

OŠETROVANIE ČERSTVÉHO BETÓNU – STRATA VODY Z BETÓNU

Ing. Peter Briatka, Technický a skúšobný ústav stavebný, n. o., v Bratislave, doc. Ing. Peter Makýš, PhD., Stavebná fakulta STU v Bratislave

Abstrakt: Betón, rovnako ako každý iný materiál či látka, podstupuje objemové zmeny. Objemové zmeny súvisia s teplotnou rozťažnosťou, ako aj so zmršťovaním, ktorého hlavnou hnacou silou je zmena relatívnej vlhkosti betónu. Konštrukčné riešenia objemových zmien betónu existujú, no ich použitie nie je často možné, ba dokonca ani vhodné. V technológii betónu sa tak pozvoľna vytvorila oblasť zaoberajúca sa ošetrovaním betónu. Ošetrovaním betónu by sa mali potlačiť účinky určitých faktorov objemových zmien. Táto práca sa zaoberá ošetrovaním betónu, no nie v zmysle záporných teplôt, resp. typickej zimnej betonáže.



Typická divoká zmršťovacia trhlina

Ošetrovanie čerstvého betónu

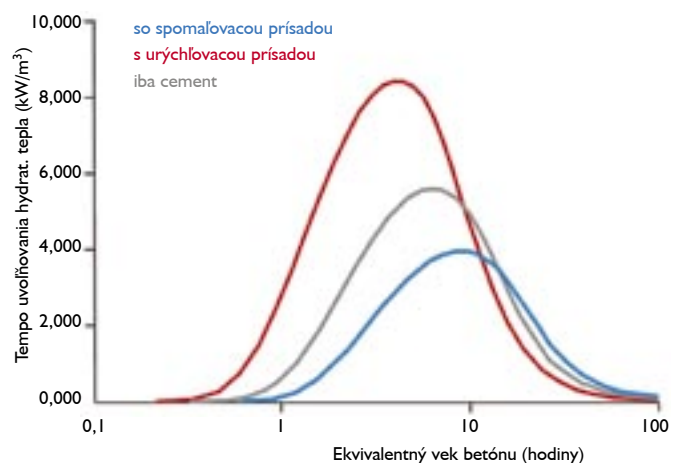
Ošetrovanie čerstvého a mladého betónu je súbor opatrení a procesov, ktorých cieľom je umožnenie hydratácie cementu v čo najideálnejších podmienkach (20 °C a relatívna vlhkosť – RH 100%). Výsledkom by mala byť trvanlivá betónová konštrukcia spĺňajúca pôvodné požadované návrhové parametre. Z iného uhla pohľadu je cieľom ošetrovania betónu dosiahnutie jeho najvyššej možnej pevnosti [1]. Syntézou oboch prístupov dospějeme ku komplexnému významu ošetrovania betónu, ktorým je maximálne využitie potenciálu čerstvého betónu a realizovanej konštrukcie na spoľahlivú funkčnosť počas čo najdlhšieho obdobia. Spomínaný potenciál je determinovaný všetkými doposiaľ vykonanými činnosťami v projektovej príprave, ako aj v realizačnej fáze. V zásade je ošetrovanie betónu finálnym procesom vyhotovovania betónových konštrukcií. Jeho správna voľba a vhodná technológia má preto rozhodujúci význam z hľadiska všetkých vynaložených prostriedkov na vyhotovenie konštrukcie.

Vo všeobecnosti možno ošetrovanie betónu rozdeliť do dvoch základných skupín. Prvou je ochrana proti mechanickému poškodeniu statickým zaťažením a poškodeniu formujúcej sa štruktúry cementového kameňa účinkami dynamického zaťaženia otrasmi alebo vibráciami. V tomto prípade platí, že kryštály, vznikajúce z CSH gélu a formujúce budúcu štruktúru cementového kameňa, sú náchylné na dynamické zaťaženia, resp. vibrácie. Vnesením takejto formy zaťaženia do tuhého betónu by došlo k zásadnému porušeniu väzieb medzi kryštálmi navzájom a na rozhraní cementový kameň – kamenivo, čo by

