

Vývoj nového materiálu pre podkladové vrstvy vozoviek v TPA Slovensko

V článku je predstavená podkladová vrstva vozoviek vyvinutá v TPA Slovensko, ktorá svojimi návrhovými parametrami vyplňa medzeru medzi stmelenými a nestmelenými podkladovými vrstvami. Je opísaný vývoj nového materiálu, ktorého tuhosť spočíva v optimalizovanej kostre kameniva a chemickej reakcii aktivátora a puzolánov obsiahnutých vo vhodnom kamenive, a realizácia vrstvy na prvej stavbe.

Kľúčové slová: podkladová vrstva, modul pružnosti, puzolánová reakcia

The article presents the base layer developed by TPA Slovakia, which with its design parameters fills the gap between bond and unbound base layers. The development of a new material, the stiffness of which lies in the optimized skeleton of the aggregate and the chemical reaction of the activator and pozzolans contained in the appropriate aggregate, and the implementation of layer on the first construction site, is to be described.

Keywords: base layer, modulus of elasticity, pozzolanic reaction

Úvod

Pri výstavbe nových ciest na Slovensku (diaľnice a rýchlostné cesty) stále prevládajú polotuhé konštrukcie vozoviek. Je to spôsobené vysokou mechanickou účinnosťou hydraulicky stmelených podkladových vrstiev v porovnaní s nestmelenými podkladovými vrstvami – konštrukcie netuhých asfaltových vozoviek. Nižšia mechanická účinnosť nestmelených podkladových vrstiev automaticky vedie k ekonomicky menej výhodnému návrhu konštrukcie vozovky.

Podstatné a rozhodujúce problémy s neskoršími reflexnými trhlinami vznikajúcimi na povrchu polotuhých asfaltových vozoviek sú podceňované a neskoršie náklady na údržbu nie sú zohľadnené vo fáze návrhu. Pre širšie využitie netuhých konštrukcií vozoviek pri výstavbe nových ciest je jednou z možností zvýšenie návrhových parametrov nestmelennej podkladovej vrstvy. Z vlastnej skúsenosti vieme, že optimalizáciou zrnitosti nestmelennej podkladovej vrstvy je možné dosiahnuť výrazne vyššie hodnoty návrhových parametrov. Cestou k tomu je na jednej strane výber vhodných frakcií kameniva optimalizácia výslednej zrnitosti kameniva a na druhej strane efekt puzolánovej reakcie drveného kameniva vyvretého pôvodu.

Po overení teoretických predpokladov v laboratóriu bolo veľmi dôležité overenie materiálu v podkladovej vrstve priamo na stavbe. Na základe experimentálnych skúseností z laboratória aj zo stavby sme odvodili moduly pružnosti pre účely návrhu vozovky.

Ciele vývoja

Hlavným cieľom prezentovaného riešenia je nájsť spôsob, ako zvýšiť mechanickú účinnosť nestmelennej podkladovej vrstvy pre netuhé asfaltové vozovky smerom k lepším technicko-ekonomickým benefítom. Pevnosť podkladovej vrstvy je dosiahnutá

jednak mechanickou kostrou kameniva a jednak prirodzenou reakciou vybraného kameniva a aktivátora puzolánovej reakcie.

Optimalizačný vývojový program mechanicko-chemicky spevneného kameniva (MCSK-TPA) bol navrhnutý počas dvoji-ročného obdobia v nasledujúcich oblastiach:

- a) Teoretické pozadie výskumu, stanovenie cieľov výskumu, konzultácie s príslušnými odborníkmi.
- b) Vyhodnotenie puzolánovej aktivity prachovej zložky vybraných kamenív.
- c) Výber jednotlivých zložiek zmesi, optimalizácia zrnitosti kameniva.
- d) Skúška typu pre mechanicko-chemicky spevnené kamenivo (MCSK-TPA)
- e) Overenie možností realizácie – vybudovanie pokusného úseku s použitím optimalizovaného MCSK-TPA ako podkladovej vrstvy.
- f) Vyhodnotenie únosnosti pokusného úseku s podkladovou vrstvou MCSK-TPA vyjadrenej dynamickým modulom pružnosti zo spätného výpočtu (FWD).
- g) Vyhodnotenie únosnosti MCSK-TPA vyjadrenej statickým modulom pružnosti (statický zaťažovací test v triaxiálnom prístroji).
- h) Analýza materiálu počas prípravy, miešania a zabudovania do konštrukcie vozovky.

