

MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DLOUHODOBÝCH DEFORMACÍ LETMO BETONOVANÉHO MOSTU PŘES LABE V LITOMĚŘICÍCH

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF LONG-TERM DEFORMATION OF THE BRIDGE OVER THE LABE RIVER IN LITOMERICE ERECTED BY BALANCED CANTILEVERS METHOD

Zdeněk Matouš, Martin Štroner,
Rudolf Urban, Lukáš Vráblík

Předpjaté betonové konstrukce a mosty velkých rozpětí typicky vykazují dlouhodobý nárůst průhybů. Výsledné působení těchto konstrukcí je ovlivněno kombinací celé řady faktorů. Pro vytvoření spolehlivých komplexních metod predikce jejich chování je nutná jejich kalibrace na reálných konstrukcích. Pro tyto účely bylo ihned po uvedení do provozu započato s měřením deformací letmo betonovaného mostu přes Labe v Litoměřicích. Seznámení s metodikou měření a jejich vyhodnocením je náplní tohoto článku. ■ Long-span prestressed concrete structures and bridges usually show increasing of long-time deflections. The final behaviour of these structures is influenced by a combination of various factors. For developing reliable prediction methods it is necessary to verify these methods on real structures. For this reason the measurement of deformations of the bridge over the Labe river in Litoměřice

began immediately after the bridge opening. Introduction of the measurement methodology and evaluation of their results is the content of this article.

V prosinci roku 2009 byl slavnostně uveden do provozu nový most přes Labe v Litoměřicích. Realizační dokumentaci mostu zpracovala firma Pontex, spol. s r. o., výstavbu provedlo sdružení firem Metrostav, a. s., a SMP CZ, a. s.

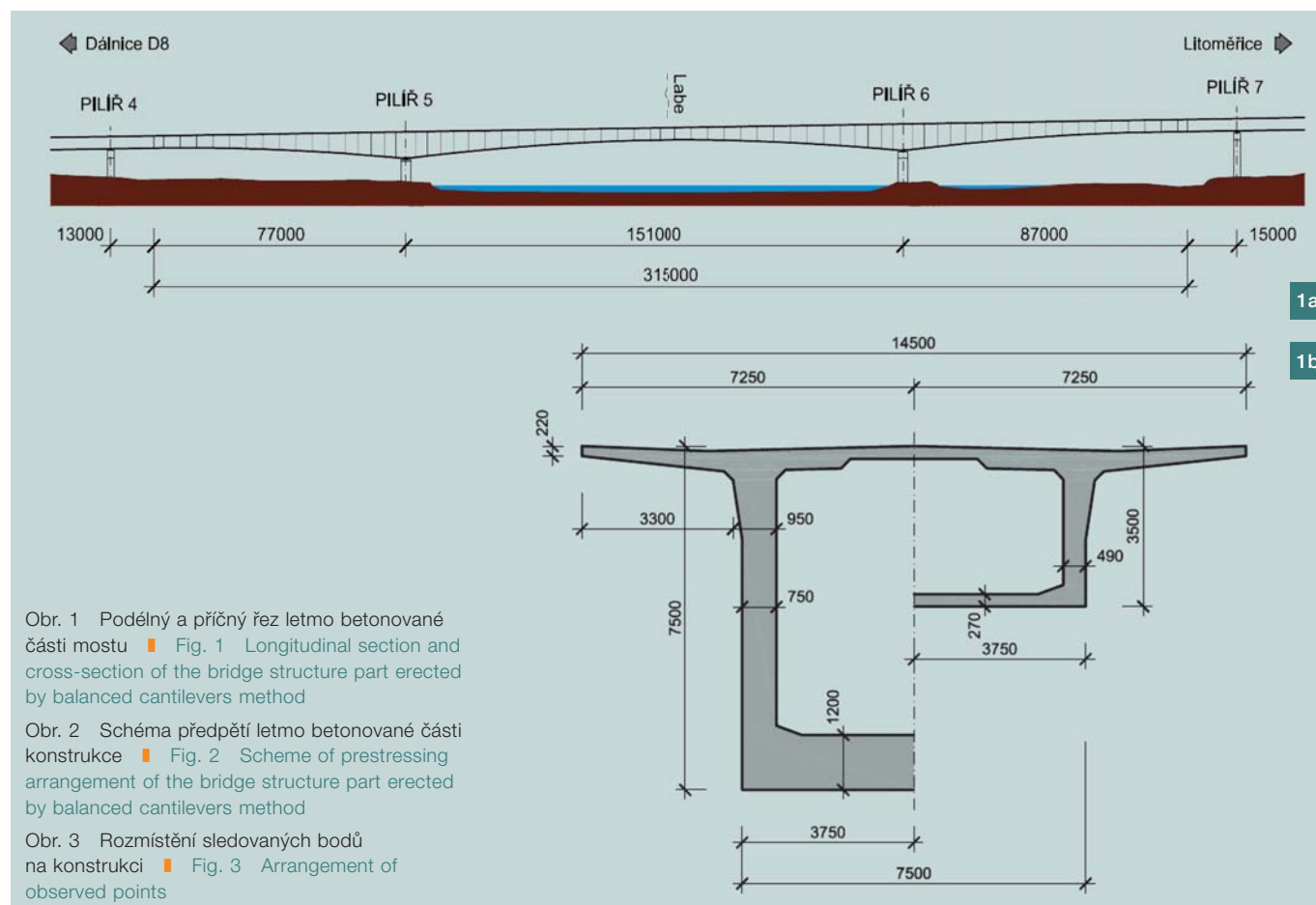
Rozpětí hlavního pole – 151 m je rekordní v České republice. Ani toto bohužel nepřesvědčilo investora věnovat pozornost tomuto mostu i po jeho dokončení a provádět jeho monitoring a dlouhodobě most sledovat. Jelikož se jedná o výborný „studijní“ materiál, bylo rozhodnuto měření financovat z prostředků výzkumných projektů zpracovávaných na pracovišti autorů. Výsledky získané z těchto měření jsou velmi cenná data, která rozšíří databázi po-