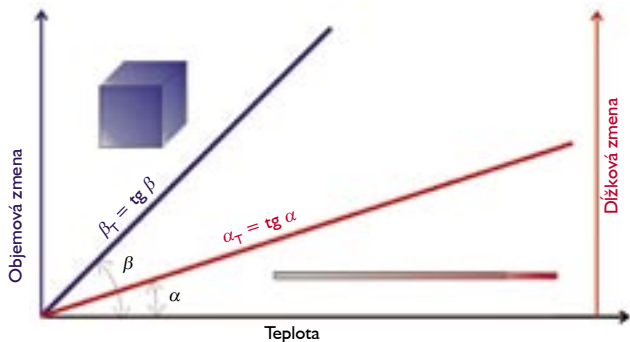
logicky viedlo k zníženiu výslednej pevnosti betónu. Z hľadiska statického zaťaženia je potrebné poznamenať, že veľkoplošné doskové konštrukcie si vyžadujú relatívne včasné zaťaženie pri realizácii úpravy povrchu a prerezaní kontrakčných škár. Z tohto dôvodu je nevyhnutné v každom okamihu zaťaženia mladého betónu spĺňať podmienku $\sigma(t) \leq f_c(t)$. Druhou skupinou je zabránenie vzniku ťahových alebo tlakových napätí vo vznikajúcej alebo už existujúcej štruktúre betónu, ktorá v danom okamihu nemá dostatočnú pevnosť na to, aby ich dokázala preniesť. Ťahové alebo tlakové napätia vznikajú v dôsledku objemových zmien, samotného materiálu alebo jeho zložiek, vyvolaných nepriaznivým pôsobením vonkajšieho prostredia. Napätia v celom kompozite sú spôsobené objemovými a dĺžkovými zmenami súvisiacimi s priebehom vývinu hydratačného tepla (obr. 1) a snahou tuhnucej, resp. tvrdnucej konštrukcie o dĺžkovú kontrakciu.

Strata vlhkosti betónu – vysychanie

Ďalším faktorom generujúcim ťahové napätia, no pôsobiacim len v určitej zložke betónu, je vysychanie cementového tmelu. Vznik a rozvoj napätí týmto mechanizmom súvisí so stratou vody z povrchu konštrukcie (vysychanie) a spotrebou vody na hydratáciu cementu (autogénne vysychanie). Povrchové vysychanie spôsobené nižšou relatívnou vlhkosťou (RH) ako je vlhkosť cementového tmelu možno rozdeliť do troch fáz (obr. 3). V prvej fáze sa z povrchu odparuje tenká vrstvička „vypotenej“ vody. Táto fáza nie je ničím zaujímavá, keďže ide o klasické odparovanie vody z voľnej vodnej hladiny,



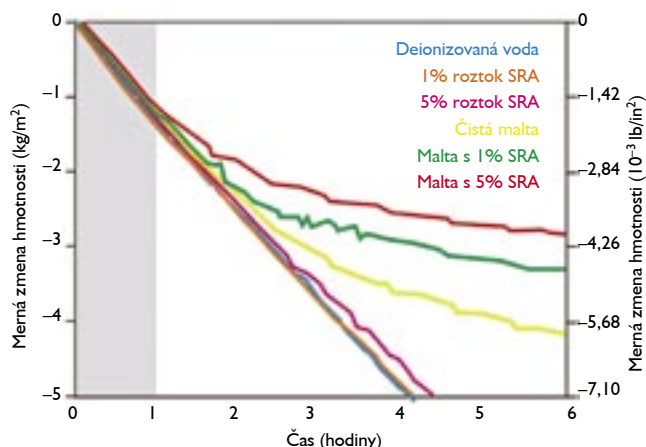
Obr. 1 Tempo uvoľňovania hydratačného tepla [2]



Obr. 2 Schematická objemová a dĺžková teplotná rozťažnosť



Obr. 3 Tri fázy straty vody odparovaním do okolitého prostredia



Obr. 4 Špecifické množstvo odparenej vody [3]

čo potvrdzuje aj obr. 4. Jasne vidno konštantnú a zhodnú rýchlosť odparovania vody počas prvej fázy.

