

NÁVRH A REALIZACE VODNÍHO CHLAZENÍ NA ŠTVANICKÉ LÁVCE

Pavel Reiterman, Vendula Davidová, Tomáš David, Vít Šmilauer

Článek popisuje jednotlivé etapy vodního chlazení rozpletu Štvanické lávky – od návrhu, kalibrace modelu, mock-up experimentu až po konečnou realizaci.

DESIGN AND APPLICATION OF WATER COOLING OF FRESH CONCRETE ON THE ŠTVANICE FOOTBRIDGE

The article describes individual stages required to provide cooling of fresh concrete at the Štvanice Footbridge – from design, numerical modelling to model calibration, a mock-up experiment to the final application.

Při hydrataci cementu dochází k exotermickým reakcím, které způsobují ohřívání betonu [1]. Masivní betonové konstrukce a prvky jsou charakteristické vznikem teplotních rozdílů s možným vznikem trhlin, běžně se jedná o prvky s tloušťkou větší než 1 m [2]. Při vysokých dávkách cementu či zrychleném vývinu hydratačního tepla může být masivním prvkem deklarován i menší prvek [3]. Tento případ nastal u rozpletu Štvanické lávky z betonu C110/130 s vysokou dávkou bílého cementu CEM I 52,5 N (750 kg/m³), kde tloušťka monolitické desky byla cca 750 mm.

Adiabatický nárůst teploty betonu představuje limitní stav, kdy nedochází k disipaci tepla do okolí a veškeré uvolněné teplo způsobuje ohřívání betonu o teplotu:

$$\Delta T(t) = Q(t) \cdot m_c / c_v, \quad (1)$$

kde Q je uvolněné teplo v čase t pro 1 kg cementu [J/kg], m_c hmotnost cementu v 1 m³ betonu [kg/m³] a c_v objemová tepelná kapacita betonu [J/m³/K]. Celkové uvolněné teplo $Q(t)$ se běžně získá integrací tepelného toku z izotermálního měření, kde je nutné provést škálování dle aktuální teploty a aktivační energie [1].

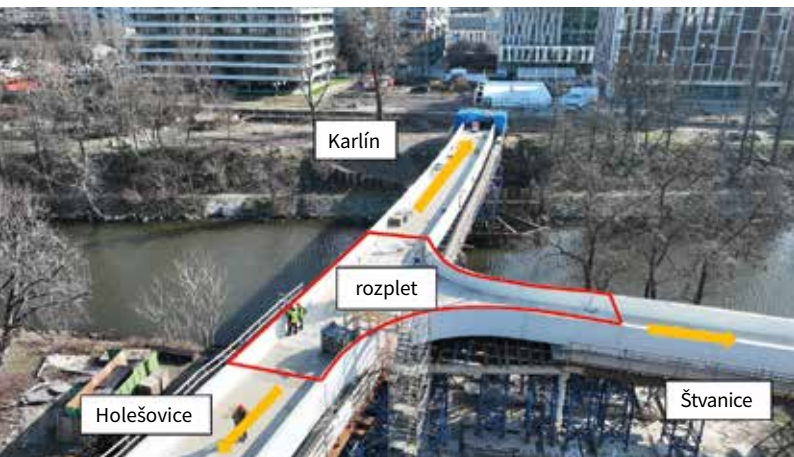
Prvotní experimenty ukázaly, že beton rozpletu vytváří maximální výkon 12 kW/m³ v čase 7 h, který přibližně odpovídá uvolněnému teplu $Q(7 \text{ h}) = 12 \cdot 7 \cdot 3,6 / 2 = 151,2 \text{ MJ/m}^3$ s nárůstem adiabatické teploty o $151,2 / (2,5 \cdot 1) = 60,5 \text{ }^\circ\text{C}$, je-li uvažovaná hodnota objemové hmotnosti betonu UHPC 2,5 t/m³. Hydratační teplo a nárůst teploty pokračuje dále

