TECHNICKÝ A SKÚŠOBNÝ ÚSTAV STAVEBNÝ, n. o.
BUILDING TESTING AND RESEARCH INSTITUTE, Slovak Republic
Studená 3, 821 04 Bratislava

Pobočka Košice, Krmanova č. 5, 040 00 Košice, tel.: +421 55 6226 171, 6233 408, fax.: +421 55 6255 189
e-mail: ondik@ke.tsus.sk

OBJEMOVÉ ZMENY BETÓNU
rozborová úloha

číslo správy: 7009116

Objednávateľ: Slovenská správa ciest, Miletičova 19 , 826 19 Bratislava

Zhotoviteľ: Technický a skúšobný ústav stavebný, n.o., Studená 3, 821 04 Bratislava, pobočka Košice, Krmanova 5, 042 00 Košice

Štatutárny orgán: prof. Ing. Zuzana Sternová, PhD., riaditeľka

Splnomocnený zástupca: Ing. Slávo Ondik, riaditeľ pobočky

Zodpovedný riešiteľ: Ing. Ján Gillinger, PhD.

Košice, november 2009

Obsah

1. Cieľ 4
2. Úvod 4
3. Rozbor problematiky 4
   3.1 Vplyv zmeny vlhkosti na objemové zmeny betónu 8
   3.2 Vplyv teploty na objemové zmeny betónu 17
   3.3 Vplyv alkalicko-kremičitej reakcie na objemové zmeny betónu 30
   3.4 Vplyv síranov 32
4. Závery a odporúčania 34
5. Použitá literatúra 35
   5.1 Slovenské technické normy 35
   5.2 Technické predpisy MDPT SR 35
   5.3 Zahraničná literatúra 35

1. Cieľ

Cieľom rozborovej úlohy je na základe analýzy odbornej literatúry, predpisov a laboratórneho overovania vplyvov objemových zmien betónu navrhnúť odporúčania na zníženie rizika vzniku porúch v cementobetónových krytoch. Výsledky riešenia majú poskytnúť podklad pre doplnenie TKP časť 8 Cementobetónový kryt vozoviek.

2. Úvod

Objemové zmeny betónu majú viacero príčin. Poznanie týchto príčin je užitočné pri plánovaní betonárskych prác cementobetónového krytu vozoviek. Vzhľadom na to, že doskám cementobetónového krytu je bránené voľne zväčšovať alebo zmenšovať svoj objem vznikajú v ňom napätia, čo môže spôsobiť nebezpečné poruchy vo forme deformácií a trhlín. Nekontrolované trhliny, ktoré vznikajú už na začiatku tuhnutia majú ďalej tendenciu zväčšovať sa v dôsledku napätí od mechanického a klimatického namáhania. Preto minimalizovanie príčin objemových zmien v štádiu prípravy betonáže a na začiatku tuhnutia betónu môže predĺžiť životnosť cementobetónového krytu.

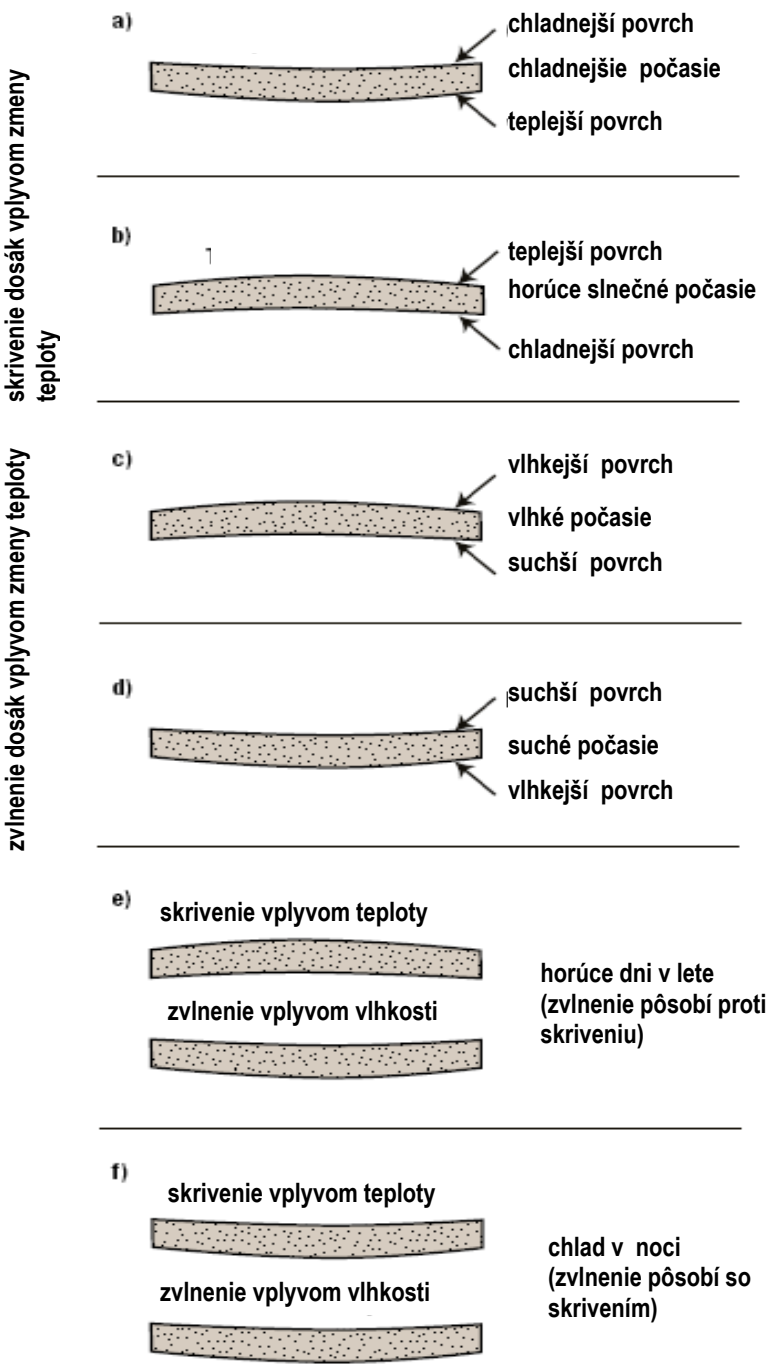
3. Rozbor problematiky

Objemové zmeny môžu byť spôsobené rôznymi faktormi ako sú napr. strata vlhkosti, zmeny teploty, vplyv chemických látok, zloženie betónu, podmienky betonáže atď.
Objemové zmeny sú definované ako zmenšenie resp. zväčšenie objemu. Pri plošných prvkoch ako sú dosky cementobetónového krytu vozoviek sa obvykle používa pojem lineárna rozťažnosť resp. zmraštenie. Vyjadruje zmenu dĺžky pripadajúcu na jednotku dĺžky (napr. 10^{-6} mm/mm), čiže výsledkom je bezrozmerné číslo v x 10^{-6}. Výsledkom niektorých skúšobných metód na meranie objemových zmien môže byť aj hodnota v %.
Najviac vplývajú na rozťažnosť resp. zmrašťovanie betónu zmeny vlhkosti a teploty. Nezanedbateľný je aj vplyv chemických látok ako napr. sírany alebo alkálie.
Zmraštenie betónu v kryte vozovky vplyvom poklesu teploty 22 ºC môže byť v rozsahu od 140 x 10^{-3} do 350 x 10^{-3}. Zmrašťovanie stratou vlhkosti môže dosahovať hodnoty významne vyššie od 400 do 800 x 10^{-3} , ale dosiahnutie takejto úrovne zmraštenia bude trvať niekoľko mesiacov.
Objemové zmeny betónu môžu spôsobiť skrivenie (angl. curling) a zvlnenie (angl. warping) dosák CB krytu.

Skrivenie je spôsobené rozdielmi v teplotách medzi horným a spodným okrajom dosky.
Počas chladného počasia (napr. v noci alebo pri náhlom ochladení) horný povrch dosák sa ochladí oveľa rýchlejšie ako izolovaný spodný povrch dosák, čo spôsobuje skrivenie okrajov dosák (pozri obrázok 1a). Počas horúceho počasia (počas dňa), sa horný povrch dosák zohrieva viac ako ich spodný povrch, čo má za následok skrivenie dosák opačným smerom (pozri obrázok 1b) [12].

Zvlnenie dosák je spôsobené rozdielom vlhkosti medzi horným a spodným povrchom dosky. Počas chladného a vlhkého počasia (napr. v noci) spodný povrch dosky môže byť suchší, ako horný povrch. Spodný povrch dosky sa preto zmraští rýchlejšie ako horný povrch, čo spôsobí zvlnenie dosák smerom dole (pozri obrázok 1c). Počas horúceho, suchého počasia horný povrch dosák vysušuje a zmrašťuje, zatiaľ čo spodný povrch zostáva vlhký, čo má za následok zvlnenie opačným smerom (pozri obrázok 1d).

Skrivenie a zvlnenie dosák sa môže vzájomne kompenzovať alebo umocňovať. Počas letných dní môže zvlnenie pôsobiť proti skriveniu (pozri obrázok 1e). Počas letných nocí sa môže účinok zvlnenia spojiť s účinkom skrivenia (pozri obrázok 1f).
Pri vysychaní a chladnutí povrchu sa hrany dosák v miestach spojov ohýbajú smerom dohora. Ohnuté hrany potom tvoria konzolu zaťažovanú dopravou. Kolesá vozidiel prechádzajúce spojmi spôsobujú ďalšie deformácie hrán a následne únavové trhliny.



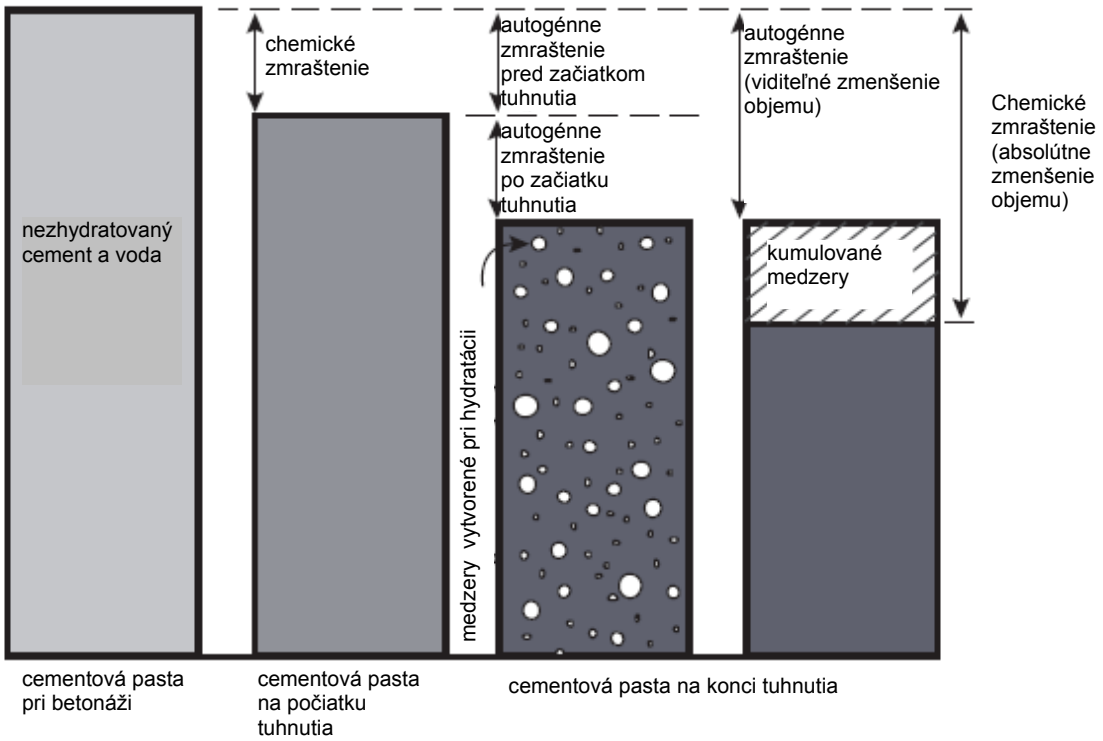
Obrázok 1 Skrivenie a zvlnenie dosák
(Federal Highway Administration 2007)

Čerstvý betón po namiešaní má tendenciu zmrašťovať sa v dôsledku viacerých faktorov.
Hneď po položení sa betón začína zmrašťovať v dôsledku chemických reakcií a straty vlhkosti.

Chemické zmrašťovanie sa vzťahuje na zmenšenie absolútneho objemu pevných častíc a kvapalín v paste následkom hydratácie. Absolútny objem produktov hydratovaného cementu je menší ako absolútny objem cementu a vody pred hydratáciou. Táto zmena objemu cementovej pasty počas plastického štádia, znázornená na prvých dvoch stĺpcoch obrázka 2 nezahŕňa vzduchové bubliny vzniknuté pri miešaní. Chemické zmrašťovanie ďalej pokračuje v mikroskopickom meradle pokiaľ

cement hydratuje. Po začiatku tuhnutia sa už pasta nemôže deformovať tak, ako keď bola v plastickom stave. Preto sa ďalšia hydratácia a chemické zmrašťovanie v betóne kompenzuje tvorbou medzier v jeho mikroštruktúre (pozri obr. 2). Tieto objemové zmeny sú obvykle takého rozsahu, že vizuálne nie je možné pozorovať zmenu rozmerov betónového prvku.

Autogénne zmrašťovanie predstavuje rozsah chemického zmraštenia, ktorý je možné odmerať na skúšobnej vzorke. Autogénne zmrašťovanie je makroskopické zmenšenie objemu (viditeľná zmena rozmerov), spôsobená hydratáciou cementu. Autogénne zmrašťovanie nie je obvykle významné v betónoch s vodným súčiniteľom nad 0,4. Betón sa zmrašťuje stratou vody, najmä vyparovaním. Chemické a autogénne zmrašťovanie je znázornené na obrázku 2.



Obrázok 2 Chemické a autogénne zmrašťovanie čerstvej a tuhnúcej cementovej pasty (nie je v mierke)

Plastické zmrašťovanie vzniká úbytkom vlhkosti z povrchu čerstvého betónu pred začiatkom jeho tuhnutia. V praxi je viditeľné vo forme plastických zmrašťovacích trhlín, ktoré sa tvoria pred alebo počas rozprestierania (pozri obrázok 3). Plastické zmrašťovanie je dôsledkom chemického a autogénneho zmrašťovania a rýchleho vyparovania vlhkosti z povrchu, ktoré je rýchlejšie ako vylučovanie vody z povrchu betónu. Aj keď rýchlosť vylučovania vody z povrchu betónu závisí od viacerých vlastností betónu a jeho vstupných materiálov, pravdepodobne najväčší vplyv na vylučovanie vody má vodný súčiniteľ. Na obrázku 4 je znázornený vplyv vodného súčiniteľa na rýchlosť vylučovania vody z povrchu betónu.

