnými oblouky. Lávka má proměnnou šířku od 10,2 do 5,5 m, celková výška konstrukce je od 1 do 4,5 m. Průřez konstrukce je tvořen skořepinou proměnné výšky a šířky a proměnného zakřivení, **obr. 63**. Tloušťka skořepiny je od 10 do 450 mm. Skořepina je hladká, bez ztužujících žebér, jen v místě kloubů je místně zesílena. V zakřivených bočních stěnách a v podlaze jsou eliptické otvory. Lávka je uložena na patkách podepřených šikmými mikropilótami. Návrh předpokládá, že poloviny oblouků budou betonovány po segmentech délky 7 m ve svislé poloze do překládaného bednění, následně se konstrukce pomocí hydraulických vzpěr sklopí do projektované polohy. Potom se smontují výtahy a vybetonuje se rampa spojující konstrukci se sousedním mostem. Podobně jako u předcházející konstrukce byly rozměry lávky navrženy na základě podrobné statické a dynamické analýzy. Analýza prokázala, že konstrukce je schopna bezpečně přenést nejen všechna normová zatížení, ale že má i dostatečnou mezní únosnost.



Obr. 62



Obr. 63



Obr. 64

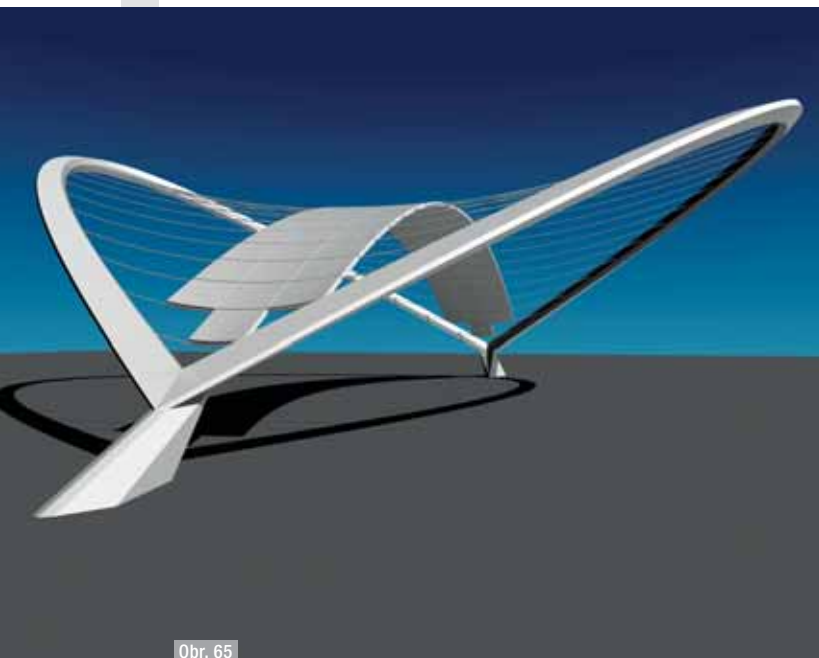
měřeny deformace a napětí ve vybraných bodech skořepiny. Zatěžovací zkouška prokázala dostatečnou shodu vypočítaných a naměřených hodnot a prokázala dostatečnou provozuschopnost i únosnost skořepiny.

Při zpracování jedné alternativy lávky pro pěší v San Diegu, Californii, jsme také studovali konstrukci tvořenou podobnými dvěma na sebe spojitě navazujícími skořepinami s rozpětím 2 x 54 m, **obr. 61**.