pisující chování podobných konstrukcí po celém světě.

KONSTRUKCE MOSTU

Most generála Františka Chábery v Litoměřicích je součástí stavby „II/247 – přivaděč k průmyslové zóně Prosmuky“. Přemostuje Labe mezi obcí Mlékojedy na levém břehu a městem Litoměřice ležícím na pravém břehu řeky. Nosnou konstrukcí mostu tvoří spojitý komorový nosník o sedmi polích, jehož celková délka je 584,5 m. Rozpětí jednotlivých polí jsou 43 + 64 + 72 + 90 + 151 + 102 + 60 m.

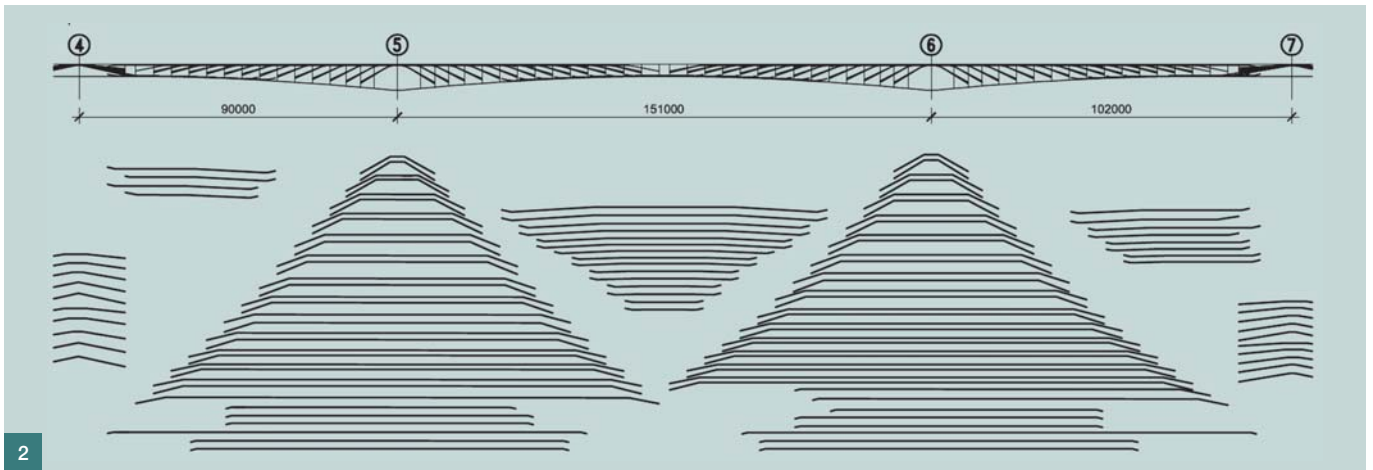
Nosná konstrukce je tvořena komorovým příčným řezem – šířka spodní desky je 7,5 m, šířka horní desky je 14,5 m. Hlavní pole mostu (151 m) a pole k němu přilehlá (90 + 102 m) byla realizována technologií letmé betonáže. Tato pole jsou tvořena dvojicí vahadel s proměnnou výškou komory nosní-



Obr. 1 Podélný a příčný řez letmo betonované části mostu ■ Fig. 1 Longitudinal section and cross-section of the bridge structure part erected by balanced cantilevers method

Obr. 2 Schéma předpětí letmo betonované části konstrukce ■ Fig. 2 Scheme of prestressing arrangement of the bridge structure part erected by balanced cantilevers method

Obr. 3 Rozmístění sledovaných bodů na konstrukci ■ Fig. 3 Arrangement of observed points



