

**VYSOKORÝCHLOSTNÝ DEFLEKTOMETER TSD – MOŽNOSTI
JEHO VYUŽITIA PRI HODNOTENÍ ÚNOSNOSTI VOZOVIEK NA
ÚROVNI CESTNEJ SIETE NA SLOVENSKU**

ROZBOROVÁ ÚLOHA

OBSAH

1	Základné údaje	3
1.1	Identifikačné údaje	3
1.2	Špecifikácia a predmet rozborovej úlohy	3
1.3	Použité skratky	3
2	Riešenie predmetu rozborovej úlohy	3
2.1	Základné termíny a definície	3
3	Analýza súčasného stavu.....	4
3.1	Traffic Speed Deflectometer – popis metódy.....	5
3.2	História TSD	6
3.3	Princíp merania priehybov zariadením TSD	7
3.4	Meranie priehybov a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek na úrovni cestnej siete na Slovensku	9
4	Traffic Speed Deflectometer vo svete	11
4.1	Austrália	11
4.2	Česká republika/Taliansko	12
4.3	Dánsko.....	13
4.4	Taliansko	14
4.5	Juhoafrická republika	15
4.6	Nemecko.....	17
4.7	Poľsko	18
4.8	USA	19
4.9	Veľká Británia	20
5	Porovnávacie meranie TSD a FWD KUAB na Slovensku.....	23
5.1	Merané úseky	23
5.2	Technická špecifikácia TSD.....	24
5.3	Technická špecifikácia FWD KUAB 2m-50.....	24
5.4	Vyhodnotenie meraní.....	25
6	Záver.....	29
6.1	SWOT analýza	29
6.2	Analýza nákladov súvisiacich s hodnotením únosnosti vozoviek zariadením TSD v SR.....	30
7	Návrh uplatnenia TSD na Slovensku.....	30
8	Literatúra.....	32
8.1	Citovaná literatúra	32
8.2	Súvisiaca použitá literatúra	33

1 Základné údaje

1.1 Identifikačné údaje

Úloha:	Rozborová úloha RVT 2015/2016
Názov:	Vysokorýchlostný deflektometer TSD – možnosti jeho využitia pri hodnotení únosnosti vozoviek na úrovni cestnej siete na Slovensku
Číslo objednávky:	O-204/2210/2015
Objednávateľ:	Slovenská správa ciest
Sídlo:	Miletičova 19, 826 19 Bratislava
Kontaktná osoba:	Ing. Zsolt Benkó
Zhotoviteľ:	Centrum dopravného výzkumu, v.v.i.
Sídlo:	Líšeňská 33a, 636 00 Brno
Riešitelia:	Ing. Ilja Březina Ing. Josef Stryk, Ph.D.

1.2 Špecifikácia a predmet rozborovej úlohy

Cieľom tejto RÚ je zhrnúť doterajšie skúsenosti s meraním TSD (Traffic Speed Deflectometer) so zameraním na:

- overenie presnosti meraní zariadením TSD, ktoré je založené na vysokorýchlostnom bezkontaktnom meraní priehybov vozovky pri zaťažení nápravou vozidla, v porovnaní s rázovým zariadením FWD KUAB používaným na Slovensku;
- analýzu doterajších skúseností a uplatnenia TSD v jednotlivých krajinách;
- návrh možného uplatnenia tohto zariadenia na Slovensku - porovnanie rôznych variant, vrátane ich SWOT analýzy a ekonomického vyčíslenia.

Úloha musí zahŕňať:

- analýza súčasného stavu;
- realizácia porovnávacieho merania medzi zariadením FWD Kuab (vo vlastníctve SSC) a TSD vlastného poľským výskumným ústavom IBDiM na minimálne 3 typoch vozoviek s asfaltovým krytom (s rôznou skladbou vrstiev vozovky);
- SWOT analýza uplatnenia TSD v podmienkach SR;
- analýza nákladov súvisiacich s hodnotením únosnosti vozoviek zariadením TSD v SR;
- návrh optimálneho variantu nasadenia TSD na Slovensku v priebehu nasledujúcich rokov;
- spracovanie záverečnej správy.

1.3 Použité skratky

AB	– asfaltobetónový
BCI	– podkladový index krivosti
E_{ekv}	– ekvivalentný modul pružnosti
FWD	– rázové zariadenie
PK	– pozemná komunikácia
SSC	– Slovenská správa ciest
SCI	– povrchový index krivosti
TP	– technické podmienky
TSD	– vysokorýchlostný deflektometer
y_i, d_i	– priehyb vo vzdialenosti i od osi zaťažovacej dosky

2 Riešenie predmetu rozborovej úlohy

2.1 Základné termíny a definície

Termíny použité v tejto RÚ sú uvedené v STN 73 6100, STN 73 6114. Na účely tejto rozborovej úlohy sú doplnené nasledujúce termíny a definície:

diagnostika (diagnostics): súhrn systematických činností a postupov, slúžiacich na meranie veličín a parametrov, potrebných pre hodnotenie technického stavu cestnej komunikácie

ekvivalentný modul pružnosti E_{ekv} (equivalent elastic moduli): charakteristika únosnosti vozovky, ktorá vychádza z nameraných priehybov vozovky a teórie vrstevnatého lineárne pružného polpriestoru; spravidla sa používa ako najjednoduchší ukazovateľ hodnotenia vozoviek s AB krytom na úrovni siete

index krivosti podkladu BCI (Base Curvature Index): charakteristika tuhosti podkladových vrstiev vozovky, ktorá sa vypočíta ako rozdiel hodnoty priehybu povrchu vo vzdialenosti 450 mm a 1200 mm od osi zaťažovacej dosky

index krivosti povrchu SCI (Surface Curvature Index): charakteristika tuhosti horných, spravidla stmelených, vrstiev vozovky, ktorá sa vypočíta ako rozdiel hodnoty priehybu povrchu pod zaťažovacou doskou a priehybu vo vzdialenosti 300 mm od osi zaťažovacej dosky

priehyb (deflection): zvislý posun povrchu vozovky pri zaťažení

priehybová krivka (deflection curve): spojnice hodnôt priehybov povrchu konštrukcie vozovky, ktoré sa namerali v bodoch s rôznou vzdialenosťou od osi zaťaženia, pričom body ležia na spoločnej priamke

rázové zariadenie FWD (Falling Weight Deflectometer): zariadenie na rázovú zaťažovaciu skúšku vozoviek generujúce zaťaženie pádom bremena na tlmiace podložky uložené na povrchu kruhovej zaťažovacej dosky, ktorá je v kontakte s podložíom alebo vozovkou

únosnosť vozovky (bearing capacity): schopnosť vozovky plniť požiadavky charakterizované definovanou hodnotou rozhodujúcej veličiny (napätia, pretvorenia, priehybu a pod.), prípadne funkcií týchto veličín

vysokorýchlostný deflektometer TSD (Traffic Speed Deflectometer): zariadenie na meranie priehybov povrchu vozovky použitím pokročilej laserovej technológie pri pohyblivom dynamickom zaťažení vyvolanom rýchlo sa pohybujúcim kolesom

3 Analýza súčasného stavu

Diagnostika únosnosti sa v SR realizuje na základe meraní priehybu na povrchu vozovky. Meranie priehybov sa vykonáva rázovým zariadením FWD, ktoré zaťažuje vozovku zo stojaceho vozidla stacionárnym impulzným zaťažením a umožňuje nastaviť parametre zaťaženia (veľkosť zaťažovacej sily a dobu pôsobenia zaťaženia) tak, aby sa blížili k reálnemu zaťaženiu kolesami pohybujúcich sa vozidiel. Rázové zariadenie FWD je celosvetovo uznávaným a zároveň najpočetnejším zariadením pre meranie priehybov, ale z dôvodu bodového merania, ktoré vyžaduje obmedzenie premávky na sledovanom úseku vozovky, sa využíva väčšinou pre meranie na projektovej úrovni. Využitie pre merania na úrovni cestnej siete je menej časté, napr. z dôvodu potreby obmedzenia premávky, alebo z dôvodu merania s veľkým krokom merania. Výsledky projektu [5] však dokladujú, že zariadenie má potenciál i pri používaní na úrovni cestnej siete. Obsahujú tiež návod, ako a kedy má byť rázové zariadenie FWD použité, aby poskytlo správcovi cestnej siete dostačujúce podklady pre rozhodnutie v technických a ekonomických oblastiach súvisiacich s údržbou a opravou vozoviek. V Slovenskej republike sa meranie priehybov a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek vykonáva podľa technických podmienok TP 01/2009.

Súčasnou alternatívou k meraniu priehybov rázovým zariadením FWD je vysokorýchlostný deflektometer TSD (Traffic Speed Deflectometer). Jeho výhodou je kontinuálne meranie priehybov celého meraného úseku, ktoré sa neobmedzuje iba na meranie vybraných lokálnych meracích bodov, ako je tomu u rázového zariadení FWD. Pri vysokorýchlostnom a bezkontaktnom zázname dát (až 80 km/h) nie je obmedzovaná cestná premávka a kapacita meraní sa oproti rázovému zariadeniu FWD značne zvyšuje. Vďaka tomu umožňuje vysokorýchlostný deflektometer TSD rýchly a bezpečný záznam dát a je vhodným zariadením pre použitie na úrovni cestnej siete. V Európe existuje niekoľko týchto zariadení (Dánsko, Poľsko, Taliansko, UK), ktoré sa už bežne zapájajú do diagnostiky únosnosti vozoviek. Z dôvodu overenia korelácie medzi rázovým zariadením FWD a zariadením TSD

sa v jednotlivých krajinách vykonáva porovnávacie meranie. Vysokorýchlostný deflektometer TSD, metodológia analýzy i vyhodnotenia výsledkov sa stále zdokonaľujú.

3.1 Traffic Speed Deflectometer – popis metódy

Vysokorýchlostný deflektometer TSD slúži na meranie priehybov povrchu vozovky pri rýchlosti 40 km/h - 80 km/h. Vďaka tomu je priehyb meraný pri pohyblivom dynamickom zaťažení vyvolanom rýchlo sa pohybujúcim kolesom vozidla. Takto meraný priehyb najviac zodpovedá skutočnému priehybu pri zaťažení nákladnými vozidlami pohybujúcimi sa rýchlosťou dopravného prúdu. Výhodou je tiež možnosť zaznamenať priehyb vozovky v celej línii prejazdu vozidla, ktoré sa neobmedzuje iba na meranie lokálnych miest, ako je tomu u rázového zariadenia FWD. Užívateľ tak získa kompletnú informáciu o únosnosti vozovky na celom meranom úseku. Odpadá tiež problém s obmedzovaním premávky na pozemných komunikáciách ako pri meraní zariadením FWD, ktoré môže v prípade vysokých intenzít dopravy spôsobiť značné dopravné problémy. Zvyšuje sa bezpečnosť účastníkov cestnej premávky a posádka meracieho zariadenia v priebehu merania. Veľkou výhodou je taktiež vysoká kapacita meraní, ktorá umožňuje merať až niekoľko sto kilometrov vozoviek denne.

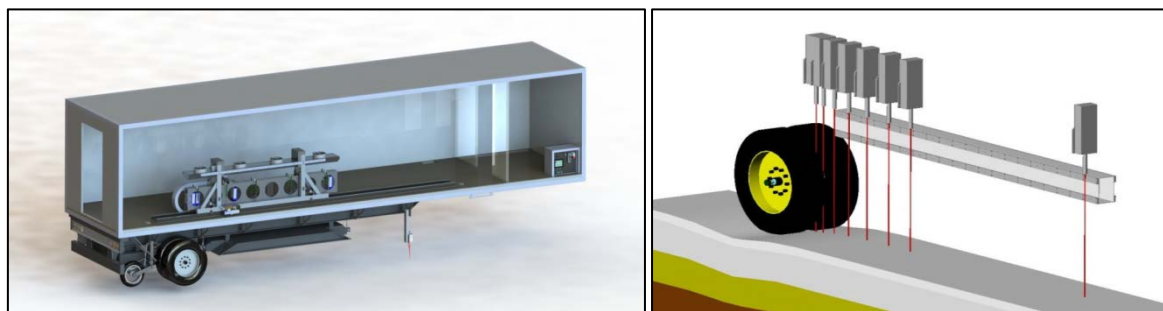
Zariadenie pozostáva z jazdnej súpravy ťažkého nákladného vozidla so štandardným ťahačom návesu a s modifikovaným návesom (obrázok 1). V kontajneri jednonápravového návesu je umiestnený merací systém pre účely snímania odozvy vozovky na zaťaženie. Štandardné zaťaženie na nápravu je 10 ton. Z tohto dôvodu je pod kontajnerom návesu nainštalovaná zodpovedajúca záťaž. V klimatizovanom kontajneri je osadený tuhý nosník s príslušným počtom Doppler-laser snímačov (obrázky 2, 3), ktoré snímajú povrch vozovky pravej stopy vozidla v osi dvojmontáže návesu a ďalšie podporné a výpočtové systémy. Posádku zariadenia TSD tvorí vodič vozidla a operátor, ktorý ovláda činnosť merania a riadi záznam dát počas merania.