Hneď ako sa však vypotená voda úplne odparí, odparovanie prechádza do fázy číslo dva. Oblasť odparovania sa presúva do najvrchnejšej vrstvičky tuhých častíc, kde sa stratou vody začínajú formovať kapilárne menisky. S prebiehajúcim odparovaním sa polomery meniskov zmenšujú. V pórovom roztoku tak vznikajú ťahové napätia. Zatiaľ neexistuje pevná štruktúra cementového tmelu, preto ťahové napätia spôsobujú kolaps systému. Viskózný systém sa zmršťuje prevažne v smere pôsobiacej gravitácie a pevné častice klesajú nižšie (konsolidujú), čo vytlačí pórový roztok do vrchných vrstiev a odparovanie pokračuje ďalej. Konsolidáciu systému sa zvyšuje difúzny odpor proti stúpaniu pórového roztoku k povrchu konštrukcie. Zároveň sa znižuje aj stlačiteľnosť systému. Z tohto dôvodu vznikajú väčšie kapilárne napätia, ktoré ťahajú pórový roztok k povrchu. Vyšším napätiam pevné častice opäť podliehajú a ich kostra sa výrazne zhrutňuje. Keď už systém nie je schopný konsolidácie (kritický bod), oblasť odparovania sa presúva do vnútra cemen-

tového tmelu. V tomto bode vznikajú trhliny, keď už systém nie je schopný ďalšieho sadania (konsolidácie) a kapilárne napätia dosahujú najvyššie hodnoty. Odparovanie však pokračuje ďalej treťou fázou. Oblasť odparovania sa presúva hlbšie do cementového tmelu, čo znamená neustále spomaľovanie jeho tempa, pretože sa stráca priamy kontakt kapilárnych pórov s okolitým prostredím. Je potrebné poznamenať, že prechod z druhej do tretej fázy nemožno jednoznačne určiť, pretože zatiaľ čo veľké póry na povrchu sú vyprázdnené, malé póry zostávajú saturované a vodu na odparovanie uvoľňujú až neskôr. Je to spôsobené spojitým rozdelením veľkostí zŕn cementu, a tým aj spojitým rozdelením veľkosti pórov.

Strate vody z betónu sa venovala a v súčasnosti sa naďalej venuje veľká pozornosť, obzvlášť na teoretickej úrovni a skúmaním v laboratórnych podmienkach simulujúcich reálne podmienky na stavenisku. Ako si teda stratu vody zo systému (z betónovej konštrukcie) vysvetliť? Strata vody z betónu je reakcia na určitý podnet z okolia konštrukcie, ktorého účinok sa v čase mení. Podnetom sa v tomto prípade rozumie stav prostredia charakterizovaný relatívnou vlhkosťou (RH), teplotou tesne nad povrchom betónovej konštrukcie (T_s) a rýchlosťou prúdenia vzduchu (v_w) tiež v oblasti tesne nad konštrukciou. Prvotný koncept odparovania vody z betónu predstavil Menzel a vyjadruje ho vzťah 1. V tomto modeli je podnetom rozdiel tlakov vodnej pary medzi betónom a okolitým prostredím a rýchlosťou prúdenia vzduchu. Rozdiel tlakov v sebe zahŕňa aj teplotu prostredia v zmysle závislosti relatívnej vlhkosti od teploty ovzdušia. Tento model prešiel určitým vývojom, výsledkom ktorého je v súčasnosti dobre známy a odbornou verejnosťou akceptovaný nomogram straty vody z betónu v dôsledku odparovania (obr. 5).

$$E_E = 0,44 \cdot (p_{VS} - p_{VA}) \cdot (0,253 + 0,096 \cdot v_w) \quad (\text{lb} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{hr}) \quad (1)$$

