

VZNIK TRHLIN V DŮSLEDKU VÝVOJE HYDRATAČNÍHO TEPLA V MASIVNÍCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH – SKLUZ VD ORLÍK

Simona Potůčková, Milan Holý, Jiří Kolísko

Článek se zabývá analýzou vývoje hydratačního tepla v masivních betonových konstrukcích a zaměřuje se na rizikové faktory vedoucí ke vzniku trhlin v raném stadiu po betonáži konstrukce. V rámci analýzy skluзу VD Orlík byla provedena parametrická studie zaměřená zejména na velikost trhlin na povrchu konstrukce a na vyhodnocení průměrného teplotního gradientu. Byly uvažovány různé varianty typu a délky zakrytí horního povrchu konstrukce a různé okrajové podmínky z hlediska teploty okolí během jednotlivých ročních období. Parametrická studie byla provedena pomocí nelineárních numerických výpočtů v softwaru Atena.

FORMATION OF CRACKS DUE TO THE DEVELOPMENT OF HYDRATION HEAT IN SOLID CONCRETE STRUCTURES

The article deals with the analysis of the development of hydration heat in massive concrete structures and focuses on the risk factors leading to the formation of cracks at an early stage after concreting the structure. A parametric study was carried out, which was focused on the size of cracks on the surface of the structure and on the evaluation of the average temperature gradient. Different variations of the type and length of the covering of the top surface and different boundary conditions were considered. The parametric study was carried out using non-linear numerical software Atena.

Hydratační teplo v masivních konstrukcích

Konstrukce je za masivní považována dle platných norem a předpisů následovně:

- norma ČSN 73 1208 [1] zabývající se navrhováním vodohospodářských objektů uvádí jako masivní konstrukci o tloušťce větší než 2 m,
- norma ČSN EN 13670 [2] považuje za masivní konstrukce s tloušťkou větší než 1 m,
- ŘSD TKP 18 [3] definuje jako masivní konstrukci takovou, kdy je její tloušťka větší než 0,6 m, a dále také uvádí, že maximální rozdíl teplot uvnitř konstrukce a na povrchu nesmí přesáhnout 40 °C,
- SŽDC TKP 17 [4] pro masivní konstrukce uvádí maximální teplotu v konstrukci 70 °C, přičemž maximální gradient nárůstu teploty nesmí překročit 15 °C/h a pokles teplot při chladnutí by neměl být větší než 10 °C/h.

V praxi se z hlediska vývoje hydratačního tepla ukazuje jako potřebné se touto problematikou zabývat právě již u konstrukcí tloušťky 0,6 m. Během hydratace cementu se uvolňuje velké množství hydratačního tepla, které může vést ke vzniku vysokých teplot uvnitř konstrukce, přičemž u masivních konstrukcí nedochází k rychlému uvolňování tepla do okolí jako u běžných konstrukcí s menší tloušťkou. To způsobuje nerovnoměrné namáhání průřezu, resp. vznik tlakových napětí v jádře průřezu vlivem rozpínání betonu a naopak vznik tahových napětí na povrchu konstrukce. U takto namáhaného průřezu může dojít k překročení okamžité tahové pevnosti, a tím i ke vzniku trhlin. Namáhání konstrukce během hydratace je ovlivněno také působením klimatických jevů, tj. průběhem venkovních teplot, osluněním povrchu, větrem atd.

Nerovnoměrnou teplotu v průřezu lze definovat např. průměrným teplotním gradientem, který označuje rozdíl teplot dvou míst v konstrukci přepočtený na vzdálenost 1 m. Z následujícího vztahu pro výpočet tahové deformace obalového betonu a Hookova zákona plyne, že omezením maximálního průměrného teplotního gradientu je možno ovlivnit velikost tahového napětí na povrchu, a tím snížit počet povrchových trhlin:



$$\varepsilon(t) = \Delta T \cdot \alpha, \quad (1)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

Dalším rizikovým faktorem vývoje hydratačního tepla v masivních konstrukcích je vysoká teplota jádrového betonu, která může způsobit opožděnou tvorbu ettringitu v již zatvrdlém betonu, což vede k následnému vzniku trhlin na konstrukci.

