

# MONITORING BETONOVÝCH OBLOUKOVÝCH MOSTŮ BĚHEM VÝSTAVBY

Vít Némčic, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
vit.nemcic@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Článek se zabývá monitoringem betonových obloukových mostních objektů během jejich výstavby. Konkrétně letmo betonovaného mostu přes Opárenské údolí, který se nachází na dálnici D8 spojující Prahu a Drážďany. Výstavba mostu byla velice složitá a náročná. Mostní objekt během jeho výstavby procházel mnoha stavebními stavy o rozdílném statickém systému, což s sebou přinášelo různé komplikace. Z důvodu složitosti výstavby byla navržena různá měření, která umožnila sledovat chování mostu během jeho výstavby. Dále článek pojednává o současně realizovaném mostním objektu přes VD ORLÍK (železniční most přes Vltavu u Červené nad Vltavou). V rámci výstavby mostního objektu je nutné, obdobně jako u mostu přes Opárenské údolí, zajistit komplexní monitoring během jeho výstavby.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Monitoring • Tenzometry • Měření teploty

## ABSTRACT

The article deals with the monitoring of concrete arch bridge structures during their construction. In particular, the bridge over the Oparno valley which was cast using the free cantilevering, located on the D8 motorway connecting Prague with Dresden. The construction process of the bridge was very complex and challenging. During its construction, the bridge went through many construction stages, which brought various difficulties. Due to the complexity of construction, various measurements were designed that could monitor the behaviour of the bridge during its construction. Furthermore, the article deals with the currently designed bridge structure across the VD ORLÍK (the railway bridge to crossing the Vltava river at Červená nad Vltavou). As a part of the construction of the bridge, it is necessary to provide comprehensive monitoring during its construction, similar to that which was used at the bridge over the Oparno valley.

## KEYWORDS

Monitoring • Tensometers • Temperature measurement

## 1. ÚVOD

Mostní objekt přes Opárenské údolí je železobetonový oblouk s horní mostovkou. Příčný řez oblouku je navržen jako dvoutrámový spojený horní deskou. Rozpětí oblouku činí 135 m. Konstrukci mostovky tvoří spojitý dvoutrám. Most má dvě samostatné konstrukce, každá pro jeden jízdní směr. Most byl během výstavby vybaven měřicími zařízeními (tenzometry, snímači teplot, geodetickými značkami), které umožnily sledovat jeho chování během výstavby. Monitoring mostu přes Opárenské údolí může sloužit jako podklad pro vytvoření optimálního návrhu monitoringu na aktuálně realizovaném mostním objektu: železniční most přes VD ORLÍK (most přes Vltavu u Červené). Mostní objekt je obdobně tvořen železobetonovým obloukem s horní mostovkou. Oblouk mostního objektu je navržen jako železobetonový komorový. Rozpětí oblouku je 156,0 m. Mostovka nosné konstrukce je navržena jako spojitý nosník s dvoutrámovým průřezem. Realizace mostního objektu začala v lednu 2022 přípravnými pracemi. Výstavba nosné konstrukce bude probíhat od roku 2023. Pro výstavbu mostního objektu přes VD ORLÍK byla zvolena identická technologie výstavby (letmá betonáž s postupným vyvěšováním). Cílem příspěvku je popis a zhodnocení dříve provedených měření na mostním objektu Opárno. Závěry z těchto měření mohou sloužit pro optimální návrh měření na objektu VD Orlick. Článek má rešeršní charakter.