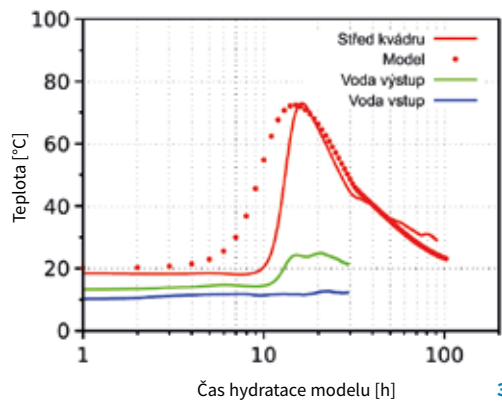
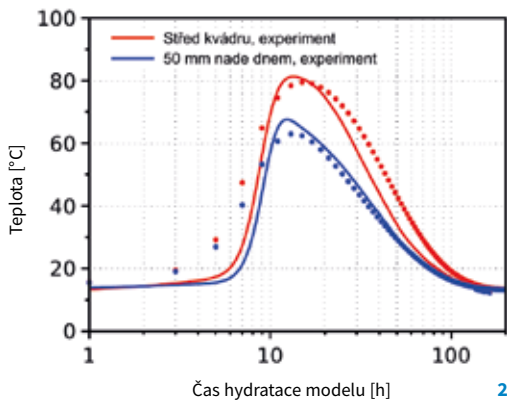
a v letních podmínkách by snadno došlo k dosažení teploty 100 °C. Takto vysoké teploty jsou nepřijatelné z pohledu varu vody, teplotních gradientů, objemových změn betonu, vzniku trhlin, rizika zpožděné formace ettringitu či měknutí plastových prvků uvnitř betonu. Vzhledem k dané receptuře betonu nebylo možné přistoupit na změnu dávkování či změnu typu cementu, proto jediným řešením zůstalo snížení teploty rozpletu pomocí vodního chlazení. Vodu bylo možné odebírat přímo z Vltavy, čímž odpadla nutnost aktivního chlazení či dovážení ledu, které bylo použito na jiných stavbách s vodním chlazením [4].

Vodní chlazení betonu bylo poprvé ve velkém měřítku použito při výstavbě Hooverovy přehradě v letech 1931 až 1936, při jejíž výstavbě činil objem betonu 2,48 milionů m³. Celkem bylo použito 937 km ocelových trubek Ø 25,4 × 1,5 mm, které byly umístovány v charakteristickém rastru 1,8 × 1,5 m. Chladicí smyčky měly délku do 160 m, k chlazení se používal stlačený amoniak s výslednou teplotou chladicí vody 4 až 8 °C. Maximální chladicí výkon byl 2,9 MW a maximální dosažená teplota betonu byla 38 °C. Cena chlazení vycházela na 6 % ceny betonu, jednalo se o velmi efektivní způsob [5]. V současnosti se pro vodní chlazení nabízejí nové možnosti, zejména snadnější používání plastových chladicích trubek, řízení teploty chladicí vody, mobilní chladicí zařízení, automatický záznam teplot či počítačové termo-mechanické simulace.

Rozplet Štvanické lávky

Konstrukce lávky je navržena z prefabrikovaných segmentů, které jsou dodatečně předepnuty lany v parapetních nosnících. Napojením rampy z ostrova Štvanice vznikl rozplet, který bylo nutné zhotovit z monolitického betonu s podobným složením jako ostatní prefabrikované segmenty (obr. 1). Rozplet tvoří monolitická deska tloušťky cca 750 mm, která byla při betonáži spojena s prefabrikovanými parapety po obou stranách. Směs UHPC C110/C130 - XF4, XD3, XC4 byla navržena z bílého cementu CEM I 52,5 N Rohožník v množství 750 kg/m³, s vodním součinitelem 0,24 a kamenivem frakce do 5 mm. Maximální podélný sklon desky je 8,33 %. Volná hladina betonu by při tomto sklonu způsobovala problémy s udržením tvaru, proto bylo zvoleno i zákloně horní bednění. Betonáž probíhala otvory v rastru cca 2 × 2 m, které se postupně uzavíraly. V rozpletu jsou osazeny kabelové kanálky pro radiální





předpětí a plastové chráničky pro elektroinstalace. Rozplet má plochu cca 240 m², objem betonu činil 120 m³.