V Európskej únii zaisťujú meranie vysokorýchlostným deflektometrom TSD tieto organizácie:

- Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) – Poľsko
- Transport Research Laboratory (TRL) – Veľká Británia
- Danish Road Directorate – Dánsko
- Azienda Nazionale Autonoma delle Strade (ANAS) – Taliansko



Obrázok 1: Traffic Speed Deflectometer [13]



Obrázky 2 a 3: Tuhý nosník s Doppler-laser snímačmi [19]

3.2 História TSD

V období od roku 1996 do roku 2001 bolo v spolupráci spoločnosti *Greenwood Engineering A/S*, dánskeho riaditeľstva ciest *DRD (Danish Road Directorate)* a dánskeho výskumného ústavu *DRI (Danish Road Institute)* vyvinuté zariadenie vhodné pre meranie priehybov pohyblivým dynamickým zaťažením za vysokých rýchlostí – zo začiatku označované ako *High Speed Deflectograph (HSD)*.

Celkovým cieľom projektu bolo vyvinúť prototyp testovacieho zariadenia, ktoré je schopné pri bežných rýchlostiach premávky monitorovať bezkontaktnú únosnosť vozovky, za použitia pokročilej laserovej technológie. Myšlienka vznikla na pôde *Greenwood Engineering A/S*, kde bol patentovaný koncept použitia laserových snímačov, ktoré pracujú na báze Dopplerovho javu (*Doppler-laser sensors*). Od roku 2006 nahrádza názov *Traffic Speed Deflectometer (TSD)* predošlý *High Speed Deflectograph (HSD)*. Rôzne modifikácie TSD sú znázornené na obrázku 4.

Začiatkom roku 2000 bol prvý prototyp TSD vyrobený a patentovaný v Dánsku. Prvé dve zariadenia boli vyrobené s 4 Doppler-laser snímačmi a sú vo vlastníctve *Highways Agency* vo Veľkej Británii a dánskeho *Danish Road Directorate*, ktorý okrem iného v roku 2009 zmonitoroval 18 000 km austrálskych pozemných komunikácií.

V roku 2010 bol ďalší TSD so 7 snímačmi dodaný do talianskeho *ANAS S.p.A. – Centro Sperimentale Stradale (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade)* a následne v roku 2011 bol už štvrtý TSD s 8 Doppler-laser snímačmi vyrobený pre poľský *IBDiM (Instytut Badawczy Dróg i Mostów)*.

V roku 2012/13 bol piaty TSD dodaný do Južnej Afriky pre *SANRAL (The South African National Roads Agency Limited)*. Toto zariadenie má už 10 laserových snímačov.

V roku 2013 bolo šieste zariadenie doručené do čínskeho *RIOH (Research Institute of Highway)* a siedme do USA, kde bol americkou *FHWA (Federal Highway Administration)* zahájený projekt porovnávacieho merania medzi TSD a americkým *RWD (Rolling Wheel Deflectometer)*.

Ôsme zariadenie TSD bolo v roku 2014 vyrobené pre austrálsku *ARRB Group (Australian Road Research Board)*.



Obrázok 4: Rôzne modifikácie TSD [13]

3.3 Princíp merania priehybov zariadením TSD

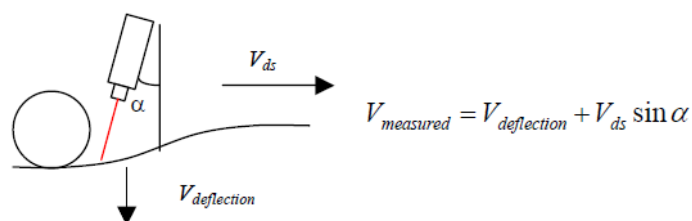
Zaťaženie povrchu vozovky rýchlo sa pohybujúcim kolesom spôsobuje deformáciu povrchu vozovky (priehybová krivka). Základnou myšlienkou konceptu vysokorýchlostného deflektometra TSD je meranie rýchlosti deformácie povrchu vozovky pomocou Doppler-laser snímačov, z ktorých je následne možné vypočítať priehyb vozovky. Tento spôsob merania rýchlosti deformácie povrchu vozovky je vhodný pre skúšanie pri vysokých rýchlostiach jazdy, kedy nelineárne stúpa rýchlosť tejto deformácie so zvyšujúcou sa rýchlosťou jazdy.

Doppler-laser snímače sú rozmiestnené na tuhom nosníku v príslušných vzdialenostiach od osi zaťaženia (obrázok 5). Vyslaný laserový lúč (obrázok 6) sa odrazí od povrchu vozovky a snímač meria rýchlosť krátkodobej vertikálnej deformácie namáhaného povrchu v smere laserového lúča.



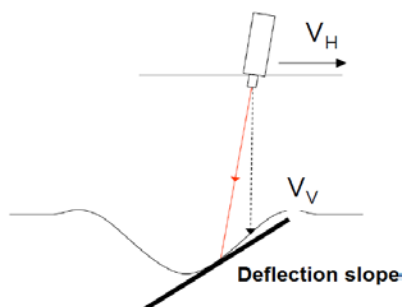
Obrázky 5 a 6: Nosník s Doppler-laser snímačmi; laserové lúče troch snímačov na povrchu vozovky

Vzhľadom k tomu, že snímač nie je umiestnený presne kolmo k povrchu vozovky, dopadá laserový lúč pod uhlom približne $\alpha = 2^\circ$. Vďaka tomu Doppler-laser snímač registruje okrem požadovanej rýchlosti deformácie i zložku rýchlosti jazdy vozidla V_{ds} . Relatívne malý uhol umožňuje vstup rýchlosti jazdy vozidla do výpočtu a zároveň má len malý vplyv na vertikálnu zložku rýchlosti deformácie povrchu vozovky. Rozklad rýchlostí jedného Doppler-laser snímača je znázornený na obrázku 7.



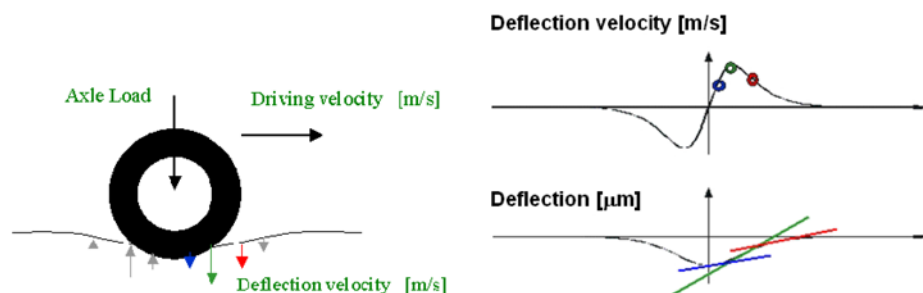
Obrázok 7: Rozklad rýchlostí jedného Doppler-laser snímača [26]

Pomocou súčasne meranej rýchlosti vozidla a definovaného uhla dopadu laserového lúča oproti zvislici je pre každú polohu vypočítaná hodnota „slope“ [$\mu\text{m}/\text{m}$] (= sklon dotýčnice priehybovej krivky v mieste Doppler-laser snímača), pozri obrázok 8.



Obrázok 8: Rozklad rýchlostí [27]

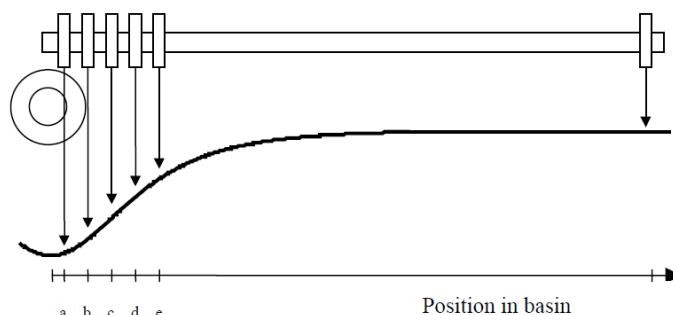
Zo znalosti rýchlostí deformácie povrchu vozovky na rôznych pozíciách Doppler-laser snímačov je možné získať prehľad o tvare priehybovej krivky (pozri obrázok 9). Čím viac snímačov je na nosníku osadených, tým má užívateľ vyššiu možnosť pre interpretáciu dát.



Obrázok 9: Priehybová krivka pod pohybujúcim sa kolesom; rýchlosť deformácie povrchu vozovky a priehybová krivka s jej dotyčnicami [24]

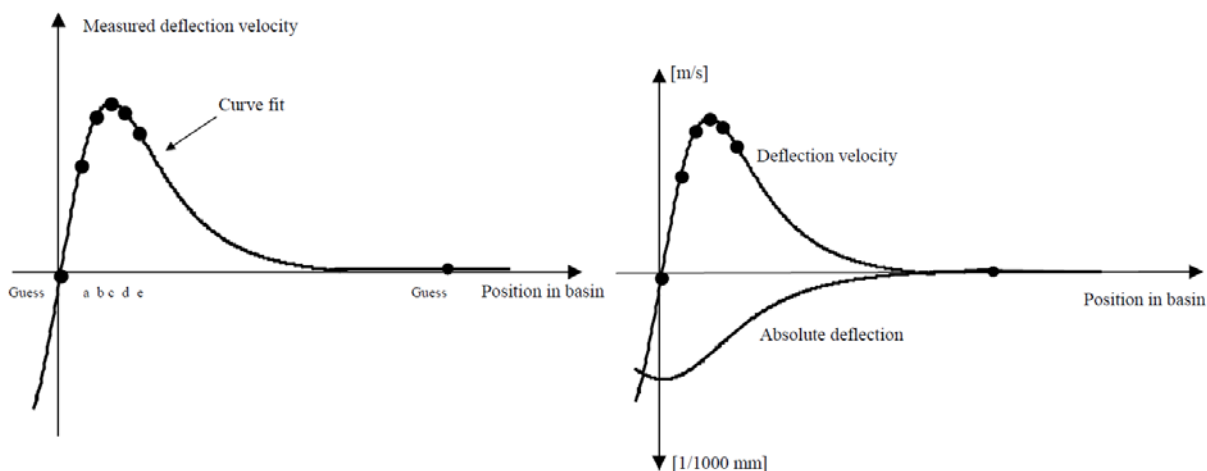
Obrázky 10, 11 a 12 ukazujú, ako je možné získať znalosti o tvare priehybovej krivky zo znalosti rýchlosti deformácie povrchu vozovky pomocou snímačov umiestnených na viacerých pozíciách od osi zaťaženia. Obrázok 11 znázorňuje priehybovú krivku pod pohybujúcim sa kolesom a merací nosník s 5 Doppler-laser snímačmi snímajúcimi rýchlosť deformácie v priehybovej krivke a s 1 snímačom mimo priehybovej krivky. Polohy snímačov *a*, *b*, *c*, *d*, *e* sú vo vzťahu k zaťaženiu známe.

Rýchlosti deformácie povrchu vozovky sú vynesené ako body v súradnicovom systéme (obrázok 12). Na os *x* sa vynáša poloha v priehybovej krivke, na os *y* merané rýchlosti deformácie. Ďalej sú vykreslené ďalšie dva body, pretože možno predpokladať, že rýchlosť deformácie je nulová v osi zaťaženia a mimo priehybovej krivky v mieste referenčného snímača.



Obrázok 10: Priehybová krivka a nosník s Doppler-laser snímačmi [9]

Zo znalosti polohy 7 bodov je vypočítaná aproximačná krivka pomocou polynomickej regresie. Integráciou aproximačnej krivky sa získajú znalosti o tvare priehybovej krivky.



Obrázky 11 a 12: Aproximačná krivka (vľavo); rýchlosť deformácie a priehybová krivka (vpravo) [9]

Zariadenie TSD, ktoré je vo vlastníctve výskumného ústavu IBDiM, používa pre meranie 8 Doppler-laser snímačov vo vzdialenostiach 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,6 m, 0,9 m a 1,5 m od osi zaťaženia. Referenčný snímač vo vzdialenosti 3,5 m od osi zaťaženia meria nedeformovateľný povrch vozovky vďaka vysokej vzdialenosti od náprav vozidla.

3.4 Meranie priehybov a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek na úrovni cestnej siete na Slovensku

Meranie priehybov pri hodnotení únosnosti asfaltových vozoviek na úrovni cestnej siete sa vykonáva za účelom získania celkového prehľadu o stave cestnej siete z hľadiska únosnosti. V Slovenskej republike sa meranie priehybov a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek vykonáva podľa technických podmienok TP 01/2009.

Únosnosť asfaltových vozoviek stanovená na základe meraní priehybu vozoviek rázovým zariadením FWD je na úrovni cestnej siete hodnotená:

- ekvivalentným modulom pružnosti E_{ekv} podľa [18];
- povrchovým indexom krivosti SCI a podkladovým indexom krivosti BCI podľa [18].

Pri spracúvaní získaných výsledkov na úrovni cestnej siete sa namerané priehyby opravujú najskôr vzhľadom na veľkosť zaťažovacej sily alebo tlaku, a potom vzhľadom na teplotu vozovky. Následne sa vypočíta ekvivalentný modul pružnosti E_{ekv} , prípadne indexy SCI a BCI umožňujúce hodnotiť stav asfaltových vrstiev, podkladu a podložia. Podľa číselných hodnôt týchto parametrov sa určia kvalitatívne kategórie z hľadiska únosnosti vozovky v každom diagnostikovanom bode (priradia sa klasifikačné stupne) z 5-stupňovej škály. Na záver sa na základe klasifikačných stupňov vytvorí homogénne sekcie. Postup pri orientačnom hodnotení je uvedený v [18], záväznej prílohe A. Na hodnotenie na úrovni cestnej siete je potrebné mať k dispozícii aktuálne údaje o zaťažení dopravou TNV a priehyby namerané rázovým zariadením FWD. Je potrebné poznať údaje o konštrukcii vozovky (netuhá/polotuhá).