Skluz VD Orlík

V rámci projektu s názvem VD Orlík – zabezpečení vodního díla před účinky velkých vod byla pro investora stavby, tj. Povodí Vltavy, na Kloknerově ústavu ČVUT v Praze provedena výpočetní analýza vývoje hydratačního tepla ve zkušebním bloku nově budovaného skluzu vodní nádrže Orlík (obr. 1).

Hlavním cílem bylo urychlení betonáže masivních bloků za dodržení předepsaných požadavků na konstrukci. V projektové dokumentaci byly stanoveny následující limitní hodnoty s cílem předejít výskytu trhlin větších než 0,2 mm na povrchu bloků ve stáří 28 dní:

- maximální teplota v konstrukci během hydratace $T = 65^\circ\text{C}$,
- maximální průměrný teplotní gradient $\Delta T = 25^\circ\text{C/m}$.

Během přípravy projektu byl společností Aquatis navržen a následně společností Metrostav v rámci vrstvy podkladního betonu vybetonován zkušební železobetonový blok (dále značeno ZB4), na kterém byly zkoušeny různé okrajové podmínky uložení v konstrukci, detail dilatační a pracovní spáry, technologie a způsob betonáže, ošetřování či finální úpravy povrchu skluzu. Na zmíněném zkušebním bloku betonovaném v listopadu 2022 byla provedena i numerická analýza a rozsáhlá měření, která dále slouží jako podklad pro sledování a omezení vzniku trhlin vlivem hydratačního tepla během tuhnutí betonu.

Aktuálně (listopad 2023) pokračují práce na výstavbě otevřené části koryta skluzu a průběžně probíhají další rektifikační měření teplot na vybraných blocích.

Zkušební blok

Konstrukce skluzu je navržena jako masivní železobetonová stavba dělená příčnými i podélnými dilatacemi na jednotlivé úseky. U ZB4 se konkrétně jednalo

o jednu příčnou dilataci na pravém boku a jednu podélnou dilataci ze strany spodního čela bloku. V případě horního čela bloku, které bylo v modelu uvažováno jako bedněné v době výstavby, byla po betonáži navazujícího bloku navržena opět podélná dilatační spára. Zkušební blok, betonovaný v jednom záběru a po ukončení experimentálního měření zabetonovaný do podkladního betonu spodní části skluzu, měl tvar úseku otevřené části skluzu (SO 03), imitoval svah v maximálním spádu 40 % a jehopůdorysné rozměry byly $7,5 \times 12$ m s proměnnou tloušťkou konstrukce 1,5 až 1,8 m. (obr. 2)

Výpočetní analýza zkušebního bloku

Výpočetní analýza byla prováděna jako parametrická studie, v níž byly měněny jednotlivé vstupní parametry a zkoumána citlivost na jejich změnu z hlediska výsledného vývoje trhlin na povrchu konstrukce ve stáří 28 dní.

Výpočetní modely betonových bloků byly vytvořeny v softwaru GiD 14.0.6, který slouží jako preprocessor a postprocessor programu Atena Studio x64, v němž byl následně proveden nelineární výpočet metodou konečných prvků.

Výpočet probíhal v čase 0 až 28 dní ve dvou fázích:

- 1 – teplotní analýza modulu Transport – simulace vývoje teploty během hydratace,
- 2 – analýza vývoje trhlin v modulu Static (vývoj teploty v konstrukci z kroku 1 je zde použit jako zatížení na model).