2

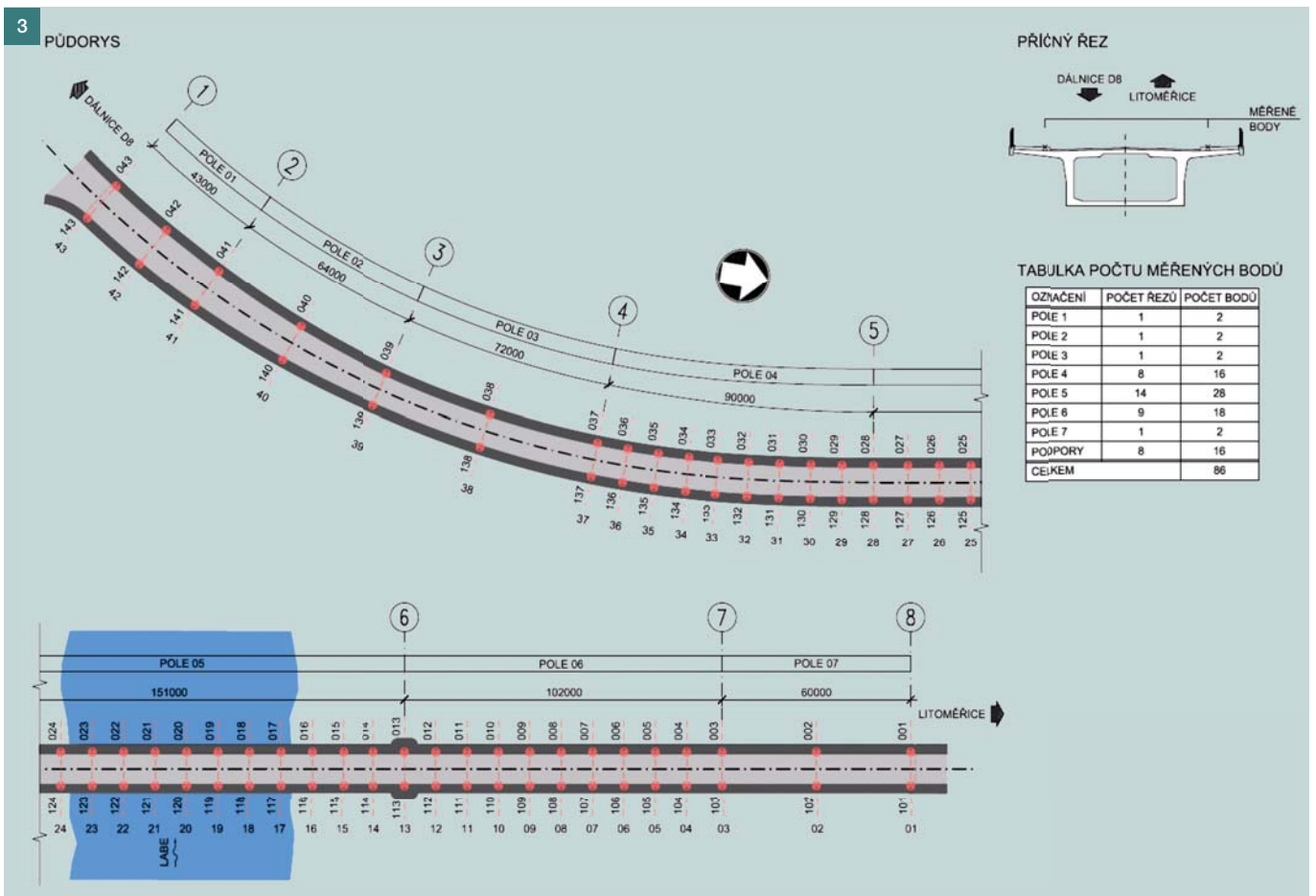
ku od 3,5 m ve středu pole do 7,5 m nad podporou a proměnnou tloušťkou spodní desky nosníku narůstající spolu s výškou komory od 270 mm do 1 200 mm (obr. 1). Levé vahadlo, které bylo zhotoveno jako první v pořadí, je symetrické s délkou vyložení obou ramen 148 m od zárodku. Pravé vahadlo, na kterém byly započaty práce až po zhotovení levého vahadla z důvodu použití pouze dvou betonážních vozíků, má délku vyložení levého ramene 74 m a pravého ramene 84 m od zárodku. Navazující části komorového nosníku, které byly vystavěny na pevné skruži, mají konstantní výšku komory 3,5 m

s tloušťkou spodní desky 270 mm. Předpínací výztuž vahadel tvoří zalomené kabely vedené při horním povrchu, které jsou na konci vahadel před místem kotvení svedené ke spodnímu povrchu. Předpínací kabely při spodním povrchu v poli jsou poté kotvené v místě kotvení vahadlových kabelů, čímž zajišťují předpětí všech průřezů konstrukce a nahrazují tak užívané kabely spojitosti finální konstrukce mostu. Konstrukce je dále doplněna dalšími kabely, aplikovanými až na finálním statickém systému. Schéma předpínací výztuže letmo betonované části mostu je ukááno na obr. 2.