Vlastné meranie priehybov sa realizuje deflektometrom firmy KUAB (obrázok 13). Technické parametre deflektometra KUAB 2m-50 a KUAB 2m-150 sú uvedené v [18]. Podľa tohto predpisu je na úrovni cestnej siete merací krok v jednom jazdnom pruhu 200 m, pričom merané miesta v jednotlivých jazdných pruhoch sú navzájom posunuté o 100 m.

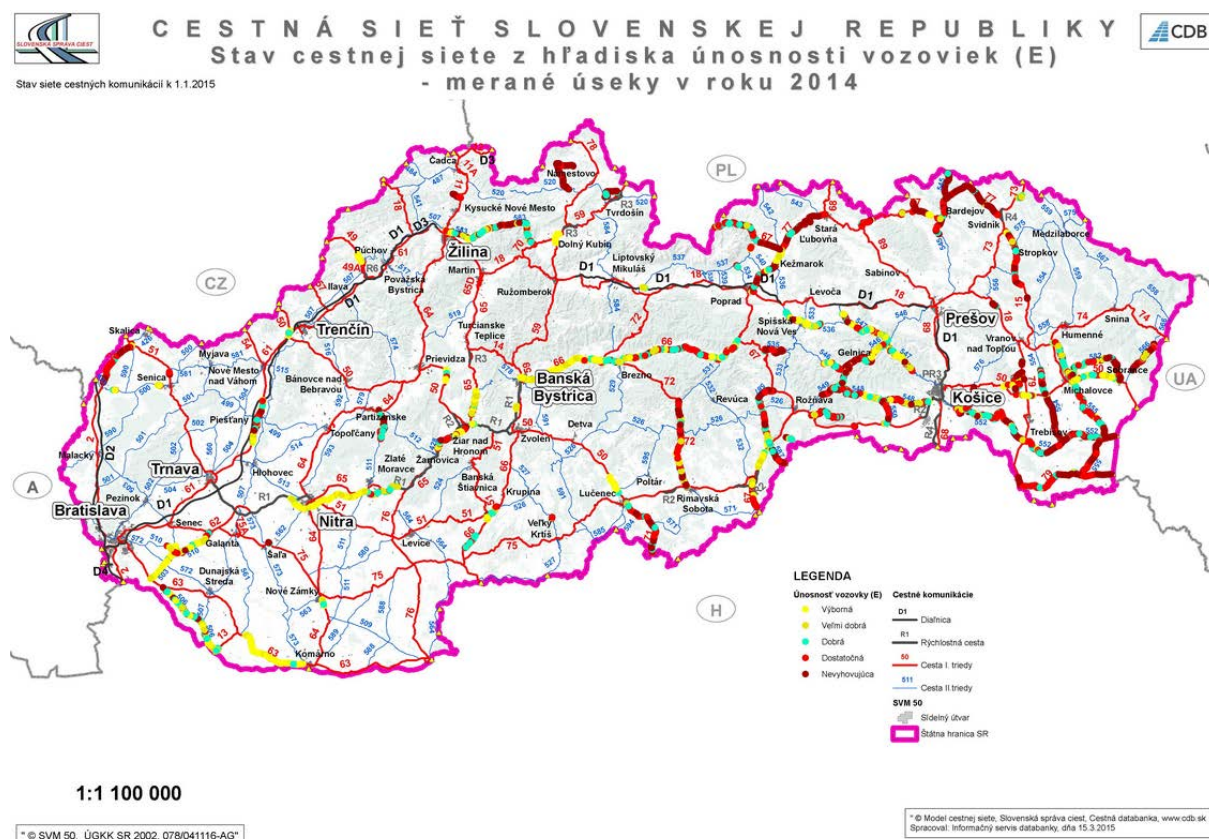


Obrázok 13: Deflektometer KUAB pri porovnávacom meraní FWD/TSD na diaľnici D1, dňa 9.6.2015

V literatúre [17] je uvedené, že rozhodnutie správcu cestnej siete o tom, či sa použijú rázové zariadenia FWD na meranie na úrovni cestnej siete závisí od zvolenej stratégie. Jej stanovenie môže byť ovplyvnené viacerými faktormi, medzi ktoré patria najmä:

- veľkosť cestnej siete,
- aktuálny stav databázy informácií o únosnosti vozoviek,
- dôležitosť údajov o únosnosti vozoviek v používanom systéme hospodárenia s vozovkami,
- celkové finančné náklady na merania a spotreba času na ich vykonanie.

Merania pre úroveň cestnej siete sa podľa [3] aktualizujú na základe významu meranej komunikácie. V [17] je uvedené, že použitie deflektometra FWD na monitorovanie únosnosti je vhodné v prípadoch, keď dĺžka cestnej siete pripadajúca na jedno dostupné zariadenie je v súlade s jeho ročným výkonom, pričom platnosť výsledkov meraní sa uvažuje 3 až 5 rokov. Pri väčšej dĺžke je potrebné zvoliť metódu štatisticky reprezentatívnych úsekov, alebo použiť diagnostické zariadenie s väčším výkonom, prípadne viac zariadení. Stav cestnej siete Slovenskej republiky z hľadiska únosnosti vozoviek podľa hodnoty ekvivalentného modulu pružnosti konštrukcie vozovky znázorňuje obrázok 14.



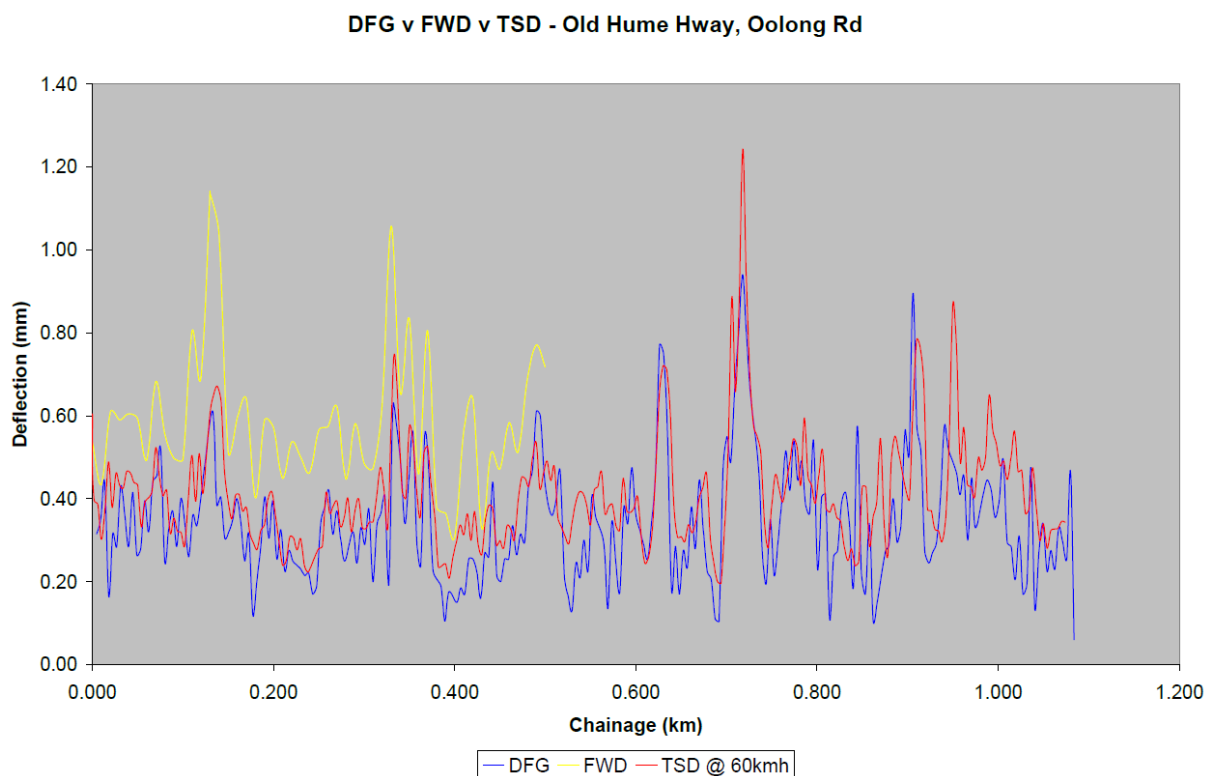
Obrázok 14: Stav cestnej siete z hľadiska únosnosti vozoviek [11]

4 Traffic Speed Deflectometer vo svete

V súčasnej dobe sa vykonáva overovanie TSD zariadení a nastavenie systému ich používania. Po celom svete prebiehajú rozsiahle merania vysokorýchlostným deflektometrom TSD, zisťuje sa reprodukovateľnosť s ďalšími zariadeniami na meranie priehybu, opakovateľnosť meraní zariadením TSD, použiteľnosť na úrovni cestnej siete. Aj napriek tomu, že toto nové diagnostické zariadenie má len krátku históriu, existuje mnoho publikácií, ktoré popisujú skúsenosti s meraním a vyhodnotením výsledkov.

4.1 Austrália

V roku 2010 vykonala prvá generácia TSD, vo vlastníctve Danish Road Directorate, meranie na viac ako 18 000 km vozoviek na území dvoch austrálskych štátov (Nový Južný Wales 13 000 km, Queensland 5000 km). Meranie prebehlo v spolupráci s ARRB Group. Výsledky merania boli prezentované v októbri 2010 na 24. konferencii ARRB v príspevku [1], ktorý obsahuje podrobnosti o porovnávacích meraniach so zariadeniami FWD a deflektografom (v obrázku 15 označený ako DFG). Zameriava sa tiež na výsledky testov na úrovni cestnej siete a aplikácii výsledkov pre plánovanie údržby a opráv vozoviek.



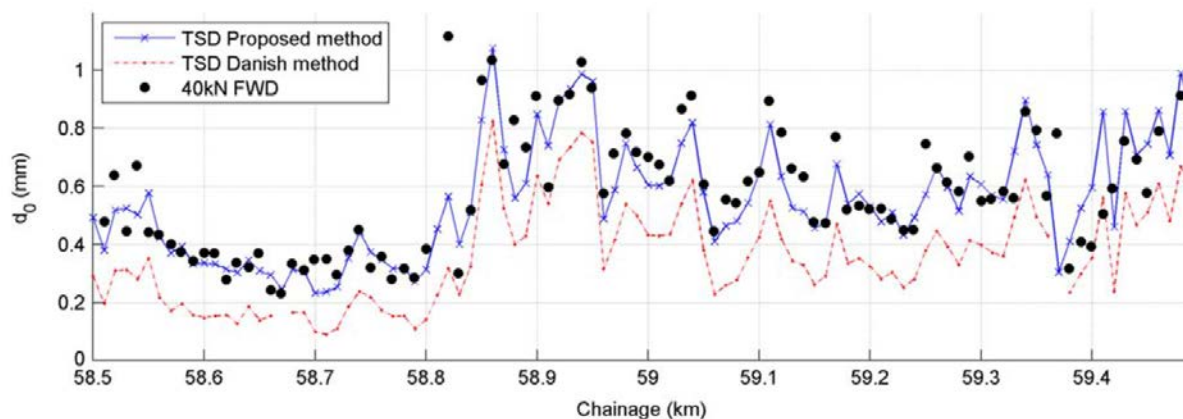
Obrázok 15: Porovnanie výsledkov zariadení DFG, FWD a TSD [1]

V roku 2014 získala ARRB Group Traffic Speed Deflectometer tretej generácie. Na internetových stránkach ARRB [<http://www.arrb.com.au/Equipment-services/TSD.aspx>] je uvedené, že súčasný plán meraní s TSD zahŕňa každoročné testovanie v päťročnom období (počnúc rokom 2015) v Novom Južnom Walese, Queenslande a tiež na Novom Zélande.

Na základe meraní s dánskym TSD v roku 2010 vyvinula ARRB metódu analýzy nameraných dát pre vytvorenie priehybovej krivky, ktorá je považovaná za kľúč k budúcej austrálskej práci s TSD. Princíp metódy AUTC (Area Under The Curve – „metóda oblasti pod krivkou“) je popísaný v [22, 25]. Rozdiel v hodnotách d_0 pri použití pôvodnej dánskej a navrhovanej metódy AUTC je znázornený na obrázku 16.

Metóda sa ukázala ako veľmi vhodná pre experimentálne dáta z Queenslandu, zatiaľ čo pre dáta z Nového Južného Walesu potrebuje úpravy. Správa [25] uvádza, že nástup tretej generácie TSD s viac ako 4 Doppler-laser snímačmi by mohol umožniť použitie AUTC metódy.

V súčasnej dobe nie je zrejmé, či priehybová krivka z TSD bude analyzovaná podobne ako priehybová krivka z FWD alebo je jednoduchšie pre hodnotenie použiť indexy únosnosti.



