



POZNATKY O REALIZOVANÝCH NETUHÝCH VOZOVKÁCH NA SLOVENSKU

ROZBOROVÁ ÚLOHA



Dipl. Ing. Zsolt BOROS

November 2014



TPA skupina Západ - 2014

POZNATKY O REALIZOVANÝCH NETUHÝCH VOZOVKÁCH NA SLOVENSKU

ROZBOROVÁ ÚLOHA

November 2014

pre

Slovenská správa ciest (Slovak Road Administration)
Miletičova 19, 826 19 Bratislava

vyhotovil:

TPA– Spoločnosť pre zabezpečenie kvality a inovácie s. r. o.
Mlynské nivy 61/A
82518 Bratislava-2
Slovakia

Skupina Západ, Svornosti 69, 82011 Bratislava

Dátum: 3.11.2014

Vypracoval: Dipl. Ing. Zsolt BOROS



POZNATKY O REALIZOVANÝCH NETUHÝCH VOZOVKÁCH NA SLOVENSKU

ROZBOROVÁ ÚLOHA

OBSAH

1. Motivácia
2. Cieľ úlohy
3. Zdôvodnenie úlohy
4. Úvod do problematiky
 - 4.1 Problematika polotuhých vozoviek
 - 4.2 Perspektíva netuhých vozoviek
5. Prieskum o postavených netuhých vozovkách na Slovensku
6. Pokusný úsek R1 Báb – Šoporňa a jeho vyhodnotenie po 16. rokoch exploatácie
 - 6.1 Dimenzovanie konštrukcie vozovky pokusného úseku
 - 6.2 Vplyv návrhu zmesi kameniva pre vrstvu mechanicky spevneného kameniva na jeho parametre pre dimenzovanie konštrukcie vozovky
 - 6.2 Meranie únosnosti deflektomerom FWD
 - 6.2.1 Výsledky merania a spracovanie dát
 - 6.3 Orientačné hodnotenie podľa ekvivalentného modulu pružnosti vozovky
 - 6.4 Hodnotenie zvyškovej prevádzkovej výkonnosti vozovky
 - 6.5 Hodnotenie vozovky na základe modulov pružností vrstiev
 - 6.6 Zhrnutie poznatkov z pokusného úseku
7. Odporúčenie pre návrh a posúdenie vrstvy MSK v konštrukcii vozovky
8. Záver



1. Motivácia

Na diaľniciach a rýchlostných komunikáciách dominujú na Slovensku polotuhé vozovky. Prečo je tomu tak? V prvom rade má hydraulicky stmelená podkladová vrstva väčšiu mechanickú účinnosť ako nestmelená podkladová vrstva. S daným faktom súvisí podstatne vyšší modul pružnosti hydraulicky stmelenej vrstvy vo vozovke. Z materiálových vlastností vyplýva ako výsledok výpočtu vozovky pre rovnakú prevádzkovú výkonnosť menšia hrúbka stmelenej podkladovej vrstvy v porovnaní s nestmelenou. Vo výpočte uvažujeme s teoretickým modelom konštrukcie vozovky a s návrhovými parametrami jednotlivých vrstiev. V danom prípade je to najmä modul pružnosti, ale aj Poissonove číslo. Podľa [4] je pre nestmelenú podkladovú vrstvu z MSK návrhový modul pružnosti 600 MPa. V porovnaní s hodnotami CBGM $C_{5/6}$ je návrhový modul pružnosti 1200 MPa a pre CBGM $C_{8/10}$ je to hodnota 2000 MPa. Paradoxné je, že z hľadiska aktuálnych cien na našom trhu sú oba materiály porovnateľné, takže za daných okrajových podmienok nie je možné hospodárne navrhnúť a presadiť netuhú asfaltovú vozovku.

Z pohľadu celoživotného cyklu správy sa stmelených a nestmelených podkladových vrstiev nesmieme zabudnúť, že v úvode popísané porovnanie mechanickej účinnosti oboch vrstiev platí len vo fragmente vozovky s hydraulicky stmelenou podkladovou vrstvou, t.j. len medzi priečnymi termickými trhlinami.

Počas exploatácie opakovane dochádza k termickej retrakcii (spätnému skracovaniu) hydraulicky stmelených vrstiev, ktorá je závislá od pevnosti materiálu stmelenej vrstvy v prostom ťahu a od veľkosti zápornej teploty počas zimného obdobia. Uvedené parametre vplyvajú na vzájomnú vzdialenosť medzi susednými priečnymi trhlinami a samotnú šírku trhliny. Pokiaľ sa neurobia opatrenia na usmernenie vzniku priečných termických trhlín, vznikajú „široké“ trhliny. Jednak je reflexia širšej trhliny cez asfaltové vrstvy vozovky rýchlejšia a následná degradácia vplyvom dopravného zaťaženia (v súčinnosti s klimatickými vplyvmi) má za následok postupne sa rozširujúce drvenie vrstiev v mieste trhliny. Degradácia takéhoto charakteru si potom vyžaduje nákladný rehabilitačný zásah až do hydraulicky stmelenej vrstvy. V prípade usmernenia priečných trhlín niektorým zo známych spôsobov, napríklad narezaním po zatuhnutí hydraulicky stmelenej vrstvy do hĺbky 1/3 hrúbky vrstvy, vo vzdialenosti zvolenej podľa výpočtu uvažovanej šírky trhliny, tieto vznikajú v preddefinovaných (usmernených) miestach s menšími vzdialenosťami medzi nimi. Takýmto spôsobom možno predĺžiť aj spolupôsobenie medzi susednými blokmi vrstvy v mieste trhliny a zabezpečiť prenos zaťaženia pomocou zazubenia trhliny pod narezanou škárou. (Spolupôsobenie na polotuhých vozovkách medzi reflexnými trhlinami sa tiež skúša deflektomerom FWD, podobným spôsobom ako na škárach cementobetónových vozoviek). Treba si však uvedomiť, že usmernenie termických trhlín v hydraulicky stmelených vrstvách sa u nás vo všeobecnosti zanedbáva, alebo sa so súvisiacimi nákladmi na ich realizáciu v projekte nepočíta. Výsledkom je vysoká mechanická účinnosť vo fragmente polotuhej vozovky, ale vozovka je náchylná na poruchy rovinatosti a únosnosti lokálneho ale pravidelného charakteru.

V rámci posúdenia konštrukcie vozovky podľa návrhovej metódy [4] sa jednak uvažujú menšie moduly pružnosti ako sú v skutočnosti (platí pre všetky vrstvy a materiály). Vo



výpočtoch nie je možné uplatňovať poznatky o vyšších hodnotách modulov pružností vrstiev na základe (funkčných) laboratórnych skúšok. V prípade správneho návrhu aj zhotovenia vozovky by sa parametre nestmelenej podkladovej vrstvy počas užívania meniť nemali. V prípade hydraulicky stmelenej podkladovej vrstvy to tak určite nie je, napr. juhoafrická návrhová metóda SAPDM zohľadňuje 3 rôzne stavy tejto vrstvy počas exploatácie vozovky.

Aby bolo z ekonomického hľadiska možné navrhnuť netuhé asfaltové vozovky pre cesty s najväčším dopravným zaťažením, je potrebné zistiť hodnoty modulov pružností v reálnych konštrukciách vozoviek a uvažovať s použitím vyššej hodnoty modulu pružnosti pre vrstvu MSK v procese posúdenia návrhu konštrukcie vozovky.

Pre daný zámer je zriadenie pokusného úseku netuhej vozovky na rýchlostnej ceste R1 včlenenej medzi polotuhú vozovku z roku 1998 v mieste Báb – Šoporňa úplne ideálny. Z historických údajov sú známe aj parametre použitých materiálov z laboratória. Na obe konštrukcie vozovky vplývajú okrajové podmienky namáhania rovnako (dopravné zaťaženie, klíma), obe vrstvy majú rovnaké hrúbky, kde boli použité aj rovnaké asfaltové vrstvy - parametre podkladových vrstiev možno vzájomne dobre porovnávať. Ďalším podkladom pre skúmanie je pokračovanie rýchlostnej cesty R1 vo forme netuhej vozovky. Vzhľadom na model užívania a vlastníctva tohto úseku (PPP) nie je zatiaľ možné publikovať výsledky.

Za týmto účelom boli na pokusnom úseku R1 Báb – Šoporňa urobené merania zariadením FWD a zisťované hodnoty modulov pružností zo spätného výpočtu.

Ďalej boli realizované merania pomernej únosnosti vrstvy MSK priamo vo vozovke po urobení vývrtov do asfaltových vrstiev. Dozvedeli sme sa aj o ďalších úsekoch netuhých vozoviek postavených v minulosti. Uvedený postup je možné zopakovať aj na týchto úsekoch.

2. Cieľ úlohy

Cieľom úlohy je hľadanie referencií, kde boli postavené netuhé vozovky na Slovensku. Ďalším cieľom je overenie modulu pružnosti podkladovej vrstvy z mechanicky spevneného kameniva na existujúcej vozovke pomocou deštruktívnych a nedeštruktívnych skúšobných a výpočtových metód a porovnanie s návrhovou hodnotou, ktorú používame vo fáze dimenzovania vozovky. Aplikovaný rad skúšok tvorí určitý súbor skúšobného postupu. Definovaný skúšobný postup má za cieľ slúžiť ako postup pre overenie parametrov podkladovej vrstvy aj na ďalších úsekoch.

3. Zdôvodnenie úlohy

Na Slovensku naďalej prevládajú pre diaľnice a rýchlostné cesty polotuhé asfaltové vozovky so stmelenu podkladovou vrstvou.

V prípade polotuhých vozoviek je dôležitým (ekonomicko-technickým) kritériom aj problémom prekopírovanie (reflexia) termických trhlin zo stmelenej podkladovej vrstvy na povrch vozovky.

Jedným z riešení problému reflexných trhlin asfaltových vozoviek je návrh a realizácia netuhých vozoviek.

Približne pred 16. rokmi bolo vyvinuté veľké úsilie na presadenie aj netuhých konštrukcií vozoviek pre veľké dopravné zaťaženie.

Pre tento cieľ bol urobený v roku 1998 pokusný úsek netuhej konštrukcie vozovky, ktorý bol včlenený do úseku rýchlostnej cesty s polotuhou konštrukciou vozovky.

Tento odvážny pokus má dnes veľmi cennú výpovednú hodnotu, pretože stmelená aj nestmelená podkladová vrstva má rovnakú hrúbku.

Na základe výsledkov laboratórnych a poľných skúšok CBR, modulov pružností podkladových vrstiev získaných spätným výpočtom z meraní deflektomerom FWD urobiť odporúčenia na prehodnotenie návrhového modulu pružnosti vrstvy mechanicky spevneného kameniva (MSK).