Táto závislosť je približne lineárna. Rýchlosť vylučovania vody je možné stanoviť empiricky na základe vodného súčiniteľa podľa nasledovného vzťahu:

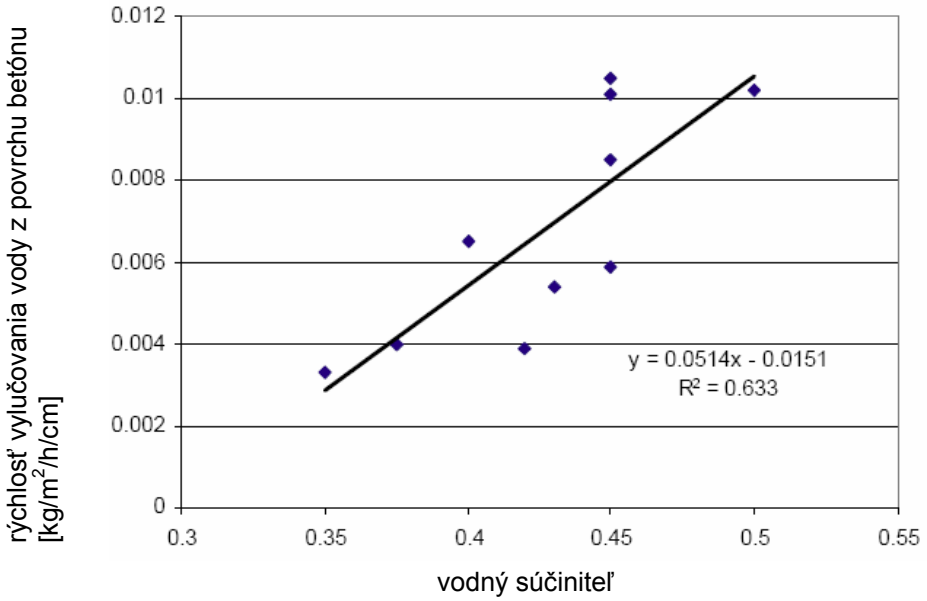
Rýchlosť vylučovania vody z povrchu betónovej vrstvy $= (0{,}051 \times \frac{w}{c} - 0{,}015)xh$ (1)

kde: w je množstvo zámesovej vody [$kg.m^{-3}$],
c množstvo cementu v [$kg.m^{-3}$],
h hrúbka vrstvy v [cm].

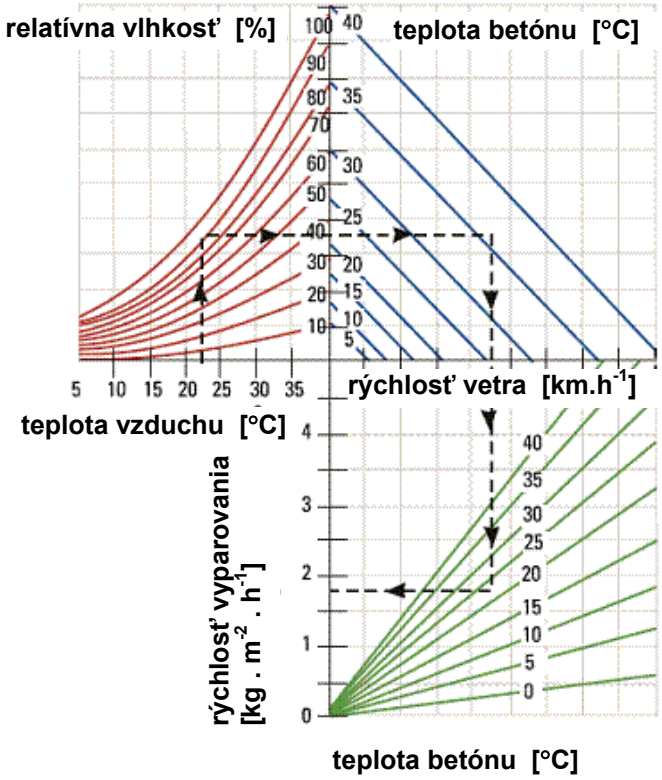
Priemerná rýchlosť vylučovania vody 30 cm hrubej betónovej vrstvy môže byť v rozsahu od 0,13 $kg.m^{-2}.h^{-1}$ do 0,28 $kg.m^{-2}.h^{-1}$ v závislosti od vodného súčiniteľa.

Rýchlosť vyparovania závisí od teploty vzduchu, teploty betónu, relatívnej vlhkosti a rýchlosti vetra. V TKP časť 8 [8] sú podmienky na kladenie a ošetrovanie definované len na základe teploty vzduchu a betónu. Na základe poznatkov zhrnutých v literatúre [19] je však potrebné na stanovenie podmienok kladenia a ošetrovania zohľadniť aj vlhkosť vzduchu a najmä rýchlosť vetra, ktorý môže výrazne prispieť k vzniku plastických trhlín. Rýchlosť vyparovania je možné zistiť podľa nomogramu na obrázku 5. Odporúčané medzné hodnoty rýchlosti vyparovania na kladenie a ošetrovanie betónu na predchádzanie trhlín od plastického zmrašťovania sú uvedené v časti 4. Závery a odporúčania.

Obrázok 3 Trhlina od plastického zmrašťovania čerstvého betónu.



Obrázok 4 Závislosť rýchlosti vylučovania vody z povrchu betónu od vodného súčiniteľa pripadajúca na jednotku hrúbky betónu (Federal Highway Administration 2006)

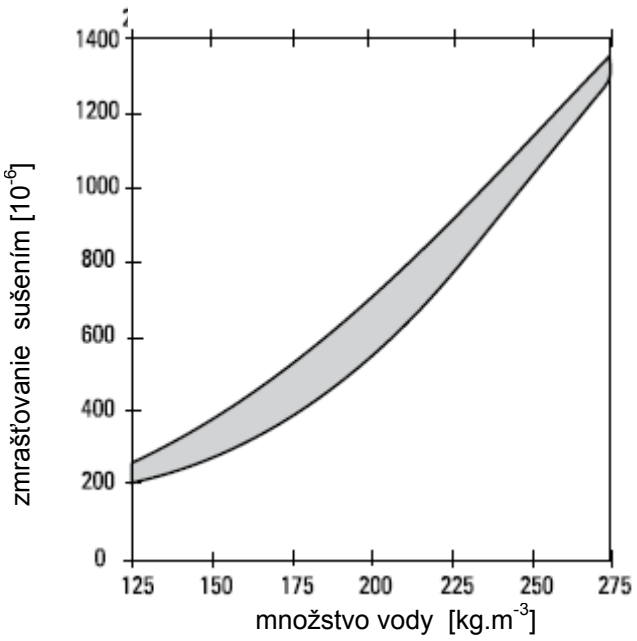


Obrázok 5 Nomogram na stanovenie rýchlosti vyparovania vody z povrchu betónu (Portland Cement Association 2004)

Zmrašťovanie sušením vzniká po začiatku tuhnutia. Ak sa obmedzí zmrašťovanie v tejto fáze, vznikajú trhliny. Najdôležitejším faktorom, ktorým je možné obmedziť zmrašťovanie sušením je množstvo vody pripadajúce na jednotku objemu v betóne.

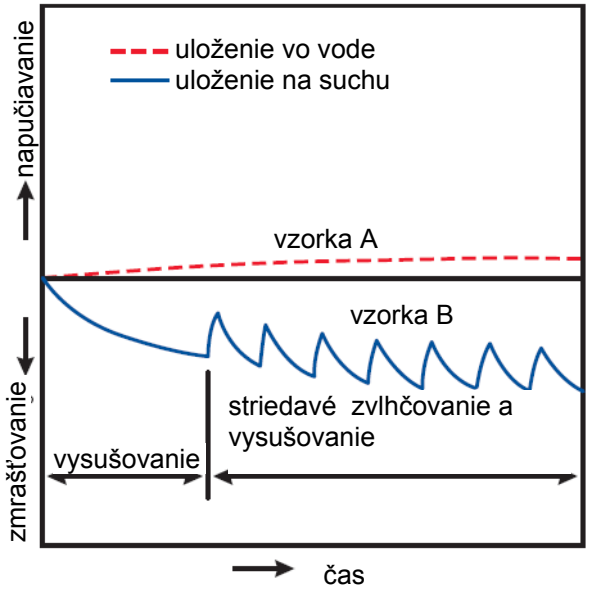
3.1 Vplyv zmeny vlhkosti na objemové zmeny betónu

Zmrašťovanie sušením narastá s rastúcim množstvom zámesovej vody. Na obrázku 6 je znázornený vplyv množstva vody na zmrašťovanie sušením. Celkové zmrašťenie je možné minimalizovať, ak bude obsah vody (alebo cementovej pasty) v betóne čo najmenší. Čím vyšší je obsah cementu v betóne, tým väčší bude rozsah zmraštenia. S vyšším vodným súčiniteľom sa znižuje pevnosť a tuhosť pasty, čo môže viesť k zvyšovaniu zmrašťovania. Množstvo pasty v betóne sa dá minimalizovať ak obsah hrubého kameniva v betóne bude čo najväčší pri dosiahnutí spracovateľnosti a minimalizácii segregácie.



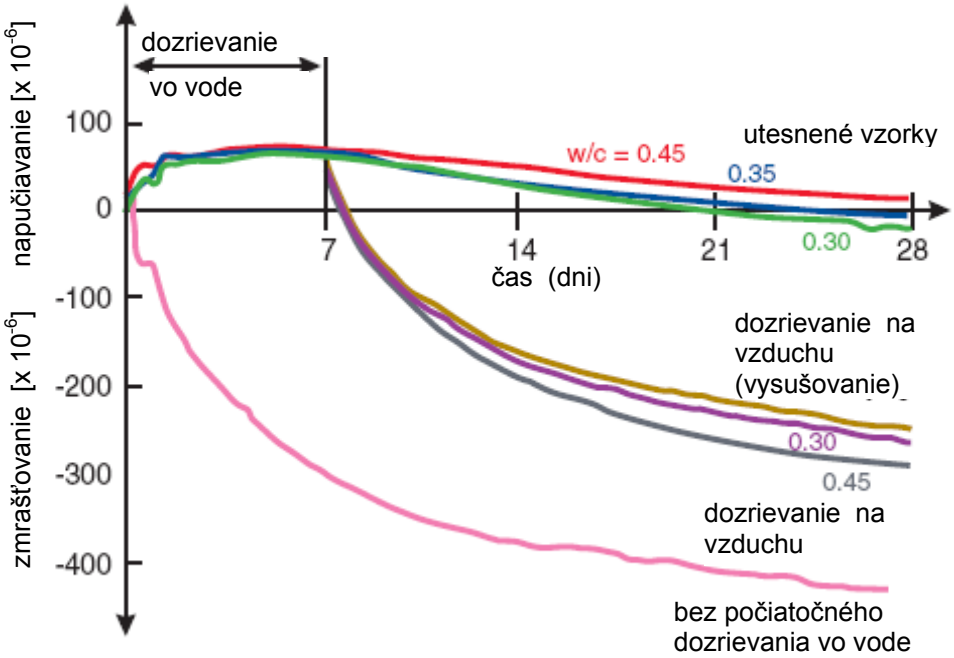
Obrázok 6 Závislosť celkového množstva vody v betónovej zmesi na zmrašťovanie sušením. Vyznačená oblasť znázorňuje viacero zmesí s rôznym dávkovaním jednotlivých zložiek. (Portland Cement Association)

Zatvrdnutý betón sa mierne rozpína pri zvyšovaní vlhkosti a zmrašťuje pri znižovaní vlhkosti. Účinok týchto cyklov je znázornený na obrázku 7. Zväčšenie objemu pri dlhodobom uložení vo vode niekoľko rokov je 4 krát menšie ako zmraštenie betónu uloženom v suchom prostredí.

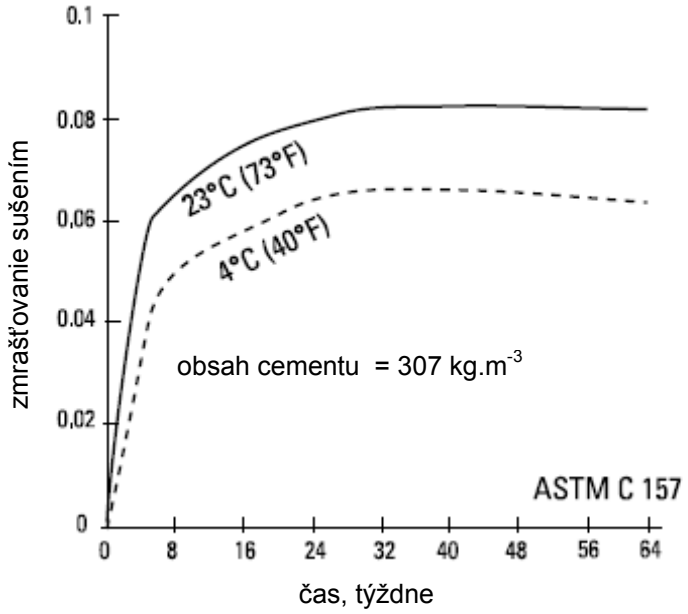


Obrázok 7 Schematické znázornenie objemových zmien vplyvom vlhkosti (Roper 1960)

Na obrázku 8 je znázornené napučiavanie betónových skúšobných telies s rôznym vodným súčiniteľom *w*, dozrievaných v rôznych prostrediach. Betóny dozrievané vo vlhkom prostredí 7 dní dosahujú nižšie hodnoty zmraštenia než betón, ktorý dozrieva na suchu.



Obrázok 8 Zmena dĺžky betónových vzoriek s rôznym vodným súčiniteľom pri rôznych spôsoboch dozrievania (Aítcin 1999)



Obrázok 9 Vplyv ošetrovania na zmrašťovanie sušením betónových skúšobných trámčekov (Gebler, Klieger 1986)

Betóny s vyšším obsahom kameniva sa zmrašťujú menej ako betóny s nižším obsahom kameniva. Betóny s nižším maximálnym zrnom kameniva sa zmrašťujú rovnomernejšie. Druh kameniva má výraznejší vplyv na zmrašťovanie betónu ako veľkosť zŕn kameniva. Výraznejšie zmrašťovanie je možné pozorovať pri betónoch, v ktorých má kamenivo pevnosť nižšiu ako samotná cementová pasta. Obvykle tieto druhy kameniva majú aj vyššiu nasiakavosť.
Rozmery konštrukčného prvku majú tiež vplyv na zmrašťovaní sušením. Čím väčší je pomer objemu konštrukčného prvku k jeho povrchovej ploche, tým menšie je zmrašťovanie sušením. Keďže

povrchová plocha je pri cementobetónových krytoch v porovnaní s inými prvkami väčšia, bude aj zmrašťovanie sušením dosahovať vyššie hodnoty.

Overovanie zmrašťovania sušením podľa STN EN 1367- 4 v TSÚS , n.o., pobočke Košice

Na posúdenie vplyvu kameniva na zmrašťovanie sušením betónu platí metóda v STN EN 1367- 4. Vzhľadom na to, že sú v tomto skúšobnom postupe pomerne úzko vymedzené požiadavky na čiaru zrnitosti a zloženie zmesi, je ho možné účelne využiť na hodnotenie kameniva z rôznych lokalít a hornín. Na základe tejto metódy boli v TSÚS, n. o., pobočke Košice posúdené rôzne druhy kameniva. Pri výbere lokalít, v ktorých sa vyrába kamenivo sa prihliadalo na to aby:
- boli zastúpení významní producenti kameniva,
- sa vytvorila čo najväčšia druhová variabilita kameniva,
- bolo proporcionálne pokryté celé územie Slovenska.

Na obrázku 10 je znázornená mapa Slovenska s vyznačenou polohou lokalít, v ktorých sa odobrali vzorky kameniva.

Na všetkých odobratých vzorkách bola ich zrnitosť upravená takým spôsobom, aby krivka zrnitosti získanej zmesi kameniva ležala v poli ohraničenom medznými čiarami stanovenými STN EN 1367- 4 (tabuľka 1).