Zloženie materiálu

Výber kameniva

Pre účely vývoja boli vybrané dva lomy „Pohranice“ a „Vtáčnik“, pri ktorých bol predpoklad puzolánovej reaktivity. V priebehu vývoja bol pre nedostatok puzolánovej reaktivity vyradený

lom Pohranice a zaradené nové lomy, ktoré obsahujú kamenivo s požadovanými vlastnosťami. Na skúmanie puzolánovej reaktivity bola použitá tzv. Frattiniho skúška, ktorá sa vykonáva na prachovej zložke kamenného materiálu.

Ako aktivátor puzolánovej reakcie bol použitý vápenný hydrát, ktorý sa vyrába hydratáciou kvalitného vápna. Jeho výhodou je možnosť jeho okamžitého použitia, pretože je objemovo stály.

Overenie puzolánovej reaktivity (Frattiniho skúška)

Puzolánová reaktivita sa identifikuje ako strata vápna z reakčnej zmesi obsahujúcej testovaný materiál, vodu a vápenný hydrát. Na tomto základe Frattini navrhol pôvodný test spočívajúci v reakcii zmesi 20 g puzolánov v 100 ml vody ponechanej pri 40 °C počas ôsmich dní a konečné stanovenie celkového vápnika a voľnej alkality. Poloha takzvaného obrazového bodu na diagrame celkových koncentrácií vápnika verzus celková alkality, buď pod, alebo nad krivkou rozpustnosti hydroxidu vápenatého, umožnila rozhodnúť, či puzolánová reakcia prebehla.

Z lomu Vtáčnik bola odobratá vzorka zložky prachu kameniva (frakcia 0–0,063 mm) na zistenie puzolánovej reaktivity. Kamenivo je vyvretého pôvodu (andezit), ktoré spĺňa predpoklady pre puzolánovú reaktivitu. Prachová zložka kameniva bola oddelená preosievaním na 0,063mm site od frakcie 0–4 mm.

Návrh zloženia zmesi MCSK-TPA

Na základe zrnitosti jednotlivých frakcií kameniva bol vytvorený referenčný návrh (bez aktivátora puzolánovej reakcie) zloženia mechanicky spevneného kameniva MSK_A (verzia A) tak, aby vyhovoval limitom zrnitosti podľa STN EN 13285. Neskôr bolo počas výskumného programu v laboratóriách TPA vytvorených mnoho rôznych verzií optimalizovaných zmesí MCSK-TPA (s pridaním aktivátora puzolánovej reakcie) s cieľom nájsť najlepšiu kombináciu a pomer jednotlivých zložiek zmesi.

Laboratórne výsledky a predpoklady pre navrhovanie vozoviek

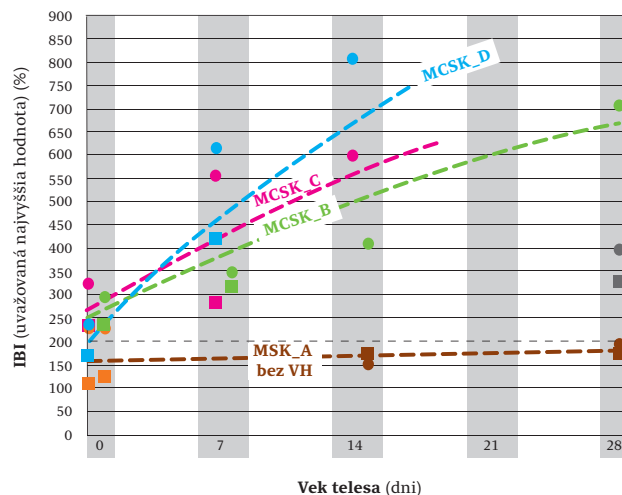
Index okamžitej únosnosti IBI

Počas výskumu bolo vykonaných niekoľko skúšok, ktorých účelom bola postupná optimalizácia zloženia výslednej zmesi a vyhodnotenie jej parametrov, najmä z hľadiska únosnosti vyjadrenej parametrom IBI (obrázok 1).



