

# MIMOSTAVENISKOVÁ DOPRAVA ČERSTVÉHO BETÓNU A VPLYV TEPLoty PROSTREDIA

## READY-MIX CONCRETE TRANSPORT AND INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE

PETER BRIATKA, LUKÁŠ ŠTEFÁNIK,  
PETER MAKÝŠ

Cieľom príspevku je zdôrazniť závažnosť problematiky primárnej dopravy čerstvého betónu, obzvlášť v letnom období, kedy sa nezriedka potýkame s nevyhovujúcou spracovateľnosťou dodaného transportbetónu. Práca podáva stručný úvod do teórie betónu, hydratácie cementu a do merania času tuhnutia materiálov na báze cementu. V experimentálnej časti sú prezentované výsledky laboratórnych skúšok tuhnutia cementového tmelu. V tretej časti sa pozornosť upriamuje na využitie poznatkov o dobe začiatku tuhnutia betónu v stavebnej praxi na Slovensku.

The main goal of this paper is to highlight importance of ready-mix concrete transport issue especially in hot weather when we often deal with inappropriate workability of ready-mix concrete. This paper offers a short introduction into concrete and cement hydration theory and also into measurement of setting time of cement-based materials. In an experimental part, there are being presented results of laboratory tests on time of cement paste setting. In the third part, the attention is paid to usage of test results on time of setting in real and common Slovak construction practice.

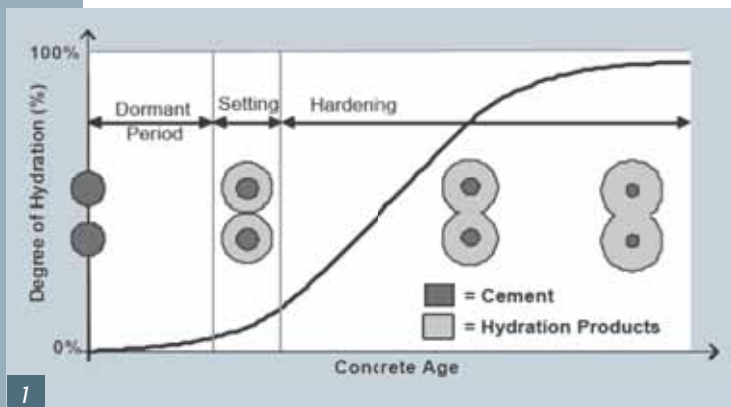
Vieme, že betonáže pri vysokých teplotách sú problematické. No vieme i to, ako voliť dopravu betónu, aby takými neboli?

### VYMEDZENIE PROBLEMATIKY Z POHLADU TECHNOLOGIE SPRACOVANIA BETÓNU

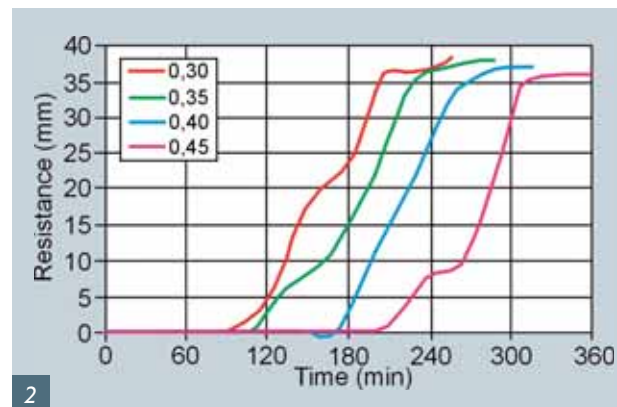
Doprava je dôležitou súčasťou spracovania čerstvého betónu (ČB). Betón je potrebné ochraňovať pred účinkami vysokej teploty (nad 25 °C a obzvlášť nad 30 °C), pretože jeho expozícia takýmto podmienkam vyvoláva radikálne zvýšenie tempa hydratácie. Podľa STN EN 206-1 nesmie teplota betónu pri dodaní prekročiť +30 °C, ak sa nezvolia vhodné opatrenia. Jedná sa hlavne o optimálne zloženie ČB pre dané podmienky. Dôležitý je výber vhodného druhu cementu, prísad, prímiesi a vodného súčiniteľa. Riešením môže byť aj chladenie ČB napríklad pridaním určitého množstva zámesovej vody vo forme ľadu alebo chladenie tekutým dusíkom.

Opačný prístup k problému je definovanie maximálnej dopravnej vzdialenosti podľa zloženia betónu, teploty prostredia, času začiatku tuhnutia ČB a prepravnej rýchlosti na jednotlivých komunikáciách tak, aby na stavenisku zostával dostatok času na jeho zabudovanie (uloženie a zhutnenie).

