

# OPTIMALIZACE CHLAZENÍ OBLOUKU OPARENSKÉHO MOSTU

## COOLING OPTIMIZATION IN OPARNO BRIDGE'S ARCH

Vít Šmilauer, Jan L. Vítek, Bořek Patzák, Zdeněk Bittnar

Článek ilustruje využití víceúrovňového modelu hydratace betonu pro optimalizaci chlazení betonového oblouku mostu přes Oparenské údolí. Tento simulační nástroj propojuje materiálový model na úrovni cementové pasty s klasickým MKP modelem konstrukce. Výsledkem je predikce nestacionárního teplotního pole s mechanickou analýzou dotvarování. ■ A multiscale model for hydrating concrete served for finding optimal position of cooling pipes in Oparno Bridge's arch. The tool interconnects a material model at the cement paste level with a standard FEM model on the structural scale. The model predicts nonstationary temperature field accompanied with mechanical creep analysis.

Most přes Oparenské údolí na trase dálnice D8 patří ke skvostům obloukových mostů v Česku. O tom svědčí jak zájem laické veřejnosti, tak množství článků v odborné literatuře [1 až 3]. Kromě architektonické a estetické stránky byla pozornost věnována i trvanlivosti konstrukce mostu s předpokládánými nízkými náklady na budoucí údržbu.

Kvalitní provedení betonové konstrukce vyžaduje nejen kvalitní materiál, řádné uložení, ale i odpovídající ošetřování mladého betonu. U masivních betonových konstrukcí se obecně setkáváme s přidruženým problémem v podobě nárůstu teplot uvnitř prvku v důsledku hydratace, jež může dodávat tepelný výkon až 5 kW a ohřát beton i nad 90 °C. Tento problém by mohl vzniknout u segmentů železobetonového mostního oblouku přes Oparenské údolí, kde proto bylo použito vnitřní chlazení pomocí vody. Přitom bylo potřeba uvažovat postupné ochlazování prvku zevnitř i vně a vznik přidružených gradientů teplotního pole.

Během ochlazování masivních betonových částí mohou vznikat díky mechanickým omezením a teplotním gradientům tahová napětí, která mohou být příčinou vzniku trhlin s následným snížením životnosti konstrukce. Další negativní vliv teploty může nastat při překročení 70 °C, kdy se začíná formovat metastabilní monosulfát s pozdější možnou rekrystalizací na expandující ettringit. Tato reakce je známá jako zpožděná formace ettringitu (DEF) s často destruktivními účinky [4].

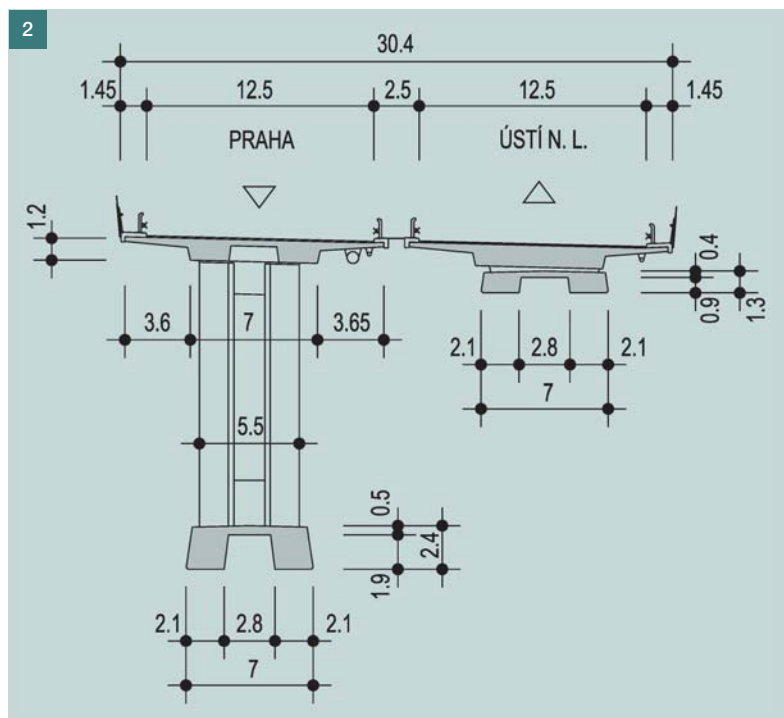
Ve fázi návrhu bylo nutné tyto faktory vzít do úvahy nejen čistě empiricky, ale ověřit navrhované chlazení i početně včetně jeho optimalizace.