Obrázok 16: Rozdiel v hodnotách d_0 pri použití pôvodnej dánskej a navrhovanej metódy AUTC [22]

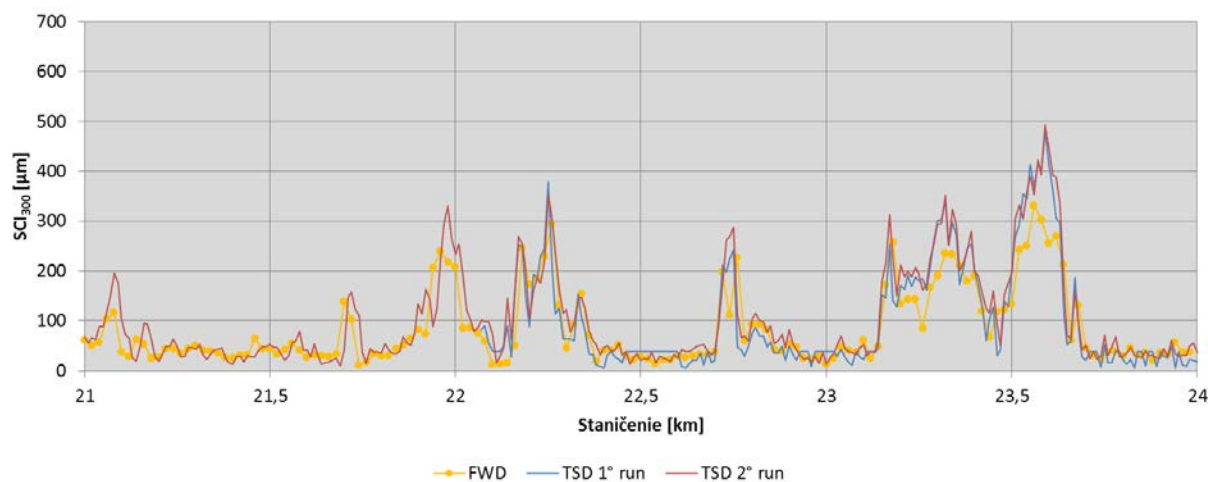
4.2 Česká republika/Taliansko

V novembri 2014 sa v okolí Ríma uskutočnilo porovnávacie meranie talianskeho TSD a rázového zariadenia FWD RODOS českej výroby vo vlastníctve Centra dopravného výzkumu, v.v.i. (obrázok 17).



Obrázok 17: Taliansky TSD a české rázové zariadenie FWD RODOS

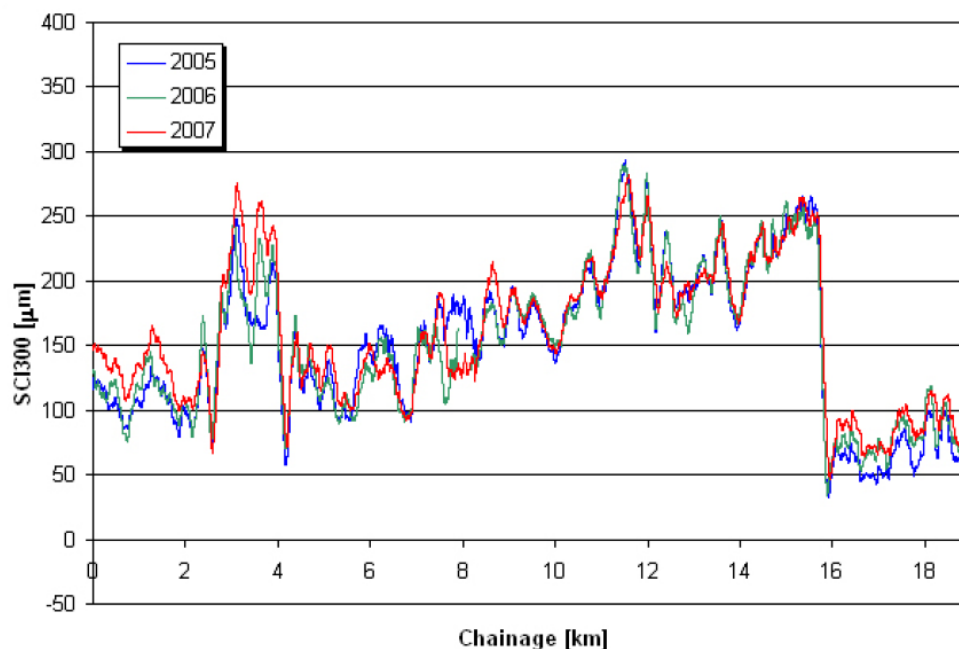
Meranie prebehlo na celkom 15 km dlhých úsekoch komunikácií A90 - GRA (diaľničný okruh Ríma, Grande Raccordo Anulare) a SS1 (Strada Statale 1 Via Aurelia). Priehyby namerané deflektometrom FWD boli opravené na porovnávaciu silu 60 kN (talianske TSD má zaťaženie na nápravu 12 ton) a teplotu podľa podmienok používaných v Taliansku (pozri čl. 4.4).



Obrázok 18: Porovnanie indexu SCI_{300} na komunikácii SS1

4.3 Dánsko

Dánske riaditeľstvo ciest zahájilo v roku 2005 meranie zariadením TSD na úrovni cestnej siete. V období 2005 – 2007 bola počas jedného roka zmeraná celá štátna sieť vozoviek, ktorá pred rokom 2007 mala dĺžku 2 000 km. Dôvodom bola potreba získania nových skúseností s TSD. V súčasnej dobe je celková dĺžka meraných komunikácií približne 3 600 km (1 600 km ciest, 2 000 km diaľnic). Celá sieť sa sleduje po jednotlivých častiach, v intervaloch od 3 do 5 rokov. Sieť ciest po dobu 3 rokov (1/3 celkovej dĺžky 1 600 km ročne), sieť diaľnic po dobu 5 rokov (1/5 celkovej dĺžky 2 000 km ročne). Súhrnne sa tak za 1 rok zmeria zhruba 1 000 km vozoviek (v priebehu 2 týždňov). Výstupom z meraní sú hodnoty povrchového indexu krivosti SCI_{300} . Obrázok 19 ukazuje príklad výsledkov meraní od roku 2005 do roku 2007 na úseku dĺžky 19 km.



Obrázok 19: Porovnanie výsledkov indexu SCI_{300} z trojročného merania [24] na rovnakom úseku vozovky

Výsledky indexu SCI_{300} sú použité pre orientačné hodnotenie únosnosti. Úseky s nevyhovujúcou únosnosťou sú určené na zosilnenie vozovky. Potrebná hrúbka zosilnenia je stanovená na základe meraní deflektometrom FWD.

Hodnoty nevyhovujúce únosnosti pre potrebu zosilnenia vozovky na základe meraní zariadením TSD boli potvrdené skúškami deflektometrom FWD. Klasifikácia únosnosti pre výsledky z meraní TSD bola vyvinutá podľa obdobnej klasifikácie pre výsledky z FWD. Následne potom bola klasifikácia pre TSD upravená na základe porovnávacích testov medzi FWD a TSD.

4.4 Taliansko

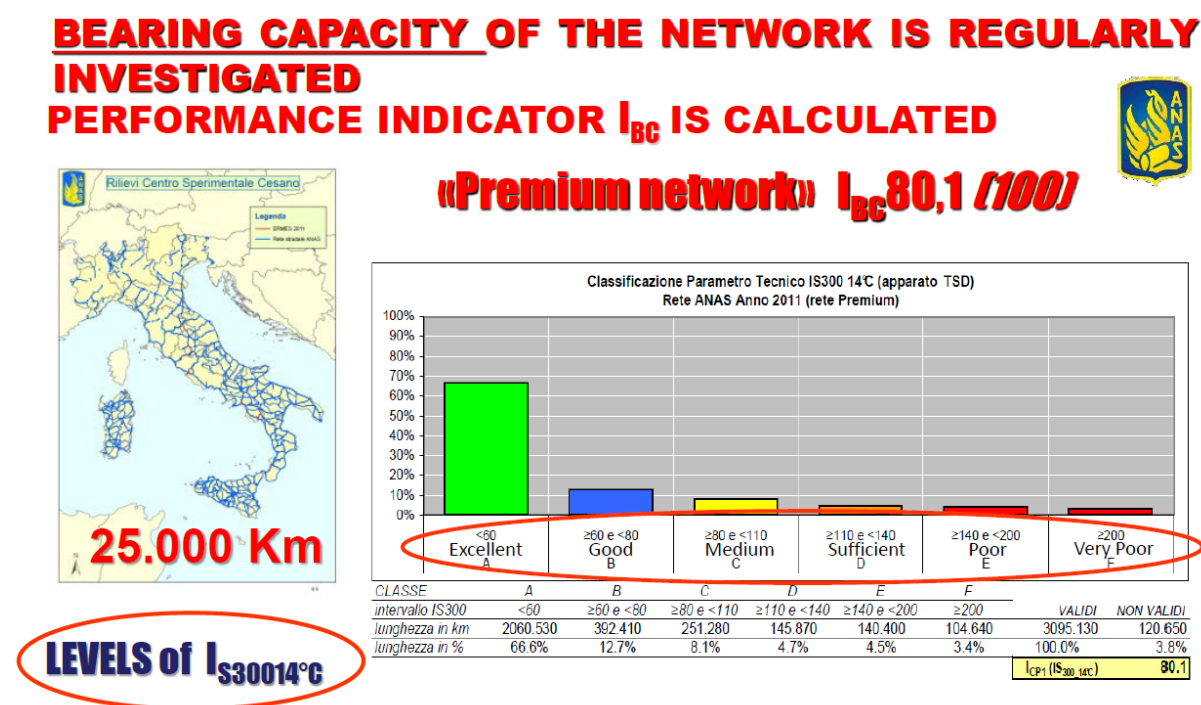
Použitie TSD v Taliansku bolo popísané v [2, 4]. ANAS S.p.A. – Centro Sperimentale Stradale (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade) používa vysokorýchlostný deflektometer TSD pre účely kontroly únosnosti v súvislosti so stavbou a rehabilitáciou vozovky. TSD má zaťaženie na nápravu 12 ton (maximálne štandardné zaťaženie používané v Taliansku). Od roku 2010 sa zariadenie TSD používa pre kontrolu únosnosti vozoviek na všetky nové a rekonštruované úseky vozoviek. Požadované hodnoty únosnosti sú zahrnuté v zmluvách pre výstavbu nových i rehabilitovaných konštrukcií vozoviek. Únosnosť je hodnotená na základe indexov SCI_{200} a SCI_{300} opravených na referenčnú teplotu 14 °C podľa rovnice:

$$IS_{14^{\circ}C} = IS_{Testing} \cdot e^{C \cdot (14 - T_{Testing})}$$

kde: $T_{Testing} = T_{vzduchu}$
 $C = 0,037$ pre SCI_{300}
 $C = 0,022$ pre SCI_{200}

V prípade nedodržania požadovaných hodnôt môže byť dodávateľ sankcionovaný. Kontrola vozovky zariadením TSD by mala byť vykonaná do jedného roka po skonštruovaní finálnej vrstvy.

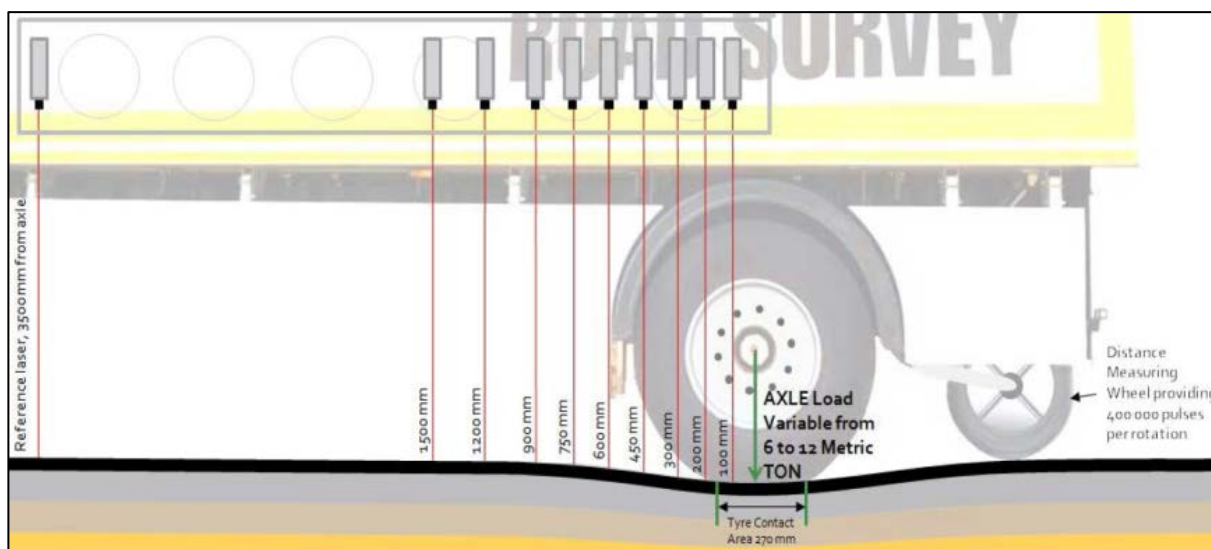
Hlavná talianska cestná a diaľničná sieť pod správou ANAS S.p.A. pozostáva zo zhruba 25 000 km ciest a diaľnic. Na základe pravidelného monitorovania únosnosti tejto siete je stanovený indikátor výkonnosti I_{BC} na základe hodnoty indexu SCI_{300} pri referenčnej teplote 14 °C (pozri obrázok 20).