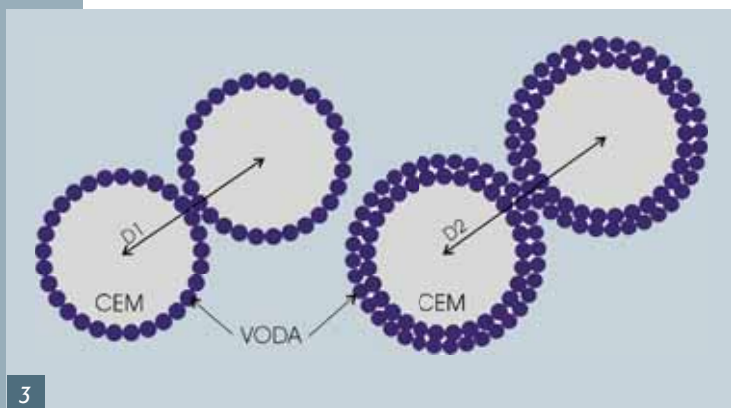
Do začiatku tuhnutia musí byť betón uložený do debnenia



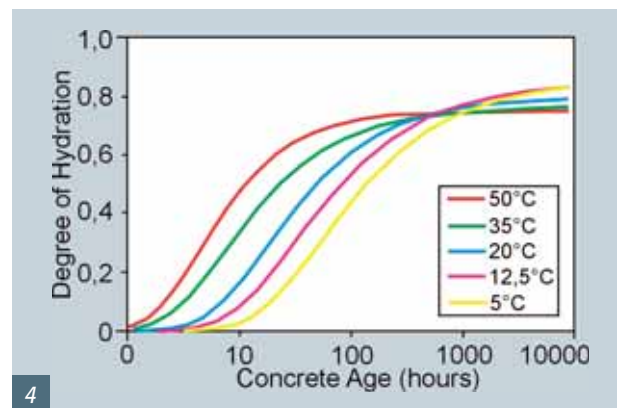
1



2



3



4

a musí byť ukončené jeho zhutňovanie. Týmto sa dostávame ku závažnej požiadavke podľa STN P ENV 13670-1 hovoriacej, že betón pri zhutňovaní ponornými vibrátormi (najrozšírenejší spôsob) musí byť zhutňovaný až do hĺbky 50 až 100 mm predchádzajúcej vrstvy. Tzn. že nielen čerstvo uložený betón, ale aj betón uložený v poslednej vrstve ešte nesmie začínať tuhnúť. Maximálny prípustný čas na dopravu betónu sa tým pádom skraca aj o dobu medzi zhutnením poslednej vrstvy a začiatkom zhutňovania najvrchnejšej vrstvy betónu.

Dôležitým parametrom z hľadiska spracovania betónu je čas začiatku tuhnutia cementového tmelu. Pod pojmom čas začiatku tuhnutia sa rozumie doba, ktorá uplynie od prvého kontaktu cementu s vodou až do nadobudnutia pevnosti cementového tmelu v tlaku 0,5 MPa. Čas začiatku tuhnutia vyjadruje aj začiatok výraznej straty plasticity cementového tmelu v dôsledku formovania hydratačných produktov a väzieb medzi nimi navzájom (obr. 1) i na rozhraní cementový tmel a kamenivo.

Čas začiatku tuhnutia sa stanovuje pre každý druh aj triedu cementu zvlášť (podľa STN EN 196-3) a to s presnosťou na jednu minútu. Pre praktické hodnotenie sa udáva zaručená doba začiatku tuhnutia ako násobok 15 min. Dobu začiatku tuhnutia ovplyvňuje v prvom rade zloženie cementu, jemnosť jeho mletia, vodný súčiniteľ (obr. 2 a 3) a samozrejme teplota prostredia (obr. 4), ktorá (jednoducho povedané) určuje tempo hydratačných procesov.

Pre zisťovanie doby začiatku tuhnutia existuje viacero skúšobných postupov. Normové, priamo alebo nepriamo, vychádzajú z merania odporu proti prenikaniu určitého skúšobného telieska do cementového tmelu [5, 6, 7, 8]. Iný prístup ponúkajú sofistikovanejšie metódy založené na zisťovaní napríklad stupňa hyd-

ratácie [11] (kalorimetrickou metódou merania uvoľneného hydratačného tepla) alebo na meraní akustickej emisie u betónov (uzavretých cementových systémov) s nízkym vodným súčiniteľom [14].