### OBLOUK MOSTU

Železobetonový dvoutrámový oblouk mostu s rozpětím 135 m tvoří hlavní nosný prvek mostu. Oblouk se betonoval po dvaceti osmi lamelách (segmentech) délky až 5,6 m, symetricky od obou patek (obr. 1). Vznikající obloukové konzoly byly postupně vyvěšovány a uprostřed oblouku pak zmonolitněny. Oblouk má šířku 7 m a jeho tloušťka 2,4 m u patek se zmenšuje na 1,3 m ve vrcholu, jak ukazuje příčný řez (obr. 2).

Výstavba oblouku přinesla dva zásadní problémy. Prvním z nich bylo řádné hutnění čerstvé betonové směsi, která byla ukládána do částečně uzavřeného prostoru bednění. Po několika neúspěšných pokusech na velkorozměrových modelech se podařilo doladit konzistenci směsi, hutnění a způsob bednění.

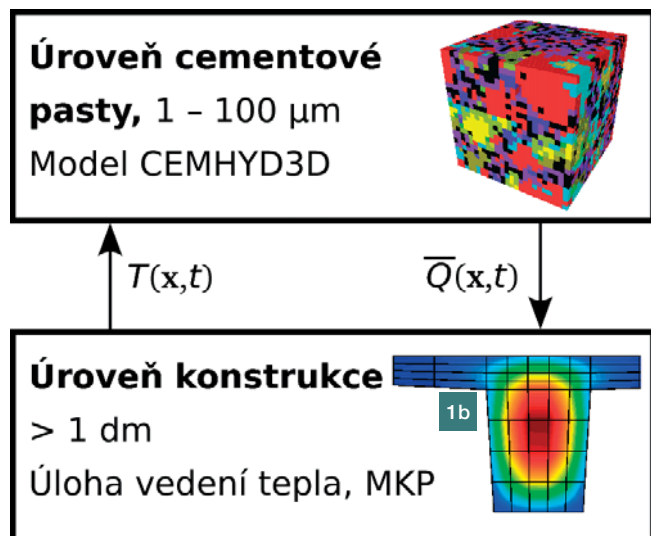
Druhý problém souvisel s vývinem teplot uvnitř oblouku při



jeho tvrdnutí. Při zpracování realizační dokumentace stavby byla zvětšena štíhlost oblouku a zároveň zvýšena třída betonu z C30/37 na C45/55. Při zkouškách na modelech v měřítku 1 : 1 bylo zjištěno překročení teploty 75 °C uvnitř žebra oblouku. Následná optimalizace složení betonové směsi či předchlazení složek betonu se ukázaly jako nedostatečné. Proto bylo rozhodnuto chladit betonovou směs pomocí vody v trubkách uvnitř jednotlivých segmentů oblouku.

Na základě zjednodušených výpočtů bylo stanoveno množství chladících trubek, jejich pozice v segmentu a množství potřebné vody k chlazení. Voda byla míchána s ledem, který byl dovážěn z nedalekých mrazíren. Pilotní experimenty s vodním chlazením prokázaly snížení maximální teploty uvnitř segmentu o 10 až 12 °C na 65 °C, což se ukázalo jako dostatečné pro betonáž během letních měsíců.

Pro reálnou stavbu bylo ještě potřeba zpřesnit pozici chladících trubek uvnitř segmentů. Toho bylo dosaženo použitím víceúrovňové simulace.