Obrázok 1: Skúšobné telesá (vľavo – pri skúške IBI; vpravo – pri skúške pevnosti v tlaku)

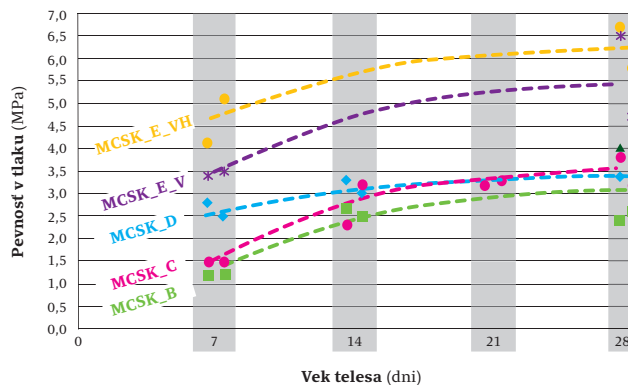
Po vyhodnotení skúšky IBI sa dostatočne preukázalo, aký veľký vplyv na únosnosť spôsobuje pridávanie aktivátora puzolánovej reakcie do zmesi, keďže referenčné zmesi bez aktivátora nevykazujú žiadne zvýšenie únosnosti v čase, vyjadrené parametrom IBI (obrázok 2). Na rozdiel od toho sa hodnota parametra IBI časom zvyšovala s pridaním aktivátora v rôznych dávkach. Pridanie aktivátora do zmesi zvyšuje mierne hodnotu parametra únosnosti IBI ihneď po výrobe vzorky; hodnoty IBI pre zmesi MCSK-TPA s aktivátorom pridaným ihneď po výrobe sa pohybovali od 240 % do 340 %. Pre porovnanie, referenčná zmes MSK_A bez pridaného aktivátora dosiahla hodnoty IBI v rozsahu 150 % až 200 %.



Obrázok 2: Výsledky skúšky IBI

Pevnosť v tlaku – laboratórium

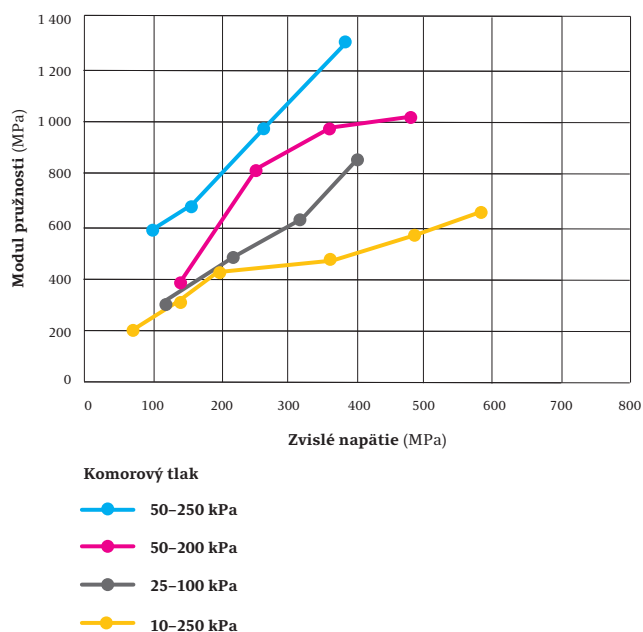
Únosnosť vyjadrená parametrom IBI bola už pri 7-dňových vzorkách taká vysoká, že vzorky boli vhodnejšie na skúšku pevnosti v tlaku podľa EN 13286-41. Na základe hodnôt výsledkov pevnosti v tlaku testovaných vzoriek boli vykreslené teoretické krivky nárastu pevnosti v tlaku v čase MCSK-TPA sú svojím priebehom podobné krivkám pevnosti betónu v tlaku, resp. CBGM. Laboratórne výsledky pevnosti v tlaku zmesí MCSK-TPA ukázali nárast v čase pre všetky varianty zmesi (obrázok 3). 28-dňová pevnosť v tlaku pre niektoré varianty zmesi dosiahla na skúšobných vzorkách hodnoty na úrovni 6 MPa.



Obrázok 3: Výsledky skúšky pevnosti v tlaku

Modul pružnosti z triaxiálneho prístroja

Moduly pružnosti boli stanovené pre jednu zmes kameniva a viaceré obsahy aktivátora skúškou v triaxiálnom prístroji Ústavu pozemných komunikácií, Stavební fakulty VUT v Brně. Skúšky boli vykonané v súlade s [10], pričom bola použitá metóda A pre úroveň nízkeho napätia s premenlivým komorovým tlakom podľa tabuľky 3 normy [10]. Z výsledkov pre rôzne kombinácie zvislého a komorového tlaku (obrázok 4) bol výsledný modul pružnosti E_r stanovený pre vodorovné napätie 70 kPa, ktoré zodpovedá vodorovnému napätiu v úrovni hornej podkladovej vrstvy. Výsledné hodnoty E_r pre jednotlivé obsahy aktivátora boli stanovené z celého rozsahu hodnôt v 100 zaťažovacích cykloch.