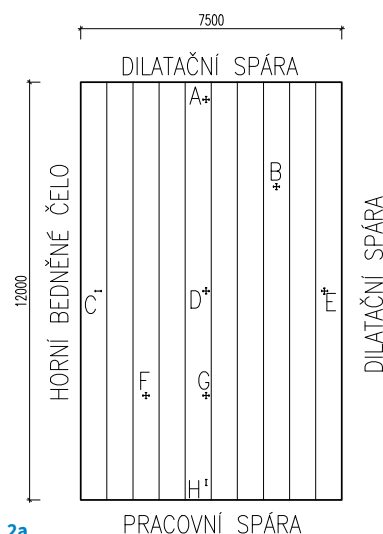
Transportní analýza

Pro transportní analýzu byl blok modelován včetně podkladního betonu, po jehož obvodu byla dále vyloučena tepelná výměna. Na obvodu zkušebního bloku byly dále definovány okrajové podmínky dle skutečnosti:

- horní bedněné čelo: bednění + expandovaný polystyren (EPS) tloušťky 20 mm (na obr. 3 označeno číslem 1),
- dilatační spára: vedlejší betonový blok + EPS tloušťky 20 mm (označeno 2 a 3),
- pracovní spára: beton + provázaná výztuž (označeno 4),
- horní plocha skluzu: zakrytí EPS tloušťky 20 mm (označeno 5).

POLOHA V PŮDORYSE

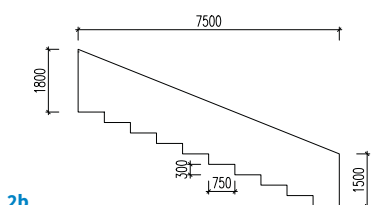
M 1:100



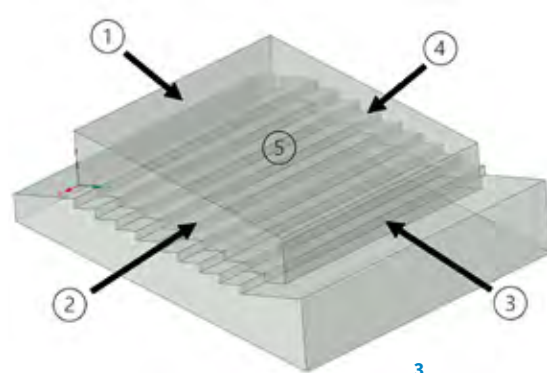
2a

ŘEZY BLOKEM

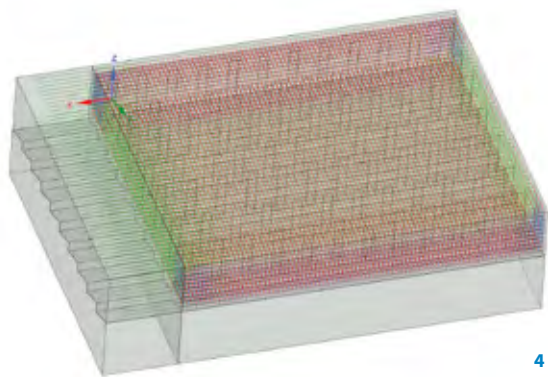
M 1:50



2b



1 Vizualizace otevřené části skluzu na vzdušné straně hráze (vlevo) 2 a) Půdorys, b) uložení a řez zkušebního bloku ZB4 3 Model v programu Atena a popis okrajových podmínek 1 Visualisation of the overflow chute on the air side of the dam (left) 2 a) Plan, b) layout and section of test block ZB4 3 Atena Software model and description of boundary conditions



4

Analýza vývoje trhlin

Pro analýzu přetvoření a vzniku trhlin v konstrukci byl namodelován betonový blok včetně vyztužení a okolních bloků kvůli provázání hlavní nosné vyztuže. Byla modelována hlavní nosná vyztuž i vyztuž konstrukční. (obr. 4)

Zakrývání konstrukce a vliv na průměrný teplotní gradient

Na výpočetním modelu byla též provedena analýza vlivu zakrývání horního povrchu na velikost průměrného teplotního gradientu. Zakrytím povr-

chu dojde k pomalejšímu ochlazení konstrukce, resp. snížení teplotního rozdílu mezi jádrem a povrchem konstrukce. (obr. 5, tab. 1)