Obr.1: Celkový pohľad na vozovku rýchlostnej komunikácie R1 s vyznačením približného rozsahu časti s nestmelenou podkladovou vrstvou

4. Úvod do problematiky

Správanie sa asfaltových vozoviek z hľadiska mechaniky vozoviek je ovplyvnené tuhosťou podkladových vrstiev a tuhosťou ochrannnej vrstvy. V prípade asfaltovej vozovky s nestmelenými podkladovými vrstvami a nestmelenou ochrannou vrstvou hovoríme o netuhej vozovke. V prípade asfaltovej vozovky s podkladovou vrstvou stmelenou hydraulickým spojivom hovoríme o polotuhej vozovke.

Mnohé užitočné informácie týkajúce sa prístupu k navrhovaniu polotuhých vozoviek vo svete sa čerpali z materiálov svetovej organizácie AIPCR – PIARC [5].



4.1 Problematika polotuhých vozoviek

Polotuhé konštrukcie vozoviek sa bežne navrhujú a aj úspešne realizujú v rôznych klimatických podmienkach sveta. Majú však svoje zákonitosti, ktoré si vyžadujú osobitý prístup v procese návrhu konštrukcie vozovky a tiež v procese návrhu, výroby a spracovania stavebnej zmesi. Vo fáze konceptu návrhu polotuhej vozovky možno v zásade uvažovať o troch možnostiach pôsobenia hydraulicky stmelenej vrstvy vo vozovke, od čoho sa odvíja hlavne neskorší spôsob údržby. Ak zohľadníme prevládajúce typy konštrukcií vozoviek v jednotlivých krajinách, môžeme rozlišovať koncept návrhu vozovky so stmelenou vrstvou s nízkymi pevnosťami (7-dňové pevnosti sú nižšie ako 2 MPa, modul pružnosti je od 1 000 MPa do 2 000 MPa), napríklad Švajčiarsko; so stmelenou vrstvou so strednými pevnosťami (7-dňové pevnosti sú medzi 2,5 MPa a 4,5 MPa, modul pružnosti od 7 000 MPa do 10 000 MPa), napríklad Taliansko; a so stmelenou vrstvou s vysokými pevnosťami (7-dňové pevnosti sú vyššie ako 10 MPa, modul pružnosti je od 15 000 MPa do 30 000 MPa), napríklad Francúzsko. Najrozšírenejší spôsob návrhu polotuhej konštrukcie asfaltových vozoviek uvažuje obe stmelené vrstvy (asfaltom aj hydraulicky) do ohybovej tuhosti vozovky. V koncepcii návrhu je dôležitým (ekonomicko-technickým) kritériom prekopírovanie (reflexia) termických trhlin zo stmelenej podkladovej vrstvy na povrch vozovky.

Vznik reflexných trhlin možno oddialiť pomocou voľby hydraulického spojiva, kombináciou hrúbok vrstiev alebo jednoducho akceptáciou týchto trhlin a ich systematickým ošetrovaním počas životnosti vozovky. Na Slovensku prevláda koncept návrhu stmelených podkladových vrstiev s nižšími pevnosťami a modulmi pružnosti s prekrytím týchto vrstiev relatívne hrubým asfaltovým súvrstvom na oddialenie času prekopírovania trhlin.

4.2 Perspektíva netuhých vozoviek

Okrem spomínaných komplikácií, ktoré musí projektant pri návrhu stmelených podkladových vrstiev pri asfaltových vozovkách zohľadniť a riešiť, existuje ešte rad dôvodov, prečo sa zamyslieť nad širším využitím netuhých vozoviek. Jedným z posledných pozitívnych príkladov realizácie netuhej konštrukcie vozovky je aj prvý PPP projekt na Slovensku, ktorý je vlastne pokračovaním rýchlostnej cesty R1 – jej časťou je práve opisovaný pokusný úsek. Medzi výhody nestmelenej podkladovej vrstvy z mechanicky spevneného kameniva (MSK) patria vysoký denný výrobný výkon miešacieho zariadenia, eliminácia potreby času čakania na dosiahnutie potrebných pevností vrstvy na umožnenie ukladania ďalšej asfaltovej vrstvy a eliminácia problematiky riešenia reflexných trhlin. Podmienkou je zaistenie kameniva potrebnej kvality v dostatočnej blízkosti. Z ekologického hľadiska sa podstatne zníži energetická náročnosť na realizáciu podkladovej vrstvy, čo sa prejaví aj znížením emisií CO₂.



5. Prieskum o netuhých vozovkách na Slovensku

Z dôvodu snahy o prieskum histórie výstavby netuhých vozoviek bol vypracovaný dotazník, ktorý bol rozoslaný slovenským odborníkom v oblasti cestného staviteľstva. Z mála doteraz obdržaných odpovedí vyplýva, že pre diaľnice a rýchlostné cesty máme pre netuhé vozovky nasledovné referencie:

- rýchlostná cesta R1, Báb – Šoporňa, uvedenie do prevádzky v roku 1998, pokusný úsek s dĺžkou približne 50 m,
- rýchlostná cesta R1, Nitra – Tekovské Nemce a severný obchvat mesta Banská Bystrica, uvedenie do prevádzky v roku 2011, celková dĺžka úseku približne 51,6 km, ktoré budú podrobnejšie analyzované v ďalších častiach úlohy,
- rýchlostná cesta R1, Jalná – Hronská Breznica, bez presnejších údajov,
- rýchlostná cesta R1, Tekovské Nemce – Nová Baňa, uvedenie do prevádzky v roku 2000, bez presnejších údajov,
- rekonštrukcia cesty I/15 Domaša, uvedenie do prevádzky v roku 2010, celková dĺžka úseku približne 2,5 km,
- diaľničný privádzač na D1 v časti Prešov západ.

Na základe písomného spracovania historických údajov RNDr. Klačanským uvádzame všeobecné informácie o lokalizácii ďalších úsekov s netuhou konštrukciou vozovky na Slovensku:

Experimenty s použitím konštrukčnej vrstvy na báze triedenej resp. netriedenej štrkodrviny majú začiatok už v 70-tich rokoch. V minulosti existoval tzv. ISGR t.j. Inžinierske staviteľstvo generálne riaditeľstvo kde patrilo o. i. aj Doprastav Bratislava a Inžinierske stavby Košice, ktoré realizovali výstavbu komunikácií, samozrejme aj Cestné stavby ktoré patrili Krajom.

V rámci ISGR existovali v jednotlivých podnikoch odbory technického vývoja, ktoré mali za úlohu aplikovať výsledky štátnych úloh do praxe v úzkej spolupráci s týmito organizáciami ako VUIS, CVVL a pod. formou tzv. odborových úloh.

Rozdelenie sféry bolo také, že Doprastav pôsobil hlavne v oblasti západného a stredného Slovenska a Inžinierske stavby v oblasti východného Slovenska.

Okrem vlastných informácií sme čerпали skúsenosti a podnety aj v rámci družobných podnikov v rámci RVHP. Stretávali sme sa so zástupcami vývojových organizačných zložiek podnikov z NDR Autobahn Kombinat Magdeburg a Maďarska Betonutépítő Budapest.

Tak sa na Doprastav, odbor technického vývoja, dostala v roku 1978 úloha tzv. Mineralbeton, ktorá bola pridelená RNDr. Klačanskému ako zodpovednému riešiteľovi. Úloha po overení na pokusných úsekoch končila vydaním TcHP s pôsobnosťou na celé Československo.

Pri realizácii pokusného úseku v rámci pôsobenia závodu vo Zvolene vyšlo najavo, že podobná konštrukcia už bola realizovaná na stavbe prekládky št. cesty I/66 Brusno v rámci vetiev na križovatke už v roku 1971-72. Použitá bola štrkodrvina frakcie 0/32 resp. 0/45 v hrúbke 20 cm.



V 80-tich rokoch sa v rámci úlohy, ktorá sa zaoberala využitím miestnych zdrojov overovalo použitie štrkodrviny ako náhrady cementovej stabilizácie. Pravdepodobne sa vtedy prvý raz použil výraz mechanický spevnené kamenivo - MSK. Realizovali sa pokusné úseky v oblasti Zvolena, Banskej Bystrice, Žiliny. Výsledkom bol revidovaný TcHP, ktorého spolu riešiteľom bol taktiež RNDr. Klačanský. Úloha sa riešila približne v roku 1985.

Posledné práce súvisiace s použitím MSK, prebiehali na Doprastave okolo roku 2000. Boli realizované pokusné úseky v oblasti Žiliny a Zvolena, v Bratislave to bol úsek s vibrovaným štrkopieskom. Výsledkom bol ďalší revidovaný TcHP.

Presný zoznam pokusných úsekov sa nachádza v materiáloch ako sú záverečné správy, ktoré by sa mali nachádzať v archíve Doprastavu. Pokusné úseky sa realizovali na cestách I. a II. triedy na parkoviskách a iných spevnených plochách nie na diaľniciach. Archív ISGR je pravdepodobne skartovaný. Pre overenie tohto stavu je potrebné vykonať hlbší prieskum v Štátnom archíve.

5.1 Rýchlostná cesta R1, Báb – Šoporňa

Zatiaľ najcennejším úsekom s netuhou konštrukciou vozovky sa nachádza na rýchlostnej ceste R1 Báb – Šoporňa (v uzlovom lokalizačnom systéme medzi uzlami: 4512A01404 a 4512A01303). Pokusný úsek je včlenený do úseku rýchlostnej cesty s polotuhou konštrukciou vozovky a má dĺžku 50 m, do prevádzky bol uvedený v roku 1998. Je najcennejším úsekom jednak z hľadiska jeho zámeru naplánovania – rovnaké hrúbky oboch podkladových vrstiev pre možnosti porovnania, jednak z hľadiska dĺžky jeho prevádzky (cca. 16 rokov), ďalej existencie historických údajov o výsledkoch laboratórnych skúšok o výbere a zložení kameniva pre vrstvu MSK a taktiež existencie výsledkov meraní deflektometrom FWD spred 14 rokov.

Skladba konštrukcie vozovky je uvedená v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Skladba konštrukcie netuhej vozovky na úseku R1 Báb - Šoporňa [2]

Netuhá konštrukcia vozovky			
R1 Báb – Šoporňa			
Skladba konštrukcie vozovky	označenie		hrúbka
	pôvodné	nové	(mm)
asfaltový betón modifikovaný	AB-MI	AC O PMB	50
asfaltový betón	AB II	AC L	60
obaľované kamenivo	OK I	AC P	110
mechanicky spevnené kamenivo	MSK	UM MSK	180
štrkodrvina	ŠD	UM ŠD	160
podložie	E _{p,n} = 45 MPa		
celková hrúbka vozovky			560



5.2 Rýchlostná cesta R1, Nitra – Tekovské Nemce a severný obchvat mesta Banská Bystrica

Ojedinelým prípadom realizácie netuhej konštrukcie vozovky pre rýchlostnú komunikáciu vo veľkom rozsahu je prvý PPP projekt na Slovensku v úsekoch Nitra, západ – Selenec o dĺžke 12 589 m, Selenec - Beladice o dĺžke 18 967 m a Beladice - Tekovské Nemce o dĺžke 14 310 m ktoré boli ukončené v septembri roku 2011. Skladba konštrukcie vozovky je uvedená v tabuľke 2.