Obrázok 20: Stav hlavnej talianskej siete ciest a diaľnic [4]

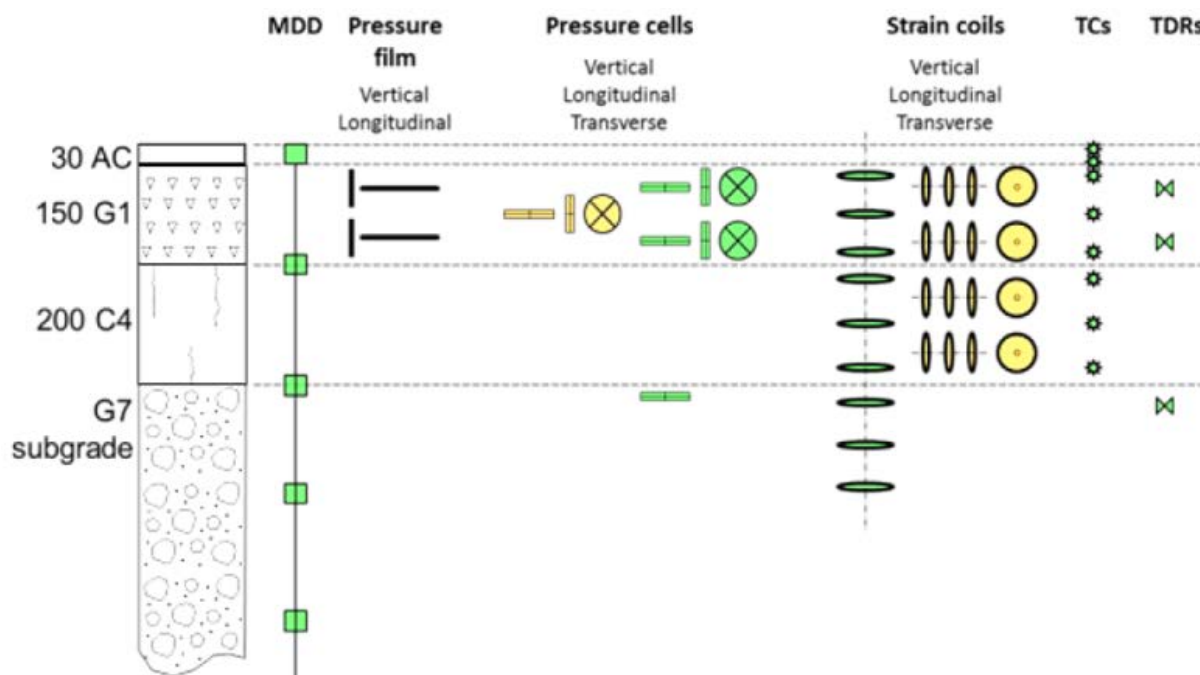
4.5 Juhoafrická republika

V priebehu roku 2012 bol skonštruovaný piaty TSD s 10 Doppler-laser snímačmi (vo vzdialenostiach 100 mm, 200 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm, 750 mm, 900 mm, 1 200 mm, 1 500 mm a 3 500 mm od osi zaťaženia, pozri obrázok 21) a začiatkom roku 2013 dodaný do Južnej Afriky pre SANRAL (*The South African National Roads Agency Limited*).



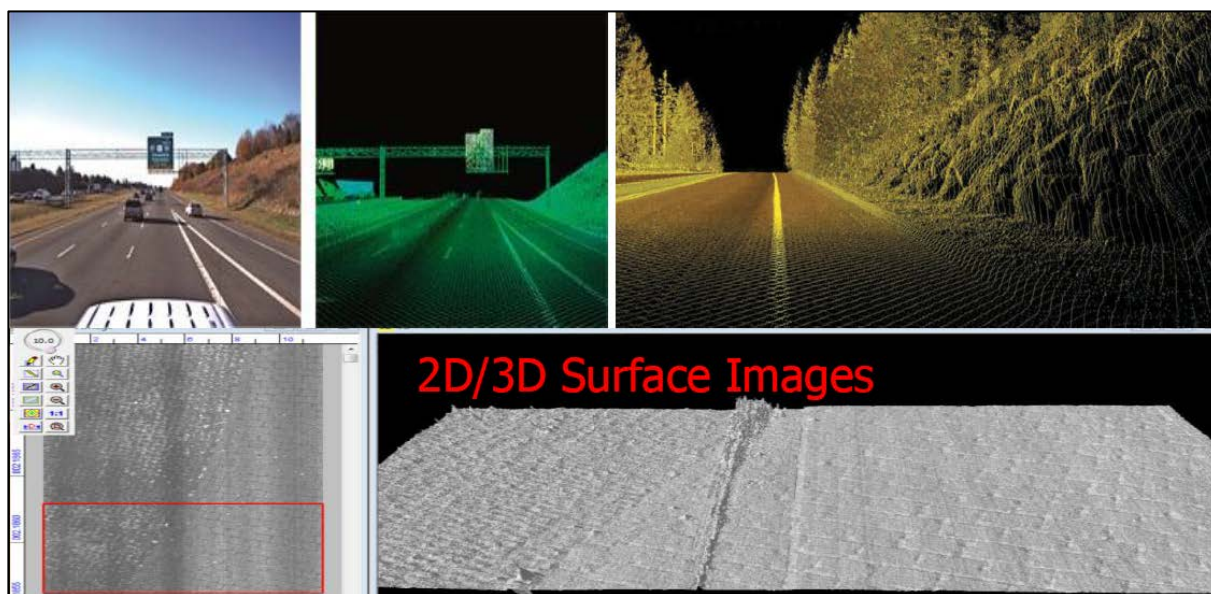
Obrázok 21: Schéma rozmiestnenia Doppler-laser snímačov juhoafrického TSD [15]

Zariadenie prechádza v súčasnej dobe starostlivým overovaním na špeciálne skonštruovaných vozovkách, ktoré obsahujú zabudované snímače pre overenie správneho fungovania TSD (pozri obrázok 22). Bližšie informácie sú uvedené v [21].



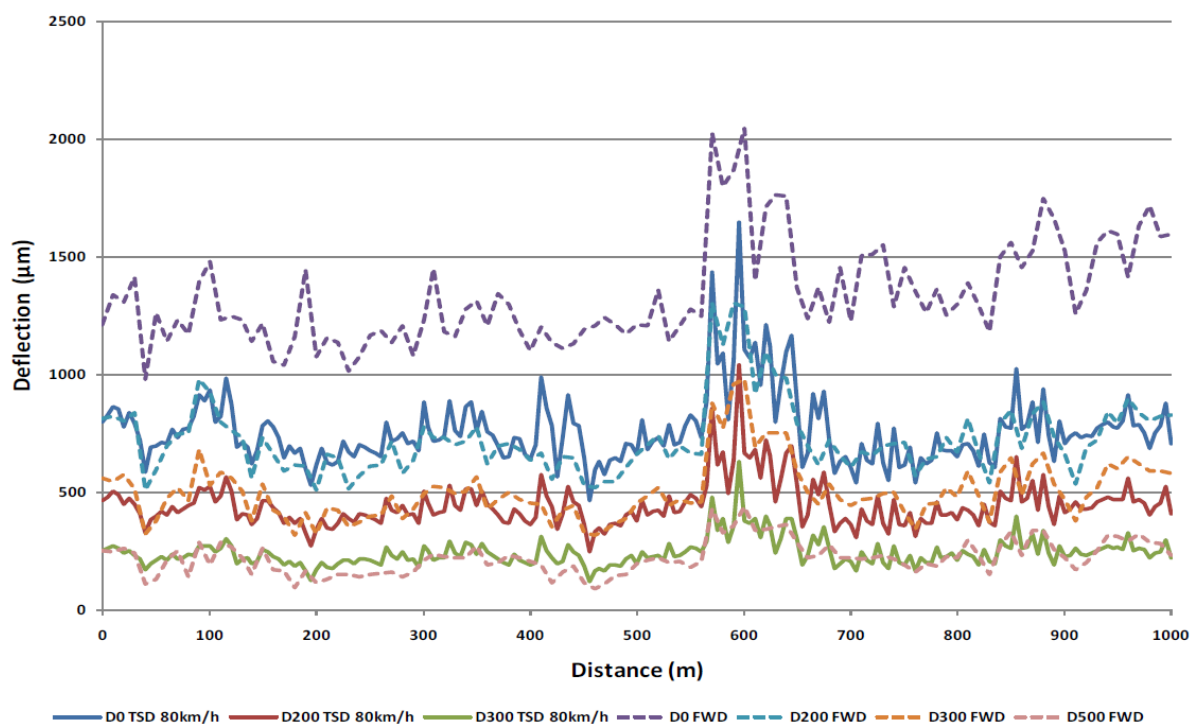
Obrázok 22: Typická referenčná konštrukcia vozovky experimentálneho úseku so snímačmi tlaku, napätia, teploty a vlhkosti v jednotlivých vrstvách vozovky [21]

Súčasťou juhoafrického TSD je tiež laserový skenovací systém LaserProf, pomocou ktorého môže zariadenie automaticky detekovať trhliny na povrchu vozovky, trvalé deformácie, merať makrotextúru a pozdĺžny profil vozovky (IRI) a vytvárať 3D model vozovky a jej blízkeho okolia (pozri obrázok 23). TSD má tiež ako prvý namontované tenzometre pre merania zaťaženia nápravy.



Obrázok 23: Ukážka výstupu zariadenia LaserProf [16]

V súčasnej dobe nie sú k dispozícii žiadne verejné správy týkajúce sa merania TSD v JAR. Na konferencii Pavement Evaluation 2014 v USA však bolo v príspevku [15] uverejnené porovnanie medzi TSD a FWD (pozri obrázok 24), ktoré dokumentuje podobnú úroveň priehybov s posunutím v pozícii snímačov.

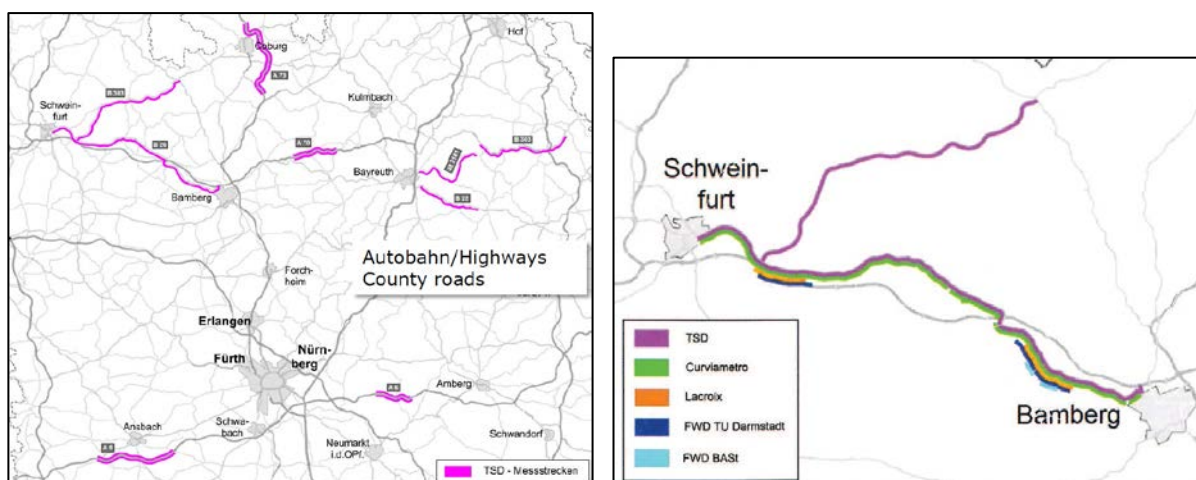


Obrázok 24: Porovnanie TSD a FWD v rôznych vzdialenostiach od osi zaťaženia [15]

4.6 Nemecko

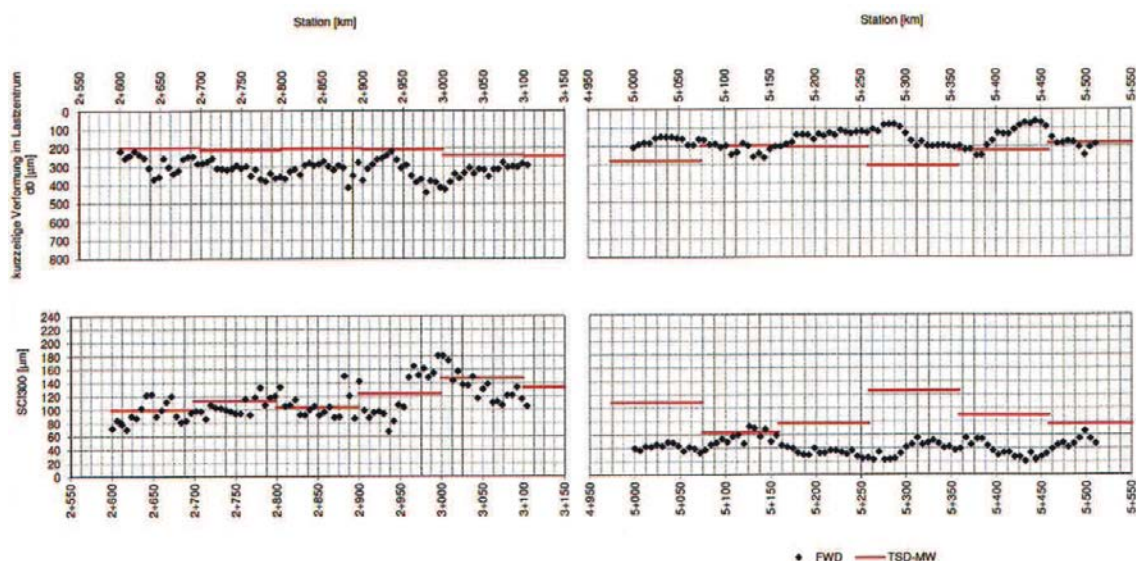
V rámci pilotného projektu v Bavorsku, o ktorom sa zmieňuje článok [28] bola v roku 2012 skúmaná použiteľnosť systému TSD v porovnaní s inými metódami merania priehybov (FWD, Deflectograph Lacroix, Curviameter) na diaľniciach a cestách v celkovej dĺžke 300 km (pozri obrázky 25 a 26). Poľské TSD meralo na asfaltových vozovkách s odlišnou konštrukciou a rôznymi triedami zaťaženia. Meranie prebehlo prevažne na vozovkách, ktoré boli zmerané rázovým zariadením FWD alebo Curviametrom. Cieľom projektu bolo získať čo najširšiu dátovú základňu pre preskúmanie súvislostí s dosiaľ používanými meracími systémami.