Experimentální měření na zkušební bloku

Za účelem ověření správnosti výpočetní analýzy bylo na zkušební bloku provedeno po dobu 28 dní kontrolní měření teploty. Při měření byly použity termometry a strunové tenzometry Encardio typu EDS-20V-E s citlivostí 1 mikrostrain a rozsahem 3 000 mikrostrainů. Celkem bylo na zkušební blok osazeno 26 tenzometrů (obr. 6 a 7). Naměřené teploty a vyhodnocení průměrného gradientu jsou uvedeny v tab. 2.

Výsledky a diskuse

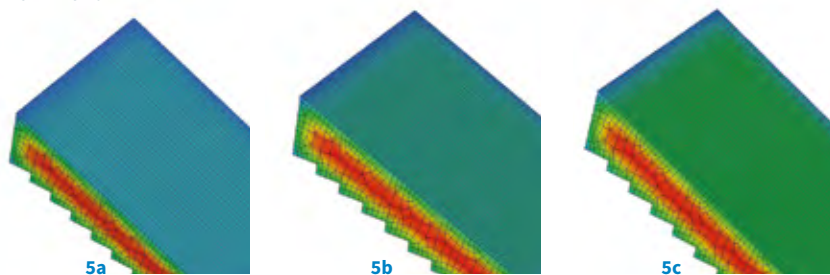
Maximální vypočtená teplota v jádře během simulace v programu Atena pro podzimní období, kdy probíhala betonáž zkušební bloku, byla 47,5 °C, přičemž maximální naměřená teplota na experimentálním bloku dosahovala 49,6 °C. Na základě tohoto pozorování je zřejmé, že hodnoty maximální teplo-

ty a průběh hydratace predikovaný pomocí numerické simulace velmi dobře koresponduje se skutečnými průběhy (obr. 8). Z výsledků je dále patrné, že za daných podmínek, kdy betonáž probíhala za chladného počasí, nedošlo vlivem hydratace k překročení limitní teploty 65 °C v konstrukci ani k překročení maximálního průměrného gradientu 25 °C/m během tuhnutí a tvrdnutí betonu. Dle výpočtů uvedených v tab. 1 by však v případě letní betonáže teploty v jádře dosahovaly až 66,6 °C. Při vysokých teplotách v konstrukci dochází k urychlení hydratace a tvorbě méně kvalitní struktury betonu, což má negativní dopad na dlouhodobou pevnost betonu. Hlavním faktorem, který může snížit maximální teplotu v konstrukci, je okolní teplota a teplota čerstvého betonu. Pro tuto konkrétní stavbu bylo doporučeno neprovádět betonáž při teplotách vyšších než 35 °C, přičemž teplota čerstvého betonové směsi nesmí přesáhnout 27 °C.

Vyhodnocení teplotního rozdílu mezi jádrem a povrchem konstrukce pomocí nelineárního výpočtu v pro-

4 Model bloku s podkladním betonem a pracovní spárou včetně vyztuže pro výpočet v programu Atena 5 a) Nezakrytý model, b) model zakrytý fólií, c) model zakrytý EPS tloušťky 20 mm

4 Model of the block with base concrete and working joint including reinforcement for calculation in Atena Software 5 a) Uncovered model, b) model covered with foil, c) model covered with EPS 20 mm thick



Tab. 1 Vyhodnocení gradientu pro různé způsoby zakrytí horního povrchu

Tab. 1 Gradient evaluation for different methods of covering the upper surface

Typ zakrytí	Roční období	Délka zakrytí [d]	Jádro maximální T [°C]	Povrch minimální T [°C]	Průměrný gradient [°C/m]
bez zakrytí	léto	-	65,8	38,0	37,1
	zima (jaro, podzim)	-	33,5	3,0	40,7
fólie	léto	7	66,1	42,0	32,1
	zima (jaro, podzim)	7	33,5	6,0	36,7
EPS tloušťky 20 mm	léto	7	66,6	50,3	21,7
	zima (jaro, podzim)	7	34,7	15,4	25,7
EPS tloušťky 40 mm	zima (jaro, podzim)	7	35,2	18,0	22,9

