

## ZAMĚŘENÍ TVARU NOSNÉ KONSTRUKCE MOSTU PŘES LABE V MĚLNÍKU SURVEYING OF THE DEFORMED SHAPE OF BRIDGE OVER THE RIVER LABE IN MĚLNÍK

LUKÁŠ VRÁBLÍK, MARTIN ŠTRONER,  
RUDOLF URBAN

*Předpjaté betonové mosty velkých rozpětí typicky vykazují dlouhodobý nárůst průhybů. Příkladem takovéto konstrukce je most přes řeku Labe v Mělníku, u kterého ani po patnácti letech od uvedení do provozu nemá nárůst průhybů ustalující trend. Bylo provedeno přesné zaměření tvaru deformované konstrukce s cílem identifikovat možná místa jejich poruch.*

*Long-span concrete prestressed bridges are sensitive for long-term deflections growing. Bridge over the river Labe near Mělník is a typical example of this structural type. 15 years after bridge opening, midspan deflection still increases. Detail surveying of the superstructure was made to identify possible structure failure.*

### POPIS KONSTRUKCE MOSTU A JEJÍHO STAVU

Letmo betonovaný most přes řeku Labe v Mělníku (obr. 1) je hlavní součástí přemostění převádějící komunikaci I/16. Navržen byl jako spojitý nosník o rozpětí polí 72,05 + 146,2 + 72,05 m. S délkou hlavního pole 146,2 m je stále našim největším provozovaným letmo betonovaným mostem.

Stejně jako pro ostatní betonové mosty velkých rozpětí, je i pro tento most typický trvalý nárůst deformací v čase. Konstrukce je proto od svého uvedení do provozu v září roku 1994 trvale sledována. Z vyhodnocení výsledků monitoringu [1] jasně vyplývá, že ani po téměř patnácti letech od uvedení do provozu nedochází k ustalování nárůstu deformací.

Dlouhodobé deformace jsou měřeny ve fixních bodech na konstrukci nad podporami pro analýzu jejich dlouhodobého sedání a v mezilehlých bodech krajních a středního pole pro sledování dlouhodobých deformací předpjaté betonové konstrukce způsobené jak reologickými projevy betonu – dotvarováním a smršťováním, tak jinými možnými účinky (např. úbytky předpětí apod.).

Výsledkem měření je časový vývoj skutečného tvaru konstrukce – zahrnující

jak počáteční tvar, tak i průhybovou čáru – v analyzovaných bodech.

Pro zjištění přesného tvaru průhybové čáry bylo navrženo detailní zaměření deformovaného tvaru nosné konstrukce ve velkém počtu bodů. Možné zjištěné „anomálie“ v průběhu průhybové čáry mohou ukazovat na poruchy konstrukce způsobující enormní dlouhodobý nárůst jejich průhybů.

### TECHNOLOGIE, POSTUP MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ

#### Přístrojové vybavení a technologie měření

Pro měření byl použit přístroj Trimble S6 Robotic ( $\delta_{\phi} = 0,3$  mgon,  $\delta_D = 1$  mm + 1 ppm D) s příslušným všesměrným odrazným hranolem. Jedná se o totální stanici s automatickým sledováním cíle a prokládáním, jež rovněž umožňuje i automatické cílení na všesměrný odrazný hranol. Dále bylo použito pásmo (50 m), vrtací souprava, kládívo, natloukací hmoždinky 6 × 30 mm (600 kusů), podložky (1 000 kusů), barva ve spreji.

Mostní konstrukce byla měřena prostorovou polární metodou. Technologie měření byla určena v závislosti na časové změně tvaru mostní konstrukce a na požadavcích přesnosti. Technologii přesné nivelace, která by určila výšku bodů s vyšší přesností, nebylo možné použít z důvodu mnohonásobně delší doby zaměření, což by způsobilo výrazně větší pohyb konstrukce vlivem změny teploty, a tím i výrazně větší nepřesnosti měření (měření by nebylo kontinuální a oprava pomocí časového vzorku neproveditelná).

#### Stabilizace bodů

Stabilizace bodů byla provedena pomocí natloukacích hmoždinek délky 30 mm. Vzhledem k množství bodů, a s tím související pracnosti, a vůbec k ekonomické náročnosti celého projektu nebylo možné osazovat body nivelačními značkami ani nastřelovacími hřebíky. Osazení nastřelovacích hřebů do asfaltového lože silnice bylo testováno a ukázalo se velice problematické, neboť se jedná o velmi tvrdý

povrch a při použití nastřelovací pistole není možné zaručit ani přibližně stejné zapuštění hřebů do mostovky.