- E_E – intenzita odparovania vody ($\text{lb} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{hr}$)
- p_{VS} – parciálny tlak nasýtenej vodnej pary na povrchu konštrukcie (psi)
- p_{VA} – parciálny tlak vodnej pary vo vzduchu (psi)
- v_w – rýchlosť prúdenia vzduchu vo výške 20 in. nad konštrukciou (mph)

$$p_s = 0,61 \cdot e^{\left(\frac{17,3 \cdot T}{273,3 + T}\right)} \quad (\text{kPa}) \quad (2)$$

- p_s – tlak nasýtenej vodnej pary (kPa)
- T – teplota ($^{\circ}\text{C}$)

Intenzitu odparovania vody E_E v anglosaských jednotkách (vzťah 1) možno jednoduchým prepočtom vyjadriť aj v metrických jednotkách pomocou zmeny koeficientov, ako je to uvedené vo vzťahu 3.

$$E_E = 0,313 \cdot (p_{SS} - r \cdot p_{SA}) \cdot (0,253 \cdot 0,06 \cdot v_w) \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})) \quad (3)$$

- p_{SS} – tlak nasýtenej vodnej pary na povrchu betónu (kPa) zo vzťahu 2
- p_{SA} – tlak nasýtenej vodnej pary vo vzduchu (kPa) zo vzťahu 2
- r – vlhkosť vzduchu vyjadrená ako $RH/100$
- v_w – rýchlosť prúdenia vzduchu vo výške 0,5m nad konštrukciou (km/h)

Pre jednoduchšie výpočty priamo na stavenisku bol odvodený vzťah 4, ktorým možno vypočítať intenzitu odparovania vody bez výpočtov tlakov vodných pár.

$$E_E = (T_S^{2.5} - r \cdot T_A^{2.5}) \cdot (1 + 0,4 \cdot v_W) \cdot 10^{-6} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})) \quad (4)$$

V zjednodušenom vzťahu 4 vystupuje premenná T_S , čo je teplota povrchu betónu, resp. teplota tesne nad povrchom. Teplota v tejto oblasti je v skutočnosti ovplyvnená nielen teplotou prostredia (T_A), ale aj intenzitou slnečného žiarenia (I_{GR}) (priameho aj difúzneho) a pohltivosťou betónu. Pohltivosť betónu sa v jeho skorom veku výrazne mení, a to rýchlym prechodom dvomi štádiami. V prvom štádiu je na povrchu betónu tenká vrstvička tzv. vypotenej vody, ktorá zabezpečuje výraznú reflexiu slnečného žiarenia, preto je pohltivosť relatívne nízka. Keď sa ale vypotená voda odparí, absorpcia žiarenia výrazne vzrastie a teplota betónu aj vzduchu v jeho tesnej blízkosti sa zvýši.

Menzelov model matematicky nezahŕňal vplyv slnečného žiarenia na intenzitu odparovania vody, no v reálnych podmienkach je potrebné tento faktor zakomponovať do výpočtu. Prvotnou myšlienkou je, že časť slnečného žiarenia absorbujú betón, čím prijíma energiu absorbovaných fotónov a zvyšuje svoju vnútornú energiu. Zvýšenie vnútornej energie sa prejaví zvýšením teploty. Ako prvá sa od slnečného žiarenia zvýši povrchová teplota a následne, v závislosti od teplotného gradientu po výške prierezu, dochádza k zmene tepelného toku v priereze. Pre odparovanie vody z betónu podľa vzťahu 4 má význam zaoberať sa len zvýšením povrchovej teploty betónu. Zohľadnením vplyvu slnečného žiarenia potom možno povrchovú teplotu betónu T_S vyjadriť vzťahom 5 [6].

$$T_S = T_A + \frac{c_a \cdot I_{GR}}{h_{s,cv}} - \frac{v_0}{h_{s,cv}} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5)$$

- c_a – koeficient pohlcovania slnečného žiarenia ($c_a = 1c_r$)
- I_{GR} – intenzita globálneho žiarenia ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)
- $h_{s,cv}$ – koeficient prestupu tepla ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)
- v_0 – teplo vydávané povrchom konštrukcie ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)

$$h_{s,cv} = (5,3 + 3,6 \cdot v_W + 4) \cdot 1,162 \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})) \quad (6)$$