Literatura:

- [1] ČSN 73 1208. *Navrhování betonových konstrukcí vodo hospodářských objektů*. Praha, 09/2010.
- [2] ČSN EN 13 670. *Provádění betonových konstrukcí*. Praha, 06/2010.
- [3] ŘSD ČR. *TKP 18 – Betonové konstrukce a mosty*. Praha, 01/2016.
- [4] SŽDC ČR. *TKP 17 – Beton pro konstrukce*. Praha, 04/2022.
- [5] *Projektová dokumentace RDS*. Metrostav a.s. Stav k 03/2023.
- [6] ČSN EN 1992-1-1. *Navrhování betonových konstrukcí*. Praha, 11/2006.
- [7] ČSN EN 206+A2. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha, 10/2021.
- [8] ČSN EN 197-1 Ed. 2. *Cement*. Praha, 04/2012.
- [9] ČSN EN 196-9. *Metody zkoušení cementu*. Praha, 08/2010.
- [10] *Projektová dokumentace DPS: VD Orlík zabezpečení VD před účinky velkých vod*. Aquatis a.s. Stav k 03/2023.
- [11] ČERVENKA, V. et al. *ATENA Program Documentation, Part 1 – Theory*. Praha, 2018.
- [12] VD Orlík – SO 03 sklz otevřená část – Dílčí zpráva o měření a výpočetní analýze vlivu hydratačního tepla na vznik trhlin zkušební bloku ZB4 na stavbě Orlík. Expertní zpráva č. 2100J359-1. Kloknerův ústav ČVUT, 12/2022.
- [13] VD Orlík – SO 03 sklz otevřená část – Analýza vlivu hydratačního tepla na vznik trhlin – parametrická studie. Expertní zpráva č. 2100J359-2. Kloknerův ústav ČVUT, 04/2023.

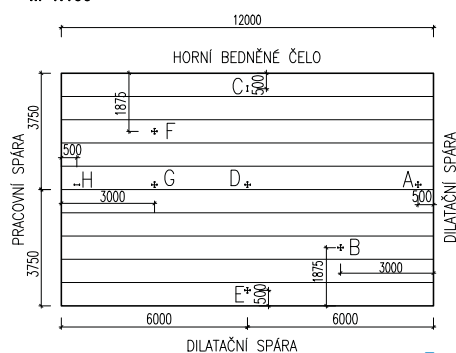
Tab. 2 Vyhodnocení průměrného gradientu – rozhodující žebříčky s největším teplotním rozdílem
Tab. 2 Average gradient evaluation – decisive rankings with the highest temperature difference

Vzdálenost měřidel – 0,75 m => přepočten na průměrný gradient [°C/m]				
Označení pozice	Tenzometr	Teplota [°C]	Rozdíl teplot [°C]	Gradient [°C/m]
B	3	32,47	17,11	22,8
	4	49,58		
D	10	31,88	17,26	23,0
	11	49,14		
G (jádro)	25	31,46	17,69	23,6
	27	49,15		