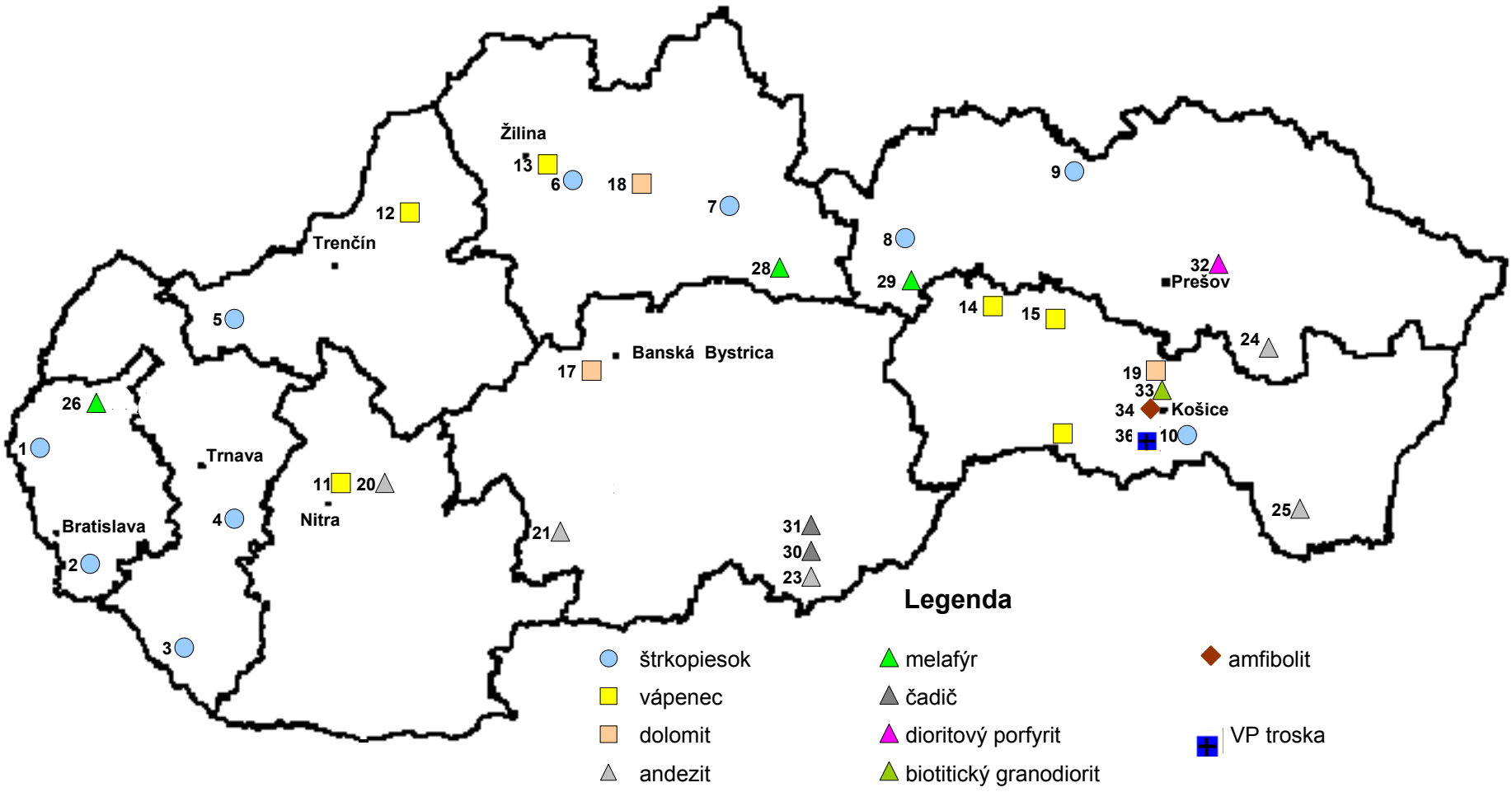
Tabuľka 1 Medzné čiary zrnitosti pre úpravu kameniva podľa STN EN 1367- 4

Veľkosť sita [mm]	Medzné hodnoty prepadov sitom		
	Spodná hranica prepadu [%]	Odporúčané % prepadu (stred)	Horná hranica prepadu [%]
20	100	100	100
16	76	82	92
14	65	69	83
12,5	60	64	78
11,2	56	60	76
10	50	55	70
8	41	46	61
5,6	32	38	52
4	26	30	43
2	20	22	33
1	14	17	25
0,5	10	12	18
0,25	5	8	12
0,125	6	2	6

Z kameniva s upravenou zrnitosťou sa vyrobili betónové trámčeky na posúdenie rozsahu objemových zmien, ktoré sú dôsledkom zmrašťovania sušením. Pri výrobe telies sa použil cement CEM I triedy 42,5, pričom hmotnostný podiel jednotlivých zložiek betónovej zmesi predpísaný STN EN 1367- 4 bol nasledovný:

cement CEM 1 trieda 42,5	550 g,
kamenivo	3300 g,
destilovaná (deionizovaná) voda	300 g.

Betónová zmes sa uložila do foriem na výrobu trámčekov s rozmermi 50 mm x 50 mm x 200 mm. V stenách formy sa osadili oceľové terčíky, ktorých väčšia časť sa zaliala betónovou zmesou.
Formy s trámčekmi a prikrytou hornou plochou sa uložili na (24 ± 2) h, pri teplote okolia (20 ± 2) ºC. Po (24 ± 2) h sa trámčeky odformovali a označili. Trámčeky sa uložili na ďalších (24 ± 2) h pri teplote okolia (20 ± 2) ºC a vlhkosti 95 %. Potom nasledovalo zrenie a nasiakavanie v časovom intervale (120 ± 2) h vo vode o teplote (20 ± 2) ºC.



Obrázok 10 Mapa Slovenska s vyznačenými lokalitami odberov jednotlivých druhov

Po ukončení tohto intervalu sa vykonalo meranie počiatočnej dĺžky mokrého trámčeka *„w“* pri teplote (20 ± 2)°C. Na meranie objemových zmien zhotovených telies sa použil číselníkový odchýlkomer s delením 0,001 mm, oceľový merací rám a invarová referenčná tyč. Merania boli urobené na pologuľových hrotoch oceľových terčíkov.
Po zmeraní počiatočnej dĺžky mokrého trámčeka sa trámčeky uložili do sušiarne na (72 ± 2) h pri teplote (110 ± 5)°C.
Následne sa trámčeky uložili do exikátora na (24 ± 2) h. Odmerala sa dĺžka suchého trámčeka *„d“* pri teplote (20 ± 2)°C tým istým spôsobom ako pri sa merala dĺžka mokrého trámčeka (pozri obrázok 11). Na suchom trámčeku sa súčasne odmerala jeho skutočná dĺžka - bez oceľových terčíkov *„l“* pri teplote (20 ± 2)°C.

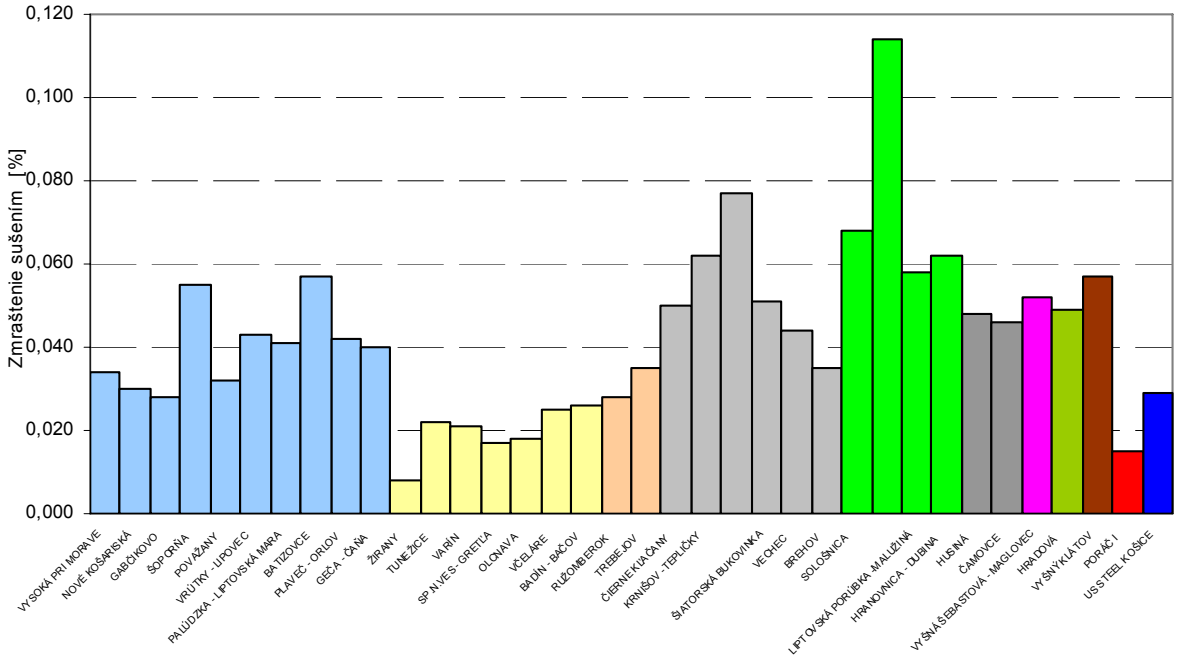
Obrázok 11 Meranie dĺžky suchého trámčeka

Na základe nameraných dĺžkových zmien jednotlivých trámčekov sa vypočítalo zmraštenie sušením *„S“* pre jednotlivé vzorky kamenív:

$$s = \frac{(w - d)}{l} \cdot 100 \qquad (2)$$

Zmraštenie sa zaznamenalo ako priemer z troch meraní na troch trámčekoch.
Vyhodnotenie skúšok zmrašťovania sušením realizovaných na betónových trámčekoch vyrobených z kameniva odobratého z jednotlivých lokalít je zhrnuté v tabuľke 2. Na obrázku 12 sú porovnané hodnoty zmrašťovania kameniva z jednotlivých lokalít.
Za účelom klasifikácie nameraných hodnôt sa posudzovali druhy kamenív rozdelené do troch dominantných skupín:
- štrkopiesky,
- karbonáty (vápence, dolomity),
- vyvreté a premenené horniny.

Zostávajúce druhy kameniva majú špecifický charakter a nie je ich možné zaradiť do žiadnej z uvedených skupín.
Priemerné hodnoty jednotlivých druhov kameniva sú uvedené v tabuľke 2.
Skupinu štrkopieskov predstavuje na obrázku 12 prvých 10 stĺpcov svetlomodrej farby. Skupina karbonátov sú stĺpce 11 až 19 svetložltej a svetlooranžovej farby. Stĺpce 20 až 34 (svetlosivá, svetlozelená, tmavosivá, ružová, zelená a hnedá farba) sú vyvreté a premenené horniny.



Obrázok 12 Zmraštenie sušením – vlastnosť kameniva stanovená na betónových trámčekoch 50 mm x 50 mm x 200 mm

Tabuľka 2 Priemerné hodnoty zmrašťovania sušením kamenív stanovené postupom podľa STN EN 1367- 4

P.č.	Lokalita	Hornina /druh	Mokré meranie "w" [mm]	Suché meranie "d" [mm]	Dĺžka suchého trámčeka "l" [mm]	Zmraštenie sušením "S" [%]	Priemer [%]
1	Vysoká pri Morave	štrkopiesok	-6,065	-6,134	200	0,034	0,034
			-6,010	-6,079	200	0,035	
			-6,488	-6,554	200	0,033	
2	Nové Košariská	štrkopiesok	-5,925	-5,982	200	0,029	0,030
			-5,764	-5,831	200	0,033	
			-5,903	-5,961	200	0,029	
3	Gabčíkovo	štrkopiesok	-5,981	-6,041	200	0,030	0,028
			-6,069	-6,119	200	0,025	
			-6,047	-6,104	200	0,028	
4	Šoporňa	štrkopiesok	-5,255	-5,365	200	0,055	0,055
			-5,667	-5,783	200	0,058	
			-4,787	-4,892	200	0,053	
5	Považany	štrkopiesok	-5,915	-5,976	200	0,031	0,032
			-5,952	-6,019	200	0,034	
			-5,987	-6,053	200	0,033	
6	Vrútky – Lipovec	štrkopiesok	-5,940	-6,027	200	0,043	0,043
			-6,006	-6,088	200	0,041	
			-5,935	-6,021	200	0,043	
7	Palúdzka – Liptovská Mara	štrkopiesok	-6,036	-6,117	200	0,041	0,041
			-6,085	-6,169	200	0,042	
			-5,957	-6,038	200	0,040	
8	Batizovce	štrkopiesok	-6,138	-6,252	200	0,057	0,057
			-6,158	-6,277	200	0,059	
			-6,282	-6,390	200	0,054	
9	Plaveč – Orlov	štrkopiesok	-6,052	-6,137	200	0,042	0,042
			-6,091	-6,172	200	0,041	
			-6,010	-6,095	200	0,042	
10	Geča – Čaňa	štrkopiesok	-6,012	-6,083	200	0,036	0,040
			-5,942	-6,030	200	0,044	
			-6,084	-6,164	200	0,040	
11	Žírany	vápenec	-6,169	-6,183	200	0,007	0,008
			-6,053	-6,071	200	0,009	
			-6,082	-6,099	200	0,009	
12	Tumežice	kremičitý vápenec kremičitý	-5,919	-5,961	200	0,021	0,022
			-5,919	-5,964	200	0,023	
			-5,932	-5,977	200	0,023	
13	Varín	dolomitický vápenec	-6,089	-6,127	200	0,019	0,021
			-6,041	-6,086	200	0,023	
			-5,974	-6,016	200	0,021	
14	Sp. Nová Ves – Gretľa	vápenec	-5,789	-5,826	200	0,019	0,017
			-5,820	-5,851	200	0,016	
			-5,649	-5,684	200	0,018	
15	Olcnava	vápenec	-4,643	-4,682	200	0,020	0,018
			-5,263	-5,298	200	0,017	
			-5,204	-5,239	200	0,018	
16	Včeláre	vápenec	-6,332	-6,386	200	0,027	0,025
			-6,122	-6,171	200	0,025	
			-6,183	-6,229	200	0,023	
17	Badín – Bačov	vápenec	-6,033	-6,085	200	0,026	0,026
			-6,091	-6,142	200	0,026	
			-6,218	-6,271	200	0,027	
18	Ružomberok	dolomit	-5,916	-5,972	200	0,028	0,028
			-6,444	-6,494	200	0,025	
			-6,033	-6,094	200	0,030	
19	Trebejov	dolomit	-5,915	-5,989	200	0,037	0,035
			-5,896	-5,963	200	0,034	
			-5,851	-5,921	200	0,035	
20	Čierne Kľačany	andezit	-5,688	-5,787	200	0,050	0,050
			-5,288	-5,388	200	0,050	
			-5,362	-5,460	200	0,049	