Paralelne s meraním zariadením TSD bolo výskumným ústavom BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen), na niektorých z uvedených úsekov, súčasne vykonané porovnávacie meranie medzi zariadením FWD a Lacroix (predovšetkým na B 26 medzi Schweinfurtom a Bambergom). Zariadenie FWD zmeralo priehyby tiež na komunikáciách A 70, A 73, St 2181. Porovnanie výsledkov TSD a FWD na komunikáciách St 2181 a B 26 je znázornené na obrázkoch 27, 28.



Obrázky 25 a 26: Merané úseky v roku 2012 [14, 28]

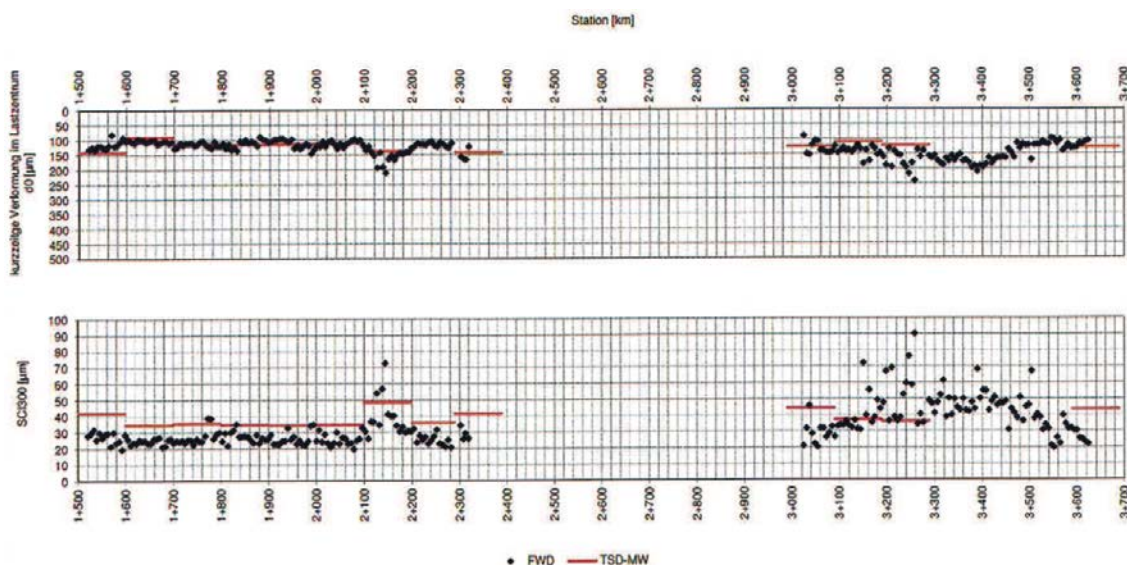
V [28] je uvedené, že porovnávanie jednotlivých hodnôt (SCI_{300} a y_0) ukázalo rozdiely medzi výsledkami z merania TSD a FWD. Pri porovnávaní priemerných hodnôt výsledkov z TSD (100 m úsek) s jednotlivými výsledkami FWD však bolo možné v niektorých oblastiach nájsť dobrú zhodu medzi oboma systémami (hlavne pre y_0 v osi zaťaženia). Na niektorých úsekoch komunikácie St 2181 sú však časti s protichodnými tendenciami charakteristických veličín (predovšetkým SCI_{300}) medzi oboma systémami.



Obrázok 27: Porovnanie výsledkov TSD a FWD na komunikácii St 2181 [28]

Jednoznačnú príčinu sa nepodarilo zistiť, aj keď je možné uviesť, že pri väčších nerovnostiach vozovky boli výsledky medzi TSD a FWD značne divergentné. Použité poľské TSD nebolo v dobe merania vybavené dynamickým záznamom zaťaženia nápravy vozidla, preto v tejto súvislosti nebolo možné vykonať žiadne ďalšie vyhodnotenie.

Cieľom projektu uverejneného v [28] bolo predovšetkým porovnanie hodnôt priehybov medzi TSD a ďalšími zariadeniami. Porovnateľnosť výsledkov však bola zaťažená rôznymi okrajovými podmienkami (napr. uvedené úseky komunikácií boli merané v rôznych rokoch). Medzi výsledkami z merania TSD a FWD nebol stanovený žiadny korelačný vzťah, ako je uvedené tiež v [23]. Na základe výsledkov merania bolo stanovené, že zariadenie TSD má veľký potenciál pre stanovenie charakteristík únosnosti. Vznikli tiež odporúčania pre ďalší výskum v tejto oblasti.



Obrázok 28: Porovnanie výsledkov TSD a FWD na komunikácii B 26 [28]

4.7 Poľsko

Poľské zariadenie TSD, ktoré je v poľskom IBDiM od roku 2011, pravidelne meria v rámci rôznych projektov po celej Európe. V [8] je možné dohľadať, že okrem meraní vo Fínsku, Nemecku, Švédsku, skontroloval TSD v rokoch 2013-2015 viac ako 20 000 km komunikácií v Poľsku.

Obrázok 32 zobrazuje porovnanie výsledkov maximálnych priehybov TSD a FWD na základe výskumu realizovaného na pokusných úsekoch blízko Varšavy. Získané priehyby boli prepočítané na veľkosť porovnávacej sily a teploty. Korekcia teploty sa vykonala podľa postupu uvedeného v [27] (pozri obrázok 29).

Koreláciou medzi TSD a FWD bola stanovená hodnota spoľahlivosti $R = 0,81$. Porovnanie medzi TSD a FWD bolo vykonané v „rutinnom režime“, čo znamená, že nastávajú rozdiely v líniiach meraných jednotlivými zariadeniami. V porovnávacom teste, kde by boli línie merania prísne sledované, môže hodnota spoľahlivosti prekročiť hodnotu 0,9.

BELLS equation

$$T_d = 0,95 + 0,892 * IR + \{\log(d) - 1,25\} \{-0,448 * IR + 0,621 * (T_{1-day}) + 1,83 * \sin(h_{18} - 15,5)\} + 0,042 * IR * \sin(h_{18} - 13,5)$$

where:
 T_{1-day} is average air temperature the day before measurement
 IR is temperature measured with infra red sensor

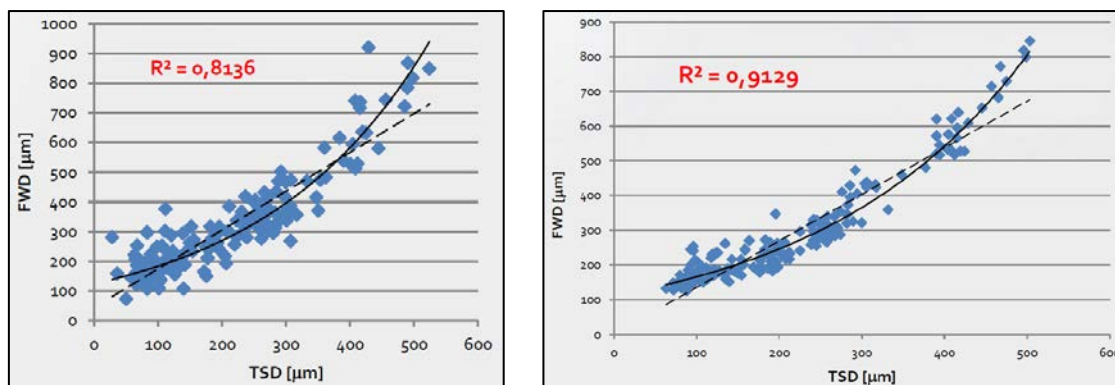
Correction factor

$$f_t = 1 + 0,02(20 - T_a)$$

where T_a is temperature in the half depth of asphalt layer calculated with BELLS equation

Obrázok 29: Postup pri korekcii na porovnávaciu teplotu [27]

Korekciou teploty sa taktiež zvyšuje hodnota spoľahlivosti R^2 pri porovnaní výsledkov. Vplyv korekcie teploty je uvedený na obrázkoch 30 a 31. Porovnanie výsledkov medzi zariadením TSD a FWD je znázornené na obrázku 32.



Obrázky 30 a 31: Vplyv korekcie teploty (vľavo: pred korekciou, vpravo: po korekcii [27])



Obrázok 32: Porovnanie TSD a FWD [27]

4.8 USA

V roku 2013 bolo skonštruované a následne doručené siedme zariadenie TSD do USA (pozri obrázok 33), kde sa podieľa na porovnávacích testoch FHWA (Federal Highway Administration). Na vykonanie meraní uzavrela FHWA zmluvu s konzultačnou a inžinierskou spoločnosťou AMEC a následne bol vytvorený projekt "Pavement Structural Evaluation at the Network Level" DTFH61-12-00040. Firma Greenwood Engineering A/S zaisťuje pre spoločnosť AMEC na porovnávacie meranie "Traffic Speed Continuous Deflection Data Collection, Minnesota" DTFH61-12-C-00031. Hlavným cieľom projektu je overiť schopnosti zariadení merajúcich priehyby vysokých rýchlostí pre hodnotenie na úrovni cestnej siete.

V septembri 2013 sa tak na MnRoad v Minnesote stretli tri meracie zariadenia - Curviameter (Euroconsult Nuevas Tecnologías, S.A), Rolling Weight Deflectometer (Applied Research Associates, Inc.) a Traffic Speed Deflectometer (Greenwood Engineering A/S). MnRoad je testovacia dráha skladajúca sa z uzavretého testovacieho okruhu (MnRoad Low Volume Road) s vylúčením cestnej premávky a príľahlej komunikácie I-94 (Interstate-94 Mainline) s reálnym dopravným zaťažením.

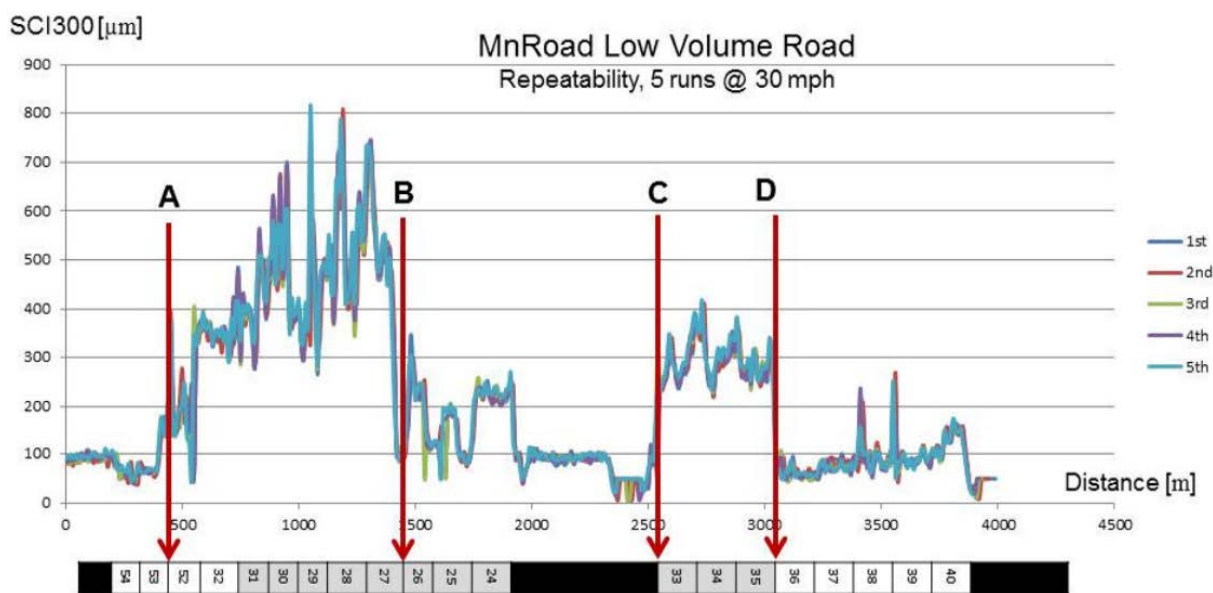
V priebehu jedného týždňa bol vykonávaný celý rad pokusov pre overenie opakovateľnosti a reprodukovateľnosti 3 rôznych zariadení. Porovnávacie meranie prebehlo na príľahlej komunikácii I-94 v úseku s dĺžkou 5,6 km (45 meracích sekcií rôznych vozoviek) a na uzavretom okruhu v úseku

s dĺžkou 4,0 km (28 meracích sekcií rôznych vozoviek). Opakovateľnosť meraní TSD na MnRoad je znázornená na obrázku 34. Posledná časť merania sa vykonávala na komunikácii s dĺžkou 30 km vo Wright County, Minnesota, ktorá poskytuje, okrem dlhšieho skúšobného úseku, tiež smerové oblúky malých polomerov a zvlnenú niveletu. V [20] je uvedené, že projekt má trvať až do konca roku 2016.