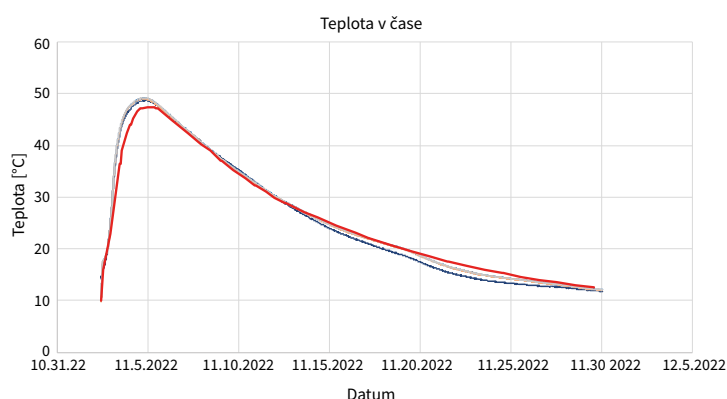


6

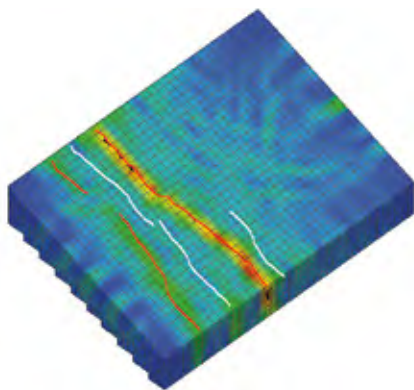
POLOHA V PŮDORYSE
M 1:100



7



8



9

6 Osazení tenzometrů pracovníky Kloknerova ústavu **7** Schéma rozmístění a označení tenzometrů na zkušebním bloku **8** Graf průběhu teplot – srovnání měření Kloknerova ústavu (čidla ze středových oblastí) a simulace programu Atena (červená čára) **9** Porovnání rozložení trhlin – potenciální trhliny ze simulace v programu Atena (červené) a trhlinky pozorované na zkušebním bloku (bílé); barevně je vykreslena koncentrace napětí

6 Installation of strain gauges by Klokner Institute staff **7** Schematic of strain gauge placement and marking on the test block **8** Temperature graph – comparison of Klokner Institute measurements (sensors from the central areas) and Atena Software simulation (red line) **9** Comparison of crack distribution – potential cracks from Atena Software simulation (red) and cracks observed on the test block (white); stress concentration is plotted in colour

gramu Atena také dobře odpovídá naměřeným hodnotám. Např. v pozici G (jádro) byla naměřena hodnota průměrného gradientu 23,6 °C/m (tab. 2), přičemž vypočtená hodnota uvedená v tab. 1 byla rovna 22,9 °C/m.

Po odkrytí experimentálního bloku v časech 14 a 28 dní od betonáže nebyly na povrchu pozorovány žádné trhliny větší než 0,2 mm. Z porovnání výsledků numerické simulace a vizuální prohlídky ve stáří 28 dní je patrné, že došlo ke vzniku velikostně obdobných trhlin ($\pm 0,01$ mm) na podobných místech jako predikovala simulace (obr. 9).

Závěr

V rámci projektu VD Orlík – zabezpečení vodního díla před účinky velkých vod byla na Kloknerově ústavu ČVUT provedena výpočetní analýza vývoje hydratačního tepla a vlivu zakrývání povrchu na velikost průměrného teplotního gradientu na zkušebním bloku dna otevřené části skluzu. Numerická výpočetní analýza byla verifikována experimentálním měřením na zkušebním bloku. Vývoj teplot v jádře i na po-

vrchu konstrukce a rozložení trhlin zjištěné na zkušebním bloku velmi dobře odpovídaly výpočetní predikci, čímž byla potvrzena výstižnost aplikovaných výpočetních modelů.

Po dobu výstavby skluzu je konstrukce dále monitorována a probíhají kontrolní měření pro ověření správnosti výpočetních modelů při různých okrajových podmínkách (měnící se teplota okolí).

Děkujeme státnímu podniku Povodí Vltavy za možnost publikování výsledků a společností Metrostav a Aquatis za spolupráci.

Článek byl vypracován za podpory grantu RVO 31251 122 1222101J000 1ND.



Ing. Simona Potůčková
 Kloknerův ústav ČVUT v Praze
 & OBERMEYER HELIKA a.s.
 simona.potuckova@cvut.cz



Ing. Milan Holý
 Kloknerův ústav ČVUT v Praze
 milan.holy@cvut.cz



prof. Ing. Jiří Kolisko, Ph.D.
 Kloknerův ústav ČVUT v Praze
 jiri.kolisko@cvut.cz