Vplyv rôznych parametrov čerstvého betónu, napr. druh cementu, jemnosť jeho mletia, vodný súčiniteľ, prítomnosť prísad ako aj teplota prostredia, zásadne ovplyvňujú čas začiatku tuhnutia betónu. Dobu začiatku tuhnutia betónu teda možno upravovať receptúrou zloženia betónu alebo jeho teplotou. Ak ale nemáme, ako zhotoviteľa, na úpravu receptúry dosah, musíme sa vysporiadať s mimostaveniskovou dopravou čerstvého betónu v určitých podmienkach lokality, a to v určitom čase tak, aby boli splnené požiadavky STN P ENV 13670-1 a STN EN 206-1.

Pre praktické riešenie problematiky mimostaveniskovej dopravy čerstvého betónu boli vykonané skúšky zisťovania začiatkov tuhnutia na cementových tmelech. Na základe týchto výsledkov sa pristúpilo k praktickému riešeniu problematiky z technologického hľadiska.

#### EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

V experimentálnej časti sa vychádzalo zo skutočnosti, že receptúra čerstvého betónu je daná a nemenná rovnako ako aj teplota vonkajšieho prostredia. Úlohou bolo zistiť čas začiatku tuhnutia cementového tmelu (s rôznymi vodnými súčiniteľmi) pri rôznej teplote prostredia, ktorému je exponovaný a v ktorom začína tuhnúť. Z úvah bolo vylúčené používanie plastifikačných, spomaľovacích a vlastne akýchkoľvek prísad, keďže ich sortiment, účinnosti a kumulované funkčné mechanizmy nezapadajú do zámeru tejto práce – zdôrazniť význam riadenia a optimalizácie dopravy čerstvého betónu.

Obr. 1 Fyzikálna interpretácia stupňa vývinu hydratácie [11]

Fig. 1 Physical interpretation of degree of hydration development [11]

Obr. 2 Závislosť tuhnutia cementu od vodného súčiniteľa zistená Vicatovou skúškou [12]

Fig. 2 Dependence of cement setting on water-cement ratio investigated by Vicat test [12]

Obr. 3 Zväčšenie vzdialenosti zŕn cementu  $D_2 > D_1$  pri zvýšení dávky vody

Fig. 3 Extension of spacing of cement particles  $D_2 > D_1$  within increasing water content

Obr. 4 Vplyv teploty na rýchlosť hydratácie [13]

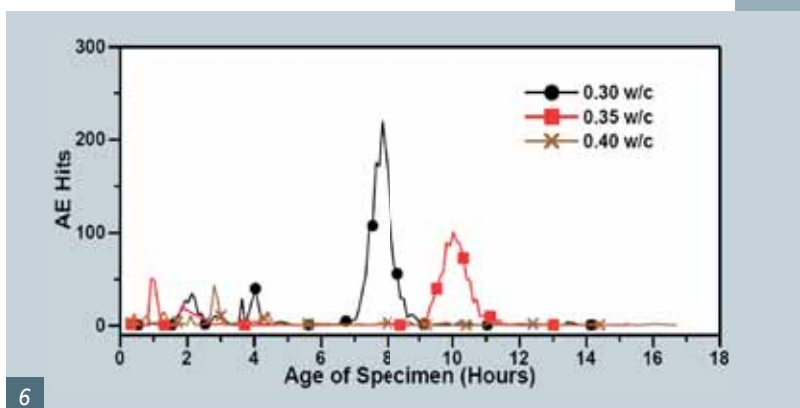
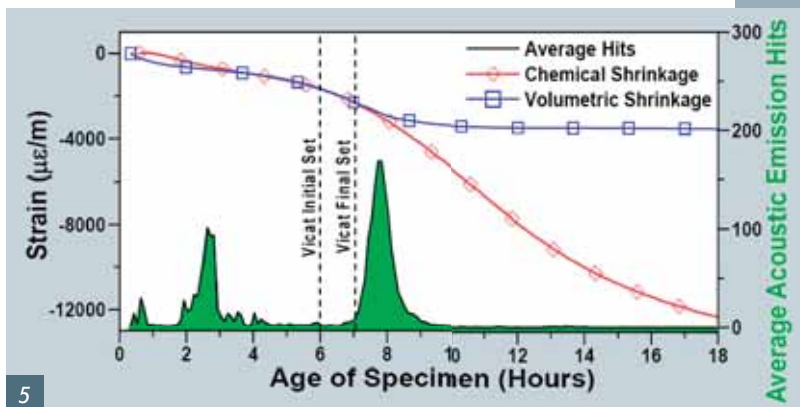
Fig. 4 Influence of temperature on rate of hydration [13]

Obr. 5 Korelácia intenzity akustickej emisie čerstvého betónu a začiatku tuhnutia [15]

Fig. 5 Correlation of intensity of fresh concrete acoustic emission and time of initial setting [15]

Obr. 6 Závislosť intenzity akustickej emisie čerstvého betónu od vodného súčiniteľa [15]