Betonáž rozpletu měla proběhnout v letních měsících roku 2022, a panovala proto oprávněná obava z vyšší teploty čerstvého betonu i okolního prostředí. Předběžné výpočty ukázaly, že pro požadovaný typ betonu s rychlým a velkým vývinem hydratačního tepla je třeba uložit chladicí trubky ve třech vrstvách v osových vzdálenostech okolo 0,4 m.

Termo-mechanický model

Termo-mechanický výpočet probíhal v otevřeném softwaru OOFEM pomocí metody konečných prvků [6]. Model vedení tepla uvažuje bilanční rovnici tepla ve tvaru:

$$-\nabla^T q(x) + Q(x, t) = \rho(x)c_V(x) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

kde $q(x)$ je hustota tepelného toku [W/m²], Q tepelný výkon hydratace [W/m³], ρ objemová hmotnost betonu [kg/m³], c_V měrná tepelná kapacita [J/kg/K] a T teplota [K]. Člen $Q(x, t)$ je aproximován pomocí čtyřparametrického modelu [6]:

$$Q(x, t) = Q_{pot} m_c \left[B_1 \left(\frac{B_2}{\alpha_\infty} + \alpha \right) (\alpha_\infty - \alpha) \exp\left(-\eta \frac{\alpha}{\alpha_\infty}\right) \right] \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)\right], \quad (3)$$

kde Q_{pot} je potenciální teplo hydratace [J/kg], α stupeň hydratace [-], E_a aktivací energie [J/mol], T_0 referenční teplota [K] a $B_1, B_2, \alpha_\infty, \eta$ jsou parametry. Mechanický model betonu se uvažuje jako viskoelastický s fixními trhlinami (ConcreteFcmViscoelastic) a s časovým nárůstem tahové pevnosti betonu. Konstitutivní vztah je řešen v inkrementální formě jako:

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \overline{D_{ve}} (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{cr} - \Delta \varepsilon'' - \Delta \varepsilon_{sh} - \Delta \varepsilon_T), \quad (4)$$

kde σ_{i+1} je aktualizované napětí [MPa], σ_i předešlé napětí [MPa], D_{ve} tečná tuhost viskoelastického materiálu [MPa], $\Delta \varepsilon$ přírůstek celkové deformace [-], $\Delta \varepsilon_{cr}$ přírůstek rozetřené deformace od trhlin [-], $\Delta \varepsilon''$ přírůstek z historie viskoelastického materiálu [-], $\Delta \varepsilon_{sh}$ přírůstek autogenního smrštění [-] a $\Delta \varepsilon_T$ přírůstek deformace od teploty [-]. Poslední člen představuje sdružení s úlohou vedení tepla. Smrštění od vysychání je zanedbáno. Pro výpočet dotvarování se po-

1 Pohled na monolitický rozplet lávky
2 Kalibrace modelu na kvádru 3 Teploty při mock-up testu 4 Mock-up test
1 A view of the in-situ joint where the footbridge branched (to Štvanice)
2 Calibration of the model on a trial block of concrete 3 Temperatures recorded during the mock-up test 4 The mock-up test

užívá materiál MPS, u něhož se funkce poddajnosti počítá pomocí modelu B3 s relaxací mikropředpětí [6].

Před vznikem trhlin se mechanický materiálový model chová jako lineárně viskoelastický. Při dosažení pevnosti materiálu se začnou tvořit trhliny, které se formují kolmo na hlavní tahové napětí. Při chladnutí se trhliny mohou zavírat. Správná disipace energie je zajištěna pomocí přístupu crack-band [6]. Mechanický model se aktivuje 1 h od počátku hydratace, kdy se předpokládají ještě nulová napětí v poddajném mladém betonu.