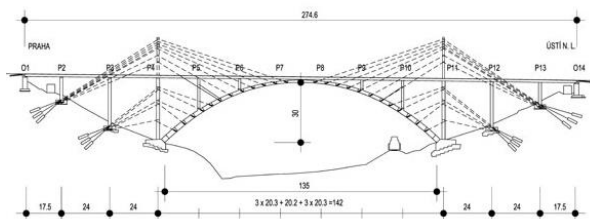
## 2. MONITORING U MOSTNÍHO OBJEKTU PŘES OPÁRENSKÉ ÚDOLÍ

Výstavba mostního oblouku metodou letmé betonáže s postupným vyvěšováním prochází mnoha stavebními stavy, což s sebou přináší různé komplikace. Přitom se požaduje, aby byly jednotlivé konstrukční části mostního objektu efektivně využity a konstrukce byla hospodárná zejména v definitivním stavebním stavu. Z důvodu vytvoření co nejpřesnějších statických modelů, které by vystihovaly reálné působení mostní konstrukce, bylo navrženo měření na vzorcích betonu (např. moduly pružnosti) a dále byla provedena měření na zkušebním tělese. I přes množství provedených měření a experimentů, existuje i dále celá řada faktorů, které jsou obtížně vystihnutečné, například:

- nepřesnosti předpokladů statického výpočtu;

\* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng.

- vliv teplotních změn;
- vlivy smršťování a dotvarování betonu;
- odchylky geometrické přesnosti;
- odchylky od předepsaných technologických postupů a předpisů;
- odchylky skutečně dosažené kvality materiálů apod.



Obrázek 1: Podélný řez mostem přes Oparenské údolí s pylony a dočasným zavěšením.

Výstavba segmentů mostního objektu byla prováděna v opakujícím se cyklu, při kterém probíhala geodetická měření geometrie mostu. Výsledky těchto měření byly zaznamenávány do projektantem připravených formulářů a odesílány k vyhodnocení. Záměrem těchto měření bylo co nejpřesnější nastavení polohy betonážního vozíku k dosažení požadovaného tvaru oblouku. Výstavbu mostního oblouku výrazně ovlivňoval vliv teplotních změn, které způsobovaly deformace mostního oblouku. Hodnoty změny výškové polohy od oslunění/ochlazení dosahovaly až  $\pm 80$  mm. Z důvodu omezení působení vlivů proměnné teploty, oslunění oblouku na závěsů oblouku a oblouk samotný se všechna geodetická měření a nastavování prováděla v brzkých ranních hodinách. S měřeními po betonáži některých segmentů byly současně kontrolně měřeny i síly v zemích kotvách pod pilíři, které byly vybavené dynamometry.

Pro monitorování chování konstrukce z dlouhodobého hlediska bylo navrženo diagnostické sledování formou tenzometrického měření poměrných deformací, sledování průběhu teplotních polí v jednotlivých průřezích a geodetického měření skutečných tvarů konstrukce v jednotlivých etapách. U prvního z postavených mostů (levý most) byla konstrukce oblouku detailně sledována ve 13 průřezích – vyjma patního a vrcholového průřezu byly sledovány i průřezy pod podporami mostovky a průřezy mezilehlé. U pravého mostu bylo provedeno pouze kontrolní srovnávací měření v redukovaném rozsahu. K měření poměrných deformací bylo využito celkem 80 ks vibračních strunových tenzometrů s čidly pro sledování teploty. V každém měřeném řezu byly rozmístěny 4 ks tenzometrů. V referenčním řezu levého mostu byla také osazena souprava k dlouhodobému sledování teplotního namáhání průřezu oblouku a mostovky.

Měření během výstavby mostního objektu zahrnovalo:

- vyhodnocení vlastností betonu
- měření teplot od hydratačního tepla na vzorcích oblouku
- měření deformací oblouku strunovými tenzometry
- měření teplot v oblouku a jejich dálkový přenos přes GSM bránu
- geodetická měření během výstavby

- měření sil v zemních kotvách

## 2.1. Měření hydratačního tepla na vzorcích oblouku

Pro urychlení postupu výstavby je vhodné užít betonu s rychlým náběhem pevností. K tomu je obvykle potřeba použití cementů typu CEM I, které vyvíjejí větší hydratační teplo. Pro betonáž mostních oblouků mostu Opárno byl použit beton C 45/55 – XF2 z betonárny PZ Holcim Lovosice.