Fig. 6 Dependence of fresh concrete acoustic emission on water-cement ratio [15]





Tab. 1 Vlastnosti CEM I 42,5R  
 Tab. 1 Properties of CEM I 42,5R

Parameter	Požiadavka STN EN 197-1	Hodnoty u výrobcu
Začiatok tuhnutia [min]	≥ 60	208 ± 24
Pevnosť v tlaku po 2 dňoch [MPa]	≥ 20	30,3 ± 1,8
Memný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	–	405 ± 16

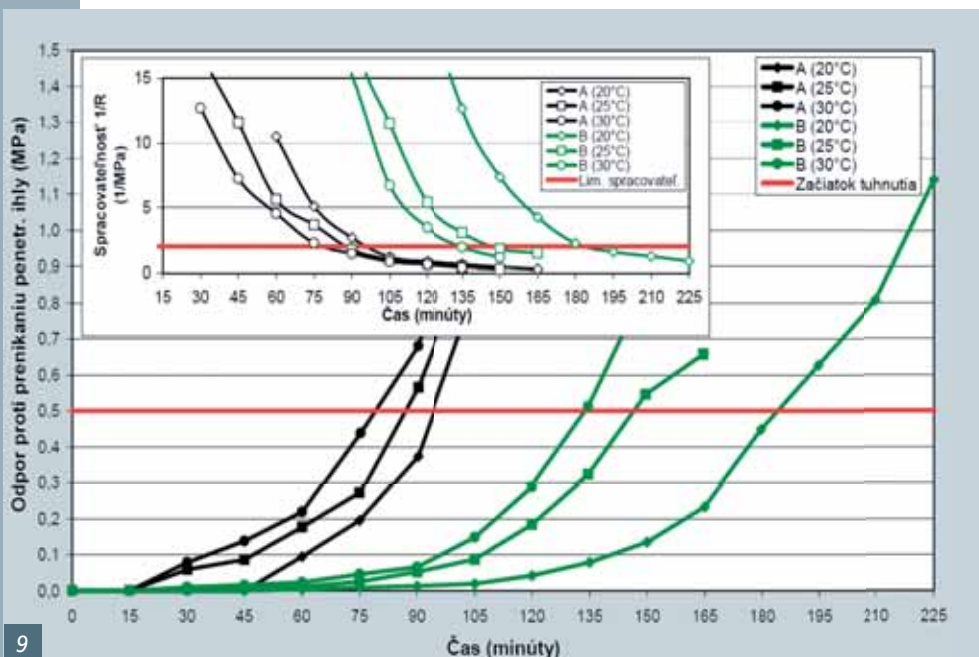
Tab. 2 Použité receptúry cementového tmelu  
 Tab. 2 Used cement paste proportions

Sada	Zložka	Dávka [kg/m <sup>3</sup> ]	Vodný súčiniteľ
A	Cement	1619,54	0,30
	Voda	485,86	
B	Cement	1393,81	0,40
	Voda	557,52	

Skúšky boli vykonané podľa STN EN 1015-9 na vzorkách cementového tmelu. Zjednodušenie zloženia vzoriek zanedbaním plniva (kameniva) bolo zvolené preto, aby výsledky reprezentovali priebeh tuhnutia cementu ako zložky zodpovednej za reologické vlastnosti betónu.

V skúškach bol použitý portlandský cement CEM I 42,5 R (tab. 1). I keď je jasné, že rýchlotuhnúci cement nie je vhodný pre betonáže v letnom období, zvolený bol, lebo je nesporné najpoužívanejším cementom na Slovensku a nezriedka sa používa aj počas betonáží pri vysokých teplotách. Skúšobné vzorky (sada A a B) boli vyrobené podľa receptúr uvedených v tab. 2 a to pre všetky skúšky. Začiatok tuhnutia cementového tmelu pri rôznych teplotách (20; 25 a 30 °C) sa zisťoval na opakovane vyrábaných skúšobných vzorkách.

Vzorky boli miešané podľa postupu uvedeného v STN EN 196-3. Navlhčená miešacia nádoba sa naplnila celou dávkou



Obr. 7 Kondicionovanie pri teplote 20 °C  
 Fig. 7 Curing and treatment at 20 °C

Obr. 8 Kondicionovanie pri teplote 25 °C a 30 °C  
 Fig. 8 Curing and treatment at 25 °C and 30 °C

Obr. 9 Priebeh tuhnutia skúšobných vzoriek (priemerné hodnoty troch telies)  
 Fig. 9 Setting curves of test samples (average values of three specimens)

Obr. 10 Časy začiatku tuhnutia vzoriek podľa teploty prostredia  
 Fig. 10 Time of initial setting in terms of ambient temperature

Obr. 11 Priemerná júlová teplota vzduchu v období 1951 až 1980 na území Slovenska [4]  
 Fig. 11 Average July air temperature within 1951-1980 [4]

vody a následne cementom. Ihneď sa spustilo pomalé miešanie. Po uplynutí 90 s sa miešačka na 30 s zastavila a cementový tmel sa zoškrabal z lopatiek a stien nádoby. Následne sa tmel nechal miešať pri nízkych otáčkach ďalších 90 s.