FHWA tiež založila projekt TPF 5(282) „Demonstration of Network Level Pavement Structural Evaluation with Traffic Speed Deflectometer“ pre posúdenie použiteľnosti TSD na úrovni cestnej siete v jednotlivých štátoch americkej federácie na úsekoch vozoviek s dĺžkou 50 km - 80 km. Prvé kolo meraní prebehlo v roku 2014. Ďalšie testovacie merania TSD sú naplánované na rok 2015 v Pensylvánii, New Yorku, Južnej Karolíne, Nevade, Kalifornii, Georgii a v Illinois. Podľa [12] potrvá výskum až do polovice roka 2016.



Obrázok 33: Americký TSD pri práci na MnRoad [13]



Obrázok 34: Opakovateľnosť meraní TSD na MnRoad [13]

4.9 Veľká Británia

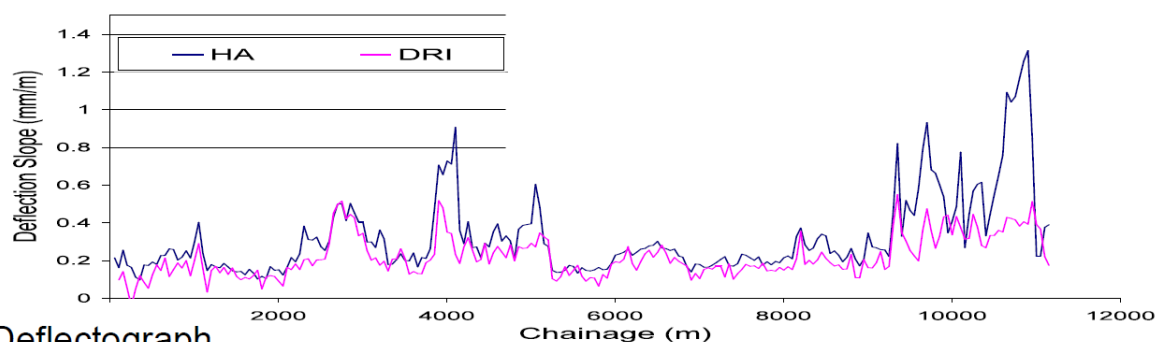
Meranie zariadením TSD na úrovni cestnej siete v Anglicku je popísané v [6]. Anglická Highways Agency má zmluvu s TRL (Transport Research Laboratory) na kontrolovanie cestnej siete zariadením TSD. V období od roku 2009 do roku 2012 vykonala TRL meranie na viac ako 50 000 km strategickú diaľničnej a cestnej siete.

Postup interpretácie nameraných hodnôt zariadením TSD je založený na vzťahu medzi priehybom meraným deflektografom a hodnotou TSD „slope“ vo vzdialenosti 100 mm od osi zaťaženia (pozri obrázok 35). Použitím tohto vzťahu je možné odhadnúť stav vozovky na základe dát zo zariadenia TSD. Na meranej vozovke je každému 100 m úseku pridelená kategória stavu vozovky so 4 klasifikačnými stupňami podľa tabuľky 1.

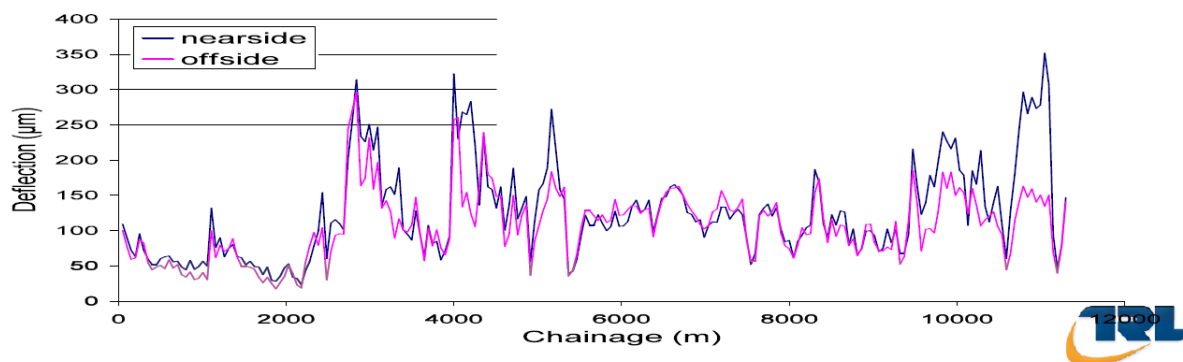
Tabuľka 1: Kategória stavu vozovky podľa UK Highways Agency [6]

Category	Description
1	Flexible pavements without any need for structural maintenance
2	Flexible pavements unlikely to need structural maintenance
3	Flexible pavements likely to need structural maintenance
4	Flexible pavements very likely to need structural maintenance

TSDs

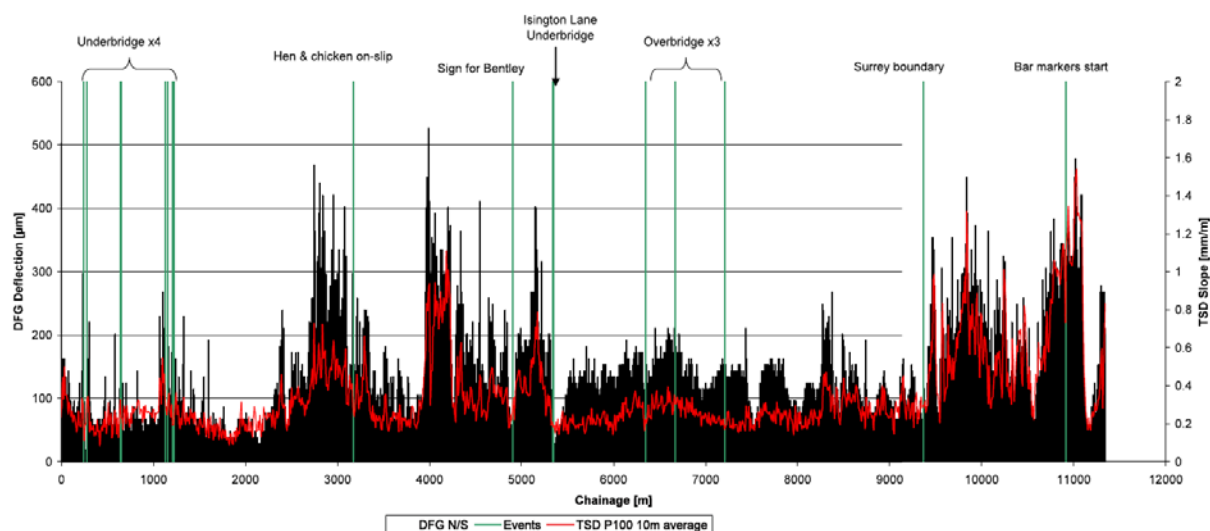


Deflectograph

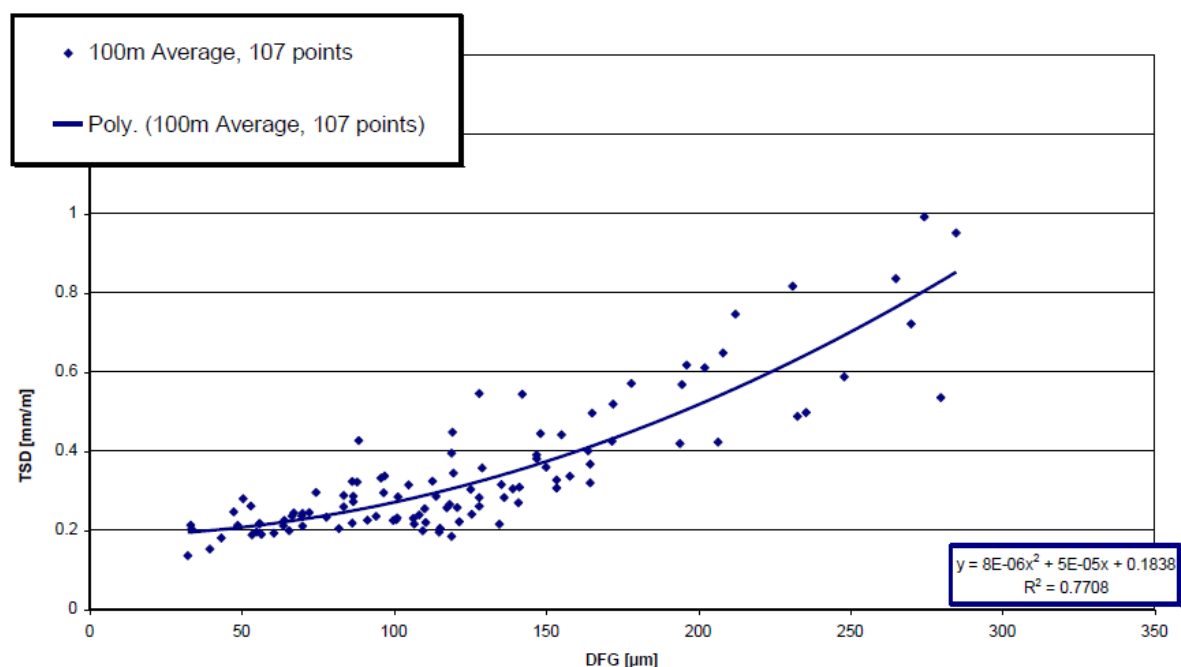


Obrázok 35: Porovnanie anglického a dánskeho TSD a deflektografu [7]

Obrázok 36 znázorňuje porovnanie anglického TSD a deflektografu na komunikácii A1 vo Veľkej Británii. Vzťah medzi zariadením TSD (deflection slope) a deflektografom (peak deflection) je znázornený na obrázku 37.



Obrázok 36: Porovnanie anglického TSD a deflektografu na komunikácii A1 vo Veľkej Británii [7]



Obrázok 37: Vzťah medzi zariadením TSD (deflection slope) a deflektografom (peak deflection) [6]

5 Porovnávacie meranie TSD a FWD KUAB na Slovensku

V rámci tejto rozborovej úlohy prebehlo dňa 9.6.2015 porovnávacie meranie medzi deflektometrom FWD KUAB 2m-50 vo vlastníctve Slovenskej správy ciest a vysokorýchlostným deflektometrom TSD vlastným poľským výskumným ústavom IBDiM *. Meranie prebehlo na 3 miestach. Priehyby boli na každom vybranom úseku najprv zmerané zariadením TSD a následne deflektometrom KUAB. Po skončení merania rázovým zariadením FWD bol úsek znovu zmeraný vysokorýchlostným deflektometrom. Na cestách I/18 a II/537 boli priehyby merané vysokorýchlostným deflektometrom TSD pri rýchlosti cca 70 km/h. Na diaľnici D1 boli navyše priehyby zmerané pri rôznych rýchlostiach TSD (cca 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h).

5.1 Merané úseky

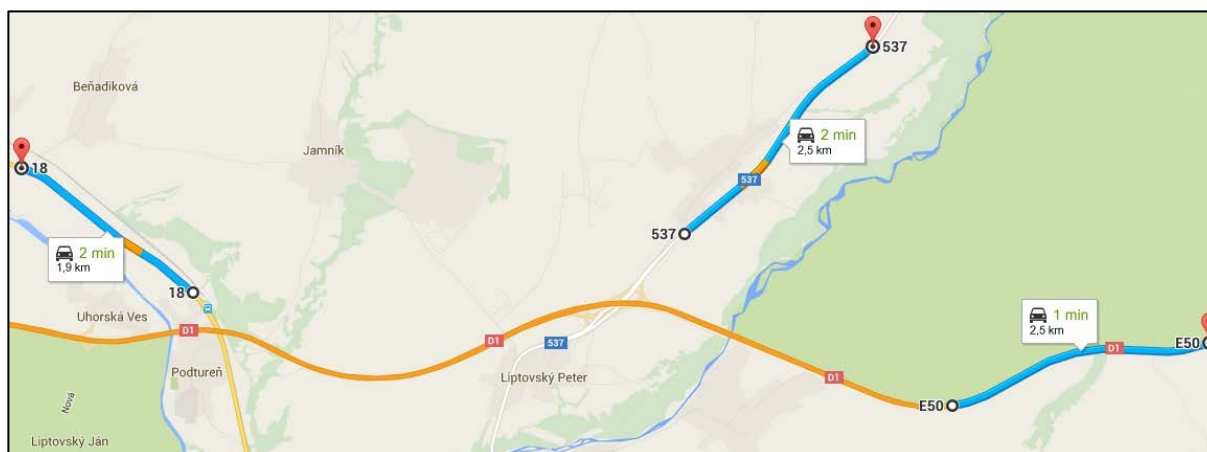
Po dohode s objednávatelom rozborovej úlohy (SSC) boli vybraté 3 úseky vozoviek s asfaltovým krytom na komunikáciách D1, I/18 a II/537 v okolí Liptovského Mikuláša (pozri obrázok 38 a tabuľku 2).