Prvních 246 bodů bylo stabilizováno asi 0,5 m od svodidla směrem do komunikace do asfaltového povrchu, zatímco druhá polovina bodů byla stabilizována 0,5 m od svodidla směrem od komunikace do betonového podloží. Hlavy hmoždinek bylo nutno zvýšit pomocí podložek (asfalt – dvě podložky, beton – jedna podložka). Vztažný bod pro porovnání rozdílů etapového měření byl taktéž stabilizován hmoždinkou a situován přibližně 10 m za konec opěry do asfaltového chodníku (kontrolní bod pro připojení byl stabilizován nivelační značkou na konci mostu).

Celková doba provádění stabilizace všech cca pěti set bodů s využitím profesionální vrtací soupravy trvala dvěma pracovníkům osm hodin a to včetně rozměření. Náklady oproti standardním stabilizacím byly výrazně menší. Vzhledem k plánovanému nočnímu měření byla provedena signalizace žlutou barvou nanesenou přímo na hlavičky hmoždinek a jejich okolí.

#### Konfigurace měření

Konfigurace měření je na obr. 3. Stanovisko bylo umístěno uprostřed zaměřovaného úseku mostu, protože pak mohlo být všech 492 bodů zaměřeno z jednoho stanoviska. Případné použití dvou a více stanovisek by snížilo celkovou přesnost vlivem chyb z připojení. Během měření se tvar mostní konstrukce měnil. Při návrhu konfigurace měření bylo předpokládáno, že dojde k dostatečnému potlačení tohoto systematického vlivu metodou „časového vzorku“. Stanovisko by mohlo být umístěno na stabilnějším místě, ale pak by nebylo možné změřit vše z jediného stanoviska, tvar konstrukce by se také systematicky měnil a bylo by tedy nutné zavádět opravu.

Použitý všesměrný hranol byl stabilně upevněn na výtyčku po celou dobu měření přibližně ve výšce 1,5 m. Celé měření bylo připojeno k vztažnému bodu prostřednictvím krajních bodů obou profilů (profil na asfaltu bod č. 1, profil na betonu bod č. 492), které byly zaměřeny nezávis-

le čtyřikrát na konci měření. Stabilní body, ze kterých byly oba profily výškově určeny, jsou znázorněny na obr. 3.

### Postup měření

Nejprve byly zaměřeny oba profily ze stanoviska uprostřed mostu v pořadí bodů 1 až 492 (doba měření – 3,5 h, teplota na začátku 12,5 °C, teplota na konci 8 °C). Poté byl určen časový vzorek, jenž obsahoval každý pátý bod profilů (doba měření – 45 min, teplota 8 °C, časová změna teploty se uvažuje jako minimální). Na závěr bylo provedeno zaměření koncových bodů profilů pro připojení a samotné připojení ke stabilnímu bodu na konci mostu z druhého stanoviska přístroje (doba měření – 20 min, teplota 8 °C). Při měření byly registrovány měřené vodorovné směry, zenitové úhly a šikmé délky, pro kontrolu při měření také tři prostorové souřadnice v místní (zvolené) soustavě souřadnic.

### Zdůvodnění postupu měření a zpracování dat

Určení výšek tak velkého počtu bodů (pět set) není v současné době technologicky možné provést se směrodatnou odchylkou cca 1 až 2 mm v tak krátkém

čase, aby v době mezi měřeními prvního a posledního bodu nedošlo ke změně tvaru konstrukce vlivem změny teploty. Pro minimalizaci těchto nežádoucích změn bylo měření provedeno v nočních hodinách (22:30 h až 4:00 h), přesto (jak bude dále ukázáno) došlo ke změně ve vertikálním směru o hodnoty přibližně 3 mm. Proto byla po provedení měření přibližně 1/5 bodů (každý pátý) zaměřena znovu kontrolně ve výrazně kratším čase (cca 45 min). Zde lze změny mezi určení výšky prvního a posledního bodu považovat za významně menší a takto určený vzorek bodů lze využít pro určení křivky oprav, pomocí které lze uvést měřené body do správné polohy a potlačit systematické chyby.