Po ukončení miešania sa cementovým tmeľom naplnili valcové formy z HDPE (Ø 105 mm, výška 100 mm). Formy sa naplňali v desiatich vrstvách za priebežného jemného zhutňovania pokleptom o podložku. Takto pripravené vzorky sa uložili na kondicionovanie pri teplote, v ktorej sa zisťoval začiatok tuhnutia. Relatívna vlhkosť kondicionovania bola odlišná v skúškach pri teplote 20 °C ± 1 °C, kedy skúšobné telesá tuhli v PE obaloch s RH cca 95 % (obr. 7). V skúškach pri teplotách 25 °C ± 1 °C a 30 °C ± 1 °C (obr. 8) boli vzorky uložené vo vodnom kúpeli a teda RH 100 %.

Meranou veličinou bola sila zatlačania penetračného kolíka do cementového tmeľu vyjadrená zmenou hmotnosti vzorky pri penetrácii. Táto sila reprezentuje odpor R, ktorý kladie tuhnutí tmel proti vnikaniu kolíka. Ako časom tmel tuhne, odpor sa zvyšuje a za začiatok tuhnutia sa považuje čas, kedy sa dosiahne hodnoty 0,5 MPa. Jednotlivé merania boli vykonávané v intervaloch 15 min. a výsledné časy začiatku tuhnutia boli lineárne interpolované.

Výsledkom experimentálnej časti práce je sumárny graf priebehu tuhnutia jednotlivých vzoriek s rôznymi vodnými súčinitelmi pri rôznych teplotách prostredia (obr. 9). Z neho je jasne vidno závislosť začiatku tuhnutia od vodného súčiniteľa a teploty, pri akej cementový tmel tuhne. Výsledky viac-menej zodpovedajú všeobecne očakávanému priebehu tuhnutia. Inverznou funkciou k priebehu tuhnutia je spracovateľnosť, ktorá, ako je vidno, ešte aj cca 15 až 30 min. pred dosiahnutím limitnej hodnoty rapídne klesá, čo poukazuje na závažnosť problematiky dopravy čerstvého betónu na stavenisko v takom čase, aby mohol byť bezpečne zabudovaný.

Sumárny prehľad časov začiatku tuhnutia jednotlivých vzoriek ponúka tab. 3 a obr. 10, z ktorých je evidentné, že význam sledovania začiatku tuhnutia betónu podľa konkrétnej teploty narastá s vodným súčiniteľom betónu. Na druhej stra-

ne však treba podotknúť, že so zvýšením vodného súčiniteľa sa začiatok tuhnutia významne oddiali a rozhodujúca je v tom prípade už len relatívna zmena času tuhnutia.

#### PRAKTICKÁ APLIKÁCIA

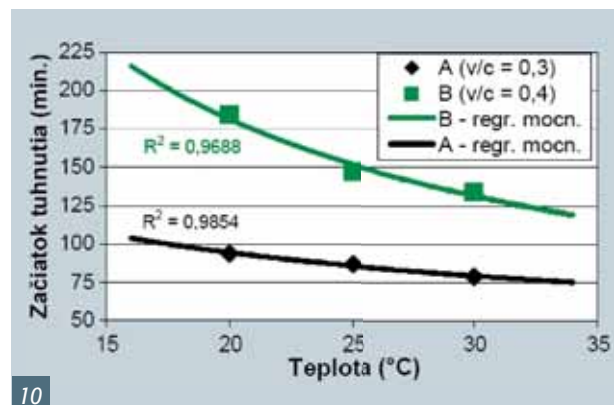
Prvým krokom k možnosti aplikácie laboratórnych výsledkov do praxe je dôkladný prieskum všetkých relevantných podmienok v záujmovej oblasti ich využitia. Nakoľko je táto práca zameraná na primárnu dopravu čerstvého betónu v Slovenskej republike, prieskum bol obmedzený len na toto územie, no metodika je aplikovateľná na ktorúkoľvek inú krajinu alebo územie. Je nesporné, že čím menšie územie sa spracováva, tým presnejšie výsledky a návrhové modely možno zostrojovať.