Obr. 1 Postup výstavby druhého mostního oblouku letnou betonáží (Foto Milan Špička) ■ Fig. 1 Construction of the second bridge arch using the free cantilever method

Obr. 2 Charakteristické příčné řezy oblouku ■ Fig. 2 Characteristic cross-sections of the arch

Obr. 3 Propojení dvou úrovní pomocí stavových proměnných ■ Fig. 3 Coupling of two levels via state variables

### VÍCEÚROVŇOVÉ MODELOVÁNÍ

Víceúrovňové modelování představuje efektivní nástroj pro studium kompozitních materiálů, jakým je například beton. Hydratační teplo vzniká na atomární úrovni zejména rozpouštěním slínkových minerálů v kapilární vodě. Pro zachycení kinetiky těchto chemických reakcí je možné použít empirické funkce, nebo přesnější hydratační modely zohledňující mineralogii cementu, vodní součinitel, jemnost mletí atd. CEMHYD3D [5] je jedním z nejvíce propracovaných modelů hydratace, který integruje kinetiku reakcí s topologickými informacemi mikrostruktury. Rozpouštění, nukleace a transport chemických látek je uvažován při rozlišení 1 µm pomocí modelu založeném na celulárním automatu [5, 6]. Tím je dosaženo vynikající výpočetní rychlosti na velkých mikrostrukturách cementových past i při velikostech 50 x 50 x 50 µm, které byly použity dále v simulacích.

Rychlost chemických reakcí je obecně závislá na teplotě okolí. Tento obecný vztah popisuje Arrheniova rovnice, která zavádí ekvivalentní čas  $\tau_e(T_0)$ :

$$\tau_e(T_0) = \tau(T) \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (1)$$

kde  $T$  je libovolná bodová teplota na konstrukci,  $T_0$  je referenční teplota (v Kelvinech),  $R$  je molární plynová konstanta  $8,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$  a  $E_a$  je aktivační energie, která se pohybuje okolo hodnoty  $40 \text{ kJ/mol}$  pro portlandské cementy. Zvýšení teploty o  $10 \text{ °C}$  znamená v tomto případě přibližně dvojnásobné zrychlení reakcí a dvojnásobné zvýšení hydratačního výkonu. Z tohoto důvodu musí být propojena úroveň cementové pasty s materiálovým (integračním, Gaussovým)

bodem konstrukce (obr. 3). Pro zrychlení výpočtu není každému integračnímu bodu na každém konečném prvku přiřazena individuální mikrostruktura, ale prvky jsou vhodně sdruženy do oblastí s očekávanou podobnou teplotou a teplota z těchto podoblastí se průměruje před vstupem do hydratačního modelu. Tím se dosáhne vysoké výpočetní rychlosti za cenu dostačující přesnosti.

Hydratační model CEMHYD3D je zaintegrovan do volně šiřitelného programu OOFEM [7], vyvíjeného na Fakultě stavební ČVUT v Praze, který umožňuje řešit metodou konečných prvků řadu úloh v oblasti mechaniky, transportních problémů či modelování proudění kapalin. Tím je vytvořen robustní nástroj pro řešení řady inženýrských úloh, viz ukázky v sekci Galerie [7]. Na úrovni konstrukce se řeší problém nestacionárního vedení tepla. Samotný model vychází z následující nelineární diferenciální rovnice vedení tepla:

$$\lambda(\mathbf{x}, t) \Delta T(\mathbf{x}, t) + \bar{Q}(\mathbf{x}, t) = c_v(\mathbf{x}, t) \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

kde  $\lambda(\mathbf{x}, t)$  je časově klesající tepelná vodivost betonu,  $\bar{Q}(\mathbf{x}, t)$  je výkon zdroje tepla z modelu CEMHYD3D a  $c_v(\mathbf{x}, t)$  časově klesající tepelná kapacita betonu. Rovnice (2) je v čase diskretizována pomocí schématu Crank-Nicolson, v prostoru pak metodou konečných prvků. Nelineární rovnice je řešena Newtonovou metodou, kde nerovnováha vzniklá lineární zací řídicí rovnice je odstraněna iteračním algoritmem [7]. Výsledkem řešení je časově závislé teplotní pole v uzlech konečných prvků, které splňuje počáteční i okrajové podmínky přidružené k rovnici (2) [8].