Pokračovanie tabuľky 2

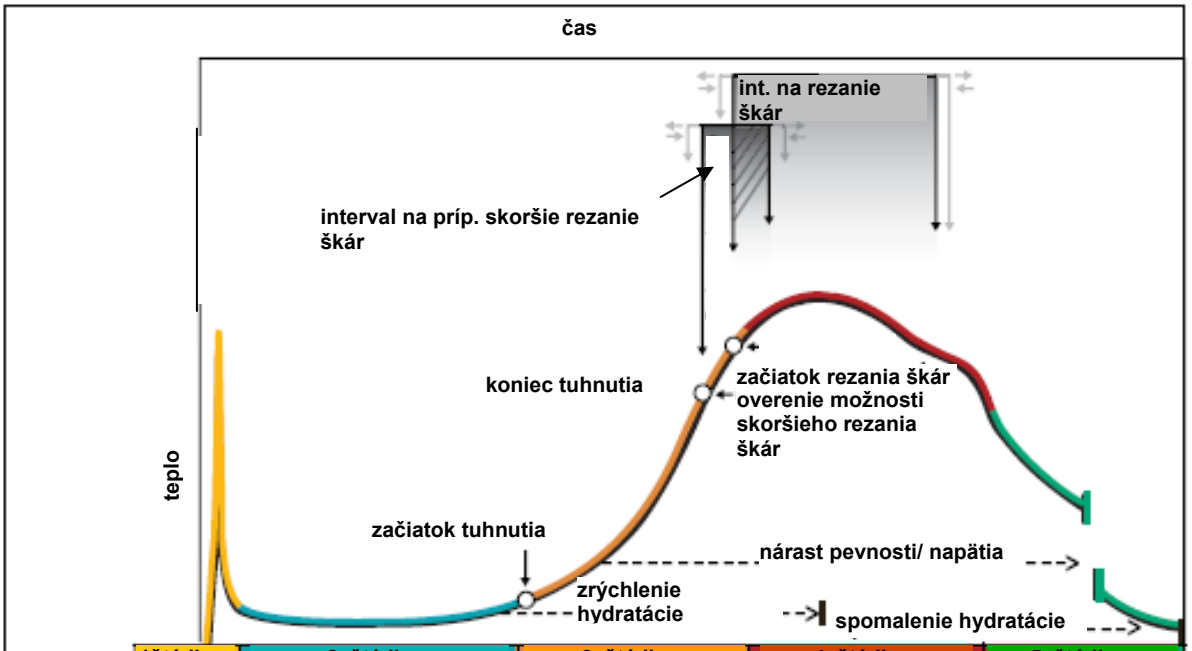
P.č.	Lokalita	Hornina /druh	Mokré meranie "w" [mm]	Suché meranie "d" [mm]	Dĺžka suchého trámčeka "l" [mm]	Zmraštenie sušením "S" [%]	Priemer [%]
21	Krnišov - Tepličky	andezit	-5,908	-6,033	200	0,062	0,062
			-5,937	-6,056	200	0,059	
			-5,940	-6,066	200	0,063	
22	nezverejnená	andezit	-5,977	-6,131	200	0,077	0,077
			-6,270	-6,422	200	0,076	
			-8,342	-8,495	200	0,077	
23	Šiatorská Bukovinka	andezit	-5,937	-6,039	200	0,051	0,051
			-6,675	-6,782	200	0,054	
			-6,114	-6,213	200	0,050	
24	Vechec	pyroxenický andezit	-6,140	-6,224	200	0,042	0,044
			-6,084	-6,173	200	0,045	
			-6,038	-6,127	200	0,044	
25	Brehov	andezit	-5,660	-5,726	200	0,033	0,035
			-5,628	-5,700	200	0,036	
			-5,542	-5,615	200	0,036	
26	Sološnica	melafýr	-5,984	-6,129	200	0,072	0,068
			-6,020	-6,150	200	0,065	
			-5,971	-6,102	200	0,066	
27	nezverejnená	melafýr	-5,809	-6,034	200	0,113	0,114
			-5,953	-6,185	200	0,116	
			-5,994	-6,218	200	0,112	
28	Liptovská Mara - Malužiná	melafýrový porfyrit	-5,931	-6,052	200	0,060	0,058
			-6,002	-6,116	200	0,057	
			-5,984	-6,096	200	0,056	
29	Hranovnica - Dubina	melafýr	-5,857	-5,983	200	0,063	0,062
			-5,859	-5,987	200	0,064	
			-5,798	-5,918	200	0,060	
30	Husiná	čadič	-5,959	-6,051	200	0,046	0,048
			-5,894	-5,987	200	0,047	
			-5,986	-6,086	200	0,050	
31	Čamovce	čadič	-6,045	-6,135	200	0,045	0,046
			-6,010	-6,104	200	0,047	
			-6,024	-6,116	200	0,046	
32	Vyšná Šebastová – Maglovec	dioritový porfyrit	-5,975	-6,080	200	0,053	0,052
			-6,006	-6,109	200	0,052	
			-5,987	-6,089	200	0,051	
33	Košice - Hradová	granodiorit	0,052	0,052	0,052	0,052	0,049
			0,052	0,052	0,052	0,052	
			0,052	0,052	0,052	0,052	
34	Vyšný Klatov	Amfibolit	-6,073	-6,185	200	0,056	0,057
			-6,152	-6,267	200	0,058	
			-6,095	-6,212	200	0,059	
35	U.S. Steel Košice	VP troska	-5,882	-5,944	200	0,031	0,029
			-2,038	-2,094	200	0,028	
			-5,979	-6,037	200	0,029	

Priemerná hodnota štrkopieskov predstavuje približne polovicu limitnej hodnoty 0,075 % stanovenej STN EN 12620, pričom ani maximálna nameraná hodnota v rámci tejto skupiny nepresahuje toto kritérium. Zaujímavým zistením je, že aj napriek pestrosti petrografického zloženia, sú percentuálne odchýlky od priemeru v rámci posudzovaných skupín najnižšie.
Priemerná hodnota skupiny karbonátov je najnižšia a je pod úrovňou jednej tretiny z vyššie uvedenej limitnej hodnoty a aj maximálna hodnota je menšia ako polovica limitnej hodnoty. Napriek značne príbuznému zloženiu v skupine zastúpených kamenív sú percentuálne odchýlky väčšie ako pri štrkopiesku.
Petrograficky pestrá je aj skupina vyvretých a premenených hornín. Priemerná hodnota zmrašťovania sa už výraznejšie približuje limitnej hodnote. Jedna lokalita andezitového a jedna lokalita melafýrového kameniva prekročili limitnú hodnotu. Ďalšie 3 lokality spomedzi vyvretých a premenených hornín prekročili hodnotu 0,060 % a sú blízko limitnej hodnoty. Dve nezačlenené kamenivá dosiahli hodnoty pod úrovňou jednej tretiny limitnej hodnoty a sú taktiež pod úrovňou priemernej hodnoty celého hodnoteného súboru, ktorá je 0,042 %.
Aj keď väčšina overovaných lokalít kameniva vyhovela požiadavke STN EN 12620 na maximálnu hodnotu zmrašťovania sušením, overovanie naznačilo riziká prekročenia prahovej hodnoty pri niektorých druhov kamenív a z toho vyplývajúcu potrebu overovania tejto vlastnosti pre každú zmes, ktorá má byť použitá v CB kryte.

3.2 Vplyv teploty na objemové zmeny betónu

Reakcia cementu s vodou (hydratácia) v betónoch generuje teplo. Sledovanie teploty je preto užitočným nástrojom na posúdenie stupňa hydratácie betónu. Teplota betónu bude mať vplyv na rýchlosť hydratácie (vývoj pevnosti) a riziko vzniku trhlín. Na obrázku 13 je znázornený vývoj tepla v závislosti na čase, s tým súvisiaca zmena vlastností a opatrenia počas stavebných prác na minimalizáciu negatívnych dôsledkov objemových zmien v jednotlivých štádiách hydratácie betónu CB vozovky.
Pre minimalizáciu rizika vzniku trhlín v CB kryte je praktické poznať hydratačné teplo betónov, ktoré majú byť položené v kryte. Vývoj tepla od hydratácie v betóne je možné merať priamo kalibrovaným kalorimetrom.
Skutočný nárast teploty v CB kryte sa bude odlišovať od adiabatického[1)] nárastu teploty kvôli vysokému pomeru plochy k objemu CB krytu, ktorý umožňuje pri určitých poveternostných podmienkach priebežne unikať teplu súčasne pri jeho generovaní.
Okolité prostredie môže predstavovať teda dodatočný zdroj tepla alebo naopak ochladzovať hydratujúci betón.

[1)] POZNÁMKA. - adiabatický nárast teploty betónu – nárast teploty bez vplyvu okolitého prostredia



	1štádium	2. štádium	3. štádium	4. štádium	5. štádium
	miešanie	latentný stav	tvrdnutie	chladnutie	zvyš. hustoty
trvanie	cca 15 minút	cca 2- 4 hodiny	cca 2- 4 hodiny		roky
vlastnosti betónovej zmesi	okamžitý rýchly nárast teploty a rýchle chladnutie	zmes ja plastická, spracovateľná a nepatrným vývojom tepla	• hydratácia generuje v zmesi významné teplo • zmes začína tuhnúť , tvrdnúť a zvyšuje sa jej pevnosť • začiatok vzniku napätí	• Napätia presiahnu pevnosť betónu , ak nenastane uvoľnenie napätia	• Nárast pevnosti a vodonepriepustnosti dosák
čo je potrebné dodržať pri stavebných prácach na dosiah. trvanlivosti CB krytu	dôkladná homogenizácia komponentov na dosiah. trvanlivosti	doprava, rozprestieranie a zhutňovanie betónovej zmesi pokiaľ je plastická a spracovateľná	• začať rezanie škár hneď ako je to možné • dôkladne naniesť na povrch povlak na ochranu betónu pred vysušovaním	• Rezanie škár na uvoľnenie narastajúceho napätia	• izolovanie dosky pri očakávanom náhlom a významnom ochladení počasia • čo najdlhšia ochrana povlaku pred poškodením

Obrázok 13 Vývoj tepla v betóne, zmena jeho vlastností a opatrenia počas stavebných prác na minimalizáciu negatívnych dôsledkov objemových zmien v jednotlivých štádiách hydratácie betónu CB vozovky (Federal Highway Association 2007)

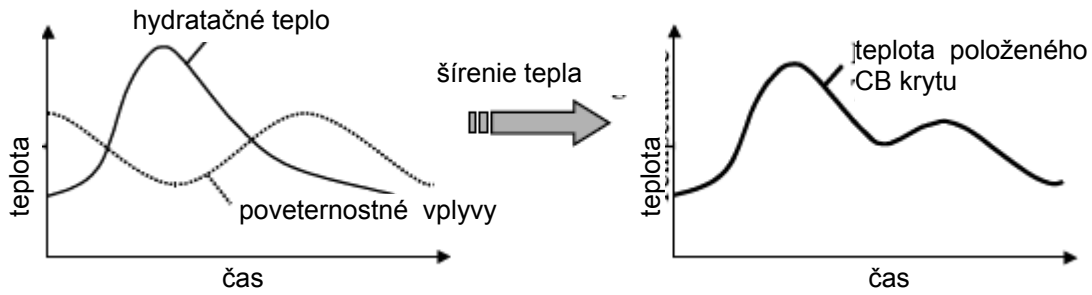
Optimálna teplota pre kladenie betónovej zmesi je od 10 °C do 15 °C. Teplota pri kladení zmesi by nemala presiahnuť 30 °C až 33 °C [12]. Medzi problémy súvisiace s vysokou teplotou betónu patria:

- potreba vyššieho množstva vody na zachovanie požadovanej spracovateľnosti,
- kratší čas tuhnutia,
- vyššie riziko tvorby plastických trhlín,
- zhoršenie efektívnosti systému medzier v betóne,
- vyššie riziko nekompatibility vstupných materiálov (prejavujúce sa neočakávanými zmenami v tuhnutí a vytvrdnutí),
- nižšia konečná pevnosť.

Pri kladení betónovej zmesi počas chladného obdobia je hlavným nebezpečenstvom to, že nízke teploty môžu spomaliť hydratáciu betónu a tým spomaliť nárast pevnosti. V extrémnom prípade, ak klesnú teploty pod bod mrazu počas tuhnutia betónu, môže nastať trvalé poškodenie cemento-betónového krytu.

Hydratácia betónu sa významne zrýchľuje pri vysokých teplotách a spomaľuje pri nízkych teplotách. Pri vysokých teplotách dochádza k predčasnému tuhnutiu, čo má vplyv na kladenie, rozprestieranie a zhutňovanie betónovej zmesi a načasovaniu rezania škár. Pri vyšších teplotách dosiahne betón vyššiu počiatočnú pevnosť, ale neskoršie môže dosahovať nižšie hodnoty ako betón s rovnakým zložením udržiavaný pri nižších teplotách. Všetky chemické reakcie sa pri vyšších teplotách urýchlia. S vyššou teplotou betónu sa skráti aj čas tuhnutia. Pri zvýšenej teplote vzniká nerovnováha v cementovej paste a môže dôjsť k neočakávanému tuhnutiu zmesi ešte pred jej zhutnením. Pridaním dodatočného množstva vody sa síce zlepší spracovateľnosť zmesi, ale na úkor zníženia konečnej pevnosti a trvanlivosti betónu.
Betón sa rozťahuje pri zvyšovaní teploty a zmrašťuje pri jej poklese. Tieto pohyby môžu výrazne prispieť k riziku vzniku trhlín, najmä počas 24 hodín od namiešania zmesi.
Ak betón začne tuhnúť pokiaľ je jeho teplota vysoká, potom sa výrazne zmraští pri neskoršom ochladení, čím sa výrazne zvýši riziko vzniku trhlín. Ak prejde studená vlna počasia miestom, kde bola betónová zmes položená uprostred horúceho dňa, riziko vzniku trhlín je väčšie pretože pokles teploty je vysoký.
Ochladzovanie betónovej zmesi po jej položení je ovplyvnené hrúbkou betónu, teplotou okolia. V tenších vrstvách bude nižšia teplota ako v hrubších.
Objemová zmena betónu vplyvom teploty je jedným z faktorov, ktoré je potrebné zohľadniť pri dimenzovaní cementobetónových vozoviek. Táto zmena rozmerov je charakterizovaná súčiniteľom (lineárnej) teplotnej rozťažnosti, ktorý predstavuje pomernú zmenu dĺžky v mikrónoch pripadajúcu na 1 ºC. Teplotná rozťažnosť a zmrašťovanie betónu závisí od typu kameniva, obsahu cementu, vodného súčiniteľa, rozsahu teplôt ktorým je betón vystavený, veku betónu a relatívnej vlhkosti. Z týchto faktorov má najväčší vplyv kamenivo, ktoré tvorí 60 % až 75 % objemu.
Kamenivo z vápencových hornín má obvykle nižší súčiniteľ teplotnej rozťažnosti ako kamenivo z kremičitých hornín. Poznanie hodnôt súčiniteľa je dôležité pre dimenzovanie vozoviek a zabezpečenie trvanlivosti betónu. Priemerná hodnota súčiniteľa teplotnej rozťažnosti betónu je približne 10×10^{-6}/°C, ale môže dosahovať hodnoty od 6 to 13×10^{-6}/°C. To približne zodpovedá zmene dĺžky od 5 mm do 10 mm (cca 1,7 mm na 3,3 mm), ktorý je vystavený nárastu alebo poklesu teploty o 50 °C. Objemové zmeny vplyvom teploty sú spôsobené teplom od hydratácie a klimatickými (poveternostnými) podmienkami.
Problematike objemových zmien betónu (rozťažnosti a skracovaniu) vplyvom teploty sa dlhodobo venuje veľká pozornosť najmä v USA v rámci výskumného programu NCHRP (National Cooperative Highway Research Program).
Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti bol overovaný na stovkách vývrtov z pokusných úsekov vozoviek realizovaných v rámci programu LTPP (Long-Term Pavement Performance) metódou AASHTO TP 60. Zistilo sa, že najväčší vplyv na súčiniteľ teplotnej rozťažnosti mal vplyv použitého hrubého kameniva. Napr. betóny z kremičitého štrkopiesku mali priemernú hodnotu 12, z granitu 7,5, z čadiča 6,5 a vápenca 5.10^{-5} /ºC. Vzhľadom na dôležitosť tohto parametra, ale aj jeho variabilitu sa v novej návrhovej metodike [14] uvažuje s laboratórne stanovenou hodnotou súčiniteľa zmesi, ktorá bude použitá na stavbe, pokiaľ nebude k dispozícii dostatočný súbor hodnôt pre spoľahlivú a dostatočne presnú klasifikáciu tohto parametra podľa zloženia zmesi. Ukázalo sa, že súčiniteľ teplotnej rozťažnosti je mimoriadne dôležitý faktor najmä ak sa vozovka betónuje v letnom období. Pri takýchto podmienkach cementobetónový kryt s vysokým súčiniteľom teplotnej rozťažnosti je náchylnejší na vznik trhlín (najmä v čase tuhnutia betónu) v porovnaní s cementobetónovým krytom s nízkym súčiniteľom teplotnej rozťažnosti. Tieto poznatky boli zakomponované do softvéru HIPERPAV II[2)], ktorý bol vyvinutý v rámci programu FHWA[3)]. Softvérom je možné analyzovať resp. predpovedať správanie sa CB krytu, už v počiatočných štádiách tuhnutia zmesi. Účelom jeho použitia je predvídať vznik trhlín v počiatočných štádiách tuhnutia, keď ešte CB kryt nie je zaťažený dopravou.
Na obrázku 14 je schematicky znázornený model predpokladaného vývoja teploty CB krytu vozovky, na základe ktorého bol vyvinutý softvér HIPERPAV [20].