Jedna časť prieskumu bola zameraná na zmapovanie polohy

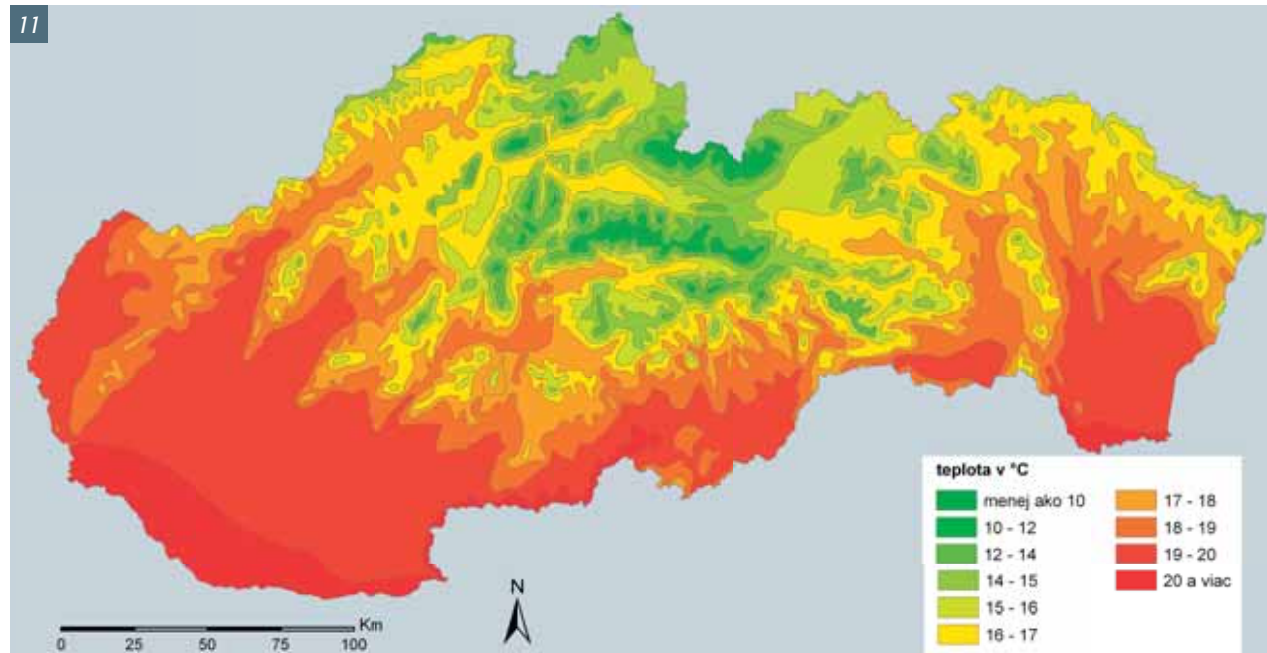
Tab. 3 Prehľad zistených časov tuhnutia

Tab. 3 Review of measured setting times

Sada	Vodný súčiniteľ	Čas tuhnutia pri teplotách [min]		
		20 °C	25 °C	30 °C
A	0,30	94	87	79
B	0,40	184	147	134



10



11

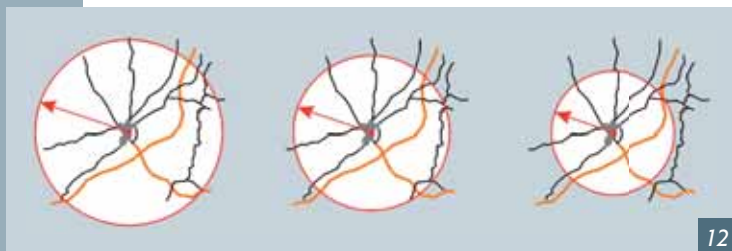
oficiálnych a oprávnených výrobcov transportbetónu na Slovensku. Dôsledné zmapovanie výrobcov transportbetónu bolo elementárnym predpokladom pre zmysluplné využitie údajov získaných v druhej časti prieskumu. V nej sa pozornosť venovala teplotným pomerom na Slovensku a dlhodobým meteorologickým pozorovaniam. Táto časť bola pôvodne zameraná na analýzu troch každoročne najteplejších mesiacov za obdobie rokov 1951 až 1980 (obr. 11). Z dôvodu rozsahu spracovávaných údajov cca 2 400 meracích staníc sa ale pristúpilo k zjednodušeniu. Do ďalšieho postupu sa spracovávali iba

priemerné maximálne denné teploty z najteplejšieho mesiaca v roku – júla, a to podľa jednotlivých okresov.