GEODETICKÁ MĚŘENÍ

Geodetická měření jsou prováděna za účelem etapového sledování výškových změn sledovaných bodů rozmístěných ve dvou podélných profilech po obou stranách mostní konstrukce – celkem 2 x 43 bodů s označením 1 až 43 a 101 až 143 (obr. 3). Sledované body jsou stabilizovány kovovými nivelačními hřebovými značkami zalepenými do vrtaného otvoru tělesa chodníku. Stabilizace byla provedena realizátorem stavby po jejím dokončení.

K měření byla vzhledem ke značným vzdálenostem, požadované rychlosti a přesnosti měření (směrodatná od-



chylka určení výšky 2 mm) zvolena technologie trigonometrického určení výšek s úspěchem použita při měřeních na obdobných mostních konstrukcích, jak je uvedeno např. v [2] nebo [3].

Technologie měření, použité přístroje a pomůcky

Pro měření je s výhodou využita robotizovaná totální stanice Trimble S6 HP (směrodatná odchylka měření délky $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \cdot D$, měření zenitového úhlu a vodorovného směru se směrodatnou odchylkou 0,3 mgon) s automatickým cílením na všesměrový hranol Trimble umístěný na výtyčce se speciálním spodním nástavcem pro měření z nivelačních značek (obr. 4). Měření je prováděno ze dvou stanovišť (v každé etapě umístěných dle aktuální potřeby) připojených na bod 1005 základní vytyčovací sítě (ZVS) vybudované pro stavbu mostu. Výška bodu byla ověřena kontrolním měřením na bod 1004 téže sítě.

Každý bod je měřen ve dvou polohách, každá poloha s dvojím cílením a odečtením. Po změně stanoviště jsou kontrolně měřeny dosažitelné již zaměřené body. Měření na připojovací bod je prováděno vícenásobně, a to před začátkem měření na stanovišti a na konci měření na stanovišti.

Paralelně s měřením je měřena teplota vzduchu a konstrukce. K měření je použit kalibrovaný digitální teploměr Greisinger, teplota konstrukce byla měřena bezdotykovým teploměrem Ahlborn Messtechnik AMiR 7811.

Při prvním měření bylo také provedeno určení vlivu refrakce při měření trigonometrickou metodou, které ukázalo, že za vhodných podmínek měření (noc 29. 9. 2010) je vliv refrakce při měření na mostní konstrukci zanedbatelný. V tomto směru je připravován další výzkum, neboť vlivem refrakce zůstává jistá nejistota při připojovacím měření.

Bodové pole

Jako připojovací je využita stávající základní vytyčovací síť vybudovaná pro stavbu mostu, její použité body (1005, 1004) jsou stabilizovány kovovou zabetonovanou pažnicí s nivelačním hřebem na vrchu (obr. 5).

Rozbor přesnosti měření

Hlavní zdroje možných chyb měření jsou zejména:

- přesnost přímo měřených veličin;
- přesnost signalizace bodu výtyčkou s všesměrovým hranolem;

- přesnost připojení na vztažený bod;
- vliv prostředí na podrobné měření, vliv prostředí na připojení.

Rozbor přesnosti byl proveden pro vzdálenost připojení maximálně 60 m a maximální vzdálenost měření stanoviště – podrobný bod 300 m dle zásad a principů uvedených v [4].

Směrodatná odchylka měření zenitového úhlu je 0,0003 gon, na vzdálenost maximálně 300 m je směrodatná odchylka určení převýšení stanoviště – měřený bod 1,4 mm.

Vliv nesvislosti výtyčky lze zanedbat, i při odchylce od svislice o 1 gon je přesnost stále dostatečná, krabicová libela na výtyčce má přítom citlivost 3' a při měření je pečlivě urovňována. Výška výtyčky není v průběhu měření měněna a je použita jak při signalizaci podrobných bodů, tak při určení připojení.

Přesnost připojení je dána přesností trigonometrického měření převýšení na vzdálenost 60 m, tj. 0,28 mm. Hranol pro připojení je během měření trvale umístěn na stativu, převýšení hranol – připojovací bod je na krátkou vzdálenost cca 10 m určeno s přesností 0,4 mm. Výslednou přesnost připojení lze popsat směrodatnou odchylkou 0,5 mm.