[2)] POZNÁMKA.- HIPERPAV – HIgh PERformance PAVement – angl. vozovky s vysokou výkonnosťou
[3)]POZNÁMKA.- FHWA – Federal Highway Administration – angl. Federálna správa diaľnic (USA)



Zohľadnené faktory v modeli vývoja teploty v CB kryte

Hydratačné teplo	**Poveternostné vplyvy**	**Šírenie tepla**
Zloženie cementu	Teplota vzduchu	Teplota podkladu
Jemnosť mletia cementu	Rýchlosť vetra	Spôsob ošetrovania
Množstvo cementu	Relatívna vlhkosť	Materiál v podkladovej vrstve
Vodný súčiniteľ	Slnečné žiarenie	Druh kameniva
Prísady	Atmosférický tlak	Hrúbka dosky
Teplota zmesi	Oblačnosť	Farba povrchu

Obrázok 14 Prehľad hlavných faktorov zohľadnených v modeli predpokladaného vývoja teploty CB krytu počas tuhnutia betónu (Schindler 2004)

Softvérom je možné napr. stanoviť vhodný časový interval na rezanie škár alebo určiť aký vplyv bude mať zmena druhu hrubého kameniva na pravdepodobnosť výskytu trhlín.

Softvér zohľadňuje pri analýze tieto faktory:

- teplotu CB krytu,
- koeficient teplotnej rozťažnosti betónu,
- hodnotu zmrašťovania vysušovaním,
- obmedzenie pohybu dosák podkladom.

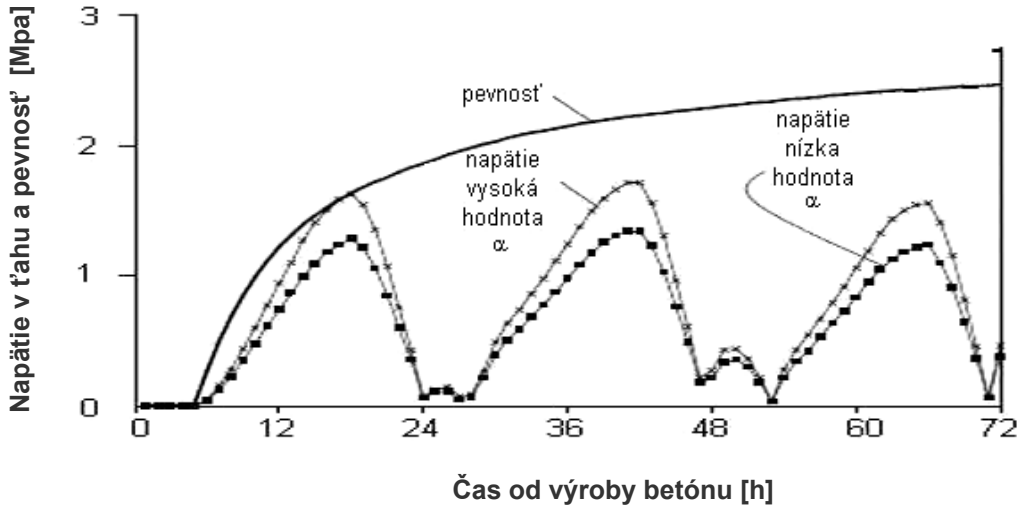
Tieto faktory sú v softvéri zohľadnené na základe numerických modelov, v ktoré využívajú tieto vstupné parametre:

- vstupy pre návrh vozovky:
  - druh podkladu,
  - trenie medzi CB krytom a podkladom (spojenie),
  - vzdialenosť priečnych škár,
  - pevnosť v ťahu,
  - modul pružnosti,
  - hrúbka dosky,
  - zloženie zmesi,
  - nárast pevnosti betónu,
  - druh spojiva,
  - množstvo spojiva,
  - chemické zloženie spojiva,
  - množstvo zámesovej vody,
  - druh a množstvo hrubého kameniva,
  - množstvo drobného kameniva,
  - množstvo plastifikátora,
  - množstvo superplastifikátora,
  - množstvo spomaľovača tuhnutia.
- poveternostné údaje:
  - teplota vzduchu,
  - relatívna vlhkosť vzduchu,
  - oblačnosť,
  - sila vetra.
- údaje o stavebných prácach:
  - spôsob ošetrovania betónu,

- čas začatia ošetrovania,
- čas ukončenia ošetrovania,
- čas vykonávania stavebných prác,
- čas na rezanie škár,
- teplota zmesi,
- počiatočná teplota podkladu.

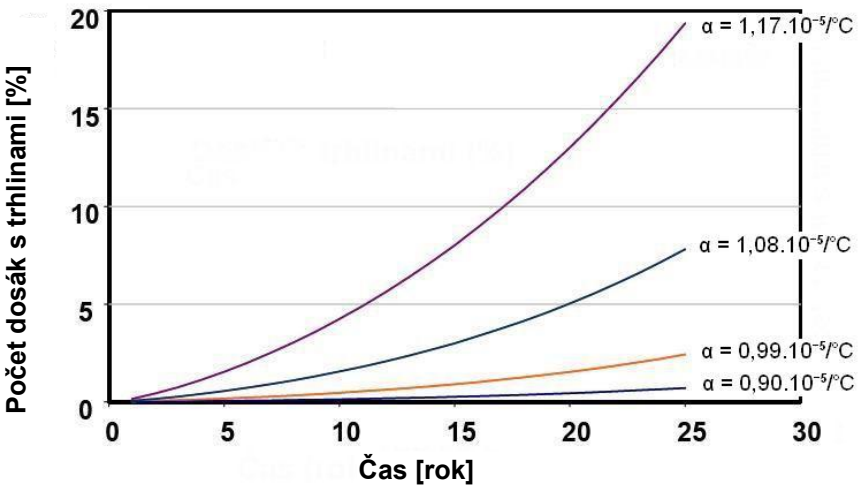
Výstupom softvéru HIPERPAV je graf s očakávaným vývojom pevnosti v betóne a predpokladaným vývojom napätia počas prvých 72 h.

Analýzu vplyvu druhu kameniva je možné programom vykonať pre konkrétne klimatické podmienky predpokladané pri kladení cementobetónového krytu, so zohľadnením teploty zmesi a podkladu. Na obrázku 15 [13] je príklad výstupu analýzy zo softvéru HIPERPAV pre betonáž v letnom období, kde je porovnaný vývoj napätí v betóne s vysokým a nízkym súčiniteľom teplotnej rozťažnosti (s rozličnými druhmi kameniva).



Obrázok 15 Porovnanie priebehu napätí v ťahu v betóne s nízkym a vysokým súčiniteľom teplotnej rozťažnosti α a pevnosti betónu pri betonáži v letnom období (Federal Highway Association 2006)

Z obrázka je zrejmé, že napätie v ťahu v betóne s vysokým súčiniteľom teplotnej rozťažnosti dosiahlo hodnotu pevnosti (riziko vzniku trhliny), zatiaľ čo v betóne s nižším súčiniteľom teplotnej rozťažnosti je evidentná rezerva v pevnosti. V cementobetónových doskách s vysokým súčiniteľom teplotnej rozťažnosti budú vznikať v priebehu životnosti vyššie napätia od teplotných zmien a budú viac náchylné na vznik únavových trhlín (pozri obr. 16) [14] .



Obrázok 16 Vývoj trhlín v CB krytoch s rôznymi súčiniteľmi teplotnej rozťažnosti v závislosti od času (Transportation Research Board 2003)

Obrázok 16 naznačuje, že výskyt trhlín sa výraznejšie zvyšuje v tých CB krytoch, kde bol použitý betón s hodnotou súčiniteľa teplotnej rozťažnosti väčšou ako 1 . 10^{-5}/ºC.
V súčasnosti nie je k dispozícii žiadna metóda v EN, ISO ani ASTM zameraná na laboratórne stanovenie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti betónu. V USA platí predpis AASHTO TP 60. Výskum v oblasti optimalizácie metódy však stále pokračuje. Podľa tejto metódy je vývrt alebo v laboratóriu vyrobené valcové teleso v nasýtenom stave (v kúpeli) vystavené teplotám od 10 °C do 50 °C. Zmena dĺžky telesa sa zaznamenáva priebežne so zmenou teploty. Vzhľadom na to, že rovnakým teplotám ako teleso je vystavený aj rám, v ktorom je uložený, je pri výpočte potrebné použiť aj korekčné súčinitele, zohľadnujúce tepelnú rozťažnosť rámu. Priebežné meranie dĺžky vyžaduje použitie lineárne premenného diferenčného snímača. Na temperovanie je potrebný pri danom rozsahu skúšobných teplôt kúpeľ s možnosťou ohrevu, ale aj chladenia. Princíp merania skúšobného telesa je znázornený na obrázku 17.
V STN EN 1770 je uvedená metóda, ktorú je možné použiť pre malty. V tejto metóde sa meria zmena dĺžky hranolov s rozmermi 40 mm x 40 mm x 160 mm pri konštantnej 60 % vlhkosti a teplotách -20 °C a + 40 °C. Z týchto hodnôt sa vypočíta súčiniteľ teplotnej rozťažnosti. Uvedená metóda nie je náročná na vybavenie laboratória.
V rade STN EN 1367 je v časti 4 uvedená metóda na stanovenie zmraštenia sušením na betónových hranoloch rozmerov 50 mm x 50 mm x 200 mm, opísaná v časti 1.1. Logické by bolo sledovať objemové zmeny vplyvom teploty na rovnakých skúšobných telesách ako zmrašťovanie sušením. Takáto metóda v tejto rade noriem zatiaľ chýba.

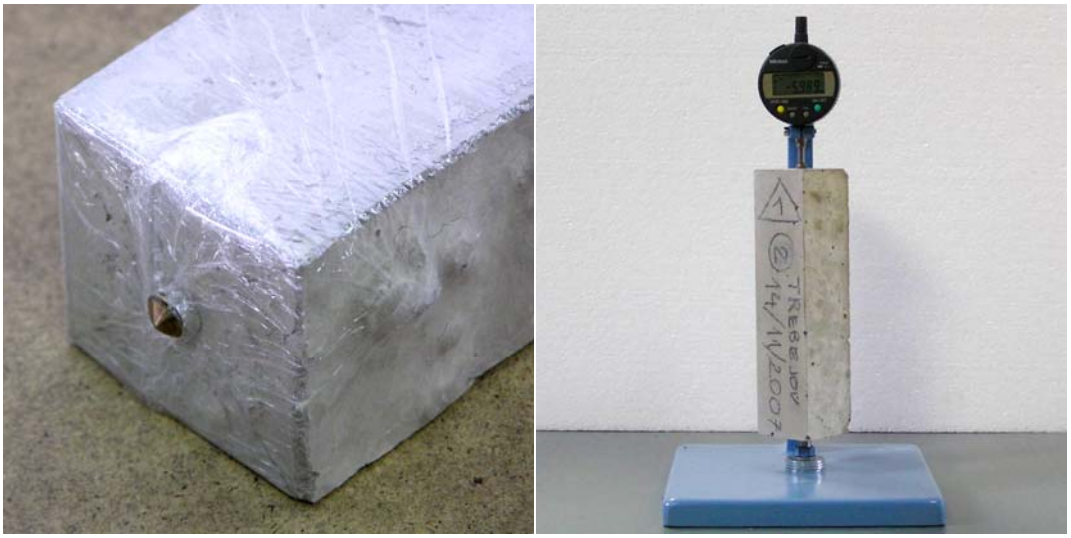
Obrázok 17 Princíp merania dĺžky valcového telesa podľa ASHTO TP 60 (Federal Highway Administration)

Overovanie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti v TSÚS, n.o., pobočke Košice

Za účelom získania prehľadu o teplotnej rozťažnosti rôznych druhov kamenív z lokalít Slovenska boli na stanovenie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti využité skúšobné telesá, na ktorých sa už merali dĺžkové zmeny vplyvom zmraštenia sušením podľa STN EN 1367-4.
Na kondiciovanie, meranie a vyhodnotenie sa použil postup podľa STN EN 1770. Skúšobné telesá boli kondiciované 7 dní pri teplote (21 ± 2) °C a vlhkosti (60 ±10) %.
Na zabezpečenie konštantnej vlhkosti počas merania dĺžky telesa pri rôznych teplotách sa telesá zabalili do plastovej fólie (pozri obr.18a). Dĺžka telesa sa merala po 5 h temperovania pri -20 °C a pri 40 °C (pozri obr.18b). Pri skúške bola na referenčnom trámčeku kontrolovaná aj teplota jadra skúšobných telies. Z nameraných hodnôt sa vypočítal súčiniteľ teplotnej rozťažnosti:

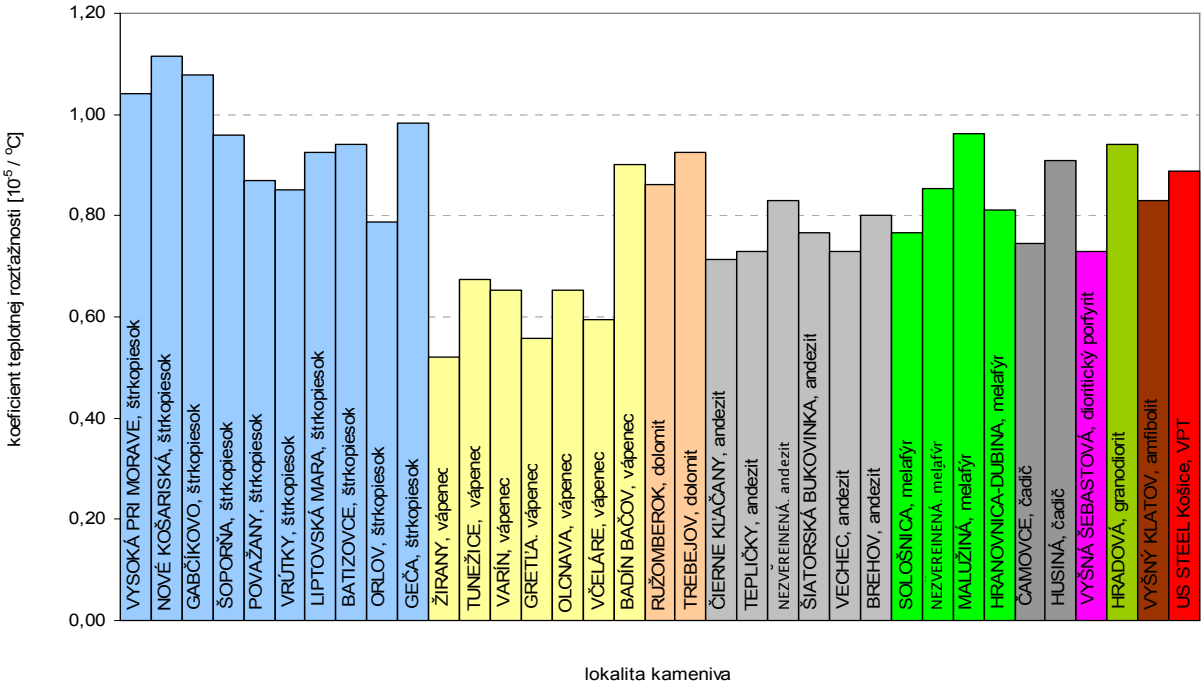
$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T} \qquad (3)$$

kde: α je súčiniteľ teplotnej rozťažnosti,
ΔL zmena dĺžky skúšobného telesa v [μm],
L dĺžka telesa pri teplote prostredia v [m],
ΔT teplotný rozdiel, v ktorom sa merala zmena dĺžky skúšobného telesa v [°C].