### Rozbor přesnosti měření výšek

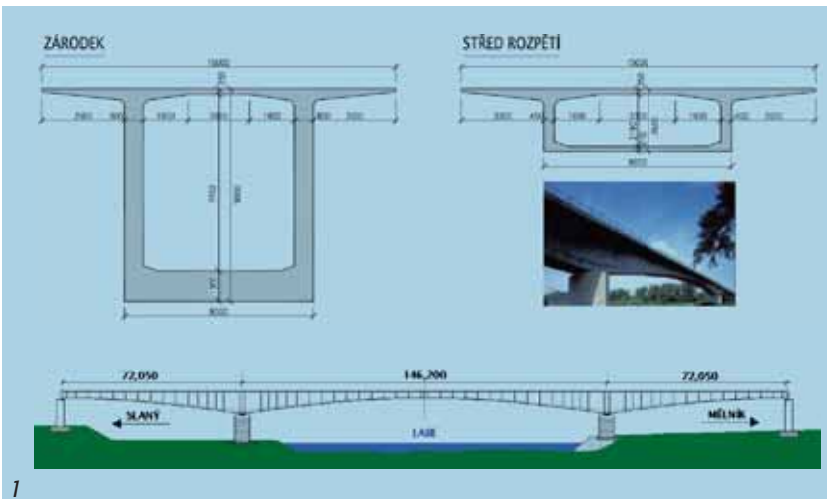
Vzhledem ke způsobu signalizace bodů pro měření (výtyčka s hranolem držena figurantem) lze odhadnout směrodatnou odchylku určení výšky bodu (v místní soustavě). Směrodatná odchylka zenitového úhlu měřeného ve dvou polohách je uváděna výrobcem 0,3 mgon. Dle zákona hromadění směrodatných odchylek (viz [7]) je směrodatná odchylka 2x měřeného zenitového úhlu v jedné poloze opět

0,3 mgon. Při maximální vzdálenosti bodu od stanoviska 150 m je tedy směrodatná odchylka určené výšky rovna 0,7 mm. Dále je vhodné uvážit vliv nepřesného nasazení hrotu výtyčky na bod, který činí s dostatečnou rezervou 1 mm. Vliv nepřesného urovňování krabicové libely na cílovém zařízení (nesvislost výtyčky) na určenou výšku je při citlivosti libely 4' až 6' a výšce hranolu 1,5 m zanedbatelný. Směrodatnou odchylku výšky je tedy možné odhadnout hodnotou 1,2 mm.

Směrodatná odchylka vypočtená z opakovaného měření při měření výškového připojení byla 0,5 mm při maximální vzdálenosti 50 m, což vyhovuje provedení rozboru přesnosti.

### Určení rovnoběžných os profilů a staničení bodů na profilech

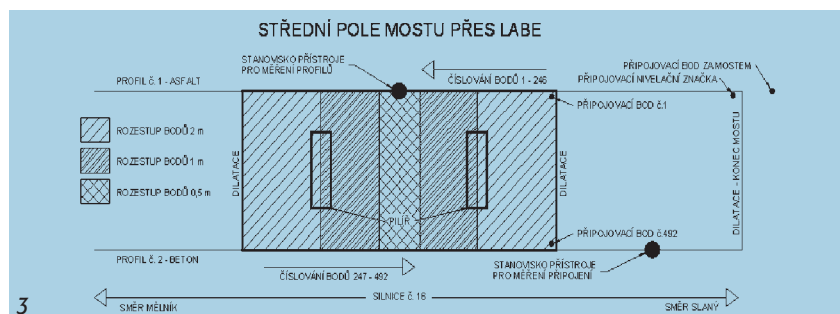
Při stabilizaci takového množství bodů nebylo možné přesně rozměřit polohu, aby oba profily byly navzájem dostatečně rovnoběžné a všechny body ležely přesně na těchto přímkách. Obecně je tedy možno uvažovat dvě řady bodů, které jsou rozmístěny kolem dvou téměř rovnoběžných přímk. Aby bylo možné určit průhybovou čáru mostovky, bylo tedy nejprve nutné polohy bodů výpočtem upra-