Tabuľka 2: Skladba konštrukcie netuhej vozovky na úseku R1 Nitra – Tekovské Nemce [údaje z projektu]

Netuhá konštrukcia vozovky		
R1 Nitra - Tekovské Nemce		
Skladba konštrukcie vozovky	označenie	hrúbka (mm)
asfaltový koberec mastixový	SMA 11, PMB	40
asfaltový betón	AC 22 L, PMB	70
asfaltový betón s veľkou tuhosťou	VMT	90
mechanicky spevnené kamenivo	UM MSK 0/31,5	240
štrkodrvina	UM ŠD 31,5	200
podložie	$E_{p,n} = 90 \text{ MPa}$	
celková hrúbka vozovky		640

Informácie o výsledkoch merania deflektomerom FWD (a súvisiacich výsledkoch výpočtov modulov pružností vrstiev konštrukcie vozovky) nie je dovolené publikovať.

5.3 Rýchlostná cesta R1, Jalná – Hronská Breznica

Ďalšie podrobnosti nám nie sú zatiaľ známe. Pre získanie podrobnejších informácií je potrebné ďalšie bibliografické štúdium archívu NDS.



6. Pokusný úsek R1 Báb – Šoporňa a jeho vyhodnotenie po 16. rokoch exploatácie

Pokusný úsek sa nachádza na rýchlostnej ceste R1 Báb – Šoporňa v uzlovom lokalizačnom systéme medzi uzlami: 4512A01404 a 4512A01303. Pokusný úsek je včlenený do úseku rýchlostnej cesty s polotuhou konštrukciou vozovky, kde je vystavený rovnakým klimatickým aj dopravným okrajovým podmienkam od roku 1998.

Podľa [2] bol pokusný úsek navrhnutý v dĺžke 100 m a dvomi sekciami. Sekcia s polotuhou skladbou konštrukcie vozovky má dĺžku 25 m (a následne vybudované príslušné časti rýchlostnej komunikácie) a netuhá konštrukcia vozovky má dĺžku 50 m. Skladby konštrukcií vozoviek a ich posúdenie sú uvedené v tabuľkách 3 a 4.

6.1 Dimenzovanie konštrukcie vozovky pokusného úseku

Dopravné zaťaženie pre dimenzovanie konštrukcie vozovky, vyjadrené počtom návrhovej nápravy je $N_c = 19,9 \times 10^6$ prejazdov návrhovej nápravy.

Tabuľka 3: Skladba konštrukcie polotuhej vozovky a jej posúdenie [2]

Polotuhá konštrukcia vozovky					
Skladba konštrukcie vozovky	označenie		hrúbka	súčiniteľ využitia vrstvy	prevádzková výkonnosť
	pôvodné	nové	(mm)		NC,max (100 kN)
asfaltový betón modifikovaný	AB-MI	AC O PMB	50		
asfaltový betón	AB II	AC L	60		
obaľované kamenivo	OK I	AC P	110	0,762	41,399x10 ⁶
stabilizácia cementom	SC I	CBGM C _{5/6}	180	0,994	21,013x10 ⁶
štrkopiesok	ŠP	ŠD C _{dek.}	160		
podložie	E _{p,n} = 45 MPa			0,5	
celková hrúbka vozovky			560		

Tabuľka 4: Skladba konštrukcie netuhej vozovky a jej posúdenie [2]

Netuhá konštrukcia vozovky					
Skladba konštrukcie vozovky	označenie		hrúbka	súčiniteľ využitia vrstvy	prevádzková výkonnosť
	pôvodné	nové	(mm)		NC,max (100 kN)
asfaltový betón modifikovaný	AB-MI	AC O PMB	50		
asfaltový betón	AB II	AC L	60		
obaľované kamenivo	OK I	AC P	110	0,936	24,344x10 ⁶
mechanicky spevnené kamenivo	MSK	UM MSK	180	0,952	
štrkodrvina	ŠD	UM ŠD	160	0,658	
podložie	E _{p,n} = 45 MPa			0,511	
celková hrúbka vozovky			560		



6.2 Vplyv návrhu zmesi kameniva pre vrstvu mechanicky spevneného kameniva na jeho parametre pre dimenzovanie konštrukcie vozovky

Návrh zmesi kameniva pre vrstvu MSK bol predmetom výskumnej úlohy [2], v rámci ktorej boli spracované viaceré návrhy skladby zmesi kameniva. Dve z nich boli vybrané na stanovenie parametrov únosnosti CBR, čo ponúka dobrý podklad pre zvýraznenie vplyvu zloženia zmesi (z toho istého zdroja materiálu – lomu) na jeho parametre únosnosti vo vozovke. Uvedené indikuje snahu o diferencovanie modulu pružnosti vrstvy (ako návrhového parametra) vo vozovke pre rôzne kvalitatívne úrovne tejto vrstvy.

6.2.1 Návrh zmesi kameniva

Návrh zmesi kameniva pre MSK bol urobený v súlade s vtedy (1998) platnou STN 73 6126 „Stavba vozoviek. Nestmelené vrstvy“ tak, aby výsledná čiara zrnitosti kameniva ležala vo vnútri oboru zrnitosti. Pri návrhu bolo uvažované s kamenivom frakcií: 0-4, 4-8, 8-16 a 16-32 mm. Pre porovnanie pomeru únosnosti CBR boli vybrané zloženia zmesi kameniva uvedené v tabuľke 5.

Tabuľka 5 – Zloženie zmesi kameniva pre vrstvu MSK [2]

frakcia (mm)	zmes kameniva	
	č. 1 (%)	č. 2 (%)
0-4	58	44
4-8	10	13
8-16	7	13
16-32	25	30

Parametre zhutnenia boli stanovené skúškou zhutniteľnosti Proctor modifikovaný – metóda D s nasledovnými parametrami uvedenými v tabuľke 6.

Tabuľka 6 – Parametre zhutnenia zmesí kameniva pre vrstvu MSK [2]

zmes kameniva	maximálna objemová hmotnosť $\zeta_{d, \max, PM} \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$	optimálna vlhkosť $w_{opt, PM} \text{ (%)}$
č. 1	2,255	6,75
č. 2	2,210	4,75

Podľa normy STN 73 6126 (1996) platnej v čase prípravy musela navrhnutá zmes kameniva pre vrstvu MSK dosiahnuť na vzorke po sytení vodou hodnotu pomeru únosnosti CBR minimálne 80 %. Skúšky CBR boli urobené podľa normy STN 72 1016. Vzorky zmesi kameniva pre MSK boli zhutnené na maximálnu objemovú hmotnosť PM pri optimálnej



vlhkosti. Z každej zmesi boli vyrobené dve vzorky. Pomer únosnosti CBR bol stanovený hneď po výrobe a po sýtení vzorky. Priemerné hodnoty CBR sú uvedené v tabuľke 7.

Tabuľka 7 – Priemerné hodnoty kalifornského pomeru únosnosti CBR [2]

	Priemerná hodnota CBR			
	zmes kameniva č. 1		zmes kameniva č. 2	
	po výrobe (%)	po sýtení (%)	po výrobe (%)	po sýtení (%)
CBR_{2,54}	78	182	72	83
CBR_{5,08}	105	173	103	119

Obe zmesi vyhoveli požiadavkám normy, jednak zmes č. 1 dosahovala lepšie výsledky ako zmes č. 2. Pre realizáciu pokusného úseku bola pre vrstvu MSK vybratá zmes kameniva č. 1

6.2.2 Parametre vrstvy MSK v návrhovej metóde

V Slovenskej návrhovej metóde [4] má vrstva z MSK výrazne nižšie hodnoty modulu pružnosti ako stmelené zmesi, z čoho vo výpočtoch priamo úmerne vychádzajú pre MSK hrubšie vrstvy. Pokusný úsek je zaujímavý aj z toho hľadiska, že pre oba druhy podkladových vrstiev bola zvolená rovnaká hrúbka.

Tabuľka 8 – Výpočtové hodnoty modulov pružností materiálov pre stmelené aj nestmelené vrstvy [4]

Zmes	Modul pružnosti E (MPa)	Poissonovo číslo μ
CBGM C _{1,5/2}	700	0.30
CBGM C _{3/4}	1000	0.25
CBGM C _{5/6}	1200	0.25
CBGM C _{8/10}	2000	0.22
CBGM C _{12/15}	2500	0.22
ŠD C dekl. (ŠP)	120	0.35
ŠD	350	0.30
ŠV	500	0.25
MSK	600	0.25

V súčasnosti platná norma STN 73 6126 (2011) má iné požiadavky na zmes kameniva pre vrstvu MSK, a to: minimálny index okamžitej únosnosti IBI podľa STN EN 13286-47 je 100 %. Napriek zmeneným požiadavkám oproti pôvodnej norme sa v návrhovej metóde sa nezmenili návrhové hodnoty modulov pružností pre vrstvu MSK. Na základe empirických vzťahov je možno predpokladať, že v návrhu konštrukcie vozovky možno použiť vyššie hodnoty modulu pružnosti vrstvy z MSK ako je uvedené v návrhovej metóde. Z tabuľky 5 je



zrejme, že na modul pružnosti vrstvy výrazne vplýva zloženie nestmelenej vrstvy (okrem vplyvu druhu horniny, podložia a technológie zabudovania). Ak len uvažíme síce starší, ale dodnes používaný (napr. FAA pre navrhovanie letísk) vzťah podľa štúdií Heukeloma a Klompa z roku 1962, ktorý síce platí len do hodnoty CBR 100% (pre nestmelené a nesúdržné materiály):

$$E = 1500 \text{ CBR (Psi)}$$

možno napríklad vypočítať, že modul pružnosti E pre hraničný prípad CBR 100 % $E = 1034,2$ MPa, čo je výrazne vyššia hodnota ako je uvedená v návrhovej metóde [4].

6.2.3 Overenie pomernej únosnosti CBR z laboratória na vrstve MSK meraním okamžitého indexu únosnosti in situ vo vozovke

Dňa 19.8.2014 boli urobené jadrové vývrty na zistenie hrúbok asfaltových vrstiev konštrukcie vozovky (5 ks v rade za sebou s odstupom á 1 m). Po odobratí jadrových vývrtov sa využila možnosť a v ich mieste boli urobené merania IBI – poľným zariadením. (Vzhľadom na komplikácie pri prvých skúsenostiach s takýmto meraním, ako napríklad nastavenie protiváhy, časová náročnosť vo vzťahu s blokováním jazdného pruhu a pod. boli urobené len 2 merania).