Kalibrace modelu

Pro kalibraci čtyřparametrického modelu hydratace byl vybetonován kvádr o rozměrech 1 200 × 1 200 × 810 mm, v němž maximální teplota dosáhla 81 °C. Některé parametry byly známy již z návrhu betonu, ostatní parametry byly nalezeny v nejlepší shodě s experimentem: $Q_{pot} = 410$ J/g, $m_c = 750$ kg/m³, $B_1 = 4e - 4$ s⁻¹, $B_2 = 0,001$, $\alpha_\infty = 0,57$, $\eta = 4$, $E_a = 48$ kJ/mol, $T_0 = 20$ °C. Výsledný průběh teplot je uveden v grafu na obr. 2 pro střed kvádrů a osový bod 50 mm nade dnem. Nesoulad v kinetice do 10 h je způsoben zejména použitím zpomalovače tuhnutí. Z modelu je možné určit maximální teplotu v adiabatických podmínkách, teploty 100 °C by bylo dosaženo již při počáteční teplotě betonu 23,8 °C.

Mock-up test

Před finální betonáží rozpletu proběhla zkouška vodního chlazení na dalším betonovém kvádru o rozměrech 2 400 × 1 200 × 810 mm. Zkouška proběhla v areálu betonárny společnosti Skanska Transbeton v Uhřetěvsi. Do zkušebního bloku byla rozmístěna výztuž a nainstalován rozvod chladicích hadic celkové délky 25 m umístěných v roztečích cca 0,4 m (obr. 4).

Betonový kvádr byl osazen na pevném podkladě a stěny bednění byly tvořeny systémovým bedněním s bednicím pláštěm z laminovaného dřeva tloušťky 24 mm. Beton byl připraven přímo v areálu betonárny. Vodní chlazení

s průtokem chladicí vody 4 l/min bylo spuštěno ihned po uložení betonu do formy.

Výsledné teploty v grafu na obr. 3 jsou vyjádřeny v čase hydratace modelu. Nulový čas hydratace modelu odpovídá stáří 28 h reálného betonu se zpomalovačem tuhnutí. Maximální teplota dosáhla 72,5 °C v 15 h, 40 mm pod horním povrchem byla podobná teplota 69 °C. Vodní chlazení bylo vypnuto 13 h po dosažení maxima teploty. Oproti předšlému případu bez chlazení došlo ke snížení maximální teploty o 8,5 °C. Z výsledků měření je dobře patrná účinnost vodního chlazení z rozdílu teplot vstupní a výstupní vody, který byl až 13 °C. To odpovídá maximálnímu chladicímu výkonu 144 W/m délky trubky a celkovému maximálnímu výkonu 3,6 kW v celém objemu kvádrů.

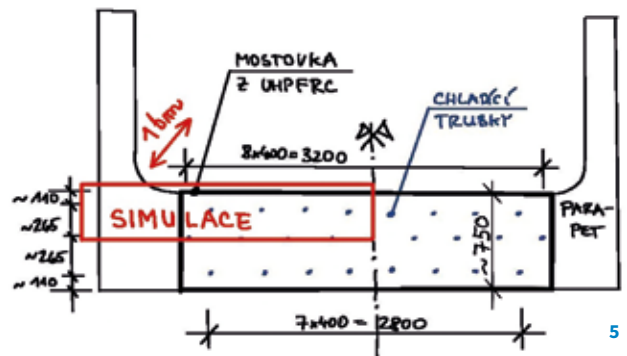
Betonáž rozpletu a porovnání s modelem

Charakteristický příčný řez pro nejužší místo rozpletu je uveden na obr. 5. Pro výpočetní model bylo zásadní postihnout oblast monolitické desky z UHPC a prefabrikovaný parapet, neboť se tyto dvě části chovají jinak z pohledu hydratačního tepla i okrajových podmínek. V termo-mechanickém modelu se díky symetrickým rovinám uvažovala 1/4 geometrie. Geometrie parapetu byla zjednodušená na výšku mostovky a na šířku 0,74 m, čímž se vyjádřila ekvivalentní elastická tuhost parapetu. Simulace dále uvažovala 1 m délky rozpletu pro zachycení trhlin, na přední a zadní stranu modelu byly přiřazeny okrajové kinematické podmínky zajišťující rovinnost průřezu s možností posunu ve směru nivelety.