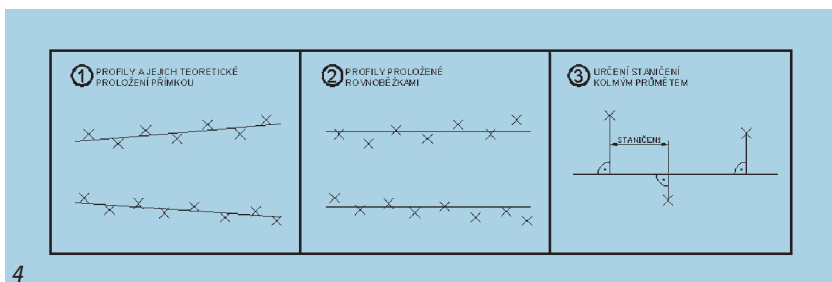
Obr. 1 Schéma mostu  
Fig. 1 Bridge arrangement



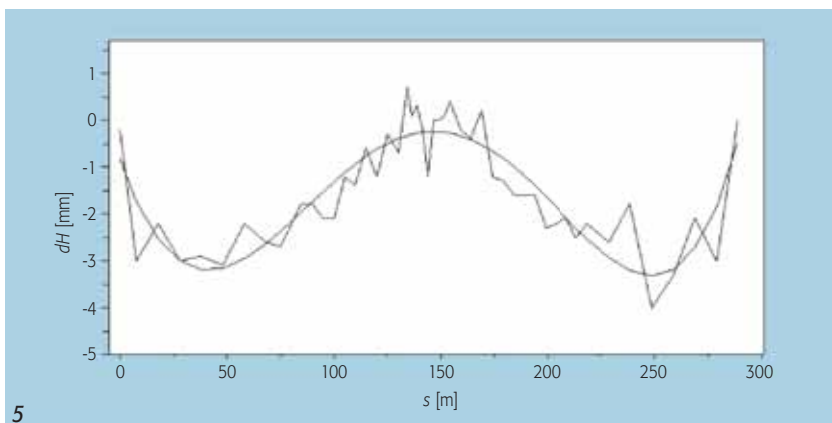
Obr. 2 Trimble S6 Robotic, výtyčka se všesměrným hranolem  
Fig. 2 Trimble S6 Robotic - picket with omnidirectional cuboid



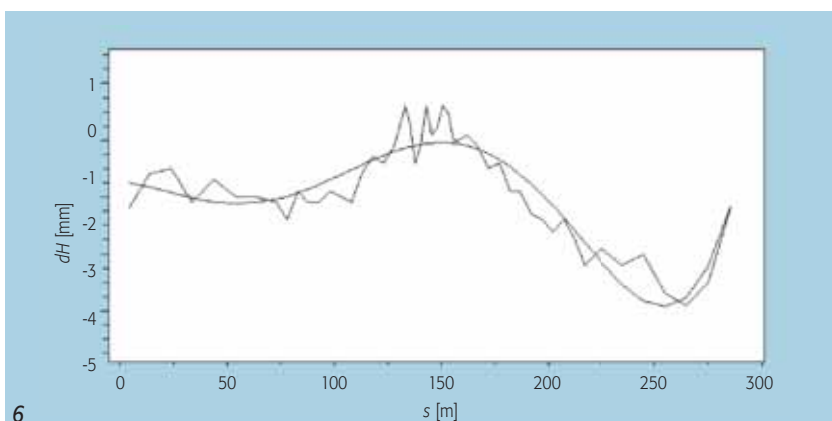
Obr. 3 Konfigurace měření  
Fig. 3 Measurement arrangement