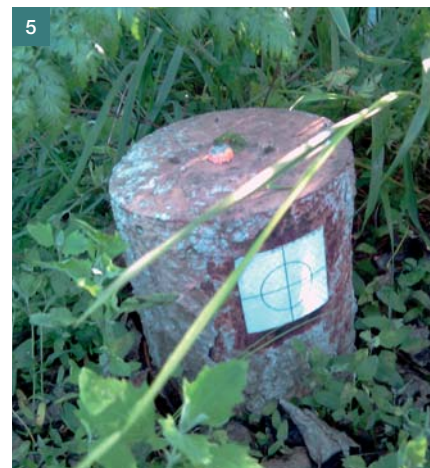
Vliv prostředí na měření je vždy problematické postihnout. Měření jsou prováděna na podzim a na jaře v nočních hodinách po západu slunce, aby nedocházelo k oslunění a zároveň nebyl velký rozdíl teploty vzduchu a konstrukce. Před měřením je sledována teplota konstrukce a měření začne až v okamžiku, kdy se teplota konstrukce mění méně než $1 \text{ }^\circ\text{C/h}$. V základní etapě byl také proveden experiment pro určení vlivu refrakce, který prokázal, že za daných podmínek neměla refrakce žádný vliv. Kladně v tomto směru působí otevřená krajina a stálé mírné proudění vzduchu (zřejmě vlivem vodního toku). Tento závěr však nelze považovat za obecný. Vzhledem k tomu, že tento vliv působí systematicky, pro jistotu zajištění dosažené přesnosti je do rozboru zaveden velikostí 1 mm (souhrnně vliv na připojení a podrobné měření).

Souhrnem jednotlivých vlivů je úplná chyba popisující přesnost určení výšky sledovaného bodu o velikosti 1,8 mm, tj. je splněna požadovaná přesnost 2 mm. Během měření bylo provedeno testování, které určilo směrodatnou odchylku určení výšky bodu o velikosti 0,67 mm z kontrolně měřených bodů z různých stanovišť, tato směrodatná odchylka zahrnuje i přesnost připo-



4a

4b



5



Obr. 4 Trimble S6 HP, výtyčka se všesměrným hranolem ■ Fig. 4 Trimble S6 HP, geodetic tool for measurement

Obr. 5 Způsob stabilizace bodů 1004 a 1005 ZVS ■ Fig. 5 Stabilization of observed points 1004 and 1005

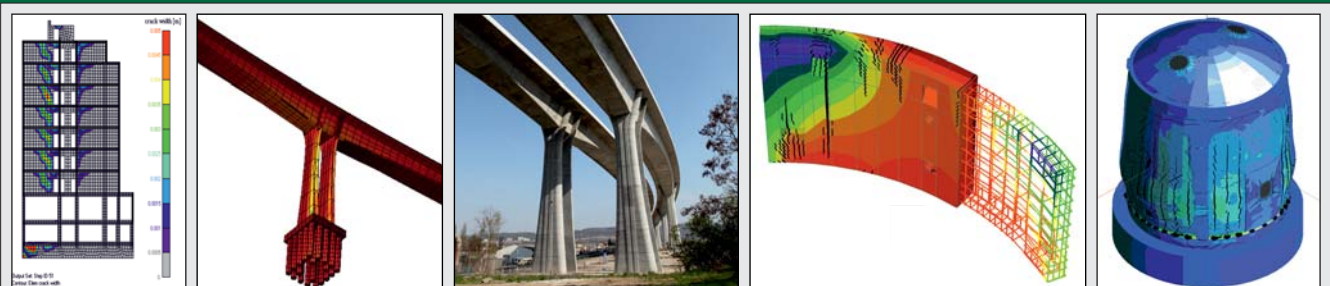
Obr. 6 Přehledná situace bodů ZVS ■ Fig. 6 Overview of the points of ZVS

Tab. 1 Realizované etapy měření ■ Tab. 1 Carried out measurement stages

Etapy měření			
Etapa	Datum a čas	Průměrná teplota atmosféry [°C]	Průměrná teplota mostovky [°C]
0.	29. 9. 2010 (21:00 až 4:00 hod 30. 9. 2010)	9	8,2
1.	13. 5. 2011 (21:30 až 2:00 hod 14. 5. 2011)	11	13
2.	27. 9. 2011 (23:00 až 2:00 hod 28. 9. 2011)	15,4	14,9
3.	4. 11. 2011 (22:30 až 1:30 hod 5. 11. 2011)	8,5	6,9
4.	12. 4. 2012 (23:00 až 2:00 hod 13. 4. 2012)	6,7	4,9
5.	30. 5. 2012 (23:30 až 2:00 hod 31. 5. 2012)	12	15,2

Ověřte Vaši konstrukci programem ATENA!

Připojte se ke špičkovým inženýrům, kteří používají počítačovou simulaci pro kontrolu a navrhování bezpečných a spolehlivých staveb.