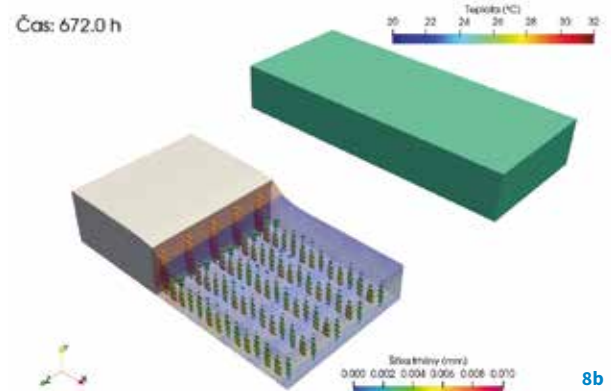
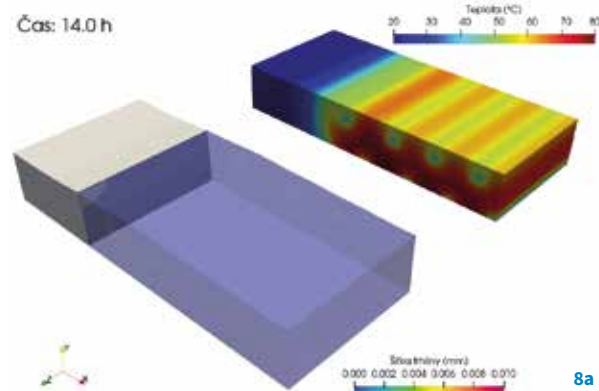
Chladicí trubky byly umístěny ve vodorovných vzdálenostech 0,4 m a ve třech vrstvách (obr. 6). Pro chlazení byly použity plastové hadice Ø 25 × 3 mm v celkové délce přes 1,2 km. Dvě vodní čerpadla ve Vltavě hnala vodu do šesti smyček, přičemž každá měla délku přibližně 200 m a celkový průtok vody 2,9 m³/h. Chlazení bylo zapnuto před vlastní betonáží z důvodu kontroly těsnosti a zajištění přetlaku vody v hadicích pro eliminaci borcení stěn.

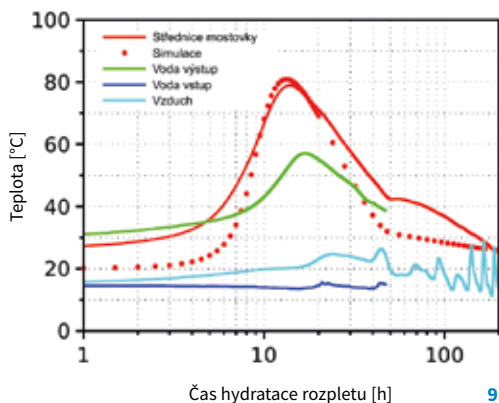
Vlastní betonáž rozpletu začala 19. října 2022 ve 23:10 a skončila 21. října v 10:00. Beton byl postupně ukládán pomocí bádíí skrze otvory připravené v bedněni (obr. 7).

Průběh teplot byl zaznamenáván na ústředny v intervalu 5 min. V grafu na obr. 9 jsou zobrazeny výsledky provedené simulace a měření při betonáži rozpletu, kde byla maximální teplota 81 °C změřena v čase 14 h. Při betonáži rozpletu bylo chlazení vypnuto v čase 50 h, tj. 36 h po do-



5 Charakteristický příčný řez a simulovaná část 6 Pohled do rozpletu před zaklopením 7 Betonáž rozpletu 8 Pole teplot, deformace a trhliny: a) v čase 14 h, b) v čase 672 h 9 Průběh teplot během chlazení rozpletu 10 Zvýrazněné trhliny na spojení rozpletu s parapetem
5 A typical cross-section of the footbridge and the part which was simulated (in red) 6 View of the junction (Štvanice branch) before being covered 7 Concreting of the junction 8 Temperature field, deformation and cracks at the age of: a) 14 h, b) 672 h 9 Temperatures recorded during the cooling of the concrete at the footbridge junction 10 Heightened (in red) cracks occurring at the connection between the in-situ deck and the prefabricated upright parapet





10

sažení maxima. Teplota po dosažení maxima klesala oproti modelu pomaleji. To je dáno zejména vyšší teplotou chladicí vody ke konci okruhu, než uvažoval model. Chladicí voda dosáhla maximální výstupní teploty 58 °C v mírném zpoždění oproti maximální teplotě jádra rozpletu.