- v_W – rýchlosť prúdenia vzduchu vo výške 0,5m nad konštrukciou (m/s)

Pri výpočte teploty tesne nad povrchom konštrukcie (T_S) je potrebné zohľadniť nielen kladné prírastky spôsobené slnečným žiarením, ale aj záporné prírastky vplyvom odparovania vody. Záporný prírastok, čiže pokles teploty, je ekvivalentný skupenskému teplu vyparovania L_E (vzťah 7).

$$L_E = m \cdot I_E \quad (J) \quad (7)$$

- L_E – skupenské teplo vyparovania (J)
- m – hmotnosť odpareného pórového roztoku (kg)
- I_E – merné skupenské teplo vyparovania (J/kg) – pre vodu (2257 kJ/kg)

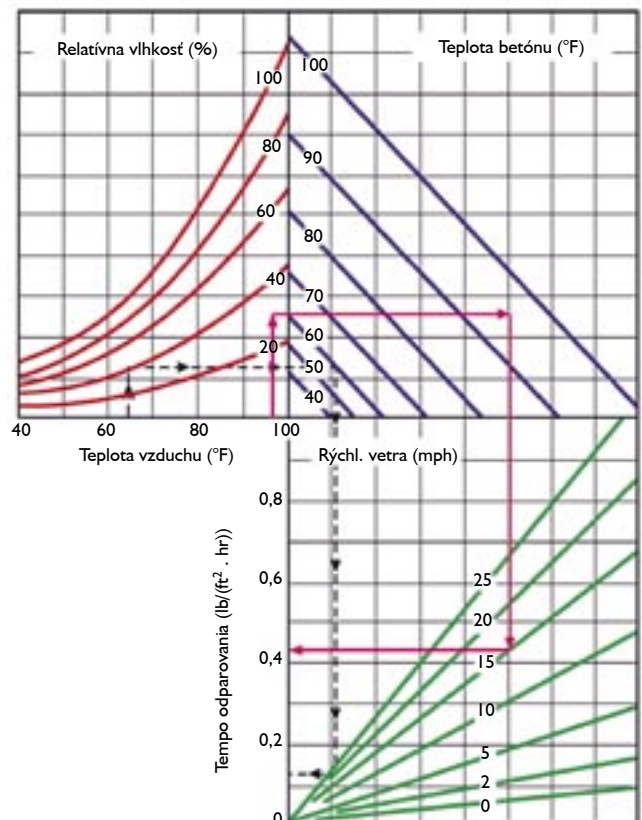
Odtiaľ sa dá pomocou mernej tepelnej kapacity betónu c ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) vyjadriť pokles teploty ΔT_E podľa vzťahu 8, kde m (kg) je hmotnosť betónu. Uvádza sa merná tepelná kapacita 900 až 1000 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, no uvedená hodnota je platná pre zatvrdnutý betón, čo však nemožno použiť do výpočtov pre čerstvý, resp. mladý betón. Po zistení skutočnej mernej tepelnej kapacity čerstvého (mladého) betónu sa dá vyjadriť ΔT_E a následne doplniť do vzťahu pre výpočet teploty tesne nad povrchom konštrukcie, čím sa získava vzťah 9 s možnosťou aplikácie do vzťahu 4 alebo do grafického vyjadrenia intenzity odparovania pomocou nomogramu (obr. 5). Treba však poznamenať, že očakávaný prínos spresnenia teploty povrchu konštrukcie je minimálny vzhľadom na vysoké teploty prostredia.