Obrázok 18 a) Detail skúšobného telesa zabaleného do plastovej fólie pred temperovaním na skúšobnú teplotu
b) Princíp merania dĺžky skúšobného trámca uloženého v meracom ráme číselníkovým odchýlkomerom

Na obrázku 19 je znázornené porovnanie hodnôt súčiniteľa teplotnej rozťažnosti pre overované lokality kameniva.



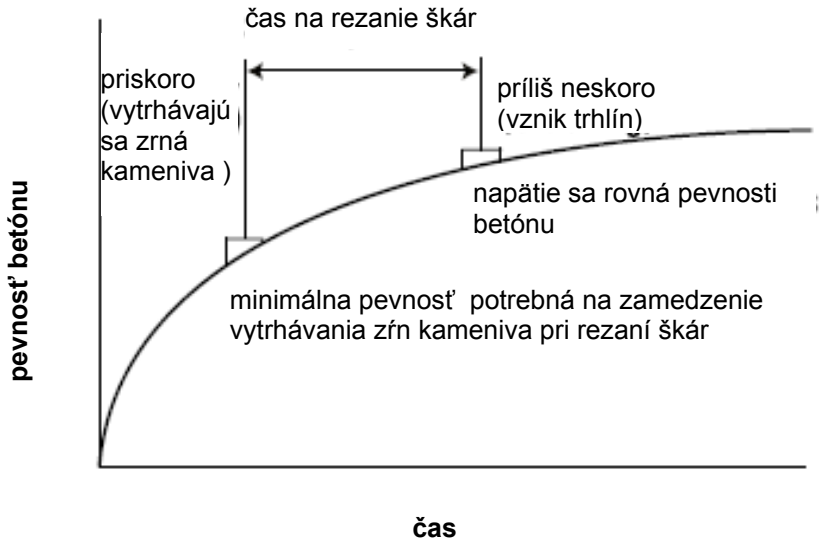
Obrázok 19 Porovnanie hodnôt súčiniteľa teplotnej rozťažnosti pre overované lokality kameniva

Z obrázku 19 je zrejmé, že najväčší rozdiel je medzi hodnotami vápencového a štrkopieskového kameniva. Táto tendencia sa zistila aj vo výskume zdokumentovanom v literatúre [24]. Na rozdiely v hodnotách v rámci jednotlivých horninových skupín malo pravdepodobne vplyv petrografické zloženie kameniva. Heterogenita zloženia sa týka najmä štrkopieskov, ktoré pozostávajú z úlomkov rôznych hornín. Pomerne malý rozptyl hodnôt vykazovalo andezitové kamenivo.

Na základe predpokladaného výskytu trhlín (pozri obrázok 16) a hodnôt nameraných metodikou TSÚS sa ukazuje potreba overovania súčiniteľa teplotnej rozťažnosti každej betónovej zmesi, ktorá má byť použitá v CB kryte.

Načasovanie rezania priečnych zmrašťovacích škár

Z hľadiska prevencie nežiaducich účinkov objemových zmien v CB kryte má význam aj správne načasovanie rezania zmrašťovacích škár.
Vhodný časový interval na rezanie škár (pozri obrázok 20) začína, ak pevnosť betónu je dostatočná na to, aby sa pri rezaní nevytrhávalo pozdĺž škáry kamenivo a končí, keď sa začínajú tvoriť náhodné trhliny.
Pretože pri niektorých poveternostných podmienkach a/ alebo použití určitých materiálov môže byť tento interval krátky, odporúča sa z hľadiska bezpečného predchádzania vzniku trhlín začať s rezaním škár hneď, keď dosiahne betón takú pevnosť, aby sa z neho pri rezaní nevytrhávali zrná kameniva.

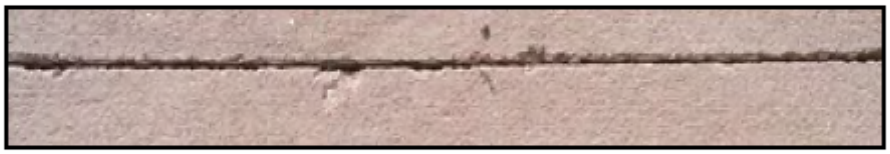


Obrázok 20 Schematické vyznačenie vhodného časového intervalu na rezanie škár (American Concrete Pavement Association)

Na obrázku 21 sú znázornené škáry vyrezané v rôznych štádiách tuhnutia betónu.

a) žiadne vytrhávanie zŕn kameniva – rezanie škáry vo vhodnom časovom intervale

b) mierne vytrhávanie zŕn kameniva – rezanie škáry tesne na začiatku vhodného časového intervalu



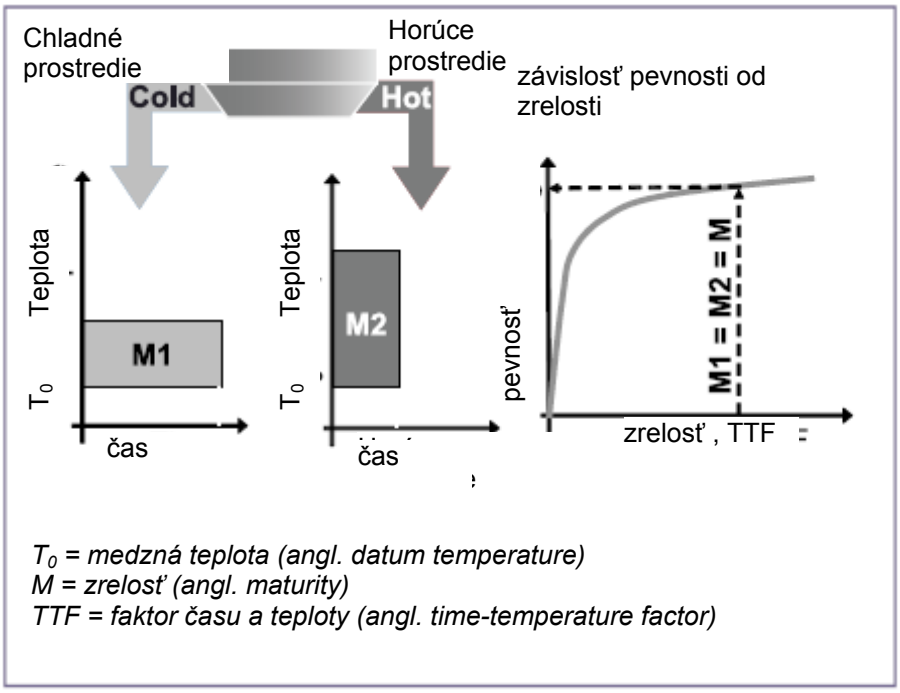
c) neprijateľné vytrhávanie zŕn kameniva – priskoré rezanie škáry

Obrázok 21 Rôzne úrovne poškodenia vytrhávaním zŕn kameniva pri rezaní škár (American Concrete Pavement Association)

Orientačne je možné určiť začiatok vhodného intervalu rezania škár vrypom klinca po povrchu CB krytu. Tvrdnutím povrchu sa hĺbka vrypu zmenšuje. Ak sa vrypom poškodí textúra povrchu je pravdepodobne ešte priskoro na rezanie škár. Žiadne resp. mierne vytrhávanie zŕn kameniva v prípustných medziach je pri rezaní škár v betóne, ktorý má pevnosť v tlaku od 2,1 MPa do 7,0 MPa, v závislosti od druhu použitého kameniva v zmesi [12]. Spresnenie konkrétnej prahovej hodnoty pevnosti v tlaku pre konkrétnu stavbu je možné vykonať na základe sledovania zrelosti betónu. Túto metódu úspešne využili na niekoľkých diaľničných projektoch v USA. Dĺžka vhodného časového intervalu na rezanie škár závisí na viacerých faktoroch a môže byť rôzna pri každej stavbe a pre každý deň výstavby. Pri niektorých materiáloch resp. poveternostných podmienkach sa môže tento interval významne skrátiť. Pomocou skúšania zrelosti je možné zistiť vplyv okolitých podmienok na pevnosť betónu a následne určiť vhodný interval na rezanie škár tak, aby nehrozilo riziko vytrhávania zŕn kameniva pri rezaní alebo sa nezačali tvoriť zmrašťovacie trhliny ešte pred rezaním škár.

Princíp skúšania zrelosti betónu

Skúšanie zrelosti betónu je založené na koncepcii znázornenej na obrázku 22 [22], ktorý ukazuje, že vzorka vystavená chladnejšiemu počasiu dosiahne neskôr zrelosť M1 [z angl. maturity] ako vzorka vystavená teplejšiemu počasiu M2 . Ak platí, že plocha obdĺžnika (ktorá predstavuje zrelosť) M1 sa rovná ploche obdĺžnika M2, potom tieto dve vzorky majú rovnakú pevnosť, aj keď podmienky dozrievania - teplota a čas sú rozdielne.



Obrázok 22 Koncepcia skúšania zrelosti betónu (FHWA 2005)

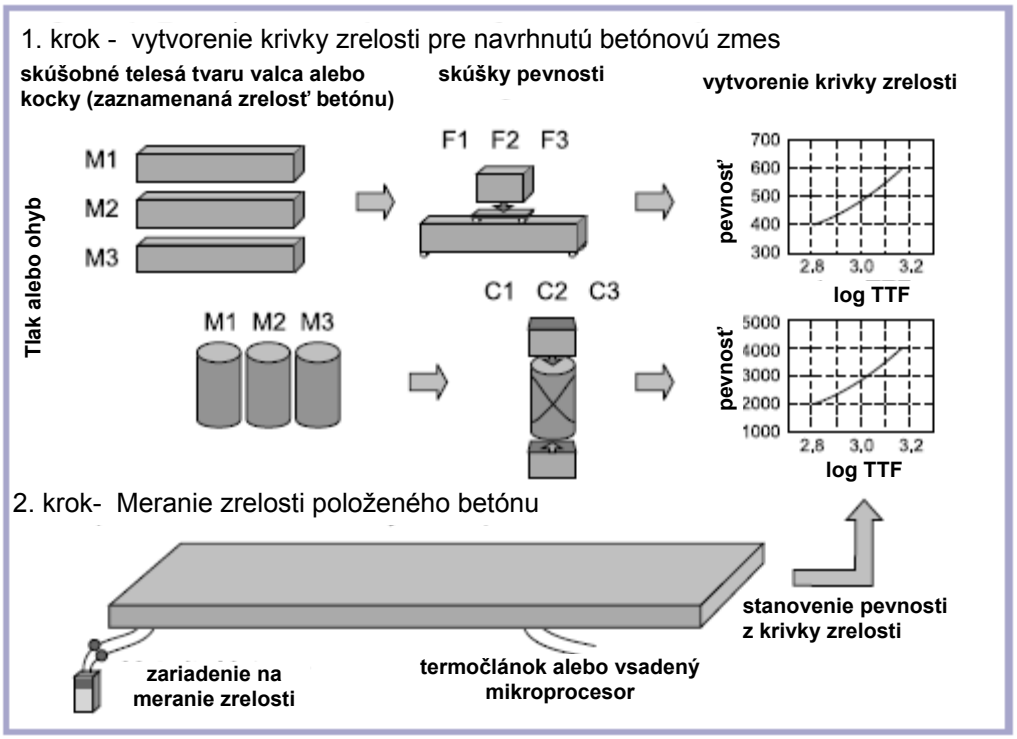
Vplyv času a teploty na nárast pevnosti betónu sú zohľadnené vo funkcii zrelosti, ktorá vyjadruje akú zrelosť betón dosiahol. Na vyjadrenie zrelosti betónu sa bežne používa vzťah podľa Nurse - Saula :

$$M = \sum (T_a - T_o)\Delta t \qquad (4)$$

kde: M je zrelosť (faktor času a teploty) v čase t,
T_a priemerná teplota betónu počas intervalu Δt,
T_o medzná teplota,
Δt časový interval.

Medzná teplota je teplotou, pri ktorej sa zastaví nárast pevnosti betónu. Počas časového intervalu, pri ktorom je medzná alebo nižšia teplota, nedochádza k nárastu pevnosti betónu. V Nurse - Saulovom vzťahu sa ako medzná teplota používa teplota -10 ºC.

Princíp skúšania zrelosti betónu je znázornený na obrázku 23 [22] a pozostáva z dvoch krokov: zostrojenia kalibračnej krivky zrelosti a merania zrelosti zabudovaného betónu. Na základe týchto informácií sa posudzuje pevnosť zabudovaného betónu.



Obrázok 22 Postup skúšania zrelosti betónu (Federal Highway Administration 2005)

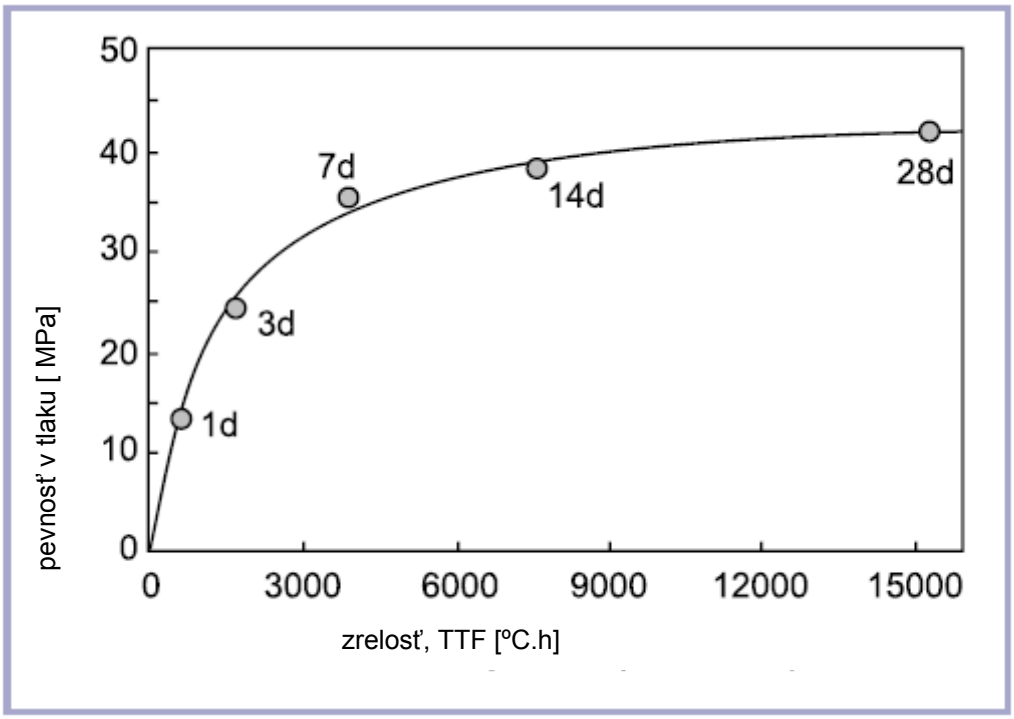
Zostrojenie kalibračnej krivky zrelosti pre konkrétnu zmes sa vykoná odskúšaním skúšobných telies v laboratóriu alebo na stavbe, pred začatím kladenia zmesi. V každom prípade sa musia na výrobu skúšobných telies pre účel zostrojenia kalibračnej krivky použiť rovnaké vstupné materiály ako budú použité pre výrobu zmesi do CB krytu. Keďže kalibračné krivky sú závislé od charakteristík konkrétnej zmesi, každá zmena vo vstupných materiáloch alebo zložení zmesi si bude vyžadovať novú kalibračnú krivku.