Tabuľka 9 – Hrúbky asfaltom stmelených vrstiev vozovky pokusného úseku získané z jadrových vývrtov

vrstva	vývrt hrúbka (mm)				
	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5
asfaltová zmes obrusná vrstva krytu	55,6	54,1	52,3	51,4	53,3
asfaltová zmes ložná vrstva krytu	96,1	95,2	94,6	93,9	91,8
asfaltová zmes horná podkladová vrstva	76,6	72,9	75,2	75,0	70,8
celkom	228,3	222,2	222,1	220,3	215,9

Tabuľka 10 – Pomery únosnosti IBI – meranie vo vozovke

Vrstva konštrukcie vozovky	č. vývrtu (miesto sondy)	
	1	3
UM MSK 0/31,5	IBI _{2,5} = 140 %	IBI _{2,5} = 135 %
	priemerná hodnota IBI _{2,5} = 140 %	

Výsledky IBI_{2,5} sú vypočítané z nameraných hodnôt zo skúšky bez opravy stupnice penetrácie, výsledky IBI_{5,0} nebolo možné vypočítať vzhľadom na maximálny rozsah meracieho zariadenia (30 kN) – ten bol dosiahnutý pri penetrácii 3,5 mm.



Okamžitý index únosnosti meraný na vrstve mechanicky spevneného kameniva v 2 susedných miestach vo vozovke $IBI_{2,54} = 140 \%$ ukazuje podstatne vyššie hodnoty, ako boli hodnoty kalifornského pomeru únosnosti CBR namerané v laboratóriu v čase návrhu zmesi (1998), tabuľka 5 – zmes kameniva č. 1 pred sýtením $CBR_{2,54} = 78 \%$ a podstatne nižšie hodnoty ako boli laboratórne skúšky po sýtení $CBR_{2,54} = 182 \%$.

Hodnota $IBI_{2,54} = 140 \%$ v danom prípade naplnila očakávania a predpoklady o podstatne vyšších parametroch fiktívneho modulu pružnosti nestmelenej vrstvy UM MSK v porovnaní s výpočtovými hodnotami. V ďalšej časti budú uvedené moduly pružnosti danej vrstvy získané zo spätných výpočtov z meraní deflektomerom FWD.

6.3 Meranie únosnosti deflektomerom FWD

V spolupráci so Slovenskou správou ciest (SSC) sa v rámci zámeru dlhodobého pozorovania a hodnotenia netuhých vozoviek na Slovensku urobilo niekoľko meraní únosnosti zariadeniami FWD typu KUAB 2m –150 a aj FWD typu Dynatest 8000. Vďaka databáze SSC bolo potom možné vyšetriť aj výsledky z merania únosnosti vozovky v roku 2001. Výsledkom merania sú priehyby na povrchu vozovky pri opakovanom zaťažení v miestach priehybomerov so súbežným záznamom času merania, teploty vzduchu a povrchu vozovky v čase merania a polohe merania v súradniciach GPS. Na pokusnom úseku boli overené hrúbky vrstiev vozovky len prednedávnom. Jedna časť vyhodnotenia je na základe merania z roku 2013, kedy sme ešte nemali k dispozícii hrúbky vrstiev konštrukcie a je zameraná na orientačné hodnotenie na základe ekvivalentného modulu pružnosti vozovky. Ďalšia časť vyhodnotenia je na základe modulov pružností podkladových vrstiev vozovky na základe spätného výpočtu z priehybov meraných deflektomerom FWD.

Prvé meranie bolo realizované v spolupráci so Slovenskou správou ciest dňa 24. 7. 2013.

Meracie zariadenie: FWD typ KUAB 2m – 150 (čas nábehu zaťaženia 17 ms až 23 ms, trvanie zaťaženia 40 ms až 60 ms, segmentové zaťažovacie dosky s priemerom 300 mm a 450 mm), zaťaženie 50k, počet snímačov priehybu 7 vo vzdialenosti od stredu zaťaženia: 0, 300, 450, 600, 900, 1 200 a 1 500 mm.

Meraný úsek: 300 m v kroku 10 m (5 m v mieste pokusného úseku)

Miesto merania: pravý jazdný pruh, v mieste stopy pravého kolesa a v mieste medzi kolesami.

Opakovanie merania: v čase od 6:00 hod pri priemernej teplote povrchu vozovky 21 °C pre pravý jazdný pruh a pravú stopu kolesa 24 °C pre stred dopravného pruhu.

V čase od 11:00 hod pri priemernej teplote povrchu vozovky 41 °C pre pravý jazdný pruh a pravú stopu kolesa a 44 °C pre stred dopravného pruhu.

Vďaka databáze Slovenskej správy ciest bolo možné vyšetriť aj výsledky z merania únosnosti vozovky v roku 2001.



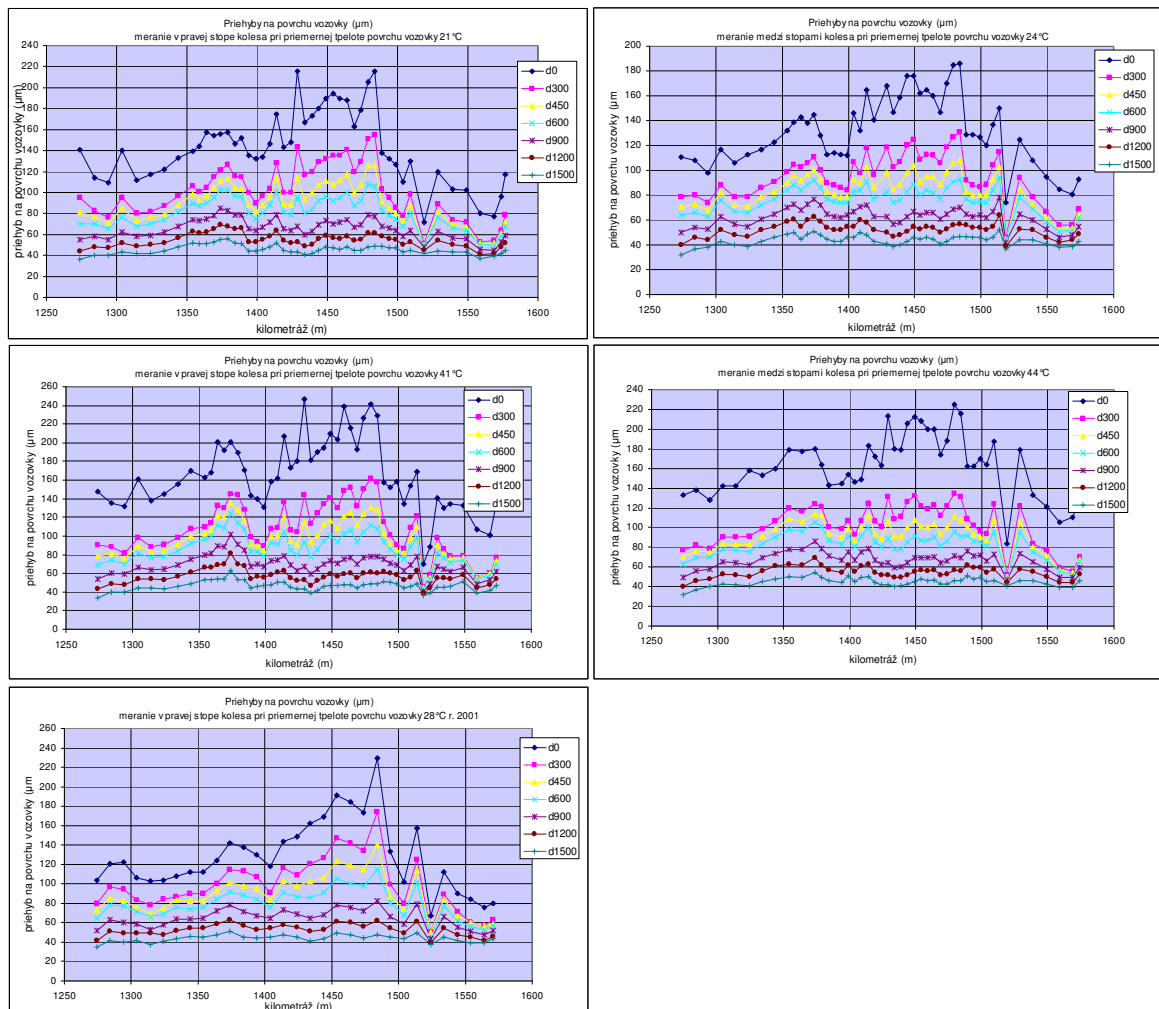
Obr.2: Meranie únosnosti pokusného úseku deflektometrami FWD typu KUAB a DYNATEST



Obr. 3: Meranie teploty asfaltových vrstiev v rôznych hĺbkach pomocou snímačov osadených vo vozovke

Ďalšie meranie bolo realizované za súčasného merania dvoch zariadení KUAB a Dynatest dňa 30. 10. 2013. Meracie zariadenie: DYNATEST FWD 8000 (trvanie zaťaženia 25 ms, segmentové zaťažovacie dosky s priemerom 300 mm a tuhá doska s priemerom 450 mm), zaťaženie od 7 do 120 kN, počet snímačov priehybu 9 (celkom 13 – do kríža pod zaťažovacou doskou) vo vzdialenosti od stredu zaťaženia: 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1 200, 1 500 a 1 800 mm. Meranie bolo z časových a bezpečnostných dôvodov urobené len v pravej stope kolesa pravého jazdného pruhu. Merania slúžili na spätný výpočet modulov pružností vrstiev licencovaným programom ELMOD 6.

6.3.1 Výsledky merania a spracovanie dát



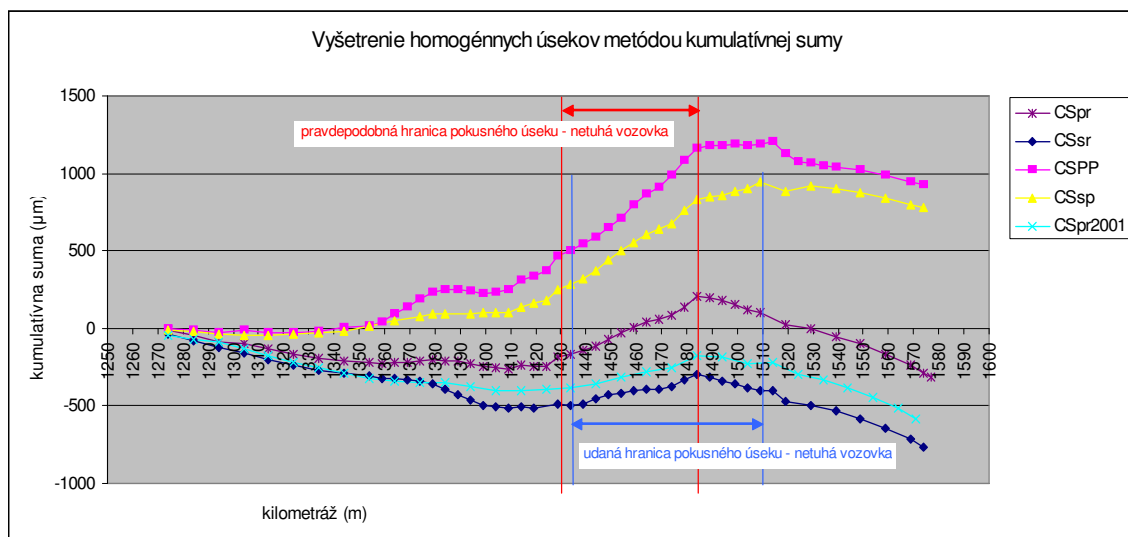
Obrázok 4 – Grafický záznam z jednotlivých meraní prieťahov zariadením FWD KUAB, 4 merania z roku 2013 a 1 meranie z roku 2001

Výsledkom merania sú prieťahy na povrchu vozovky pri opakovanom zaťažení v miestach prieťahomerov so súbežným záznamom času merania, teploty vzduchu a povrchu vozovky v čase merania a polohy merania v súradniciach GPS. Na pokusnom úseku v prvej fáze neboli overené hrúbky vrstiev vozovky, avšak neskoršie vývrty potvrdili projektované hrúbky. Boli realizované aj merania Georadarom, ktorých výsledky nie sú k dispozícii v čase odovzdania úlohy.