$$\Delta T_E = \frac{L_E}{c \cdot m} \quad (^\circ\text{C}) \quad (8)$$

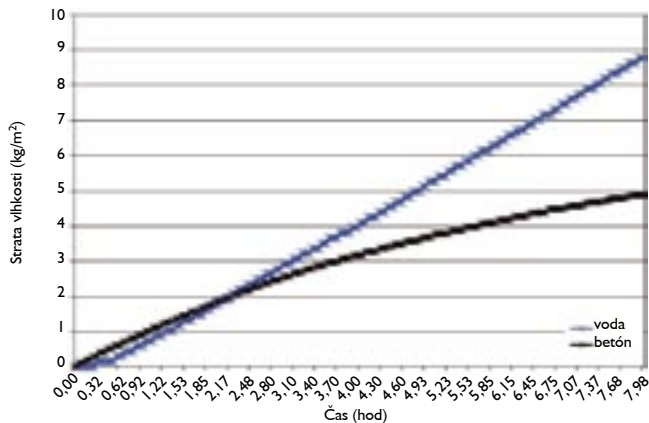
$$T_S = T_A + \frac{c_a \cdot I_{GR}}{h_{s,cv}} - \frac{v_0}{h_{s,cv}} - \Delta T_E \quad (^\circ\text{C}) \quad (9)$$

Zistenia

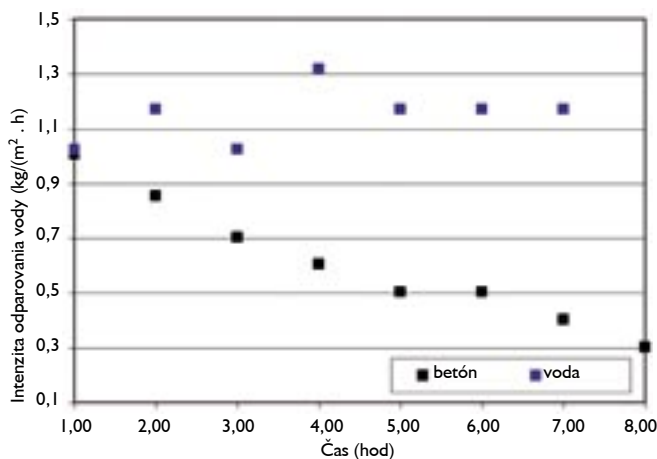
Zo vzťahu 4, resp. príslušného nomogramu (v metrických jednotkách) vyplýva intenzita odparovania vody z betónu do okolitého prostredia. Pri laboratórnych skúškach plastického zmršťovania podľa ASTM C 1579-06, kedy sa sledoval aj úbytok hmotnosti vzorky (množstvo odparenej vody) sa ukázalo, že pri daných normových okrajových podmienkach prostredia ($T_A = 36 \pm 3^\circ\text{C}$; $RH = 30 \pm 10\%$ a $v_W = 24 \pm 2 \text{ km/h}$) sa nezhoduje výpočtová intenzita straty vody $0,2 \text{ kg/m}^2$ (obr. 5) so skutočne nameranou $1,00 \text{ kg/m}^2$ (obr. 6 a 7). Výrazná diferencia vo výsledkoch je badateľná najmä v prvej fáze od-



Obr. 5 Nomogram intenzity odparovania vody z povrchu betónovej konštrukcie [4]



Obr. 6 Nameraný priebeh straty vody (odparovanie)



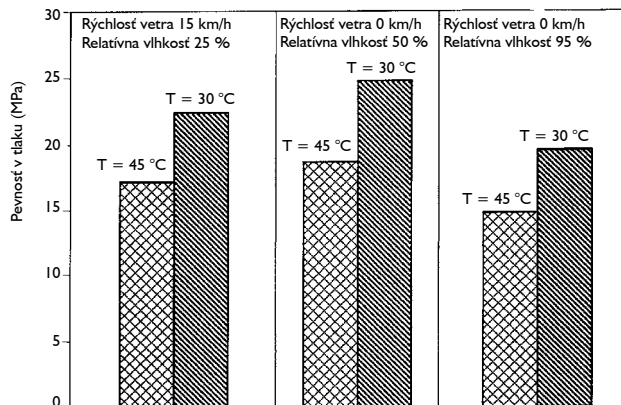
Obr. 7 Intenzita straty vody odparovaním ako funkcia času

parovania voľnej vody z povrchu čerstvého betónu. Vieme, že v počiatočnej fáze sa odparuje voľná voda z povrchu konštrukcie, preto nie je zistenie vôbec prekvapivé. Presunom oblasti odparovania hlbšie do cementového tmelu sa meraná intenzita odparovania vody z čerstvého betónu ešte viac znižuje, čo vyvoláva približovanie očakávanej intenzity odparovania ku skutočne nameranej.