Včasným vypnutím chlazení se zabrání přechlazení jádra a minimalizují se trhliny. Při uvažování jednoosé 28denní tahové pevnosti 8 MPa dochází ke vzniku trhlin do 0,01 mm (obr. 8). Při pevnosti nad 10 MPa trhliny v modelu nevznikají. Značné namáhání mostovky způsobuje kromě účinků teploty také autogenní smrštění UHPC, u něhož prefabrikovaný parapet brání volné kontrakci a které dosahuje $-800 \cdot 10^{-6}$ [-].

18. dubna 2023 byla provedena detailní vizuální prohlídka vzniklých trhlin. Paralelní trhliny se objevily na jednom místě ve styku s prefabrikovaným parapetem, který bránil ve volném autogenním smrštění (obr. 10). Zde je šířka trhlin do 0,1 mm, vzdálenost trhlin je 150 až 270 mm a jejich délka je do 0,6 m. V souladu s modelem nebyly trhliny na ostatních místech ve styku s parapetem pozorovány.

Literatura:

- [1] FAIRBAIRN, E. M. R., AZENHA, M. *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures* Springer, 2018.
- [2] *Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah: Kapitola 18: Betonové mosty a konstrukce*. Správa železnic, 2022.
- [3] *MassConcrete—Guide*. ACI Committee 207. ACI, 2022.
- [4] ŠMILAUER, V., VÍTEK, J. L., PATZÁK, B., BITTNAR, Z. Optimalizace chlazení oblouku Oparenského mostu. *Beton TKS*. 2011, roč. 11, č. 4, s. 62–65.
- [5] *Boulder canyon project: Part VII – Cement and concrete investigation: Cooling of concrete dams*. U.S. Bureau of Reclamation, 1949.
- [6] PATZÁK, B. a kol. OOFEM – *Object-oriented Finite Element Method software* [online]. 2023. Dostupné z: oofem.org

Závěr

Použití vodní chlazení se ukázalo jako spolehlivé a robustní řešení pro eliminaci vysokých teplot způsobených vlivem vývinu hydratačního tepla. Díky aplikaci vodního chlazení došlo ke snížení teploty v jádře z 96 °C na 81 °C. Účinnost celého systému dokládá teplota chladicí vody, která byla ohřáta z cca 13 °C na maximálně 58 °C.

Zkalibrované modely představují efektivní nástroj pro odhad teplotních polí a šířky trhlin po vychladnutí. Do budoucna lze předpokládat větší nasazení vodního chlazení, neboť požadavky na vyšší pevnosti či odolnosti často vedou ke zvýšenému dávkování cementu s nežádoucím nárůstem teplot.

Článek vznikl za částečné podpory projektu GAČR 21-03118S.



doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Experimentální centrum
pavel.reiterman@fsv.cvut.cz



Ing. Vendula Davidová
Skanska Transbeton, s.r.o.
vendula.davidova@skanska.cz



Ing. Tomáš David
Skanska Transbeton, s.r.o.
tomas.david@skanska.cz



prof. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., DSc.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra mechaniky
vit.smilauer@cvut.cz

inzerce

MODERNÍ BETONY A KOMPOZITY

11. a 12. října 2023, Hotel Ski, Nové Město na Moravě

Druhý ročník mezinárodní konference pořádaný Fakultou stavební ČVUT v Praze.

Konference je zaměřena na sdílení informací a znalostí z oblasti nových a nastupujících technologií, materiálů, měřících postupů a návrhových přístupů použitelných v oblasti stavebnictví a při formulaci nových typů kompozitních materiálů.

Více informací a přihláška www.silnicnispolecnost.cz



FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE

Kontakt:

d.pivodova@silnicnispolecnost.cz
+420 604 271 835