Výsledné teploty při řešení nestacionární úlohy slouží jako vstup do mechanické části výpočtu. Pro jednoduchost lze uvažovat případ rovinné deformace, kdy hydratující oblouk je pokládán za nekonečně dlouhý. Teplotní deformace a jejich gradienty pak způsobují napětí v tvrdnoucím betonu. Pro zachycení jevů smrštění a dotvarování je použit model B3 [9], který je založen na přírůstkové verzi konstitutivního vztahu s použitím exponenciálního algoritmu:

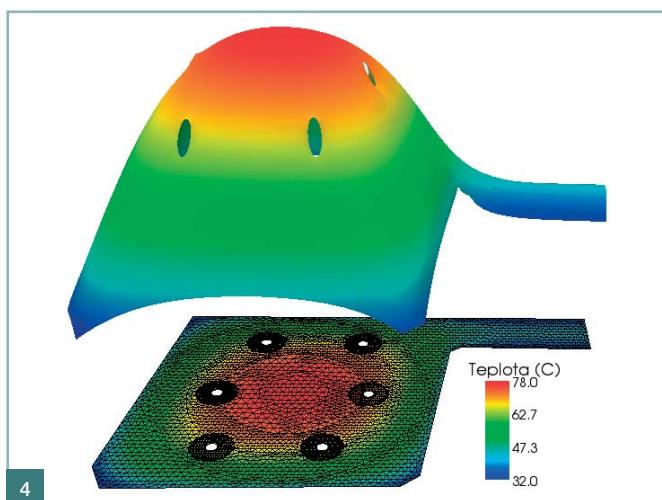
$$\Delta \sigma = \mathbf{D}'' : (\Delta \epsilon - \Delta \epsilon'' - \Delta \epsilon_T), \quad (3)$$

kde  $\Delta \sigma$  je přírůstek napětí v integračním bodě,  $\mathbf{D}''$  je tečný tenzor tuhosti obsahující funkci dotvarování,  $\Delta \epsilon$  označuje přírůstek celkové deformace,  $\Delta \epsilon''$  obsahuje neelastickou část deformace včetně historie zatížení a smrštění a  $\Delta \epsilon_T$  vyjadřuje deformace od vlivu teploty z úlohy transportu tepla.

### SIMULACE A OPTIMALIZACE CHLAZENÍ

Výsledný beton oblouku byl vyroben z cementu CEM I Prahaovice 42,5 R s dávkováním  $431 \text{ kg/m}^3$  betonu. Přepočít oxidů na mineralogické složení dle Taylora [10] dává tyto vstupní hodnoty pro program CEMHYD3D:  $\text{C}_3\text{S}$  56,33 %,  $\text{C}_2\text{S}$  18,8 %,  $\text{C}_3\text{A}$  7,83 % a  $\text{C}_4\text{AF}$  10,92 %. Potenciální hydratační teplo je  $509,2 \text{ J/g}$  cementu a Blainův měrný povrch  $360 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Pilotní simulace ukázaly příliš mnoho uvolňovaného tepla během hydratace, proto bylo uvažováno dle normy ČSN EN 197-1, že podíl portlandského slínku činí 95 % hmotnosti cementu, což dává  $409,5 \text{ kg}$  hydratujícího cementu na  $1 \text{ m}^3$  betonu. Součinitel  $w/c$  vychází 0,392 se započtením vody ze superplastifikátoru a s uvážením přidané mikrosiliky.

Pro výpočet pole teplot a mechanické části byla uvažována symetrická levá část lamely B4, která je situována v dolní