Na ľavej strane obrázku 4 sú merania v pravej stope kola pravého jazdného pruhu vozovky a na pravej strane merania medzi stopami kola pravého jazdného pruhu vozovky.

V rámci spracovania dát bol urobený prepočet priehybov na štandardné zaťaženie 50 kN a pre potreby spätného výpočtu modulov vrstiev a výpočtu zvyškovej prevádzkovej výkonnosti vozovky a na teplotu podľa vzťahu z TP 1/2009 [3]. Vzhľadom na skutočnosť, že merané priehyby pri rôznych teplotách asfaltových zmesí neukazovali zhodu s všeobecným vzorcom na prepočet priehybov od teploty, pre potreby ďalšieho šetrenia priehybov sme tento nepoužili.

Pri overení začiatku a konca pokusného úseku metódou kumulatívnej sumy sme zistili, že pravdepodobne je začiatok aj koniec posunutý voči udaným hodnotám, čo vysvetľuje obrázok 5. Koniec úseku je jasný z CSpr, CSsr, CSpr2001 aj CSpp (je zaujímavé, že v prípade CSsp nie je pozorovateľná výrazná zmena sklonu ako v iných prípadoch). Začiatok úseku nie je tak zrejмый z uvedeného šetrenia ako koniec – tu nám pomohlo vyšetrenie indexov priehybov, najmä BDI600. Je možné vysloviť názor, že dĺžka pokusného úseku má začiatok v mieste merania 1.430 (km 27,517) a koniec v mieste merania 1.484 (km 27,463).



Obrázok 5: Kumulatívna suma centrálnych priehybov všetkých piatich meraní (CSpr – pravý jazdný pruh, pravá stopa kolesa, meranie ráno; CSsr – stred pravého jazdného pruhu, meranie ráno; CSpp – pravý jazdný pruh, pravá stopa kolesa, meranie na poľudnie; CSsp – stred pravého jazdného pruhu, meranie na poľudnie; CSpr2001 – pravý jazdný pruh, pravá stopa kolesa, meranie ráno, rok 2001). Meracie zariadenie: FWD KUAB 2m - 150

6.4 Orientačné hodnotenie podľa ekvivalentného modulu pružnosti vozovky

V rámci orientačného hodnotenia únosnosti asfaltových vozoviek podľa [3] sú uvedené hodnoty ekvivalentného modulu pružnosti na pokusnom úseku netuhej vozovky, na susedných úsekoch polotuhej vozovky a pre možnosť porovnania aj celého meraného úseku.

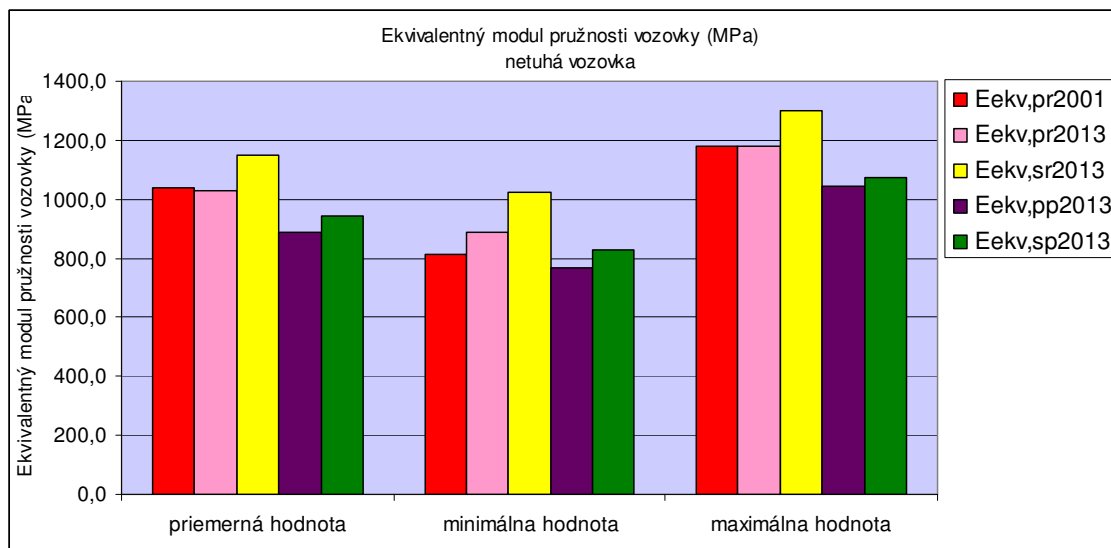


Tabuľka 11 – Hodnotenie pokusného úseku na základe ekvivalentného modulu pružnosti vozovky. Meracie zariadenie: FWD KUAB 2m - 150

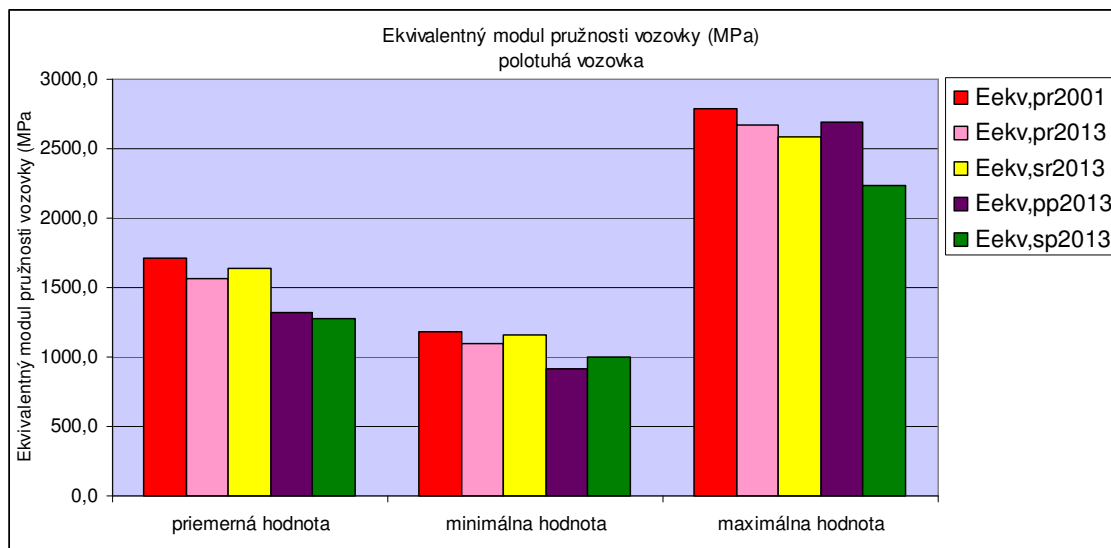
Ekvivalentný modul pružnosti vozovky (MPa)										
netuhá vozovka										
	Eekv,pr2001	klasifikácia	Eekv,pr	klasifikácia	Eekv,sr	klasifikácia	Eekv,pp	klasifikácia	Eekv,sp	klasifikácia
priemerná hodnota	1037.2	1	1027.8	1	1150.9	1	888.9	2	942.0	1
minimálna hodnota	812.7	2	888.4	2	1023.2	1	766.2	2	829.5	2
maximálna hodnota	1179.6	1	1180.5	1	1301.8	1	1042.7	1	1074.1	1
štandardná odchýlka	129.7		94.4		89.9		92.9		79.8	
variálny koeficient	12.5		9.2		7.8		10.4		8.5	
polotuhá vozovka										
priemerná hodnota	1714.9	1	1567.7	1	1641.7	1	1318.8	1	1280.1	1
minimálna hodnota	1185.4	1	1099.5	1	1158.2	1	911.7	3	999.4	2
maximálna hodnota	2789.4	1	2665.2	1	2582.4	1	2692.4	1	2234.3	1
štandardná odchýlka	391.7		359.2		317.2		347.1		260.1	
variálny koeficient	22.8		22.9		19.3		26.3		20.3	
celý meraný úsek										
priemerná hodnota	1587.8		1432.7		1516.4		1211.7		1185.8	
minimálna hodnota	812.7		888.4		1023.2		766.2		829.5	
maximálna hodnota	2789.4		2665.2		2582.4		2692.4		2234.3	
štandardná odchýlka	445.7		392.4		350.8		349.2		271.2	
variálny koeficient	28.1		27.4		23.1		28.8		22.9	

V tabuľke 11 a obrázkoch 6 a 7 sú vedľa seba uvedené hodnoty ekvivalentného modulu pružnosti z merania v pravom jazdnom pruhu, v pravej stope kola, meranie ráno, rok 2001 (Eekv,pr2001); v pravom jazdnom pruhu v pravej stope kola ráno (Eekv,pr2013); v strede pravého jazdného pruhu ráno (Eekv,sr2013); v pravom jazdnom pruhu v pravej stope kola na poludnie (Eekv,pp2013); v strede pravého jazdného pruhu na poludnie (Eekv,sp2013).