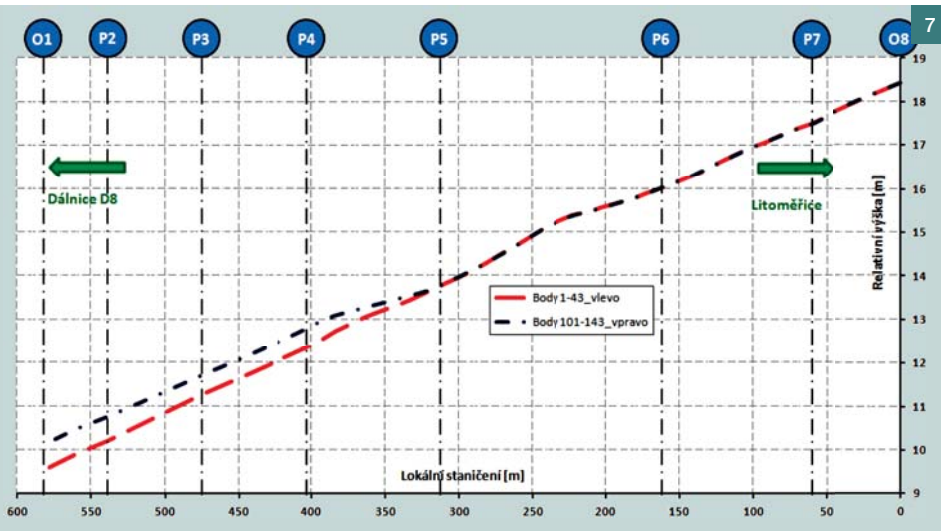


Nabízíme:

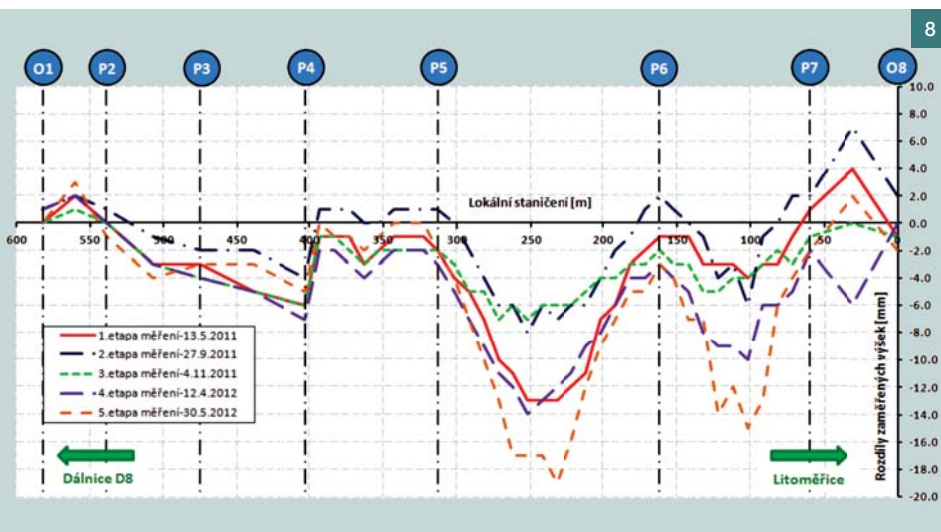
- jedinečný software pro nelineární analýzu a hodnocení bezpečnosti - programy ATENA Engineering, ATENA Science, SARA, RLACS
- uživatelskou podporu a údržbu
- poradenství v oblasti nelineárních výpočtů a spolehlivosti konstrukcí

Použití pro:

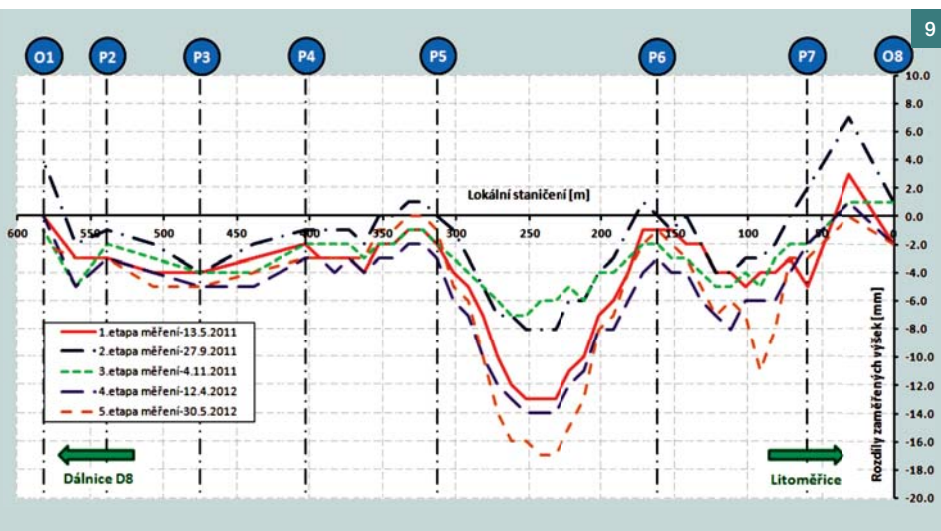
- mostní konstrukce, dopravní stavby, tunely, budovy, elektrárny
- prostý a vyztužený beton, drátkobeton, vláknobeton
- stanovení šířky trhlin, průhybů, optimalizaci výztuže
- ověření únosnosti, odolnosti, spolehlivosti, zesilování konstrukcí



Obr. 7 Podélný profil mostu – 0. etapa
 Fig. 7 Longitudinal profile of the bridge – Step 0 of measurement