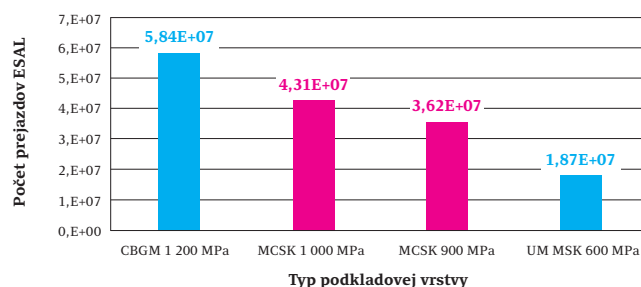


Obrázok 4: Príklad výsledkov zo skúšok v triaxiálnom prístroji

Zvýšenie prevádzkovej výkonnosti vozovky

Vyššia mechanická účinnosť hydraulicky stmelených podkladových vrstiev v porovnaní s nestmelenými podkladovými vrstevami

tvami je dôvodom ich širokého využitia pri vysoko zaťažených vozovkách. Použitie nestmelenej podkladovej vrstvy znižuje prevádzkovú výkonnosť vozovky. Medzeru medzi vlastnosťami vozovky s nestmelenou a hydraulicky stmelenou vrstvou je možné eliminovať pomocou vrstvy MCSK-TPA.



Obrázok 5: Prevádzková výkonnosť vozovky s rôznymi podkladovými vrstvami

Príklad je znázornený na obrázku 5. Maximálny počet prejazdov ekvivalentného štandardného nápravového zaťaženia (ESAL) potrebného k vzniku trhliny, vypočítaný pre konštrukciu vozovky a materiálové charakteristiky podľa tabuľky 1, sa líši v závislosti od typu uvažovanej podkladovej vrstvy. Vyšší modul pružnosti podkladovej vrstvy MCSK-TPA v porovnaní s nestmelenou podkladovou vrstvou (UM MSK) posúva vlastnosti vozovky bližšie k vozovke s hydraulicky stmelenou vrstvou.



Obrázok 6: Kladenie vrstvy MCSK-TPA (letisko Prievidza)

Tabuľka 1: Materiálové charakteristiky uvažované vo výpočte

Vrstva	Hrúbka (mm)	Modul pružnosti (MPa)	Poissonovo číslo	Pevnosť v ťahu (MPa)	Únavové koeficienty					
					a	b				
AC11 obrus	40	6 000	0,3	3,2	0,97	0,105				
AC16 ložná	90	4 600	0,3	2,8	0,95	0,11				
AC22 podkladová	70	4 000	0,3	2,6	0,95	0,11				
MCSK-TPA	170	1 000	0,25	0,4	1,0	0,097				
UM MSK		600					0,25	0,1	-	-
CBGM		1 200					0,25	0,5	1,0	0,095
UM SD	220	350	0,30	0,07	-	-				
Podložie	-	90	0,35	-	-	-				