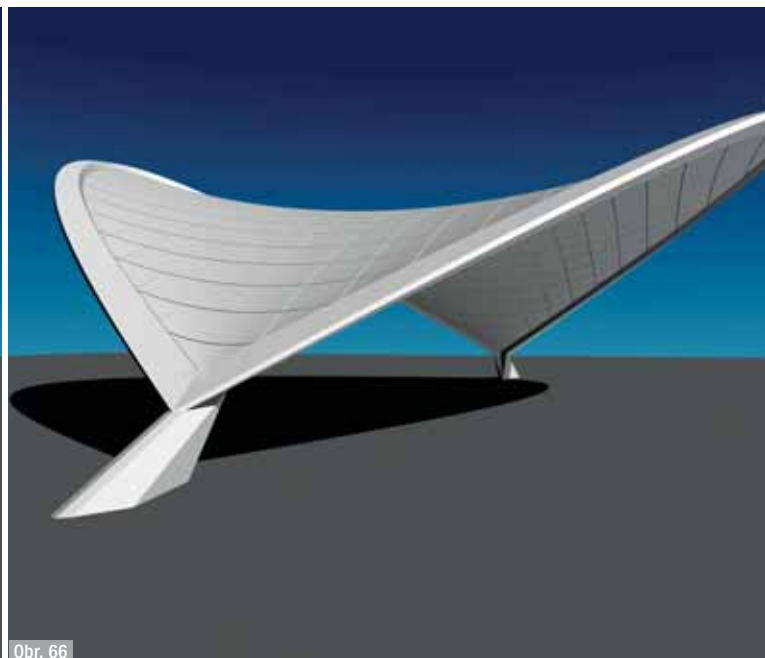
### Parapetní oblouková skořepina

Studijní návrh vyšel ze soutěžního projektu, **obr. 62** a **obr. 64**, [14]. Tříkloubový oblouk s rozpětím 105 m a vzepětím 10,341 m

- Obr. 57** Diagonální oblouková skořepina | **Fig. 57** Diagonal arch shell  
**Obr. 58** Diagonální oblouková skořepina | **Fig. 58** Diagonal arch shell  
**Obr. 59** Diagonální oblouková skořepina – model | **Fig. 59** Diagonal arch shell – model  
**Obr. 60** Diagonální oblouková skořepina – zkouška modelu | **Fig. 60** Diagonal arch shell – model test  
**Obr. 61** Dvoupolová diagonální oblouková skořepina | **Fig. 61** Two spans diagonal arch shell  
**Obr. 62** Parapetní oblouková skořepina | **Fig. 62** Channel arch shell  
**Obr. 63** Parapetní oblouková skořepina – příčné řezy | **Fig. 63** Channel arch shell – sections  
**Obr. 64** Parapetní oblouková skořepina | **Fig. 64** Channel arch shell



Obr. 65



Obr. 66



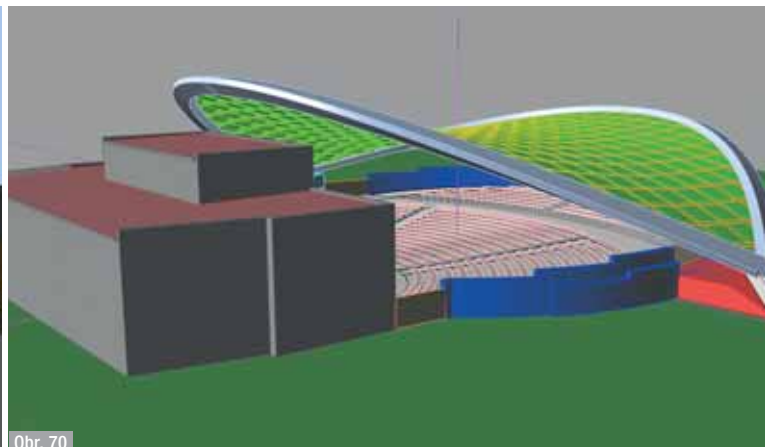
Obr. 67



Obr. 68



Obr. 69



Obr. 70

### Zastřešení amfiteátru letního kina Karviná-Fryštát

Projekt membránové konstrukce zastřešení amfiteátru letního kina Karviná-Fryštát vyšel z našich studijních projektů membránové konstrukce dvojí křivosti, [obr. 65](#) a [obr. 66](#), [15]. Střechu tvoří zborcená plocha podporovaná skloněnými oblouky. Protilehlé rovinné oblouky jsou rámově spojeny se šikmými stojkami, které jsou vetknuty do patek vzájemně spojených předpjatým táhlem. Půdorysný průmět skloněných oblouků má přibližně tvar paraboly druhého stupně. Membrána je sestavena z prefabrikovaných prvků skladebných rozměrů 3 x 3 m nesených lany příčně pnutými mezi oblouky. Tvar nosných lan odpovídá přibližně parabole druhé-

ho stupně. Poměr  $f/L^2$  všech lan je konstantní, proto je horizontální složka tahové síly ve všech lanech stejná.