Zjednodušená aplikácia výsledkov je vytvorenie predbežnej digitálnej mapy skúmaného územia s vyznačením polohy výrobní transportbetónu (betonárk). Každá z betonárk je schopná zásobovať čerstvým betónom určité územie – spádovú oblasť. Idealizovaným modelom spádovej oblasti je územie okolo betonárky vymedzené kružnicou so stredom v mieste betonárky a polomerom rovnajúcim sa súčinu rýchlosti dopravy ČB a času dostupného na transport (obr. 12).

Podľa tohto veľmi jednoduchého modelu bolo spracované pokrytie Slovenska betonárkami (obr. 13). Z uvedeného sa javí zásobovanie čerstvým betónom prakticky celého územia ako bezproblémové.

Treba si však uvedomiť, že do výpočtu obslužnej vzdialenosti (polomeru kružnice) vstupuje nielen disponibilný čas pre transport (daný teplotou a zložením ČB) ale aj dopravná rýchlosť na jednotlivých typoch komunikácií. Z toho vyplýva zásadná chyba, ak by sme posudzovali možnosť dopravy čerstvého



12



13



14

Obr. 12 Idealizovaný model spádovej oblasti pre rôzne teploty (zľava – stúpajúce)

Fig. 12 Idealized model of subregion for various air temperatures (rising from the left)

Obr. 13 Pokrytie Slovenska betonárkami (zelené plochy nie sú v dosahu betonárk)

Fig. 13 Slovakia coverage by concrete mixing plants (green areas are not covered)

Obr. 14 Reálnejší model spádovej oblasti mesta Trnavy pri teplotách (20 °C – zelená; 25 °C – oranžová; 30 °C – červená)

Fig. 14 More real model of Trnava City subarea at temperatures (20 °C – green; 25 °C – orange; 30 °C – red)

betónu z konkrétnej betonárky na konkrétne miesto iba podľa tohto modelu.

Podľa toho čo bolo doteraz uvedené, je nevyhnutné zahrnúť do výpočtov dopravných vzdialeností (a teda i spádových oblastí) aj typy komunikácií v okolí betonárky a reálne rýchlosti, akými sa po nich môže transport uskutočňovať. Do úvahy by mali byť vzaté aj dočasné dopravné obmedzenia (rekonštrukcie existujúcej infraštruktúry) a približná denná hodina transportu, nakoľko v určitých časoch sa nedá vyhnúť dopravným zápcham. Takýto, opäť čiastočne zjednodušený, model zachytáva obr. 14.

Pri výpočte spádovej oblasti mesta Trnavy boli použité priemerné dopravné rýchlosti domiešavačov na troch rôznych kategóriách ciest vyskytujúcich sa v danom území:

- I. kategória – diaľnice: 75 km/h
- II. kategória – rýchlostné komunikácie a cesty I. triedy: 60 km/h
- III. kategória – mestské a miestne komunikácie vrátane ciest II. a III. triedy: 35 km/h

Časy začiatku tuhnutia sme použili podľa tab. 3 – zodpovedajúce betónu s vodným súčiniteľom 0,3. Napriek tomu, že tento vodný súčiniteľ nie je úplne typický, môžeme uvažovať dopravu tzv. vysokohodnotného betónu, ktorý sa začína presadzovať aj na Slovensku. Priemerná maximálna denná teplota v danej lokalite pre mesiac júl je 25,97 °C [4]. Z toho dôvodu je referenčným časom začiatku tuhnutia betónu doba 87 min. Vypracované boli aj dva ďalšie scenáre pre teploty 20 a 30 °C (obr. 14).

Tu je potrebné zdôrazniť, že čas začiatku tuhnutia  $t_{S,i}$  nemožno stotožňovať s disponibilným časom na transport betónu  $t_T$ . Maximálny prípustný čas na transport sa vypočíta ako zostatok po odčítaní všetkých operačných časov od času tuhnutia betónu.

$$t_T = t_{S,i} - V_{\text{Mix}} - t_{\text{Fill}} - t_{\text{Site,T}} - t_{\text{Pump}} - t_{\text{Finish}} - t_{\text{Reserve}} \quad [\text{min}] \quad (1)$$