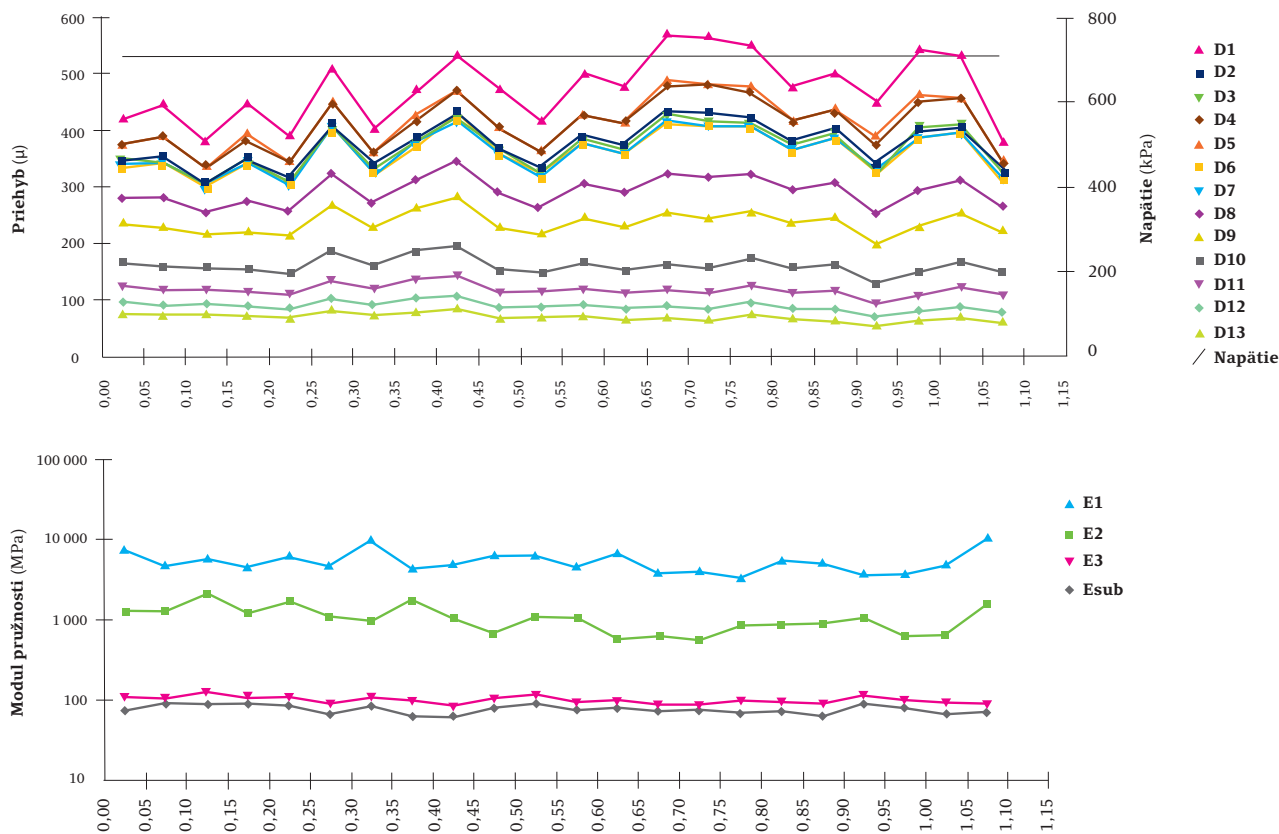
Realizácia

V druhej polovici roka 2018 bola realizovaná prevádzkovými jednotkami spoločnosti STRABAG výstavba nových pohybových plôch letiska Prievidza. V spolupráci s projektantom bola pôvodne uvažovaná podkladová vrstva CBGM nahradená pre

tento účel optimalizovanou vrstvou MCSK-TPA v rovnakej hrúbke. Počas výstavby bolo na všetkých plochách letiska Prievidza položených cca 4 700 m³ (10 900 ton) zmesi MCSK-TPA (kladenie zmesi – obrázok 6).



Obrázok 7: Meranie únosnosti zariadením FWD (letisko Prievidza)



Obrázok 8: Výsledky meraní zariadením FWD a spätných výpočtov (vzletová dráha RWY, pás 2, letisko Prievidza), vrstva MCSK-TPA je označená ako E2 (zelená)

Pevnosť v tlaku – letisko Prievidza

Skúšobné vzorky pre skúšku pevnosti v tlaku boli vyrobené zo zmesi odobratej priamo z nákladných áut na stavenisku. V tomto prípade bola stanovená aj 1-dňová pevnosť v tlaku, kde bola dosiahnutá hodnota 2,5 MPa, čo znamená, že k výraznému zvýšeniu pevnosti v tlaku dochádza už v prvých 24 hodinách po položení zmesi. Pevnosti v tlaku po 28 dňoch dosiahli priemernú hodnotu 6,2 MPa.

Modul pružnosti stanovený zo zariadenia FWD

Moduly pružnosti boli vypočítané z meraní priehybu povrchu vozovky pomocou zariadenia Dynatest 8012 FastFWD (obrázok 7). Zo spätného výpočtu bol stanovený modul pružnosti pre podkladovú vrstvu MCSK-TPA v rozsahu 1 000 MPa až 1 600 MPa (obrázok 7 a 8).