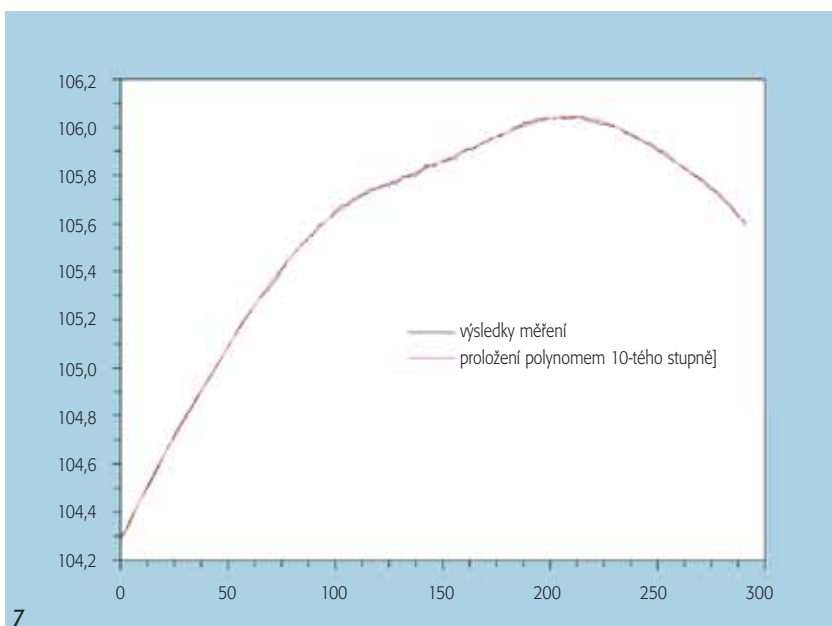
4



5



6



7

Obr. 4 Schéma vyrovnání profilů

Fig. 4 Profiles alignment

Obr. 5 Graf rozdílů měření a kontrolního měření – profil č. 1

Fig. 5 Difference between measurements - profile 1

Obr. 6 Graf rozdílů měření a kontrolního měření – profil č. 2

Fig. 6 Difference between measurements - profile 2

Obr. 7 Proložení výsledků měření polynomem

Fig. 7 Smooth of measurements results by multinominal

vit tak, že byly dvěma skupinami bodů (odpovídajícími profilům) proloženy metodou nejmenších čtverců (MNC) s dodržení podmínky ortogonálního prokládání dvě přímky s podmínkou vzájemné rovnoběžnosti a následně bylo určeno staničení, které bylo měřeno od počátků kolmic vedených od přímky k bodům profilů. Počáteční staničení bylo zároveň určeno společně pro oba profily (promítnutím počátečního bodu prvního profilu na druhý). Pro ilustraci přesnosti stabilizace bodů lze uvést, že průměrná vzdálenost bodu od vyrovnané přímky byla 13 mm (maximální 144 mm), rozdíl staničení počátečních bodů profilu byl 22 mm.

#### Určení opravy ze změny teploty

Z grafu na obr. 5 zobrazujícím porovnání určených výšek (v místním systému) při měření všech 492 bodů a při měření bodů časového řezu je patrná změna tvaru mostního tělesa v závislosti na čase (střed měřeného pole klesá společně s přístrojem, zatímco konce pole za pilířů mají tendenci stoupat). Obecně při porovnání výšek všech bodů s výškami bodů časového řezu je výsledkem polygon. Pro další výpočet potlačení teplotní změny bylo tedy nutné proložit polygon křivkou, jež je snadno matematicky definovatelná (polynom  $n$ -tého řádu), a poté je možné spočítat opravu ze změny tvaru (vlivem změny teploty) pro jednotlivá staničení a získat tak konečné výšky pro určení křivky, jež bude charakterizovat mostní konstrukci. Na obr. 5 a 6 jsou znázorněny rozdíly určených výšek  $dH$  v závislosti na staničení  $s$ . Hladká křivka znázorňuje proloženou funkci (polynom šestého stupně).

### Určení křivky průběhu mostovky

Výpočet je podobný jako při zpracování časových vzorků, ovšem s tím rozdílem, že přibližný typ křivky je znám, jedná se o polynom desátého stupně ve tvaru (1).

$$H_i = a_0 + a_1 s_i + a_2 s_i^2 + a_3 s_i^3 + \dots + a_{10} s_i^{10}, \quad (1)$$

kde  $s_i$  a  $H_i$  jsou staničení a výška  $i$ -tého bodu.

Proložení lze provést jednoduše metodou nejmenších čtverců, matice plánu experimentu  $J$  a vektor pravých stran  $I$  jsou definovány:

$$J(i, j) = s_i^{j-1}; \quad I(i) = H_i, \quad (2)$$

kde  $j$  je 1, 2, 3, ... 11 a  $i$  je 1, 2, ...  $n$ , kde  $n$  je počet měřených bodů.