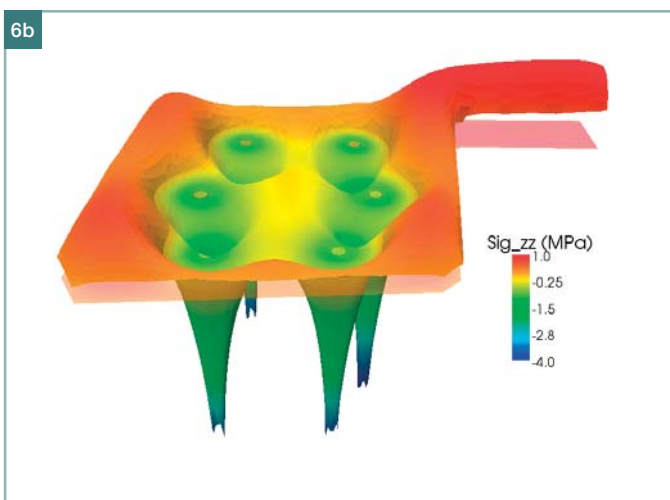
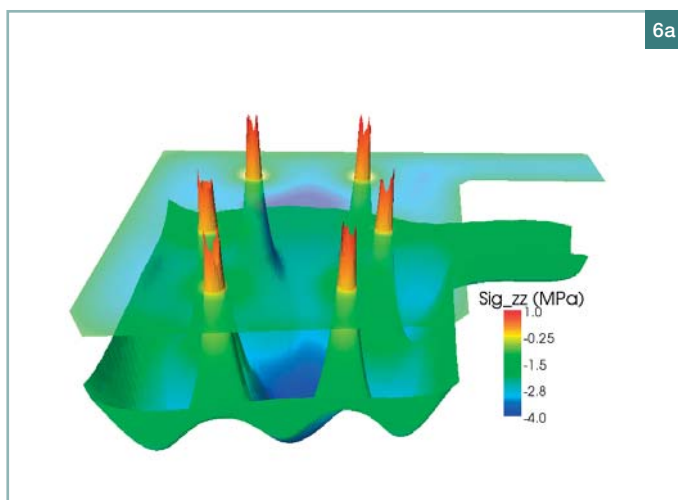
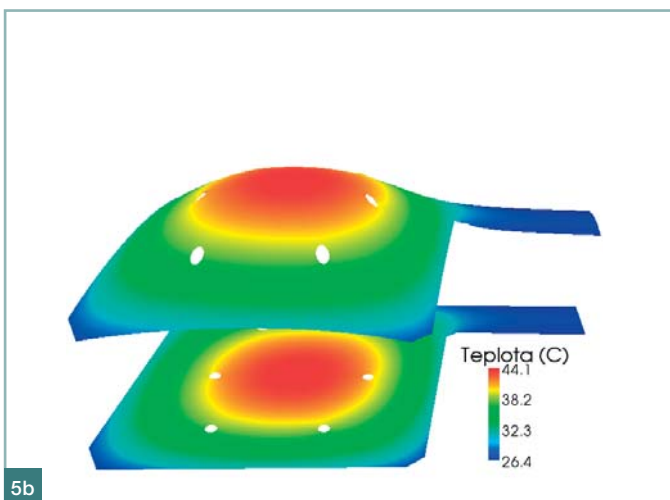
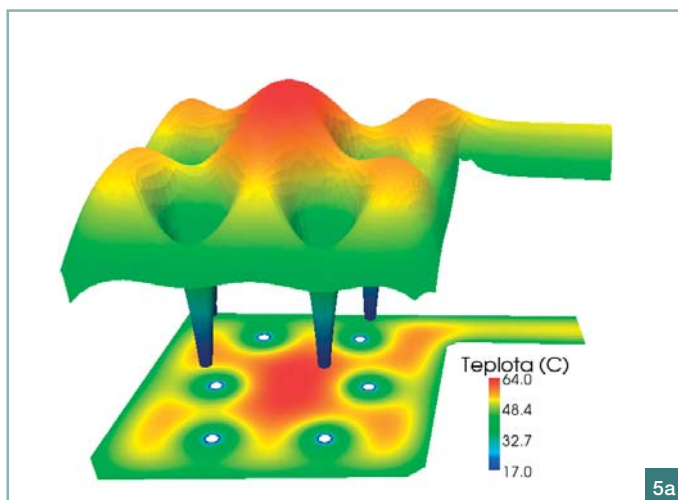


Obr. 4 Bez vnitřního chlazení by dosáhla maximální teplota 78 °C v lamelě B4 po 43 h ■ Fig. 4 The maximum temperature 78 °C would be achieved in the segment B4 at 43 h, if no internal cooling were used

Obr. 5 Pole teplot ve 22 a 100 h tvrdnutí betonu ■ Fig. 5 Temperature field at 22 and 100 h