S ohledem na půdorysný tvar konstrukce jsou u oblouků prefabrikované prvky doplněny monolitickými klíny betonovanými spolu se spárami mezi prvky. Tuhost konstrukce je dána předpětím vyvozeným monostrandy situovanými jak v příčných, tak i v podélných spárách. Prefabrikované čtvercové prvky o straně délky 2,98 m jsou tvořeny 80 mm tlustou deskou na okrajích ztuženou žebry. Jsou z lehkého betonu LC30/33. Skloněné oblouky z vysokopevnostního betonu C70/80 mají pětiúhelníkový průřez.

Statický výpočet provedený programovým systémem ANSYS

## Literatura:

- [1] Stráský J.: Stress ribbon and cable supported pedestrian bridges. ISBN: 0 7277 3282 X. Thomas Telford Publishing, London 2005. 2<sup>nd</sup> edition 2011
- [2] Stráský J., Terzijski I., Konečný L., Svadník P., Račanský J.: Dálniční most z vysokopevnostního betonu. Konstrukční beton v ČR 2002–2005, 2. fib Kongres, Neapol 2006
- [3] Kolenčík P., Romportl T., Stráský J., Šrámek Z., Faltýnek Š.: Most přes řeku Moravu a obtok v Olomouci. Konstrukční beton v ČR 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010
- [4] Nečas R., Kolářek J., Stráský J.: Stabilitní analýza obloukového mostu přes řeku Willamette, USA, Betonářské dny, Hradec Králové 2009
- [5] Stráský J., Dufek B., Romportl T., Kolenčík P., Šrámek Z.: Integrované mosty typu vzpěradlový rám a oblouk., Konstrukční beton v ČR 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010
- [6] Svoboda P., Stráský J., Kaláb P., Holba J., Mařík P., Dahinter K.: Most přes Lochkovské údolí, Konstrukční beton v České republice 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010
- [7] Vítek J. L., Stráský J., Brož R., Tvz A., Smešek P., Ševčík P.: Most přes Rybný potok. Konstrukční beton v České republice 2002–2005, 2. fib Kongres, Neapol 2006
- [8] Stráský J., Konečný L., Novák R., Romportl T., Šálek M., Pitoňák P., Bešta J.: Zavěšený most přes řeku Odru a Antošovické jezero, Konstrukční beton v České republice 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010
- [9] Stráský J., Nečas R.: Lávka přes Harbor Drive v San Diegu, Kalifornie, USA, Beton TKS, 4/2011
- [10] Zapletalová L., Mojžík P., Stráský J., Pitoňák P.: Zavěšená lávka přes dálnici D1 v Bohumině. Stavebnictví 02/12
- [11] Stráský J., Hrdina L., Leviček M.: Lávka pro pěší přes rychlostní komunikaci R35 u Olomouce, Konstrukční beton v ČR 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010
- [12] Stráský J., Štefan P., Mendl A., Pěček Z.: Lávka pro pěší přes řeku Svratku v Brně, Konstrukční beton v České republice 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010
- [13] Stráský J., Nečas R., Hmčirová M., Kocourek P., Jurík M.: Vývoj lávek s mostovkou z předpjatého pásu, Konstrukční beton v České republice 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010
- [14] Stráský J.: Pedestrian bridges utilizing high strength concrete, ISSN 0266-3511, International Journal of Space structures, Vol. 22, No. 1, 2007
- [15] Stráský J., Kaláb P., Nečas R., Terzijski I.: Vývoj membránových střeš z předpjatého betonu, Konstrukční beton v České republice 2006–2009, 3. fib Kongres, Washington 2010

zohlednil nelineární působení konstrukce a postup stavby, při kterém se konstrukce tvořená prostorovou sítí lan změnil v předpjatou membránu. Vlastní tíhu lan, betonových prvků a spár přenáší nosná lana zakotvená ve skloněných obloucích. Všechna ostatní zatížení, tj. účinky předpětí, tíhu izolace, sníh, vítr, možné nahodilé zatížení a objemové změny betonu, přenáší předpjatá membránová konstrukce, která je namáhána nejen tahem, ale i ohybem. Ohybové namáhání je výrazné zejména v místě vetknutí membrány do oblouků.