Obr. 8 Vývoj deformací bodů konstrukce vzhledem k 0. etapě – body 1 až 43 (vlevo)
 Fig. 8 Development of structure deformation due to Step 0 – points 1–43 (left)



Obr. 9 Vývoj deformací bodů konstrukce vzhledem k 0. etapě – body 101 až 143 (vpravo)
 Fig. 9 Development of structure deformation due to Step 0 – points 101–143 (right)

Obr. 10 Časový vývoj deformace středu hlavního pole
 Fig. 10 Time dependent development of midspan deflection

Obr. 11 Účinky nerovnoměrných teplotních změn na průhyb konstrukce
 Fig. 11 Impact of temperature on bridge structure deflection

Literatura:
 [1] Pontex, s. r. o. – Projektová dokumentace RDS, 09/2006
 [2] Vráblík L., Štroner M., Urban R.: Zaměření tvaru nosné konstrukce mostu přes Labe v Mělníku, časopis Beton TKS 4/2008
 [3] Vráblík L., Štroner M., Urban R.: Measurement of bridge body across the river Labe in Melnik, Acta Montanistica Slovaca, 14/2009
 [4] Štroner M., Hampacher M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii, 1. Vydání Praha, CTU Publishing house, 2011

dovaných bodů v závislosti na staničení od prvního bodu profilu (č. 1 – vlevo ve směru Litoměřice nebo 101 – vpravo ve směru Litoměřice), počátek lokálního staničení pro měření deformací konstrukce je přibližně v ose uložení na severní straně mostu (směr Litoměřice) – krajní opěra O8.

Vyhodnocení provedených měření

V šesti měřeních byly určeny relativní výšky všech zkoumaných bodů od přípojovacího vztažného geodetického bodu 1005. Dále jsou uvedena grafická znázornění vývoje posunů (deformací konstrukce) jednotlivých bodů vzhledem k základní 0. etapě (obr. 8 a 9).

Z hlediska vývoje dlouhodobých průhybů (deformací) celé konstrukce je samozřejmě nejdůležitější časový vývoj průhybu středu hlavního pole. Z výsledků měření vyhodnocených na obr. 8 a 9 byl zjištěn časový vývoj průhybu středu hlavního pole (obr. 10). Zatím se jedná, vzhledem k celkové životnosti mostu a předpokládanému vývoji deformací, o velmi krátký časový

jení, ale body nebyly kontrolně měřeny v maximální vzdálenosti. Hodnota dále neobsahuje vliv refrakce, který je systematický. Hranice prokazatelného posunu mezi etapami je **5,1 mm** (s pravděpodobností **95 %**).

Etapy měření

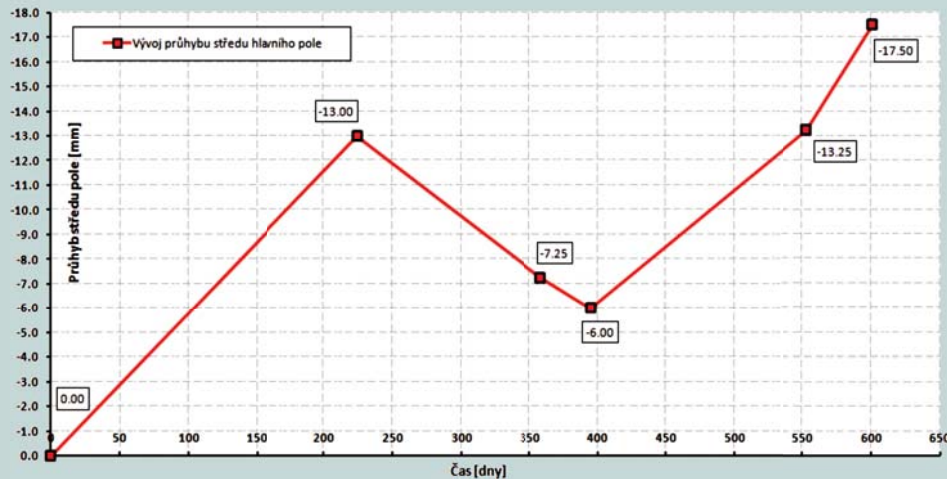
Měření byla doposud provedena v ter-

mínech uvedených spolu s průměrnými teplotami v tab. 1. Měření vždy proběhlo s úspěšnými kontrolami potvrzujícími dosažení požadované přesnosti.