Obr. 6 Pole napětí z roviny řezu ve 22 a 100 h tvrdnutí betonu ■ Fig. 6 Out-of-plane stress field at 22 and 100 h

Obr. 7 Průběh teplot v jádře průřezu ■ Fig. 7 Temperature evolution in the core of a cross-section



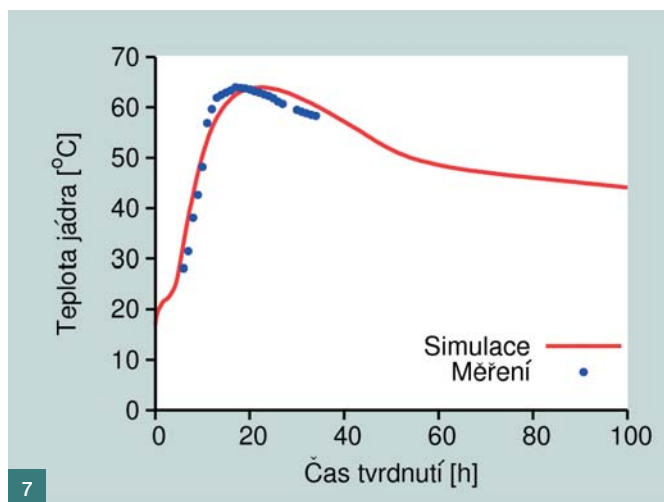
části oblouku s výškou žebra 2,27 m. Betonáž lamely probíhala během dne 7. srpna 2009 a bylo v ní uloženo 59 m<sup>3</sup> betonu. Počáteční teplota betonu po zamíchání v betonárně byla v simulaci uvažována hodnotou 17 °C, teplota okolního vzduchu okolo bednění lamely 25 °C a součinitel přestupu tepla mezi betonem a vzduchem hodnotou 10 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>. Poslední dva parametry mají zanedbatelný vliv na dosažení maximální teploty uvnitř lamely a ovlivňují chladnutí až po více než 50 h.

Díky symetrii oblouku byla modelována pouze jeho polovina, která byla dále rozdělena na devět podoblastí, kde se očekávala podobná hodnota teploty. Každé podoblas-

ti byl přiřazen jeden hydratační model CEMHYD3D. Úloha měla 4 828 uzlů a 9 368 trojúhelníkových prvků s lineárními aproximacemi teplot. První simulace byly provedeny pro případ s vypnutým chlazením, které ukázaly vzestup teploty na hodnotu až 78 °C (obr. 4). Tím byla prokázána dobrá shoda s pilotními měřeními s hodnotami přes 75 °C a oprávněnost požadavku na chlazení.

Původně navržený počet šesti chladících trubek v polovině příčného řezu oblouku byl během optimalizace zachován, byla však změněna jejich pozice. Cílem bylo vytvořit teplejší jádro průřezu, aby případné chladnutí vytvářelo menší tahová napětí uvnitř průřezu. Z tohoto důvodu byly zvětšeny oso-





7

vé vzdálenosti chladících trubek a bylo zkoumáno, jakým způsobem zareaguje průřez na vypnutí chlazení. Po několika iteracích se povedlo najít přijatelné řešení. Maximální teploty 64 °C bylo dosaženo po 22 h tvrdnutí betonu (obr. 5). Chlazení bylo vypnuto ve 42 h, kdy došlo k vymizení teplotních gradientů v okolí chladících trubek. Teplota chladící vody se uvažovala konstantní hodnotou 17 °C.

Výpočet sdružené úlohy s modelem dotvarování trval 2,1 hodin na jednom 64-bit CPU a obsahoval 1000 časových kroků s konstantním integračním krokem 10 min. Vypočtené napětí z roviny řezu ukazuje tlačnou oblast jádra vlivem oteplování průřezu (obr. 6). Pouze nepatrné části v okolí chladících trubek jsou tažené. Po vypnutí chlazení a ochlazení průřezu vznikají malá tahová napětí na okraji průřezu (obr. 6). V důsledku dotvarování betonu tato napětí klesají a jejich hodnoty se po průřezu vyrovnávají. Simulace napětí ukazují pesimistický scénář za předpokladu rovinné deformace, kdy je zamezeno posunům z roviny řezu. V reálné konstrukci dojde ke snížení normálových napětí z roviny průřezu.