Statické předpoklady a funkce studované konstrukce byly ověřeny na statickém modelu postaveném v měřítku 1:10, **obr. 67** a **obr. 68**. S ohledem na rozměry konstrukčních prvků jsou skloněné oblouky tvořeny ocelovými trubkami průměru 152 mm vyplněnými vysokopevnostním betonem C70/85. Betonové podpěry byly nahrazeny ocelovými prvky s patkou přenášejiícími zatížení do betonových bloků. Ocelové prvky jsou vzájemně spojeny dvěma ocelovými táhly U průřezu nahrazujícími předpjatá táhla.

Vlastní betonová membrána byla sestavena z čtvercových prefabrikovaných prvků o straně délky 290 mm a tloušťky 10 mm, po obvodu ztužených žebrem tloušťky 20 mm. Prvky byly vyrobeny z lehkého konstrukčního betonu LC30/33. S ohledem na tvar střechy byla část membrány u oblouků vyskládána z trojúhelníkových a pětiúhelníkových segmentů řezaných z panelů tloušťky 20 mm. Jak nosné, tak i před-

pínací kabely byly tvořeny monostrandy průměru 9,3 mm, které byly situovány vně membrány. Předpětí membrány bylo realizováno dopnutím nosných lan a předepnutím ztužujících (předpínacích) lan.

Model byl zkoušen pro čtyři polohy nahodilého zatížení, které bylo umístěno na celé ploše, na podélné a příčné polovině a ve středu membrány. Nahodilé zatížení (sníh) bylo nahrazeno zatížením pytlí s pískem umístěnými na povrch membrány. Naměřené deformace a poměrná protažení byla v dobré shodě s výsledky získanými statickou analýzou. Na závěr byl model zatížen mezním zatížením situovaným na podélné polovině membrány. Konstrukce prokázala, že má dostatečný stupeň bezpečnosti. První diagonální trhliny vznikly v membráně u podpěr v místě, kde výpočtové modely ukázaly maximální hlavní napětí.

Zastřešení amfiteátru letního kina v Karviné tvoří zborcená plocha podporovaná skloněnými oblouky, **obr. 69** a **obr. 70**. Rozpětí oblouků je 60 m, maximální rozpětí membrány je 45 m. Věříme, že konstrukce bude realizována a její stavba přinese další aplikace.

## ZÁVĚR

Z uvedených příkladů je zřejmé, že vysokopevnostní beton umožňuje hospodárný návrh široké škály konstrukcí. Největší přínos přináší tam, kde můžeme využít vlastní charakteristiky betonu, tj. vysokou pevnost a plastickou tvárnost.

Popsané mosty byly navrženy projekční kanceláří Stráský, Hustý a partneři, Brno. Diagonální oblouková skořepina byla navržena ve spolupráci s architektem Cazarym Bednarskim z Londýna, parapetní oblouková skořepina ve spolupráci s architektem Janem Kaplickým z Londýna. Projektantem lávky Harbor Drive v San Diegu byla firma T.Y. Lin International, San Diego, California. Koncept řešení a kontrola projektu je prací „Professional Partnership STRASKY + ANATECH“ tvořené firmami Jiri Strasky, Consulting Engineer, Greenbrae, California a ANATECH, San Diego, California. Projekt mostu přes řeku Willamette v Eugenu a lávky přes Johnson Creek byl vypracován firmou OBEC, Consulting Engineers, Eugene, Oregon ve spolupráci s Jiřím Stráským. Vývoj nových konstrukcí byl prováděn na Stavební fakultě VUT v Brně. Při řešení projektu mostu byly využity výsledky projektu Ministerstva průmyslu FI-IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“. Příspěvek byl vypracován v rámci výzkumného záměru MSM 0021630519 „Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce“.

Prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.

Stavební fakulta VUT v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno

tel.: 541 147 845

Stráský, Hustý and Partneři, s. r. o., Bohunická 50, 619 00 Brno

tel.: 547 101 882, e-mail: strasky.j@fce.vutbr.cz, j.strasky@shp.eu

**Obr. 65** Předpjatá membrána – montáž | **Fig. 65** Prestressed membrane – erection

**Obr. 66** Předpjatá membrána | **Fig. 66** Prestressed membrane

**Obr. 67** Předpjatá membrána – stavba modelu | **Fig. 67** Prestressed membrane – model erection

**Obr. 68** Předpjatá membrána – zkouška modelu | **Fig. 68** Prestressed membrane – model test

**Obr. 69** Střecha amfiteátru | **Fig. 69** Amphitheater roof

**Obr. 70** Střecha amfiteátru | **Fig. 70** Amphitheater roof