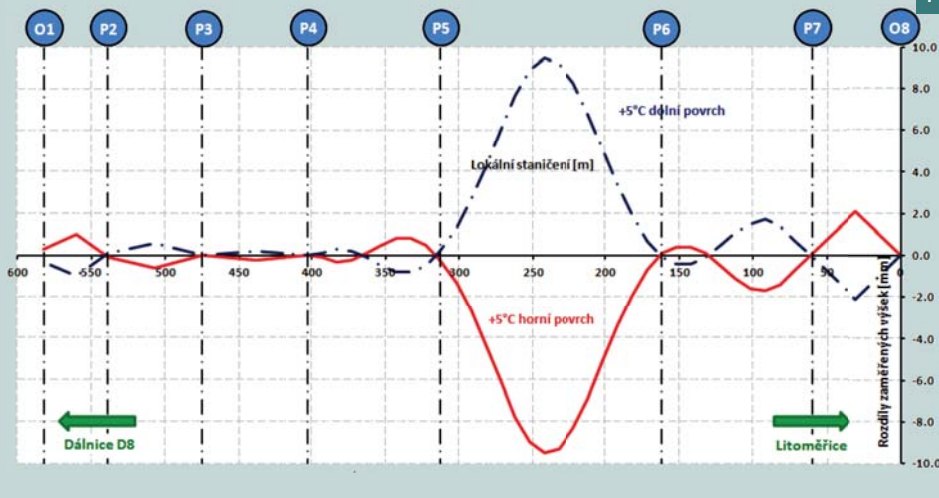
Profil sledovaných bodů

Po zaměření základní etapy (29. 9. 2010) byl vytvořen podélný profil (obr. 7) zachycující výškový průběh sle-

10



11



interval měření. Možné je však již sledovat určitý trend, který bude následně porovnán s výsledky matematické predikce.

Vzhledem ke krátkému intervalu, během kterého je zatím vývoj dlouhodobých průhybů mostu sledován, jsou jejich absolutní velikosti poměrně malé, srovnatelné s účinky teploty. Proto byla (jak je již uvedeno výše) při každém měření zjišťována i teplota atmosféry a nosné konstrukce. O tyto účinky budou veškeré výsledky následně opraveny. Pro ukázkou je na obr. 11 ukázán průběh deformace (průhybová čára) konstrukce od nerovnoměrného oteplení, resp. ochlazení horního povrchu o 5 °C oproti dolnímu povrchu.

Výpočetní analýza mostu

Souběžně s měřeními je prováděna detailní výpočetní analýza, jejímž cílem je sladit výsledky měření a predikce. Cílem je postupná kalibrace použitých výpočetních metod a postupů vedoucích ke shodě predikovaných a měřených deformací. Takto pak budou získává-

ny stále zpřesňované časové předpovědi dlouhodobých deformací a chování konstrukce, pomocí kterých bude možné usuzovat o vývoji deformací a napjatosti konstrukce v budoucnosti.

Popis jednotlivých analýz:

- detailní časově závislá analýza respektující všechny fáze výstavby, změny uložení, vývoj zatížení a předpětí;
- citlivostní analýza dotvarování a smršťování betonu společně s relaxací předpínací výztuže;
- analýza vlivu diferenčního smršťování – vliv na deformace a napjatost konstrukce;
- analýza vlivu vedení předpínacích kabelů na deformaci hlavního pole, včetně velikosti deformace hlavního pole od jednotlivých kabelů;
- analýza účinků pohyblivého zatížení na mostní konstrukci;
- analýza vlivu globálního 3D působení na napjatost konstrukce a na dlouhodobé ztráty předpětí;
- porovnání účinku předpínacích kabelů v jednotlivých fázích působení.

ZÁVĚR

Je prováděno systematické měření deformací nosné konstrukce s použitím relativně velkého počtu sledovaných bodů. Použity jsou nejmodernější metody inženýrské geodézie, které zaručují co největší přesnost a spolehlivost měření a z nich získaných výsledků.

Zatím se jedná o velmi krátký časový interval, v kterém je vývoj deformací zjišťován. Je tak zcela předčasné usuzovat o budoucím trendu vývoje průhybů konstrukce. Avšak i tyto výsledky jsou velmi důležité, neboť z nich získáme počáteční vývoj deformací a bude tak možné přesně kalibrovat souběžně prováděné výpočetní a citlivostní analýzy chování konstrukce. Tato systematická měření budou i nadále pokračovat ve stejné intenzitě a rozsahu.

Společně s dalšími výsledky z budoucích měření získáme velmi rozsáhlý soubor, který může posloužit pro lepší pochopení komplexního působení těchto konstrukcí. Jedná se o další krok vedoucí k vytvoření zcela obecné metodiky predikce dlouhodobého chování předpjatých betonových konstrukcí velkých rozpětí, která bude sloužit pro jejich bezpečný a spolehlivý návrh ve shodě s chováním reálných konstrukcí.

Výsledky byly získány v rámci řešení projektu TA 01031920 – „Rozvoj progresivních metod projektování a technologií výstavby mostních objektů dopravní infrastruktury“ podporovaného Technologickou agenturou ČR.

Ing. Zdeněk Matouš

e-mail: zdenek.matous@fsv.cvut.cz



Doc. Ing. Lukáš Vráblik, Ph.D.

e-mail: lukas.vrablik@fsv.cvut.cz

oba: Katedra betonových a zděných konstrukcí
tel.: 224 354 627

Doc. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

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



Ing. Rudolf Urban, Ph.D.

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

oba: Katedra speciální geodézie
tel.: 224 354 782

všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6