Z krátkodobého měření teplot uprostřed průřezu vychází dobrá shoda simulace s naměřenými daty (obr. 7). Původní simulace, která byla použita pro nalezení optimálních pozic trubek, se lišila kinetikou hydratace, kdy maximální teplota byla dosažena namísto ve 22 h až ve 34 h s maximální teplotou uprostřed průřezu 65 °C. Důvodem těchto rozdílů byla nedostatečně známá receptura používaného betonu a nižší kinetika hydratace. Závěry z předešlé simulace pro pozici trubek se však ukázaly plně oprávněné. Nižší maximální teplota oblouku i menší gradienty teplot jednoznačně přispívají ke zvýšení trvanlivosti konstrukce celého mostního oblouku.

## ZÁVĚR

Uvedený víceúrovňový nástroj je dostatečně univerzální pro řešení sdružených problémů hydratační teplo – mechanika. V případě oblouku mostu přes Oparenské údolí bohužel řešení důsledky volby čistého portlandského cementu jako pojiiva. Použití strusky či popílku do betonu oblouku by zcela jistě postačovalo k tomu, aby nemuselo být vnitřní chlazení vůbec používáno. To dokazuje například nově zbudovaný most St. Antony Falls Bridge v Minneapolis, postavený po kolapsu ocelového mostu v roce 2007, kde beton komorového nosníku s 28denní průměrnou pevností 55 MPa obsahuje 25 % popílku, 4 % siliky a 71 % portlandského cementu při dávkování pojiv 415 kg/m<sup>3</sup>. Tento postup by byl logičtější při na-

## Literatura

- [1] Kalný M., Kvasnička V., Němec P., Vítek J. L., Tvrz A., Brož R., Špička M.: Obloukový most přes Oparenské údolí, Beton TKS 4/2010, p. 8–15
- [2] Kalný M., Kvasnička V., Němec P., Vítek J. L., Tvrz A., Brož R., Špička M.: Obloukový most přes Oparenské údolí a komplikace před jeho dokončením, Časopis Stavebnictví 09/2010
- [3] Stavební unikát Českého středohoří, Stavitel 6/2010, příloha II–III, www.stavitel.cz
- [4] Barbarulo R., Peycelon H., Prenè S., Marchand J.: Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle, Cement and Concrete Research 35, 1, 2005, p. 125–131
- [5] Bentz D. P.: CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modeling Package, Version 3.0., technical report, NIST Building and Fire Research Laboratory, 2005
- [6] Bittnar Z., Šmilauer V.: Hydratace cementové pasty a model CEMHYD3D. Beton TKS 6/2003, p. 32–35
- [7] Patzák B.: OOFEM, www.oofem.org, www.oofem.org/wiki, 2003–2011
- [8] Šmilauer V.: Multiscale hierarchical modeling of hydrating concrete, Saxe-Coburg Publications, 2011, v tisku
- [9] Bažant Z., Baweja S.: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3, in Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects, ACI SP-194, A. Al-Manaseer Ed., Am. Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000, p. 1–83
- [10] Taylor, H. F. W.: Cement Chemistry, Academic Press, New York, 1990

prosto srovnatelných parametrech výsledných betonů. V případě mostu u Oparna však již nebylo možné měnit recepturu betonové směsi z důvodů zdlouhavého provádění průkazních zkoušek a následných schvalovacích procesů.

Příspěvek vznikl za podpory grantů GAP 105/10/2400 a MPO FR-T11/612.

Doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D.

e-mail: vit.smilauer@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 483



Prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc.

Metrostav, a. s.

e-mail: vitek@metrostav.cz

tel.: 266 709 317

Prof. Dr. Ing. Bořek Patzák

e-mail: borek.patzak@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 375



Prof. Ing. Zdeněk Bittnar, DrSc.

e-mail: bittnar@fsv.cvut.cz

tel.: 224 353 869

všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze

Katedra stavební mechaniky

Thákurova 7, 166 29, Praha 6

Text článku byl posouzen odborným lektorem.