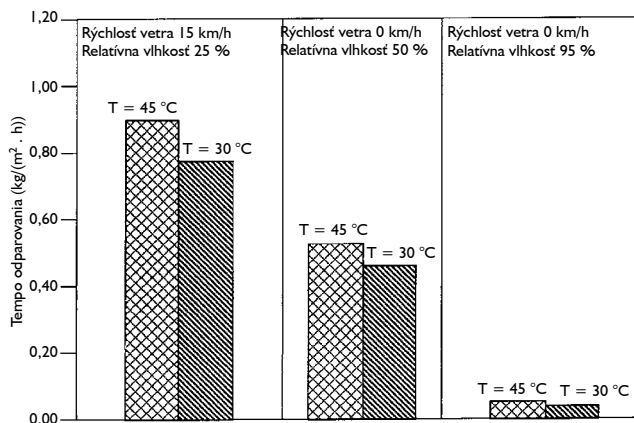
Z pozorovaní vyplýva, že model možno relatívne spoľahlivo aplikovať pri návrhu ošetrovania betónu až po približne desiatej až dvanástej hodine veku betónu. Ošetrovanie betónu je dovedty nutné navrhovať na základe straty vody vypočítanej iným spôsobom. Ak teda chceme dôsledne a efektívne ošetrovať betón vo veľmi skorom veku a zabrániť tak prejavom negatívnych vplyvov straty vody z betónu v čase začínajúceho a pokračujúceho tuhnutia, musíme poznať a zohľadniť všetky technológie ošetrovania betónu v horúcom počasi.

Význam ošetrovania betónu v horúcom počasi

Vysokou teplotou sa na účely tuhnutia, tvrdnutia a ošetrovania betónu rozumie teplota prevyšujúca teplotný interval bežných podmienok, t. j. $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ a obzvlášť teplota nad 30°C . Ako už bolo uvedené, betón je potrebné ochraňovať pred účinkami vysokej teploty z dôvodu, že expozícia betónu takýmto podmienkam vyvoláva nielen nadmernú stratu vody (obr. 9), ale aj radikálne zvyšuje tempo hydratácie. To negatívne vplyva na štruktúru kryštalických produktov hydratácie a zmenšením ich špecifického povrchu znižuje dlhodobé



Obr. 8 Vplyv podmienok prostredia na pevnosť betónu v tlaku [5]



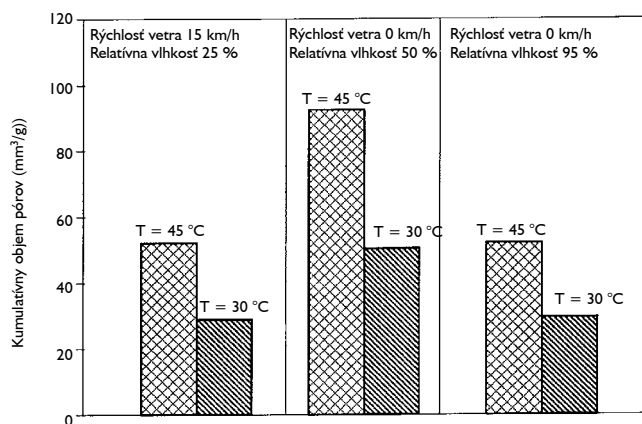
Obr. 9 Vplyv podmienok prostredia na tempo odparovania vody [5]

pevnosti (obr. 8) a, naopak, zvyšuje permeabilitu betónu (spôsobuje aj vznik pórov (obr. 10) stratou vody z cementového tmelu).