Vektor neznámých  $a$ :

$$a = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{10} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Pro výpočet neznámých koeficientů  $a_0$  až  $a_{10}$  se použije vzorec (4)

$$a = (J^T J)^{-1} J^T I. \quad (4)$$

Vektor oprav  $v$  přiřazovaných k výškám  $H$  se vypočítá ze vzorce (5)

$$v = Ja + I. \quad (5)$$

### ZÁVĚR

Bylo provedeno detailní zaměření povrchu nosné konstrukce s použitím velkého počtu bodů (obr. 3). Výsledkem je „hladká a spojitá“ čára aproximující aktuální tvar nosné konstrukce (obr. 7), jejíž detailní matematická analýza, doplněná například o vizuální kontrolu stavu nosné konstrukce, může odhalit případné poruchy nosné konstrukce vedoucí k nadměrným v čase se zvětšujícím průhybům. Při přijetí předpokladu lineárního dotvarování (úroveň tlakových napětí má být např. podle ČSN ENV 1992-1-1 menší než  $0,45f_{ck}$ ) a neměnného napětí musí být totiž zjištěný tvar průhybové čáry „podobný“ tvaru deformace získaného výpočtem s uvažováním postupu výstavby, změn statického systému a vývoje deformací vlivem dotvarování betonu.

Případné zjištěné rozdíly tak mohou indikovat na konstrukci místa například se zmenšenou tuhostí způsobenou trhli-

### Literatura:

- [1] *Vodslouh J.*: Časový vývoj trvalých průhybů velkých mostů z předpjatého betonu; Zprávy o výsledcích dlouhodobých sledování vybraných mostů pozemních komunikací za roky 1995 až 2007
- [2] *Cieslar P., Zaoral P.*: Projekt RDS mostu na silnici I/16 přes Labe u Mělníka; SSŽ, s. p., Projektová správa, 09/1990
- [3] *Vráblík L., Křístek V.*: Optimalizace vedení kabelů pro účinné omezení průhybů velkých mostů z předpjatého betonu; Symposium Mosty 2005, Brno
- [4] *Vráblík L., Křístek V., Voplakal M.*: Výpočet účinků diferenčního smršťování pomocí náhradního teplotního zatížení; Betonářské dny 2005
- [5] *Křístek V., Vráblík L.*: Optimisation of tendon layout to avoid excessive deflections of long-span prestressed concrete bridges; Concrete Engineering International UK, Volume 11, Number 1, Spring 2007
- [6] *Vráblík L., Křístek V.*: Zpřesněná metoda statického řešení mostních konstrukcí založená na 3D modelech; Symposium Mosty 2007, Brno
- [7] *Böhm J., Radouch V., Hampacher M.*: Teorie chyb a vyrovnávací počet; Geodetický a kartografický podnik Praha, 2. vydání, Praha, 1990. ISBN 80-7011-056-2

nami v konstrukci. Je nutné připomenout, že pokud reálný tvar deformace neodpovídá předpokladům výpočtu, pak ani rozložení vnitřních sil definované výpočtem není správné.

*Výsledky byly získány v rámci řešení grantového projektu 103/08/P613 a částečně též projektu 103/06/0674 podporovaných Grantovou agenturou ČR.*

*Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.*

*e-mail: lvrablik@seznam.cz*

*Ing. Martin Štroner, Ph.D.*

*e-mail: martin.stroner@fsv.cvut.cz*

*Ing. Rudolf Urban*

*e-mail: rudolf.urban@fsv.cvut.cz*

*všichni tři:*

*ČVUT Fakulta stavební*

*Tháškova 7, 166 29 Praha 6*

*tel.: 224 354 365*



### Projekt: spřažený betonový most Řešení: RIB PONTI®

Software PONTI® na statické výpočty a navrhování mostních konstrukcí má opět nový přírůstek: mosty z železobetonových nebo předpjatých prefabrikátů spřažených s monolitickou mostovkou lze komplexně řešit pomocí funkčního balíku PONTI® *betonverbund*. Od zadání spřažených průřezů, v čase se měnícího statického systému až po výpočet vnitřních účinků, jejich návrhových kombinací a datově navazujících návrhů a posouzení. Balík PONTI® tak poskytuje kompletní a výkonnou podporu statického řešení všech běžných typů mostů:

- spřažené prefabrikované mosty
- spřažené ocelobetonové mosty
- předpjaté monolitické a segmentové mosty

Informujte se o naší zaváděcí nabídce PONTI® *betonverbund* do 30.06.2008.

Více podrobností se dozvíte na: [www.rib.cz](http://www.rib.cz)

#### RIB stavební software s.r.o.

Zelený pruh 1560/99

CZ-140 00 Praha 4

telefon: +420 241 442 078

telefax: +420 241 442 085

e-mail: [info@rib.cz](mailto:info@rib.cz)



# RIB

plan it, build it, run it