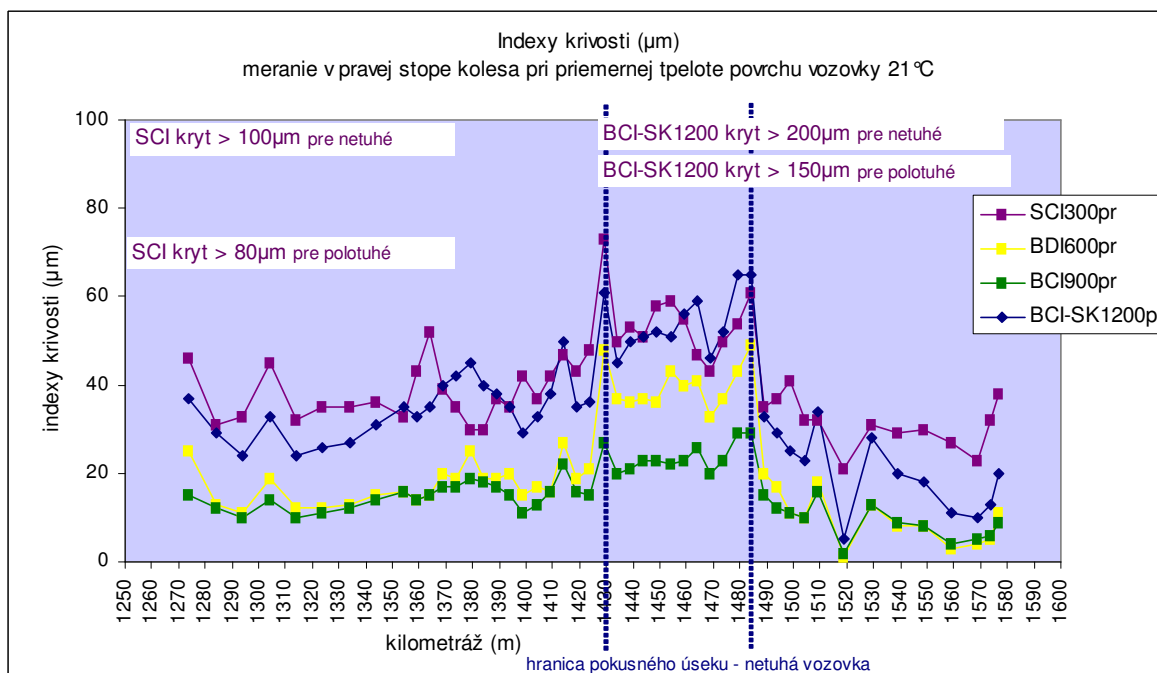
Z obrázkov je zrejmé, že vplyvom vysokých teplôt asfaltových vrstiev rapídne stúpa ich namáhanie, resp. agresivita dopravného zaťaženia je výrazne vyššia u oboch typov konštrukcií vozoviek. Charakteristickým javom pre polotuhé vozovky sú vyššie hodnoty variačného koeficientu ako v prípade netuhej vozovky. Možno tiež konštatovať, že priemerné hodnoty ekvivalentného modulu pružnosti charakterizujú stav oboch typov konštrukcií vozoviek z hľadiska únosnosti podľa [3] (okrem merania netuhej vozovky v pravej stope kola na poludnie) ako výborné. Teploty vozovky pri meraní na poludnie výrazne prekročili limitnú teplotu na hodnotenie priehybov 30 °C a merania by museli byť z hodnotenia vylúčené. (Je však potrebné si uvedomiť, že z hľadiska prevádzkových možností je počas roka veľká časť meraní FWD vykonávaná pri vyšších teplotách ako 30 °C).



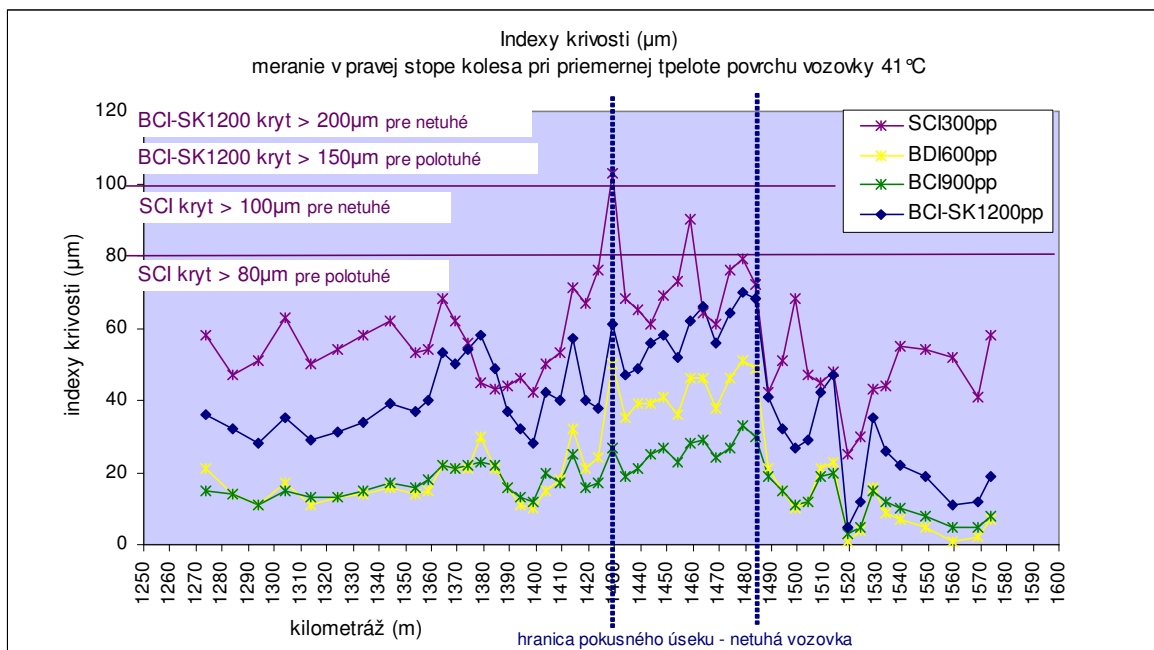
Obrázok 6 – Grafické znázornenie ekvivalentného modulu pružnosti na netuhej vozovke. Meracie zariadenie: FWD KUAB 2m - 150



Obrázok 7 – Grafické znázornenie ekvivalentného modulu pružnosti na polotuhej vozovke. Meracie zariadenie: FWD KUAB 2m - 150



Obrázok 8 – Grafické znázornenie indexov krivosti SCI300, BCI900, BCI-SK1200 a BDI600 z merania v pravom jazdnom pruhu, pravej stope kola, ráno. Meracie zariadenie: FWD KUAB 2m - 150



Obrázok 9 – Grafické znázornenie indexov krivosti SCI300, BCI900, BCI-SK1200 a BDI600 z merania v pravom jazdnom pruhu, pravej stope kola, na poľudnie. Meracie zariadenie: FWD KUAB 2m - 150

Priehyby boli pre výpočet indexov krivosti prepočítané len na porovnávacie zaťaženie 50 kN, prepočty priehybov na porovnávaciú teplotu neboli urobené. Takto vidíme indexy pri reálnych teplotách merania (je to nepriaznivejšie pre hodnotenie stavu). Pre orientačné hodnotenie



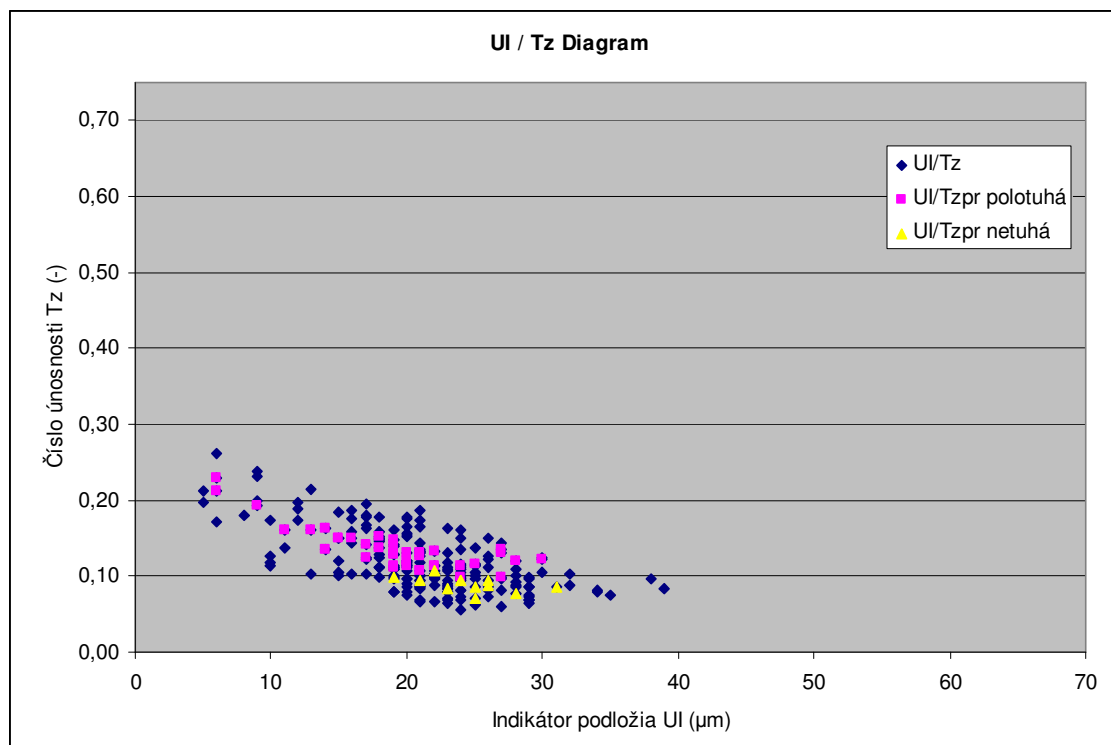
stavu vozovky a pre orientačné výpočty pomerných deformácií v konštrukcii vozovky boli vybrané nasledovné indexy krivosti priehybovej čaše:

Povrchový index krivosti:	$SCI300 = y_{0(50)} - y_{300(50)}$
Podkladový index krivosti:	$BCI900 = y_{600(50)} - y_{900(50)}$
Podkladový index krivosti:	$BCI-SK1200 = y_{450(50)} - y_{1200(50)}$
Index poškodenia podkladovej vrstvy:	$BDI600 = y_{300(50)} - y_{600(50)}$
Indikátor podložia:	$UI = y_{900(50)} - y_{1500(50)}$

$$\text{Číslo únosnosti: } T_z \quad T_z = \sqrt{\frac{r_0}{y_0}}$$

kde:

T_z	– je číslo únosnosti (-)
r_0	– polomer zakrivenia priehybovej čiary (m)
$y_{0(50)}$	– priehyb v strede zaťažovacej dosky prepočítaný na porovnávaciu silu 50 kN (μm)
$y_{300(50)}$	– priehyb vo vzdialenosti 300 mm od stredu zaťažovacej dosky prepočítaný na porovnávaciu silu 50 kN (μm)
$y_{450(50)}$	– priehyb vo vzdialenosti 450 mm od stredu zaťažovacej dosky prepočítaný na porovnávaciu silu 50 kN (μm)
$y_{600(50)}$	– priehyb vo vzdialenosti 600 mm od stredu zaťažovacej dosky prepočítaný na porovnávaciu silu 50 kN (μm)
$y_{900(50)}$	– priehyb vo vzdialenosti 900 mm od stredu zaťažovacej dosky prepočítaný na porovnávaciu silu 50 kN (μm)
$y_{1200(50)}$	– priehyb vo vzdialenosti 1200 mm od stredu zaťažovacej dosky prepočítaný na porovnávaciu silu 50 kN (μm)
$y_{1500(50)}$	– priehyb vo vzdialenosti 1500 mm od stredu zaťažovacej dosky prepočítaný na porovnávaciu silu 50 kN (μm)
UI/T_z	– pomer všetkých hodnôt netuhej a polotuhej konštrukcie vozovky zo všetkých meraní (vo všetkých úsekoch, ráno a na poludnie),
$UI/T_{zpr \text{ netuhá}}$	– hodnoty z merania únosnosti FWD netuhej vozovky v pravom jazdnom pruhu, pravej stope kola, ráno,
$UI/T_{zpr \text{ polotuhá}}$	– hodnoty z merania únosnosti FWD polotuhej vozovky v pravom jazdnom pruhu, pravej stope kola, ráno.