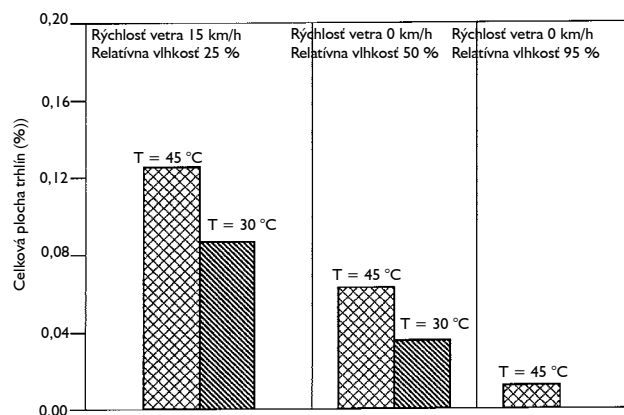
Obrázky 8 – 11 dokumentujú vplyv teploty a relatívnej vlhkosti prostredia, ako aj rýchlosti prúdenia vzduchu na vlastnosti zatvrdnutého betónu, resp. na procesy, ktoré majú priamy vplyv na úžitkové vlastnosti betónu. Pri ošetrovaní betónu teda zohrávajú nezanedbateľnú úlohu. Pretransformovaním teploty T , relatívnej vlhkosti RH a rýchlosti prúdenia vzduchu v_w ako podmienok prostredia do jednej reprezentatívnej veličiny sa dá návrh metódy ošetrovania a príslušných parametrov podstatne zjednodušiť. Za najvhodnejšiu veličinu sa pokladá tempo odparovania vody z jednotky plochy povrchu konštrukcie. Za predpokladu, že sa nevykonajú opatrenia zabraňujúce odparovaniu vody, platí, že odparené množstvo vody má byť do betónu naspäť dodané. Množstvo vody potrebnej na jednotku plochy ošetrovaného betónu sa určí z už prezentovaného výpočtu alebo nomogramu, ktoré (ak ide o ošetrovanie vo veľmi skorom veku), by mali byť upravené, resp. spresnené. Druhým prístupom k ošetrovaniu betónu je vytvorenie takých podmienok, aby k strate vody nedochádzalo alebo aby bola čo najmenšia.

Konvenčné ošetrovanie

- prekryvanie alebo postrek povrchu konštrukcie materiálmi s vysokým difúznym odporom vo forme výrobkov (fólie) alebo materiálov (polymérne postreky),



Obr. 10 Vplyv podmienok prostredia na tvorbu pórov [5]



Obr. 11 Vplyv podmienok prostredia na tvorbu trhlin [5]

- prekryvanie konštrukcie materiálmi nasiaknutými vodou pôsobiacimi ako bariéra v odparovaní vody z betónu a zároveň schopnými udržiavať povrch betónu nasiaknutý vlastnou vlhkosťou,
- vlhčenie povrchu betónu postrekom vodou alebo ošetrovanie pomocou, tzv. generátorov hmly,
- chránenie konštrukcie pred priamym slnečným žiarením a intenzívnym prúdením vzduchu.

Progresívne ošetrovanie

- vnútorné ošetrovanie betónu nahradením určitého množstva hutného kameniva nasiaknutým pórovitým kamenivom SLWA,
- vnútorné ošetrovanie dodávaním vody z nasiaknutých superabsorbčných polymérov SAP pridaných do betónu.

Literatúra

- [1] Českomoravský beton: Beton – suroviny, výroba, vlastnosti, 2. vydanie, 2005.
- [2] Schindler, A. K.: Prediction of concrete setting, Department of civil engineering, Auburn university, USA, 2003.
- [3] Lura, P., Pease, B., Mazzotta, G. B., Rajabipour, F., Weiss, J.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks, Technical paper, ACI Materials Journal / March-April, ACI, USA, 2007.
- [4] Wylie, K.: Cold-Weather Concreting, NMRMCAA meeting in Albuquerque, USA, November 7, 2007.
- [5] Almusallam, A. A.: Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete, Cement & Concrete Composites, 23, USA, 2001, s. 353–361.
- [6] Halahya, M. a kol.: Stavebná tepelná technika, osvetlenie a akustika, 1. vydanie; Bratislava, Alfa, 1970.
- [7] ASTM C 1579-06 Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (Using a steel form insert).
- [8] Wylie, K.: Cold-Weather Concreting, NMRMCAA meeting in Albuquerque, USA, November 7, 2007.