Před zahájením výstavby byla provedena řada zkoušek s cílem ověřit riziko vzniku příliš vysokých teplot v masivu monolitického betonového tělesa oblouku při betonáži, zejména v letních měsících. První zkouška byla provedena na zkušebním tělese části oblouku v měřítku 1:1. Teploty betonu zkušebního tělesa přesahovaly  $75$  °C. Z důvodu vysokých teplot nejprve došlo k úpravám betonové směsi a pokusům ovlivnit teplotu složek přímo na betonárně. V případě provedení úpravy betonové směsi lze teploty v betonu snížit jen nepatrně. Chlazení složek betonové směsi, zejména kameniva na betonárně, nebylo reálné. Další možné způsoby, které by snížily počáteční teplotu v betonu např. použití dusíku k chlazení směsi, v tomto případě nebyly ekonomické. Proto byl vyvinut originální způsob snížení teploty betonu v konstrukci. Způsob snížení teploty betonu spočíval v chlazení vodou vedenou v trubkách uvnitř jednotlivých lamel oblouku. To s sebou přinášelo další otázky, např. počet trubek, jejich rozmístění, potřebné množství vody atd. Pro optimální návrh byly provedeny numerické analýzy, které měly za cíl stanovit množství vyvinutého tepla v betonu, jež bylo nutné odebrat. Jakmile bylo ukončen vývoj betonové směsi, bylo možné stanovit množství tepla, které bylo třeba odebrat a dále stanovit potřebné množství chladicí vody a její teplotu. Velikost nádrže pro led s vodou byla stanovena na základě výpočtů. Řízení teploty chladicí vody i řízení průtoku chladícími trubkami bylo realizováno pomocí malého zařízení, jehož funkčnost byla ověřena na dalším modelu části oblouku. Po provedení experimentu bylo zjištěno, že zařízení je funkční, a že došlo ke snížení teploty betonu přibližně o  $10$ – $12$  °C, tudíž nejvyšší teploty v průběhu letních měsíců nepřesáhly  $65$  °C. Následně po dalších vyhodnocení došlo pouze k úpravě polohy chladících trubek v průřezu.

## 2.2. Měření deformací oblouku strunovými tenzometry

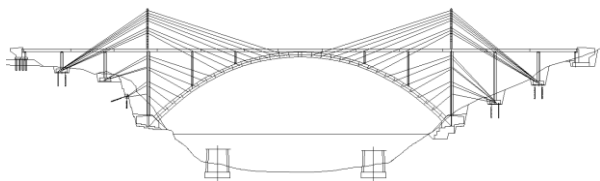
Strunové tenzometry sloužily ke sledování poměrných přetvoření v různých částech obloukové konstrukce po dobu stavby, ke zjištění vlivu dotvarování, vlivu teplotních jevů atd. Byly taktéž využity pro doplňková měření při zatěžovací zkoušce.

Oba mosty, tj. pravý most i levý most byly vybaveny strunovými tenzometrickými snímači, kdy každý tenzometr byl vybaven i teplotním snímačem. V oblouku levého mostu se nacházelo celkem 13 měřených řezů po 4 tenzometrech, v pravém mostu bylo 7 měřených řezů po 4 tenzometrech.

Odečet naměřených hodnot byl prováděn v pravidelných intervalech vždy po osazení před betonáží další lamely, popř. před dalšími významnými etapami (vyvážování lamel apod).



objektu přes Opárenské údolí, bylo by nutné zavést opatření, která by napomohla snížit teploty betonu v konstrukci.



Obrázek 5: Podélný řez mostem s pylony a dočasným zavěšením.

Pro sledování poměrných přetvoření a vlivu teplotních jevů v různých částech obloukové konstrukce a mostovky, po dobu výstavby, jsou navrženy tenzometry s integrovanými teplotními čidly. V oblouku mostu se má nacházet celkem 15 měřených řezů po 6 tenzometrech (horní-střed-dolní). Za účelem možnosti dlouhodobého sledování chování předpínací výztuže v mostovce bude osazena nosná konstrukce tenzometry v polovině každého pole a nad podporou. Dva kusy snímačů na řez. V místě spojení mostovky s obloukem budou tenzometry osazeny ve třech řezech – na koncích spoje a uprostřed. U dvou pilířů budou osazeny tenzometry v patě a polovině výšky. V místě jedné základové jámy budou kontrolně měřeny i síly v zemích kotvách pomocí dynamometrů.