Obrázok 10 – Grafické znázornenie hodnotenia únosnosti meraného úseku podľa Jendia [7]. Meracie zariadenie: FWD KUAB 2m - 150

Z obrázku 8 vidíme, že vo všetkých bodoch merania u oboch typov konštrukcií vozoviek sú oba indexy krivosti (SCI300 aj BCI-SK1200) pri teplote asfaltových zmesí blízkej k porovnávacej teplote s hodnotením: vozovka aj podložie je únosné. Na obrázku 9 pri podstatne vyššej teplote asfaltových zmesí (povrch vozovky: 41 °C) ako porovnávacia teplota sú obe vozovky okrem jedného bodu s hodnotením: vozovka aj podložie je únosné. V jednom bode merania netuhej konštrukcie vozovky došlo k prekročeniu limitnej hodnoty 100 µm, kde je hodnotenie: nevyhovujúce asfaltové vrstvy (prejavilo sa len pri meraní pri teplote 41 °C). Oba obrázky indexov krivosti BDI600 boli nápomocné pre overenie začiatku a konca pokusného úseku.

Na základe hodnotenia vozovky pomocou metódy Jendia je celý meraný úsek klasifikovaný ako veľmi únosný. Snažili sme sa to demonštrovať pomocou obrázku 10, kde sú načítané všetky hodnoty z celého súboru merania na pokusnom úseku a susedných úsekov. Ružovou farbou sú viditeľné závislosti v časti polotuhej a žltou v časti netuhej vozovky pre meranie v pravom jazdnom pruhu, v pravej stope kola, ráno. Obrázok 10 je len ¼ Jendia diagramu a to výsek jeho najvyššie hodnotenej časti, ktorá je charakterizovaná $T_z < 0,75$ a $UI < 70$. Z obrázka je zrejmé, že všetky hodnoty sa zmestia do hranice $T_z < 0,3$ a $UI < 40$.

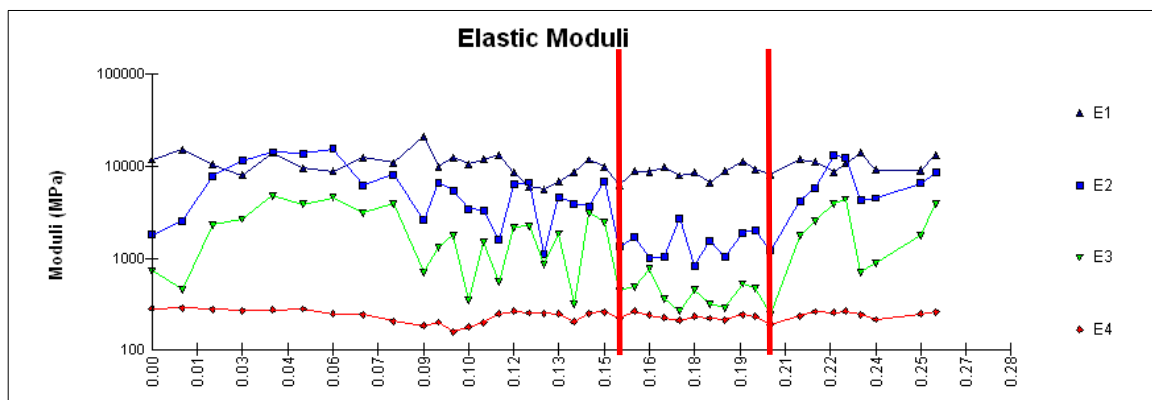
6.5 Hodnotenie zvyškovej prevádzkovej výkonnosti vozovky

Pomocou výpočtového programu CANUV urobila Slovenská správa ciest spätný výpočet modulov pružností vrstiev a výpočet zvyškovej prevádzkovej výkonnosti vozovky podľa TP 1/2009 [3] v každom bode merania FWD, typu KUAB. Výsledkom je, že pre návrhové obdobie 20 rokov nie je potrebné zosilnenie vozovky. V 2 miestach netuhej konštrukcie vozovky je zvyšková životnosť vozovky 17 a 18 rokov. Uvedené platí pri teplotách povrchu vozovky do 30 °C. V prípade výpočtov z merania pri vyšších povrchových teplotách povrchu vozovky (41 °C a 44 °C) boli výsledky podľa predpokladu skreslené.

V prípade spätného výpočtu modulov pružností stmelených podkladových vrstiev došlo miestami k enormnému nadhodnoteniu. Pre vysvetlenie je potrebná taktiež hlbšia analýza, pretože dôvodom môžu byť rôzne príčiny a ich kombinácie (napr. lokálne zvýšené pevnosti cementovej stabilizácie, zväčšenie hrúbky v porovnaní s uvažovanými vo výpočte a podobne.)

6.6 Hodnotenie vozovky na základe modulov pružností vrstiev

Pre účely spätného výpočtu modulov pružností vrstiev bolo použité meranie deflektomerom FWD typu Dynatest. Meranie bolo urobené dňa 30. 10. 2013 v čase od 14 do 15 hod v pravom jazdnom pruhu a v pravej stope kolesa. Priemerná teplota povrchu vozovky bola 13 °C a na základe TP 1/2009, Prílohy A [3] je priemerná teplota asfaltových vrstiev 12 °C. Výpočty boli urobené licencovaným programom ELMOD 6, metódou ekvivalentných hrúbok (MET). Hrúbky vrstiev asfaltových vrstiev boli zistené jadrovými vývrtmi, uvedené sú v tabuľke 9. Hrúbky ďalších vrstiev konštrukcie vozovky boli vo výpočtoch uvažované podľa projektu. Boli realizované aj merania Georadarom, ktorých výsledky nie sú k dispozícii v čase odovzdania úlohy.



Obrázok 11 – Priebeh modulov vrstiev konštrukcie vozovky. E1 – asfaltové vrstvy, E2 – podkladová vrstva, E3 – ochranná vrstva, E4 – podložie (úsek s MSK v grafe 0.155 – 0.205). Meracie zariadenie: FWD Dynatest 8000



Tabuľka 12 – Moduly pružnosti vrstiev zo spätného výpočtu pre úsek polotuhej asfaltovej vozovky pred pokusným úsekom s netuhou asfaltovou vozovkou. Meracie zariadenie: FWD Dynatest 8000

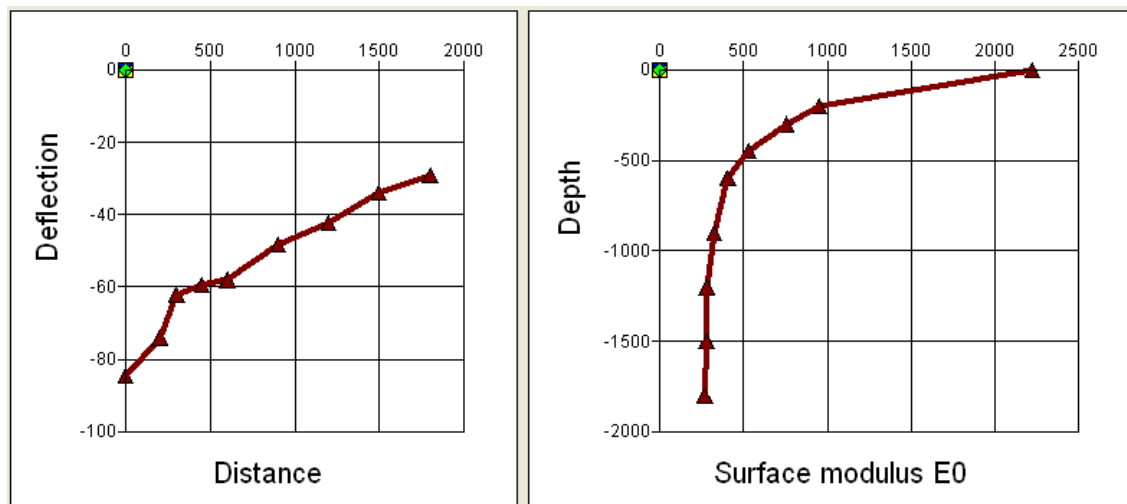
Polotuhá asfaltová vozovka (pred úsekom s netuhou asfaltovou vozovkou)				
Modul pružnosti vrstvy	Asfaltové vrstvy	CBGM	UM ŠD	Podložie
min	5580	1119	319	159
max	21222	15468	4776	287
priemer	10777	6249	2073	241
median	10507	5845	2003	252
st. dev.	3394	4171	1380	38

Tabuľka 13 – Moduly pružnosti vrstiev zo spätného výpočtu pre úsek netuhej asfaltovej vozovky medzi úsekmi s polotuhou asfaltovou vozovkou. Meracie zariadenie: FWD Dynatest 8000

Netuhá asfaltová vozovka (medzi úsekmi s polotuhou asfaltovou vozovkou)				
Modul pružnosti vrstvy	Asfaltové vrstvy	UM MSK	UM ŠD	Podložie
min	6237	828	243	191
max	11267	2725	762	268
priemer	8537	1490	420	228
median	8733	1336	441	224
st. dev.	1367	568	150	20

Tabuľka 14 – Moduly pružnosti vrstiev zo spätného výpočtu pre úsek polotuhej asfaltovej vozovky za pokusným úsekom s netuhou asfaltovou vozovkou. Meracie zariadenie: FWD Dynatest 8000

Polotuhá asfaltová vozovka (za úsekom s netuhou asfaltovou vozovkou)				
Modul pružnosti vrstvy	Asfaltové vrstvy	CBGM	UM ŠD	Podložie
min	8601	4177	704	216
max	13931	13111	4377	265
priemer	10934	7419	2489	250
median	10846	6186	2177	255
st. dev.	1990	3587	1436	17



Obrázok 12 – Záznam priehybovej krivky a priebehu ekvivalentného modulu pružnosti konštrukcie ozovky v polpriestore v mieste merania 0,3. Meracie zariadenie: FWD Dynatest 8000

Výsledky modulov pružností jednotlivých vrstiev zo spätného výpočtu dávajú podnety k rozsiahlym diskusiám. V každom prípade ich možno ďalej upresniť podľa výsledkov hrúbok vrstiev z georadaru. Moduly tuhosti (13 °C) asfaltového súvrstvia na úseku polotuhej konštrukcie sú v priemere o 2000 MPa vyššie ako na úseku netuhej vozovky. Hydraulicky stmelené podkladové vrstvy majú hodnoty modulov pružnosti v priemere 7000 MPa, čo je reálna hodnota vo fragmente, ale maximálne hodnoty vykazujú aj dvojnásobok, čo zodpovedá skúsenostiam aj iných diaľničných úsekov a prezrádza známy veľký rozptyl tuhostí tejto vrstvy. Spätný výpočet nie jednoznačný. Ako to možno vidieť na príklade priebehu spojnice maximálnych priehybov v mieste merania 0,3 z obrázku 12, kde sú moduly pružnosti stmelenej podkladovej vrstvy vyššie ako moduly tuhosti asfaltového súvrstvia. Tento efekt je ešte výraznejší pri poklese modulov tuhostí asfaltových vrstiev pri vysokých letných teplotách. Z obrázku 9 môžeme tiež predpokladať, že spätný výpočet („napasovanie“ teoretickej priehybovej krivky na nameranú krivku) je skreslený a nemožno ho absolutizovať, ale výsledky uvažovať ako smerné hodnoty. Obrázok 11 demonštruje veľký rozptyl modulov pružností hydraulicky stmelenej podkladovej vrstvy, ktorá je pravdepodobne v miestach merania kompaktná (nerozbitá) a ktorej vlastnosti ovplyvňuje homogenita výroby zmesi a jej spracovanie na stavbe. Daný jav možno konštatovať už aj na základe orientačného hodnotenia podľa ekvivalentného modulu pružnosti vozovky, čo dobre demonštrujú obrázky 6 a 7.