Postup na zostrojenie kalibračnej krivky je možné zhrnúť v nasledovných bodoch:

1. Vyrobia sa skúšobné telesá tvaru hranola - trámca (pre skúšku pevnosti v ťahu pri ohybe) alebo valca (pre skúšku pevnosti v tlaku). Vhodnejšie sú valce lebo je menšia variabilita v hodnotách pevnosti v tlaku ako v hodnotách pevnosti ťahu pri ohybe. Obvykle je potrebné vyrobiť 12 až 15 skúšobných telies v závislosti od počtu vzoriek na jedno stanovenie a časových intervalov v ktorých sa majú skúšať.
2. Umiestnia sa jeden alebo dva termočlánky alebo mikroprocesory v strede jedného valca alebo trámca. Tieto telesá sa neskúšajú, ale slúžia na sledovanie zrelosti (teploty v časových intervaloch) telies.
3. Telesá sa nechajú dozrievať vo vlhkom prostredí.
4. Odskúšajú sa najmenej dve telesá na pevnosť v tlaku (alebo v ťahu pri ohybe) v každom stanovenom čase, obvykle po 1, 3, 7, 14 a 28 dňoch. Vypočíta sa priemerná hodnota pevnosti pre každý vek telies a zaznamená sa zodpovedajúca hodnota zrelosti v danom veku telesa.
5. Vynesú sa na grafe výsledky pevnosti ako funkcia zodpovedajúcich hodnôt zrelosti. Táto krivka sa použije na stanovenie pevnosti CB krytu.

V CB kryte sa nainštalujú termočlánky alebo mikroprocesory. Merania zrelosti sa vykonávajú a zaznamenávajú v pravidelných intervaloch. Pevnosť CB krytu sa stanoví na základe predtým zostrojenej kalibračnej krivky. Napríklad, ak sa na základe merania stanovila zrelosť CB krytu

4000 °C.h, potom podľa obrázka 24 to zodpovedá pevnosti v tlaku 34 MPa.



Obrázok 24 Príklad kalibračnej krivky zrelosti (Federal Highway Administration 2005)

V tabuľke 3 sú uvedené orientačné hodnoty minimálnych pevností v tlaku betónov, ktoré je potrebné dosiahnuť na to, aby pri rezaní škár dochádzalo len k minimálnemu (ešte prijateľnému) vytrhávaniu zŕn kameniva tzn. 10,6 mm^2 na 1 m vyrezanej škáry [26]. Tieto hodnoty sa stanovili pre betóny s použitím drveného resp. ťaženého kameniva a s uvedenými dávkovaniami cementu, na základe sledovania zrelosti podľa modelu Nurse - Saula.

Tabuľka 3 Pevnosť v tlaku a zodpovedajúca zrelosť pre začiatok rezania škár

Druh kameniva	**Tvrdosť kameniva**	**Obsah cementu [kg.m^{-3}]**	**Pevnosť v tlaku [MPa]**	**Zrelosť podľa Nurse - Soula [ºC.h]**
Drvené	Mäkké	297	5,0	277
		386	3,7	227
Drvené	Tvrdé	297	8,8	436
		386	7,0	352
Ťažené	Mäkké	297	3,2	212
		386	2,1	172
Ťažené	Tvrdé	297	6,3	327
		386	4,8	267

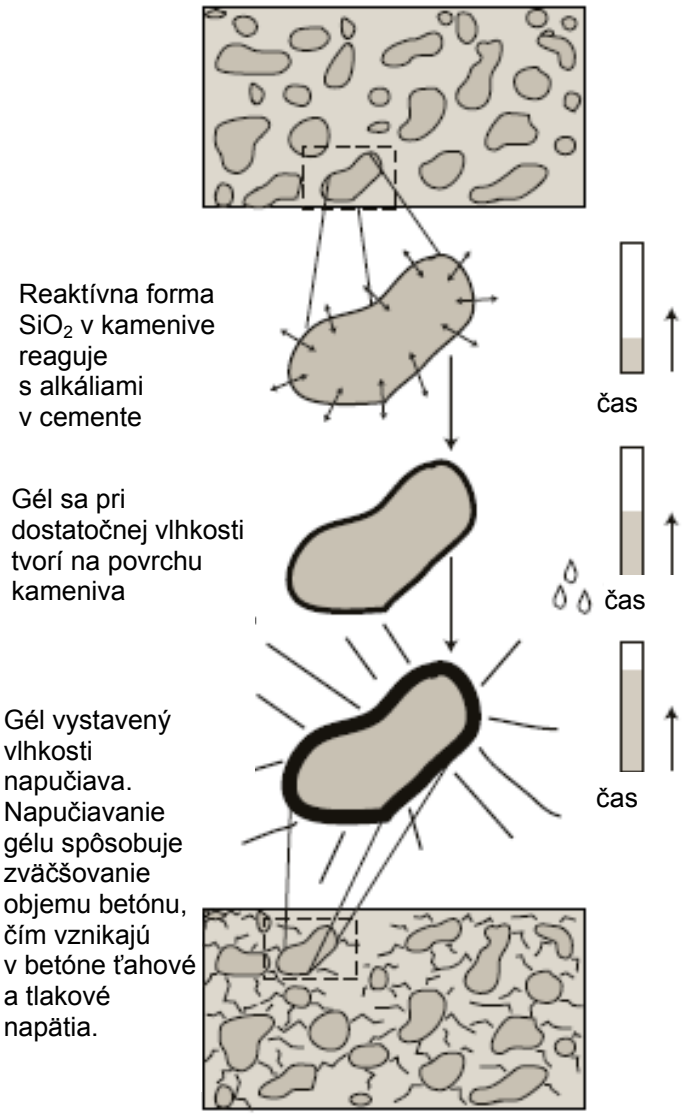
V súčasnosti sú na trhu dostupné zariadenia na monitorovanie vývoja pevnosti kladeného betónu v CB krytoch využívajúce koncepciu zrelosti betónu. Tieto zariadenia umožňujú predpovedať teplotu, zrelosť a pevnosť na základe systému jedného merania. Prístup a ovládanie je buď priamo pri mieste merania alebo je ho možné ovládať aj vzdialeným prístupom pomocou laptopu. Zariadenie umožňuje okamžité stanovenie pevnosti CB krytu, čo je výhodné poznať nielen pre stanovenie začiatku rezania škár, ale aj času pre uvedenie do prevádzky. V USA využívajú tieto zariadenia na kontrolu kvality prác jednak dodávatelia stavebných prác, ale aj správcovia ciest a diaľnic.

3.3 Vplyv alkalicko-kremičitej reakcie na objemové zmeny betónu

Pri alkalicko–kremičitej reakcii – ASR (skratka z angl. Alkali Silica Reaction) reagujú amorfný oxid siričitý (SiO_2) a hydroxid alkalického kovu (NaOH, KOH) – za prítomnosti vlhkosti – na viac či menej hustý gél, ktorého zloženie je vyjadrené rovnicou vzťahu :

$$2\ NaHO + SiO_2 + n \cdot H_2O \rightarrow Na_2SiO_3 \cdot nH_2O \qquad (5)$$

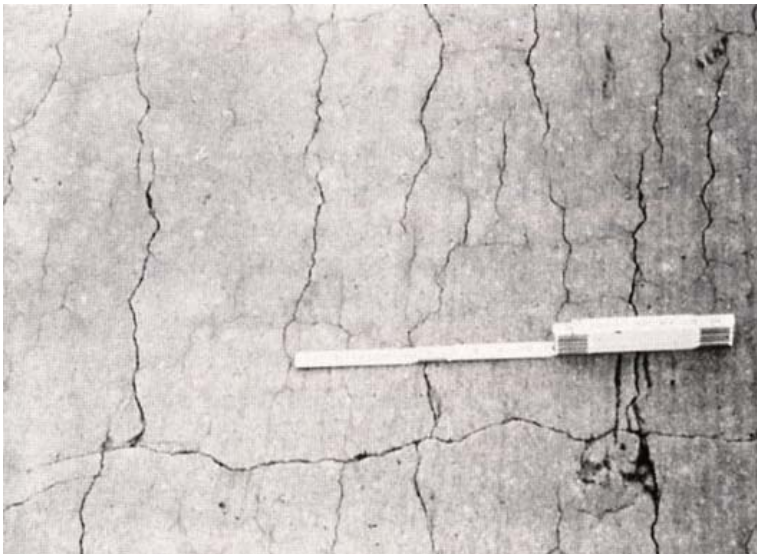
Schematické zobrazenie alkalicko-kremičitej reakcie je znázornené na obrázku 26 [12]. Po nasiaknutí kameniva je táto reakcia spojená so zväčšením objemu. Pretože kamenivo je v štruktúre malty pevne usadené, nie je k dispozícii odľahčujúci priestor pre expanziu. V dôsledku objemového nárastu dochádza pri bobtnaní k vnútornému tlaku, ktorý môže dosahovať až hodnoty 20 N/mm^2 [27].



Obrázok 25 Schematické zobrazenie alkalicko- kremičitej reakcie (Federal Highway Administration 2007)

Toto namáhanie presahuje pevnosť tlaku betónu, takže môžu veľmi ľahko vznikať v betóne trhliny. Tieto trhliny sú väčšinou jemne a sieťovito rozložené, nie sú obmedzené len na viditeľnú povrchovú oblasť, ale sa môžu šíriť celou štruktúrou cementobetónovej vrstvy. (pozri obrázok 27). Vzorky

odobraté z takto poškodeného krytu vykazujú pokles pevnosti a modulu pružnosti. Množstvo vytvoreného gélu v betóne závisí od množstva a druhu SiO_2 v kamenive a od koncentrácie alkalického hydroxidu v roztokoch v póroch betónu.



Obrázok 27 Trhliny zapríčinené alkalicko- kremičitou reakciou

Každé kamenivo obsahujúce oxidy kremičité sa v silne alkalickom roztoku rozpúšťa. Rýchlosť reakcie sa však líši v závislosti od stavu vytvorenej štruktúry.
ASR môžu značne zhoršiť prevádzkovú spôsobilosť a negatívne ovplyvniť ďalšie mechanizmy poškodzovania ako napr. tie ktoré vznikajú vplyvom mrazu, rozmrazovacích látok, a síranov.
Faktory ovplyvňujúce alkalicko-kremičitú reakciu a na to, aby došlo k alkalicko-kremičitej reakcii musia byť splnené nasledovné podmienky:

1. kamenivo musí obsahovať reaktívne formy SiO_2;
2. póry cementovej pasty musia obsahovať vodu;
3. dostatočná vlhkosť.

Ak nie je splnená niektorá z týchto podmienok nemôže sa vytvoriť ASR gél a následne vplyvom toho nemôže dôjsť k nebezpečnému zväčšeniu objemu.

Pokiaľ betón obsahuje kamenivo s SiO_2, nie je v podstate možné vzhľadom k alkáliám, ktoré obsahuje cement zabrániť alkalicko-kremičitej reakcii. Je však potrebné vylúčiť, aby alkalicko-kremičitá reakcia – podmienená zodpovedajúcim reaktívnym kamenivom a spojivom mohla prebehnúť tak rýchlo, aby počas predpokladanej doby životnosti vozovky viedla k masívnej tvorbe gélu a prípadne aj poškodeniu. Aby sa škodlivej alkalicko-kremičitej reakcii predišlo, musia sa obmedziť aspoň niektoré z uvedených predpokladov potrebných na jej vznik.

V TKP časť 8 je uvedené, že kamenivo do betónu nesmie byť reaktívne s alkáliami a reaktívnosť s alkáliami sa stanovuje podľa STN 72 1179. Nie sú tam však uvedené kritériá na posúdenie vhodnosti resp. nevhodnosti kameniva. V KLK 1/2009 [9] nie sú uvedené žiadne požiadavky na odolnosť kameniva určeného do CB krytov proti alkáliám. V KLHS 1/2010 [10] nie sú uvedené obmedzenia na obsah aktívnych alkálií v cementoch.

Podľa STN EN 206-1 [5] sa reaktívnosť kameniva s alkáliami preukazuje skúškami podľa STN 72 1179 [4] alebo STN 72 1160 [6].
Reaktívnosť neuhličitanového kameniva s alkáliami sa skúša podľa STN 72 1179 a kontrola zhody sa riadi týmito ustanoveniami:

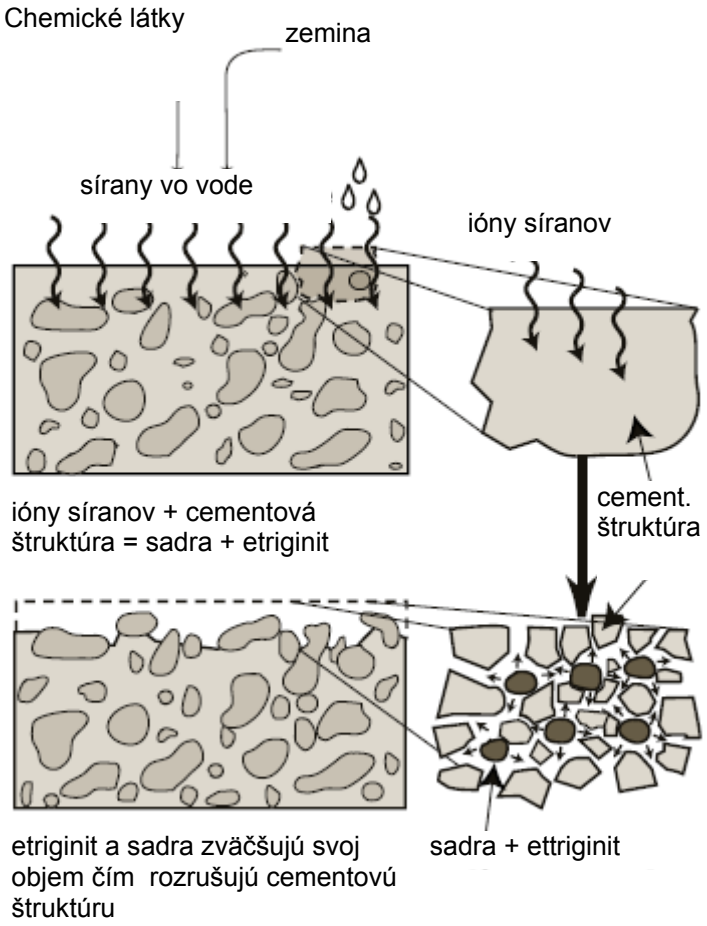
Chemická skúška podľa STN 72 1179:
a) ak $R > 70$, možno predpokladať, že kamenivo by mohlo byť reaktívne, ak $S > R$;
b) ak $R < 70$, možno predpokladať, že kamenivo by mohlo byť reaktívne, ak $S > 35 + R/2$;
kde R je úbytok zásaditosti v milimoloch na 1 liter pôvodného filtrátu;

S molárna koncentrácia oxidu kremičitého v milimoloch na 1 liter pôvodného filtrátu.