Obrázok 9: Vzletová dráha – letisko Prievidza

Záver

Na základe výsledkov laboratórnych skúšok materiálu v laboratóriu a poľných skúšok počas realizácie pohybových plôch letiska sa potvrdili hypotézy o možnosti navrhovať tento materiál pre podkladové vrstvy vozoviek, ktorého hodnoty návrhových parametrov (modul pružnosti) sa nachádzajú medzi mechanicko spevneným kamenivom (MSK) a kamenivom stmeleným cementom (CBGM). Okrem toho je možné optimalizovať aj mechanické parametre podkladovej vrstvy podľa zámeru projektanta a druhu kameniva, ktoré je lokálne dostupné prostredníctvom experimentálneho návrhu zloženia zmesi v laboratóriu. Podstatná časť tuhosti podkladovej vrstvy je dosiahnutá vďaka mechanickej kostre kameniva, ale na celkovej tuhosti sa výrazne podieľa aj chemická väzba puzolánov. Je reálny predpoklad, že vrstva MCSK-TPA by mohla na slovenských cestách nahradiť používanie mechanicky spevnených, ako aj hydraulicky stmelených podkladových vrstiev.

V prípade inovatívnych riešení je bežné, že tieto ešte nie sú podchytené v normách a príslušných technických predpisoch, čo obmedzuje ich použitie v praxi. Legalizáciou riešenia však autor výskumu stráca výhodu na trhu. V našom prípade sme pristúpili k „legalizácii“ tejto inovatívnej podkladovej vrstvy pre použitie na štátnych cestách technickým posúdením notifikovanou osobou.

**Ing. Zsolt Boros, Ing. Filip Buček,
prof. Dr. Ing. Jozef Komačka,
TPA Spoločnosť pre zabezpečenie kvality
a inovácie s.r.o.
doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D., VUT v Brně,
Fakulta stavební**

Literatúra

- [1] Boros Zs. *Mechanical-Chemical Strengthened Base Course MCSB-TPA; SID19 STRABAG Innovation Day, Stuttgart 2019, Germany*
- [2] Boros, Zs., Dancs N., Benkó Zs. *Evaluation of asphalt pavement with bounded and unbounded base courses after 15 years of exploitation under real load and climate condition. XXV. World Road Congress Roads and mobility creating new value from transport. Article 0010. Seoul 2015*
- [3] Boros Zs. *Hodnotenie podkladových vrstiev pokusného poľa na rýchlostnej komunikácii po 16 rokoch exploatácie, Podkladní vrstvy a podloží vozovek, Brno 2014 (Evaluation of base courses in frame of test fields situated in the expressway after 16 years of exploitation. Base courses and Subgrade, Brno 2014, Czech Republic)*
- [4] Boros Zs., Dancs N., Benkó Zs. *Netuhé vozovky v reálnych podmienkach na Slovensku. V. Konferencia nestmelené a hydraulicky stmelené vrstvy vozoviek, Podbanské 2014 (Flexible pavements in real conditions in Slovakia. V. Conference – Unbound and hydraulically bound pavement layers. Podbanské 2014, Slovak Republic)*
- [5] Fiedler J., Bureš P. *Zohľadnění vlastností nestmelených vrstev při navrhování vozovek s využitím laboratorních a poľných zkoušek. VI. Konferencia nestmelené a hydraulicky stmelené vrstvy vozoviek, Podbanské 2015 (Influences of properties of unbound layers when designing pavements using laboratory and field tests. VI. Conference – Unbound and hydraulically bound pavement layers. Podbanské 2015, Slovak Republic)*
- [6] Bonnot J. and comp. *Semi-rigid pavements. PIARC report no. 08.02.B, 1991*
- [7] Slovak Road Administration. *TP 033 – Design of flexible and semi-rigid pavements. Technical conditions. 2009*
- [8] Komačka J., Benkó Zs. *Diagnostika únosnosti asfaltových vozoviek deflektometrami FWD, EDIS 2011, Žilina (Diagnostics of the bearing capacity of asphalt pavements using FWD defletometers. Žilina, Slovak Republic)*
- [9] TSÚS – Building testing and research institute, *Report of pozzolanic reactivity results from quarry Vtáčnik. Slovak Republic. 2018*
- [10] ČSN EN 13286-7 *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji.*
- [11] Boros Zs., Buček F. *Mechanical-chemical strengthened base course (MCSB-TPA) – a green and innovative approach to a new generation of asphalt pavement construction. ICMFA 2022 – 11th International Conference on Maintaining Pavement Assets, Chicago 2022, USA*