#### 4. ZÁVĚR

Současně realizovaný mostní objekt přes VD ORLÍK (most přes Vltavu u Červené) je navržen obdobně jako mostní objekt přes Opárenské údolí. Oba mostní objekty jsou navrženy jako železobetonový oblouk s horní mostovkou. Mostovky obou objektů jsou tvarově podobné, podstatný rozdíl je v příčném řezu oblouku. U mostního objektu přes VD ORLÍK je navržen komorový průřez, což s sebou přináší významnou změnu v návrhu betonážního vozíku.

V současnosti jsou zahájeny přípravné práce na návrhu optimální betonové směsi. Je nutné společně s betonárnou, která bude dodávat betonovou směs, zahájit vývoj vhodné receptury pro beton vyšších pevností s nízkým vývinem hydratačního tepla. Vlastnosti betonu budou ověřeny pomocí zkoušek. Ty budou zahrnovat měření vlastností čerstvého betonu: zpracovatelnost, měření teplot v betonu, sledování mechanických vlastností a odolnosti proti účinkům prostředí (mráz, účinky chemických rozmrazovacích látek).

Na základě naměřených hodnot se bude receptura betonu dále modifikovat k dosažení optimálních vlastností. V rámci požadavků na beton oblouku se doporučuje využití receptury, která zajistí malý vývin hydratačního tepla a přitom bude dosahovat i požadovanou trvanlivost. Případně budou navržena opatření k zamezení přehřívání betonu. S ohledem na předpoklad možného přehřívání betonu v rámci hydratace se požaduje provedení zkušebního segmentu před zahájením výstavby oblouku.

Mostní objekt přes Opárenské údolí byl během výstavby vybaven měřicími zařízeními (tenzometry, snímači teplot, geodetickými značkami), které umožnily sledovat chování mostu. Současně (v zadávací dokumentaci) navržené sledování mostního objektu přes VD ORLÍK nezahrnuje

samostatné měření teplot pomocí snímačů teplot. K měřením teplot mají být využity instalované tenzometry. Momentálně je nutné s projektantem mostního objektu nadefinovat přesné požadavky na měření, které mohou doplnit požadavky zadávací dokumentace. Provést optimální návrh měření. Na objektu přes Opárenské údolí bylo prováděno fyzické odečítání dat jak v průběhu výstavby, tak po jejím ukončení. Fyzické odečítání lze nahradit automatickým odečítáním, tudíž lze mostní objekt sledovat bez nutného fyzického přístupu. Technologie, které umožní sledování chování mostu by měly být navrženy tak, aby sloužily k monitoringu jak během výstavby mostního objektu, tak i dlouhodobě po jeho dokončení.

## Literatura

- Míčka, T., *Zpráva o dlouhodobém sledování průběhu teplot - Dálnice D8, stavba 0805 Lovosice - C-205 most přes Opárenské údolí*. PONTEX, 2015.
- Míčka, T., *Zpráva o měření poměrných deformací - Dálnice D8, stavba 0805 Lovosice - Řehlovice C-205 most přes Opárenské údolí*. PONTEX, 2015.
- Göringer, J., *Rekonstrukce mostu v km 41,791 trati Tábor – Písek. Technická zpráva*. SUDOP PRAHA, 2019.
- Kalný, M. a Vitek, J., *Obloukový most přes Opárenské údolí a komplikace před jeho dokončením*. Časopis stavebnictví, 2010.
- Sýkora, P., *Technologický předpis betonářských prací pro dálniční most přes Opárenské údolí*. METROSTAV, 2008.
- Šťastník, S., *Zpráva o experimentálním sledování teplotního průběhu hydratačního procesu ve zkušebním betonovém monolitickém fragmentu mostu v Lovosicích*. METROSTAV, 2008.