Dilatometrická skúška podľa STN 72 1179:
Pri kamenive možno predpokladať, že by mohlo byť reaktívne, ak rozpínanie skúšobných trámčekov prevyšuje:
a) 0,05 % po 3 mesiacoch uloženia podľa ustanovení STN 72 1179;
b) 0,10 % po 6 mesiacoch rovnakého uloženia.
Rozpínanie väčšie ako 0,05 % po 3 mesiacoch uloženia sa neberie do úvahy, ak je rozpínanie po 6 mesiacoch menšie ako 0,10 %. Výsledky zistené po 3 mesiacoch sú rozhodujúce len vtedy, ak nie sú k dispozícii výsledky rozpínania po 6 mesiacoch uloženia.
Reaktívnosť uhličitanového kameniva s alkáliami sa skúša podľa STN 72 1160. Výsledkom skúšky je aritmetický priemer predĺženia Δ*l* skúšobných teliesok, vyjadrený v percentách a zaokrúhlený na 0,01 %. Dolomitové kamenivo, ktoré vykazuje predĺženie Δ*l* väčšie ako 0,3 %, a pri ostatných druhoch uhličitanového kameniva predĺženie Δ*l* väčšie 0,5 %, treba hodnotiť ako alkáliami rozpínavé. Ak kamenivo počas skúšky vykazuje okom viditeľné zmeny tvaru a povrchu skúšobných teliesok (deformácie, pľuzgiere, trhliny, odlupovanie, zmenšenie rozmerov, rozpad a pod.), pričom jeho predĺženie Δ*l* neprekročí uvedené hodnoty, nemožno ho hodnotiť ako alkáliami rozpínavé.
STN EN 206-1 uvádza, že v SR sa za vhodné opatrenia na zníženie náchylnosti kameniva na alkalické rozpínanie považuje nahradenie pôvodného kameniva vhodným kamenivom resp.
obmedzenie maximálneho celkového obsahu alkálií v betóne (napr. použitím cementu s nižším obsahom aktívnych alkálií);
Pre CEM I, ktorý sa používa na CB kryty je obmedzený obsah aktívnych alkálií takto: Na_2O + 0,658 K_2O < 0,6 %.
V technickom predpise TP 137 MDS a ŘSD ČR [28] (ktorý je v revízii) sa na klasifikáciu rizikovosti kameniva používa na počiatočné overenie dilatometrická metóda podľa ASTM C-1260 [29]. Podľa nej sa merajú objemové zmeny trámčekov z malty obsahujúcej drobné kamenivo, po 14 dňoch uloženia v roztoku NaOH. Ďalej sa podľa [28] postupuje v overovaní metódami uvedenými v STN EN 206-1.
V literatúre [21] sa uvádza, že metóda ASTM C-1260 nie je vhodná na karbonátové horniny.
V súčasnosti prebieha v USA rozsiahly výskum FHWA zameraný na alkalickú reakciu v betónoch, výsledkom ktorého by malo byť okrem iného aj definovanie zrýchlenej skúšobnej metódy, na základe ktorej by bolo možné predpovedať vznik alkalicko-kremičitej reakcie v CB kryte.

3.4 Vplyv síranov

Sírany môžu poškodiť betón reakciou s produktmi hydratovaného tricalcium aluminátu C_3A v zatvrdnutej cementovej paste pri preniknutí a usadení solí v betóne. Kryštály, ktoré v dôsledku tejto reakcie vznikajú, môžu poškodiť cementovú pastu a následne zapríčiniť vznik trhlín a porušenie betónu. Vplyv síranov je nepriaznivejší, ak je betón vystavený striedavo vlhkému aj suchému prostrediu, ako keď je betón vystavený len vlhkému prostrediu. Kritické množstvá síranov v zemine alebo vode môžu po niekoľkých rokoch poškodiť betónovú vozovku (pozri obrázok 28).



Obrázok 28 Schematické znázornenie síranovej reakcie v štruktúre betónu (Federal Highway Administration 2007)

Predchádzať síranovej reakcii v betóne je možné ochranou betónu od prieniku síranových iónov. V literatúre [12] sa na zníženie rizika síranovej reakcie odporúča dodržať tieto zásady:

- navrhovať betóny s nízkym vodným súčiniteľom w/c < 0,4;
- používať cementy so špeciálnym zložením pre síranové prostredie;
- používať náhradné cementy so zložením, vďaka ktorému sa dosiahne zlepšenie odolnosti znížením priepustnosti betónu a zriedením roztoku C_3A v betóne;
- čo najviac predĺžiť čas ošetrovania betónu, aby sa dosiahla vyššia pevnosť a znížila jeho priepustnosť a tým sa zvýšila jeho odolnosť proti síranom.

4. Závery a odporúčania

Na základe rozboru problematiky je možné prijať nasledovné závery a odporúčania na zníženie nežiaducich následkov objemových zmien v CB krytoch.

Vo fáze návrhu betónových zmesí sa odporúča:
- posúdiť reaktívnosť kameniva s alkáliami podľa postupu uvedeného v STN EN 206-1;
- dodržiavať čo najnižšiu hodnotu vodného súčiniteľa, čo znamená navrhovať zmesi s čo najväčším obsahom hrubého kameniva a najmenším obsahom cementovej pasty;
- stanoviť zmraštenie sušením podľa STN EN 1367- 4, pričom navrhnutý betón by nemal presiahnuť hodnotu 0,075 %;
- stanoviť súčiniteľ teplotnej rozťažnosti podľa postupu uvedeného v rozbore problematiky, pričom navrhnutý betón by nemal presiahnuť hodnotu $1 \cdot 10^{-5}$/ºC;
- zostrojiť kalibračnú krivku zrelosti betónu na základe výsledkov laboratórnych skúšok, ktorých metodika je opísaná v rozbore problematiky

Vo fáze pokladania betónu sa odporúča nainštalovať termočlánky na meranie zrelosti (teploty v závislosti od času) betónu. Následne merať zrelosť betónu pre optimálne načasovanie rezania škár.

Vo fáze ošetrovania sa odporúča:
- sledovať parametre podľa nomogramu na obrázku 5 na stanovenie rýchlosti vyparovania vody z povrchu betónu,
- ak rýchlosť vyparovania v plastickom štádiu betónu dosiahne hodnotu 0,5 kg . m^{-2} . h^{-1} je potrebné predchádzať vzniku trhlín od plastického zmrašťovania rosením alebo aplikovaním parotesných látok, ktoré vytvoria ochranný film na povrchu betónu [19],
- ak rýchlosť vyparovania napriek preventívnym opatreniam presiahne hodnotu 1 kg.m^{-2}.h^{-1} odporúča sa prerušiť kladenie betónu [19].

S ohľadom na uvedené závery sa odporúča vypracovať :

- doplnok TKP časť 8 Cementobetónový kryt vozoviek, MDPT SR: 2008,
- nový metodický pokyn: Metodika na stanovenie zrelosti betónu,
- nový metodický pokyn: Metodika na stanovenie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti betónu.

5. Použitá literatúra

5.1 Slovenské technické normy

1. STN EN 1367- 4 Skúšky na stanovenie tepelných vlastností a odolnosti kameniva proti klimatickým účinkom Časť 4: Stanovenie zmraštenia sušením (72 1188)
2. STN EN 1770 Výrobky a systémy na ochranu a opravu betónových konštrukcií. Skúšobné metódy. Stanovenie koeficientu teplotnej rozťažnosti (73 2111)
3. STN EN 12620 Kamenivo do betónu (72 1502)
4. STN 72 1179 Stanovenie reaktívnosti kameniva s alkáliami
5. STN EN 206-1 Betón. Časť 1: Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda (73 2403)
6. STN 72 1160 Stanovenie alkalickej rozpínavosti prírodného stavebného uhličitanového kameňa

5.2 Technické predpisy MDPT SR

7. TS 0803 Navrhovanie cementobetónových vozoviek na pozemných komunikáciách, MDPT SR: 2003
8. TKP časť 8 Cementobetónový kryt vozoviek, MDPT SR: 2008
9. KLK 1/2009 Katalógové listy kameniva, MDPT SR: 2009
10. KLHS 1/2010 Katalógové listy hydraulických spojív, MDPT SR: 2009

5.3 Zahraničná literatúra

11. Materials and Mix Optimization Procedures for PCC Pavements, Final Report, National Concrete Pavement Technology Center, March 2006 [Postupy optimalizácie materiálov a zmesí pre cementobetónové vozovky, záverečná správa, Národné centrum technológií cementobetónových vozoviek, marec 2006]
12. Integrated Material and Construction Practices for Concrete Pavement: A State- of- the Practice Manual, FHWA Publication No. HIF – 07 – 004, National Concrete Pavement Technology Center, October 2007 [Komplexné pokyny pre použitie materiálov a stavbu cementobetónových vozoviek, príručka spracovaná na základe súčasného stavu problematiky, publikácia FHWA č. HIF – 07 – 004, Národné centrum technológií cementobetónových vozoviek, marec 2006]
13. Research and Development of the Application of the Federal Highway Administration's HIPERPAV Model to Wisconsin, final report, SPR # 0092-04-11, Wisconsin Highway Research Program, April 2006 [Výskum, vývoj a príprava aplikácie modelu federálnej správy diaľnic HIPERPAV pre Wisconsin, záverečná správa, SPR # 0092-04-11, Diaľničný výskumný program štátu Wisconsin, apríl 2006]
14. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, final document, Appendix KK: Transverse cracking of JPCP, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, August 2003 [Príručka pre mechanicko-empirický návrh nových a rehabilitovaných vozoviek, záverečná správa, príloha KK: priečne trhliny vozoviek z prostého betónu, Národný diaľničný výskumný program, Komisia pre dopravný výskum, august 2003]
15. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, final report, part 2. Design Inputs, chapter 2 - Material Characterization, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, March 2004 [Príručka pre mechanicko-empirický návrh nových a rehabilitovaných vozoviek, záverečná správa, časť 2. Vstupy pre

návrh, kapitola 2 – Popis materiálov, Národný diaľničný výskumný program, Komisia pre dopravný výskum, august 2003]

16. Computer-Based Guidelines for Concrete Pavements, Volume II: Design and Construction Guidelines and HIPERPAV® II User's Manual, publication NO. FHWA-HRT-04-122, Federal Highway Administration, February 2005 [Počítačom podporované pokyny pre cementobetónové vozovky, diel II, Pokyny pre návrh a stavbu a užívateľská príručka HIPERPAV ® II, publikácia č. FHWA-HRT-04-122, Federálna správa diaľnic, február 2005]

17. Computer-Based Guidelines for Concrete Pavements, Volume III: Technical Appendices, publication NO. FHWA-HRT-04-127, Federal Highway Administration, January 2006 [Počítačom podporované pokyny pre cementobetónové vozovky, diel III, technické prílohy, publikácia č. FHWA-HRT-04-127, Federálna správa diaľnic, január 2006]

18. S.M.Kim, P.K. Nelson: Experimental and numerical analyses of PCC overlays on PCC slabs-on-grade subjected to climatic loading, International Journal of Solids and Structures 41 (2004), ELSEVIER, str. 785–800 [S.M. Kim, P.K. Nelson: Experimentálne a numerické analýzy pre cementobetónové kryty vystavené klimatickým účinkom, International Journal of Solids and Structures 41 (2004), ELSEVIER, str. 785-800]

19. Guide for Curing of Portland Cement Concrete Pavements, Volume II, publication no. FHWA-HRT-05-038, Federal Highway Administration, August 2006 [Príručka pre ošetrovanie cementobetónových vozoviek, diel III, publikácia č. FHWA-HRT-05-038, Federálna správa diaľnic, august 2006]

20. Schindler et all: Concrete pavement temperature prediction and case studies with the FHWA HIPERPAV models, Early Age Concrete - Properties and Performance, Cement and Concrete Composites, Volume 26, Issue 5, July 2004, str 463-471 [Schindler et all: Prognóza vývinu teploty a prípadové štúdie s modelmi FHWA HIPERPAV, diel III, Vlastnosti betónu v počiatočnom štádiu tuhnutia, Cementové a betónové kompozity, diel 26, číslo 5, júl 2004, str. 463-471]

21. Report on Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction, report no. FHWA-HIF-09-001, Federal Highway Administration, April 2008 [Správa o stanovení reaktivity kameniva do betónu a o výbere vhodných opatrení na predchádzanie škodlivému rozpínaniu v nových betónových stavbách, správa č. FHWA-HIF-09-001, federálna správa diaľnic, apríl 2008]

22. Maturity Testing for Concrete Pavement Applications, TechBrief FHWA-IF-06-004, Concrete Pavament Technology Program, November 2005 [Skúšanie zrelosti betónu pre cementobetónové vozovky, technický súhrn FHWA-IF-06-004, Program technológií cementobetónových vozoviek, november 2005]

23. Testing guide for Implementing Concrete Paving Quality Control Procedures, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, March 2008 [Príručka na skúšanie vrámci implementácie postupov kontroly kvality pokládky betónových zmesí. Národné centrum technológií cementobetónových vozoviek, Štátna univerzita v Iowe, marec 2008]

24. Jahangirnejad, Buch, Kravchenko: Evaluation of Coefficient of Thermal Expansion Test Protocol and Its Impact on Jointed Concrete Pavement Performance, ACI Materials Journal, Jan/Feb 2009 [Jahangirnejad, Buch, Kravchenko: Overovanie metódy na stanovenie súčiniteľa teplotnej rozťažnosti a jeho vplyv na výkonnosť cementobetónovej vozovky, ACI Materials Journal, január/február 2009]

25. Nelson: Handbook of Nondestructive and Innovative Testing Equipment for Concrete. Final Report. FHWA, 2003 [Nelson: Príručka nedeštruktívnych a inovatívnych skúšobných zariadení pre betón. záverečná správa. FHWA, 2003]

26. Guidelines for Timing Contraction Joint Sawing and Earliest Loading for Concrete Pavements, Volumes I and II: Final Report, FHWA-RD-91-079, Federal Highway Administration, February 1994 [Pokyny na načasovanie rezania zmrašťovacích škár a spustenie premávky na cementobetónových vozovkách, diely I a II: záverečná správa, FHWA-RD-91-079, Federálna správa diaľnic, február 1994]

27. Star, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, F.A. Finger-Institut, Heft 100, Weimar 1995 [Star, J.; Wicht, B.: Trvanlivosť

betónu, Listy vysokej školy architektúry a stavebníctva, F.A. Finger-Institut, Heft 100, Weimar 1995]

28. TP 137 MDS, Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací, Předběžné technické podmínky, MDS a ŘSD ČR, 2000

29. ASTM C-1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates [Mortar-Bar Method] [ASTM C-1260 Normová skúšobná metóda na stanovenie potenciálnej alkalickej reaktivity kameniva [skúška na trámčekoch z malty]]

30. Roper, Harold, Volume Changes of Concrete Affected by Aggregate Type, Research Department Bulletin RX123, Portland Cement Association, 1960 [Roper, Harold, Objemové zmeny betónu ovplynené druhom kameniva, správa z výskumu RX123, Asociácia výrobcov cementu, 1960]

31. Aítcin, Pierre-Claude, “Does Concrete Shrink or Does it Swell?,” Concrete International, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, December 1999, str 77 - 80. [Aítcin, Pierre-Claude, “Zmrašťuje sa betón alebo bobtná?,” Concrete International, Americký inštitút betónu, Farmington Hills, Michigan, December 1999, str 77 - 80]

32. Gebler, Steven H., and Klieger, Paul, Effect of Fly Ash on Some of the Physical Properties of Concrete, Research and Development Bulletin RD089, Portland Cement Association, 1986 [Gebler, Steven H., and Klieger, Paul, Vplyv betónu na niektoré fyzikálne vlastnosti betónu, správa z výskumu RD089, Asociácia výrobcov cementu, 1986]