kde  $t_T$  je maximálny disponibilný čas na transport [min],  $t_{S,i}$  čas začiatku tuhnutia [min]  $\approx f(T;v/c)$ ,  $t_{\text{Mix}}$  čas miešania [min]  $\approx f(V_{\text{Mixer}}; \eta_{\text{Mixer}})$ ,  $t_{\text{Fill}}$  čas plnenia domiešavača [min]  $\approx f(V_{\text{R.M.Truck}})$ ,  $t_{\text{Site,T}}$  čas presunu po stavenisku [min]  $\approx f(S_{\text{Site}}; V_{\text{Site}})$ ,  $t_{\text{Pump}}$  čas čerpania betónu [min]  $\approx f(P_{\text{Pump}}; f(A_{\text{Con}}/V_{\text{Con}}))$ ,  $t_{\text{Finish}}$  čas spracovania betónu [min]  $\approx f(P_L; T; f(A_{\text{Con}}/V_{\text{Con}}))$ ,  $t_{\text{Reserve}}$  rezervný čas na nepredvídateľné udalosti [min],  $T$  teplota [°C],  $v/c$  vodný súčiniteľ,  $V_{\text{Mixer}}$  objem miešačky [m<sup>3</sup>],  $\eta_{\text{Mixer}}$  účinnosť miešačky pri určitom naplnení,  $V_{\text{R.M.Truck}}$  objem domiešavača,  $S_{\text{Site}}$  dopravná vzdialenosť na stavenisku,  $V_{\text{Site}}$  rýchlosť pohybu po stavenisku,  $P_{\text{Pump}}$  výkon čerpadla ČB,  $A_{\text{Con}}$  plocha horného povrchu betónovanej konštrukcie [m<sup>2</sup>],  $V_{\text{Con}}$  objem betónovanej konštrukcie [m<sup>3</sup>] a  $P_L$  produktivita práce.

## ZÁVER

O význame dôkladnej organizácie transportu čerstvého betónu sa presvedčame v každonennej stavebnej praxi. Uvedený prístup a koncept metodického postupu by po rozsiahlejšom výskume a vytvorení softwarovej aplikácie mohol slúžiť pri riadení mimostaveniskovej dopravy ČB. Po zadaní vstupných údajov týkajúcich sa zloženia ČB, teploty vzduchu ako aj miesta výroby a miesta dopravy by výrobca ČB vedel s prípustnou mierou neistoty prehlásiť, či je tento betón pri daných podmienkach schopný dopraviť na stavenisko a ak nie, aké opatrenia je nútený pri-

jať a ako sa premietnu do výslednej ceny ČB. Druhé významné uplatnenie modelu sa javí v oblasti prípravy rozsiahlych stavieb, akými sú napr. diaľnice, iné formy cestnej infraštruktúry alebo jednoducho veľké stavby s dominantným zastúpením betónových konštrukcií. Už v projektovej fáze by bolo jasné, či sú okolité betonárne schopné zásobovať stavbu (alebo jej etapu resp. časť) čerstvým betónom.

Ing. Peter Briatka

Technický a skúšobný ústav stavebný

Bratislava

e-mail: briatka.p@gmail.com

Bc. Lukáš Štefánik

Doc. Ing. Peter Makýš, PhD.

oba: Stavebná fakulta

STU Bratislava

Slovenská republika

## Literatúra:

- [1] Bajza A., Rouseková I.: Technológia betónu, Jaga, Bratislava, 2006
- [2] Juríček I.: Technológia pozemných stavieb – hrubá stavba, Jaga, Bratislava 2001
- [3] Bentz D. P.: Cement hydration: building bridges and dams at the microstructure level, Materials and structures, RILEM, 2007, pp. 397–404
- [4] Šťastný P., Sternová Z.: Modelovanie klimatických podmienok v ročnom cykle, upresnenie priemerných mesačných výpočtových teplôt, vplyv stavebných materiálov a konštrukcií na kvalitu života, úloha výskumu a vývoja štátneho programu S 00065-PPŠP-2/2003, VVÚPS-NOVA, Bratislava, 2004
- [5] STN EN 196-3: Metódy skúšania cementu  
Časť 3: Stanovenie času tuhnutia a objemovej stálosti
- [6] STN EN 1015-9 : Metódy skúšania mált na murovanie,  
Časť 9: Stanovenie času spracovateľnosti čerstvej malty a jeho spresnenie
- [7] ASTM C 191: Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
- [8] ASTM C 403M: Test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance
- [9] STN P ENV 13670-1: Zhotovovanie betónových konštrukcií,  
Časť 1: Spoločné ustanovenia
- [10] STN EN 206-1/Z1/O1 Betón,  
Časť 1: Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda. Zmena 1, Oprava 1
- [11] Schindler A. K.: Prediction of concrete setting, Dept. of CE, Auburn University, USA, 2003
- [12] Bentz D. P.: Cement hydration: building bridges and dams at the microstructure level, Materials and structures, RILEM, 2007, pp. 397–404
- [13] Schindler A. K.: Effect of temperature on hydration of cementitious materials, Technical paper, ACI Materials Journal / January-February, ACI, USA, 2004
- [14] Kim B., Weiss W. J.: Using acoustic emission to quantify damage in restrained fiber-reinforced cement mortars, Cement and Concrete Research, Volume 33, USA, 2003, pp. 207–214
- [15] Weiss W. J.: Internal Curing – Lightweight Aggregate, Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, held at Purdue University, West Lafayette, 2008