6.7 Zhrnutie poznatkov z pokusného úseku

Pokusný úsek včlenený do konštrukcie vozovky je výborným nástrojom pre overenie hypotéz v reálnych a rovnakých okrajových podmienkach klímy aj dopravného zaťaženia pre rôzne konštrukcie. Doporučujeme realizáciu nových podobných projektov a ich dlhodobé sledovanie.



Výsledky potvrdili odlišné správanie sa asfaltových vozoviek s rôznymi podkladovými vrstvami, čo sa aj očakávalo na základe poznatkov z mechaniky vozoviek.

Meranie únosnosti pokusného úseku netuhej konštrukcie vozovky ukázalo, že vozovka spĺňa kritériá únosnosti aj po 15 rokoch používania a jej zvyšková životnosť je na základe výpočtov Slovenskej správy ciest viac ako 20 rokov. V dvoch miestach je zvyšková životnosť mierne znížená na 17 a 18 rokov. Tieto miesta je potrebné podrobne preskúmať (sú to miesta na začiatku a konci úseku).

Z výsledkov laboratórnych skúšok návrhu zmesi MSK (porovnané 2 zloženia zmesi z rovnakej horniny) vyplýva, že na modul pružnosti vrstvy výrazne vplyva zloženie nestmelenej vrstvy (okrem vplyvu druhu horniny, podložia a technológie zabudovania). Optimalizáciou zloženia zmesi je možné získať podstatne vyššie hodnoty IBI ako požaduje norma, čo by mohlo/malo byť zohľadnené aj v dimenzovaní konštrukcie vozovky.

Výšetrenie únosnosti vozovky na základe merania priehybov zariadením FWD je možné aj bez poznania presnej hrúbky vrstiev vozovky. Existujúce empirické ukazovatele únosnosti (domáce aj zahraničné) sú vhodným nástrojom pre šetrenie kvality jednotlivých častí vozovky. Doporučujeme použitie viacerých metód na potvrdenie trendov výsledkov (napríklad pre výpočet pomerných pretvorení, alebo zvyškovej prevádzkovej výkonnosti).

Na pokusnom úseku sa urobili merania teploty asfaltových vrstiev, ktoré sú v súlade so vzťahmi medzi povrchovou teplotou a priemernou teplotou asfaltovej vrstvy uvedenými v TP 1/2009, Príloha A [3].

Presnejšie analýzy mechanických parametrov vrstiev vozovky napríklad zo spätných výpočtov modulov pružností z nedeštruktívnych meraní zariadením FWD jednoznačne ukazujú výrazne vyššie hodnoty ako ich uvažujeme pri dimenzovaní. Je to dané tým, že v návrhu vozovky sa uvažujú hodnoty modulov pružností vrstiev na konci ich životnosti. Napriek tomu má vrstva UM MSK podstatne vyšší potenciál návrhovej hodnoty modulu pružnosti. Na základe meraní okamžitého indexu únosnosti IBI a spätných výpočtov modulov pružností vrstiev navrhujeme použitie návrhového modulu pružnosti vrstvy UM MSK pri dimenzovaní 900 MPa až 1 000 MPa. V prípade takého návrhu by mal byť definovaný spôsob, rozsah a miera kontroly no najmä zaistenia kvality a homogenity takejto vrstvy osobitným spôsobom.

Na základe výsledkov dlhodobého overeného pokusného úseku sa jednoznačne prihovárime za návrh netuhých vozoviek pri diaľniciach a rýchlostných cestách na Slovensku.

8. Odporúčania pre návrh a posúdenie vrstvy MSK v konštrukcii vozovky

Uvedené odporúčania sú zamerané len nad rámec platných noriem a predpisov a nedotýkajú sa rutinej technológie výroby a spracovania:

- zohľadniť pri výbere zdroja kameniva priaznivý vplyv puzolánového efektu
- urobiť optimalizáciu zloženia výslednej čiary zrnitosti na okamžitý index únosnosti
- uvedenú optimalizáciu urobiť pred návrhom a posúdením konštrukcie vozovky
- za cieľom dosiahnutia vyšších modulov pružností zvýšiť počet frakcií
- do návrhu a posúdenia vozovky uvažovať hodnotu približne 10 x hodnotu okamžitého indexu únosnosti



- v prípade hodnoty nad 900 MPa zaistiť skúšanie vrstvy UL MSK zariadením FWD s doskou s tuhou zaťažovacou doskou polomerom 450 mm a napätím získaným z výpočtu posúdenia vozovky
- meranie zamerať predovšetkým na homogenitu vrstvy
- meranie robiť v kroku 50 m
- hodnota variačného koeficientu ekvivalentného modulu pružnosti polpriestoru na vrstve MSK musí byť menšia ako 25 %.
- pre definíciu hodnoty ekvivalentného modulu pružnosti konštrukcie na vrstve MSK meraného deflektomerom FWD vyššie popísaným spôsobom spracovať osobitnú štúdiu
- pre overenie návrhových modulov pružností urobiť merania FWD na povrchu hotovej vozovky a na základe poznania presných hrúbok vrstiev moduly pružnosti stanoviť spätným výpočtom
- zabezpečiť sústavný nezávislý technologický dohľad pri výrobe, doprave a spracovaní zmesi do vrstvy.

9. Záver

Záverom možno konštatovať, že s experimentovaním zmesi kameniva a vrstvy MSK sa na Slovensku začalo v 80-ich rokoch, vo všeobecnosti s nestmelenou podkladovou vrstvou pre asfaltové vozovky už v 70-ich rokoch.

Boli realizované viaceré pokusné úseky menšieho aj väčšieho rozsahu. Dostali sa nám do rúk komplexné výskumné úlohy ako napríklad podniková úloha Doprastavu z roku 2001, kde boli vrstvy MSK komplexne analyzované. Súčasťou tejto úlohy bol aj katalóg konštrukcií vozoviek pre stmelené aj nestmelené podkladové vrstvy. Hrúbky vrstiev MSK sú aj v tomto katalógu výrazne väčšie ako vrstiev z MSK, čoho dôvodom je podstatne nižší návrhový modul pružnosti vrstvy – diskutované v kapitole 6.2.2. Z ekonomických analýz tejto správy vyplýva nižšia cena hydraulicky stmelenej vrstvy ako MSK. Ani v tejto ekonomickej analýze nie je uvažované s finančnými nákladmi pre opatrenia na usmernenie termických trhlín v hydraulicky stmelenej vrstve, čo sa negatívne pripočítava na konto vrstvy MSK.

Cieľom všetkých pokusných úsekov je hľadanie východiska z problémov spätých so stmelenými podkladovými vrstvami (homogenita parametrov vrstvy, ochrana pre spekaním v letnom období, problém tuhnutia a tvrdnutia v období s teplotami tesne nad bodom mrazu, technologická prestávka z dôvodu tvrdnutia vrstvy, spojenie vrstiev v prípade pozdĺžnych aj priečnych pracovných škár, reflexné trhliny, zrýchlená degradácia vozovky v okolí priečnych reflexných trhlín a ďalšie).

Veľkou nevýhodou je nedostupnosť netuhej asfaltovej vozovky na úseku R1 Nitra – Tekovské Nemce postavenej v rámci projektu PPP pre analýzu predmetného zámeru.

Na pokusnom úseku v rámci rýchlostnej komunikácie R1 Báb – Šoporňa sa zistilo, že jednak hodnoty okamžitej únosnosti IBI merané na vrstve MSK po odvrtní asfaltových vrstiev sú veľmi vysoké ($IBI_{2,54} = 140\%$) a jednak moduly pružnosti vrstvy počítané z meraní deflektomerom FWD sú podstatne vyššie ako je návrhový modul pružnosti, popísané v článku 6.2.3.



Navrhujeme použitie návrhového modulu pružnosti vrstvy UM MSK pri dimenzovaní 900 MPa až 1 000 MPa. V prípade takého návrhu treba definovať spôsob, rozsah a mieru kontroly no najmä zaistenia kvality a homogenity takejto vrstvy osobitným spôsobom, uvedené v kapitole 8.

Ako nástroj pre kontrolu kvality odporúčame použiť deflektomer FWD s tuhou zaťažovacou doskou polomerom 450 mm. Pre podrobné stanovenie parametrov a podmienok merania a hodnotenia ekvivalentného modulu pružnosti konštrukcie vozovky na vrstve MSK deflektomerom FWD odporúčame osobitnú štúdiu pre ich overenie na reálnych úsekoch.

Literatúra:

- [1] Druga, J. a kol.: Pokusný úsek asfaltovej vozovky s nestmelenou podkladovou vrstvou z MSK, In: Vozovky pre väčšie osovú záťaž, 2001
- [2] Staňo R. a kol.: Návrh vozovky s nestmelenou podkladovou vrstvou. STU Stavebná fakulta, Bratislava, 1998
- [3] TP 1/2009, Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD Kuab.
- [4] TP 3/2009, Navrhovanie netuhých a polotuhých vozoviek.
- [5] Bonnot, J. a col. Semi-rigid pavements. PIARC report, 1991.
- [6] C. Van Gurp, C.A.P.M., and P.M. Wennink. Design of pavement structures for rural roads. KOAC-WMD; Apeldoorn, 1997
- [7] Jendia S.: Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen. PhD dizertácia, Karlsruhe 1995
- [8] Boros, Zs.: Hodnotenie únosnosti podložia z meraní FWD na povrchu vozovky. In: XIV. seminár Ivana Poliačka, Bratislava 2009
- [9] COST 336, 2001
- [10] Komačka, J., Benkó Zs.: Diagnostika únosnosti asfaltových vozoviek deflektometrami FWD. Žilina: ŽU, 2011.
- [11] Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions, Dissertation, TU Dresden, 2003
- [12] Mechanicky spevnené kamenivo – Minerálny betón. Podniková úloha, Doprastav Bratislava, 2001

Vypracoval:

V Bratislave 13.11.2014

Dipl. Ing. Zsolt BOROS

TPA Spoločnosť pre zabezpečenie kvality a inovácie s. r. o.
konateľ