Na meraných úsekoch boli taktiež odobrané jadrové vývrtky pre určenie skladby konštrukcie vozovky. Dĺžky úsekov boli zmerané kalibrovaným zariadením DMI (Distance Measuring Instrument) zabudovaným v deflektometri FWD.

Tabuľka 2: Skladby konštrukcií vozoviek a dĺžky meraných úsekov

D1 "Hybe"	<i>Dĺžka úseku [km]</i>	<i>Dopravné zaťaženie NV [voz/24h]</i>
	2,5	3 308
<i>Skladba konštrukcie vozovky</i>	<i>Hrúbka [mm]</i>	
AB	90	
OŠD	120	
SC	200	
ŠP	250	
I/18 "Podtureň"	<i>Dĺžka úseku [km]</i>	<i>Dopravné zaťaženie NV [voz/24h]</i>
	1,95	1 097
<i>Skladba konštrukcie vozovky</i>	<i>Hrúbka [mm]</i>	
AB	80	
OK	180	
ŠD	250	
ŠP	200	
II/537 "Vavrišovo"	<i>Dĺžka úseku [km]</i>	<i>Dopravné zaťaženie NV [voz/24h]</i>
	2,5	146
<i>Skladba konštrukcie vozovky</i>	<i>Hrúbka [mm]</i>	
Asfaltový betón zatvorený	50	
Podkladný betón B-170	200	
Štrkopiesok	250	

* pozn.: Merania sa zúčastnili taktiež rázové zariadenia FWD Dynatest 8000 (TPA Spoločnosť pre zabezpečenie kvality a inovácie s.r.o.) a FWD RODOS 2012 (Centrum dopravného výzkumu, v.v.i.). Vo výsledkoch je zahrnuté porovnanie medzi FWD KUAB a Dynatest.



Obrázok 38: Mapa meraných úsekov

5.2 Technická špecifikácia TSD

Poľská výskumná organizácia IBDiM (Instytut Badawczy Dróg i Mostów) vlastní od roku 2011 Traffic Speed Deflectometer (obrázok 39) s ôsmimi Doppler-laser snímačmi. Toto zariadenie TSD používa pre meranie 8 Doppler-laser snímačov vo vzdialenostiach 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,6 m, 0,9 m a 1,5 m od osi zaťaženia. Referenčný snímač vo vzdialenosti 3,5 m od osi zaťaženia meria nedeformovateľný povrch vozovky vďaka vysokej vzdialenosti od náprav vozidla. Zariadenie je vybavené dynamickým záznamom zaťaženia nápravy vozidla, ktoré umožňuje korekciu na štandardné zaťaženie na nápravu 10 ton.

5.3 Technická špecifikácia FWD KUAB 2m-50

Pre účely merania priehybov bol použitý deflektometer firmy KUAB vo vlastníctve SSC (pozri obrázok 40) s technickými parametrami uvedenými v [18].



Obrázky 39 a 40: Použité zariadenia pri porovnávacom meraní

5.4 Vyhodnotenie meraní

Rázové zariadenie FWD KUAB 2m-50 má nosník so snímačmi priehybu umiestnenými za zaťažovacou doskou v smere jazdy. Oproti tomu, zariadenie TSD má Doppler-laser snímače umiestnené v smere jazdy od osi zaťaženia. To znamená, že vyhodnotenie výsledkov bolo vykonané za teoretického predpokladu, že obe polovice priehybovej krivky, ktoré rozdeľuje os zaťaženia, sú totožné (zrkadlovo obrátené).

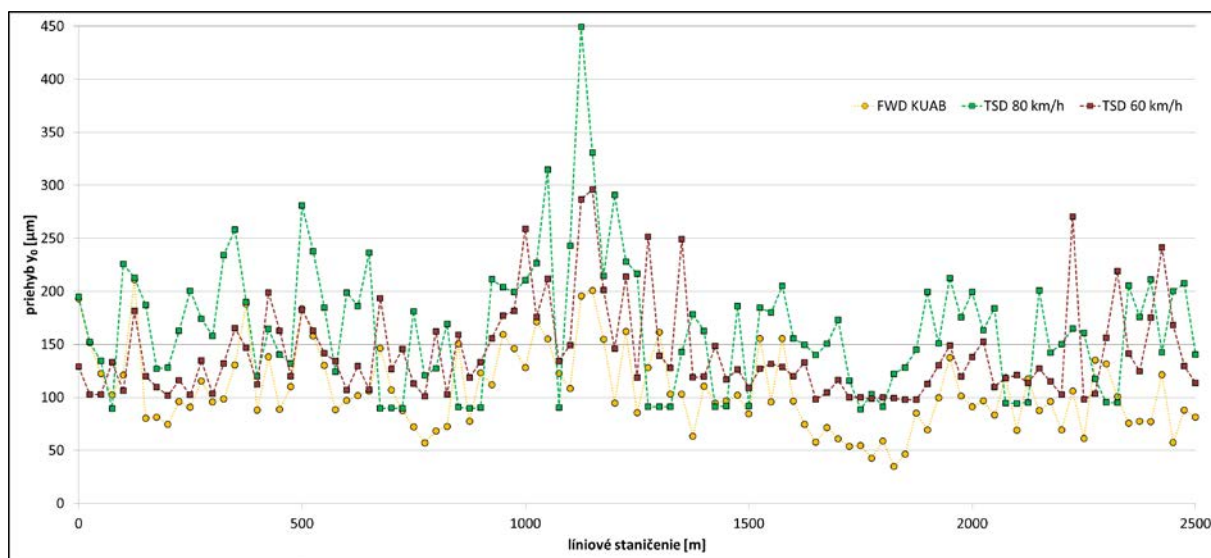
Porovnávali sa hodnoty priehybov v osi zaťaženia a hodnoty vypočítané zo zaznamenaných priehybov – index SCI_{300} (pozri rovnica A.6 prílohy A v TP 01/2009).

Úprava hodnôt priehybov na zaťaženie a teplotu prebehla v prípade FWD i TSD podľa metodiky používanej poľským výskumným ústavom IBDiM podľa rovnice:

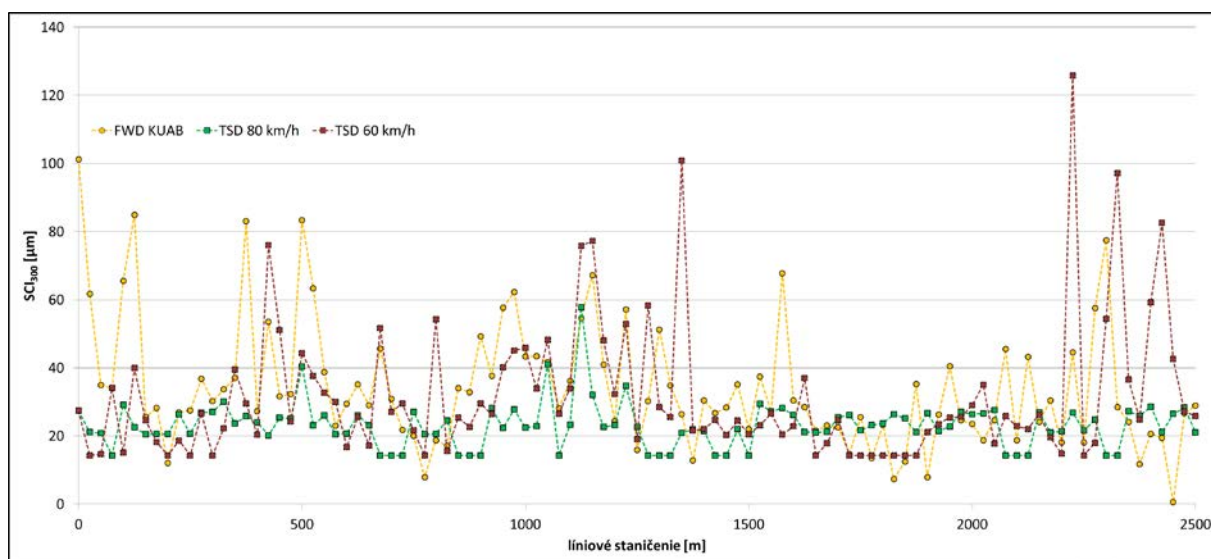
$$y_{cor.} = \left(\frac{5000}{f_L} \cdot y_i \right) \cdot \left(1 + 0,02 \cdot (20 - T_{asf.surf.}) \right),$$

kde: f_L = dynamic load [kg], $T_{asf.surf.}$ = teplota povrchu vozovky.

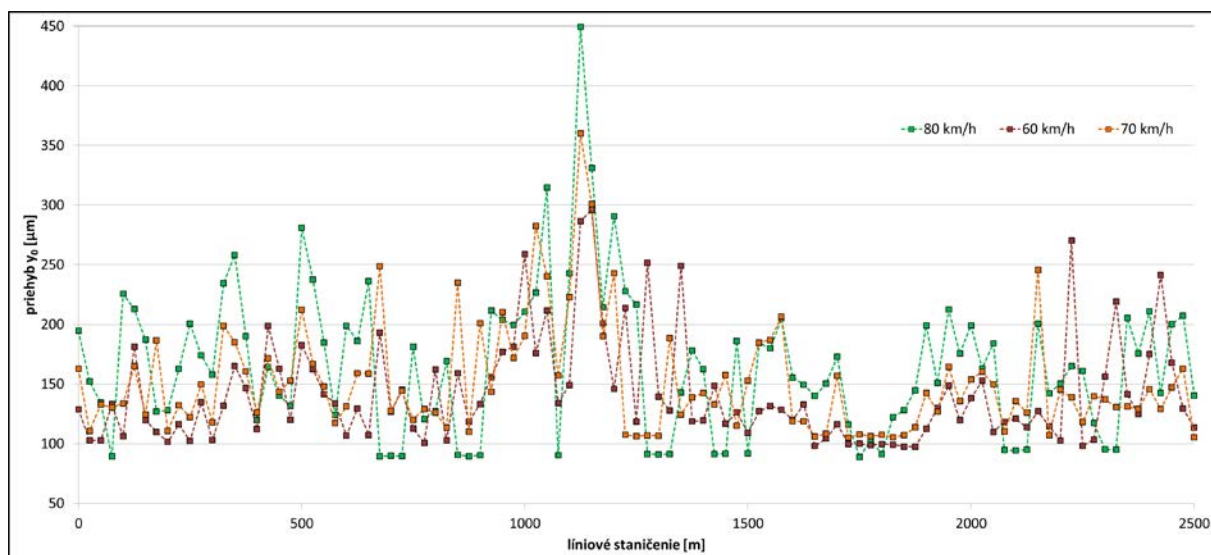
Výsledky sú prezentované na obrázkoch 41 až 51.



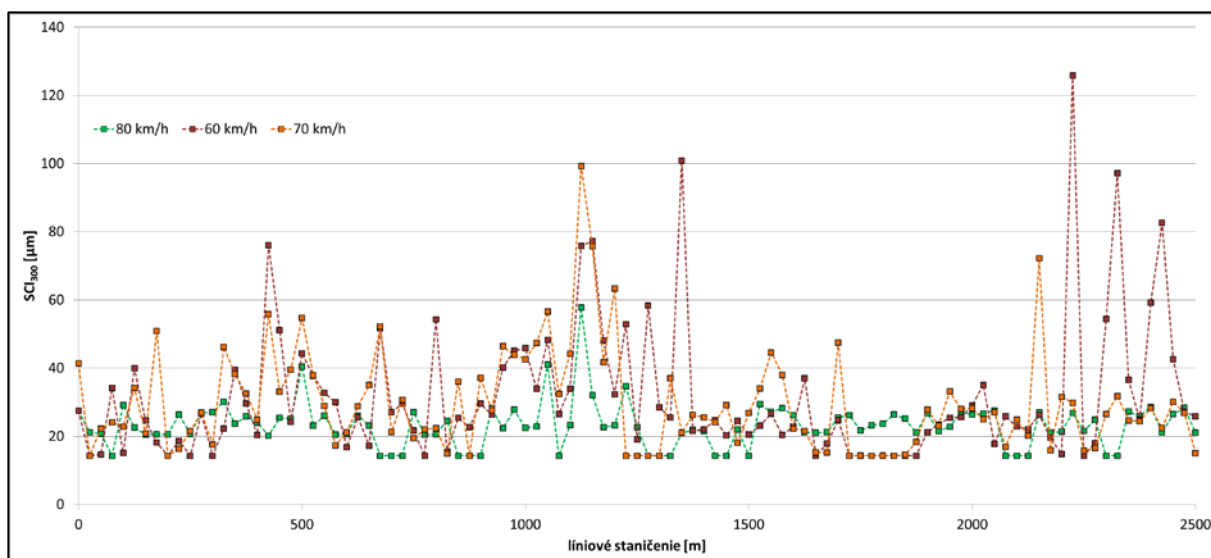
Obrázok 41: FWD verzus TSD – porovnanie priehybov y_0 v osi zaťaženia na úseku D1 „Hybe“



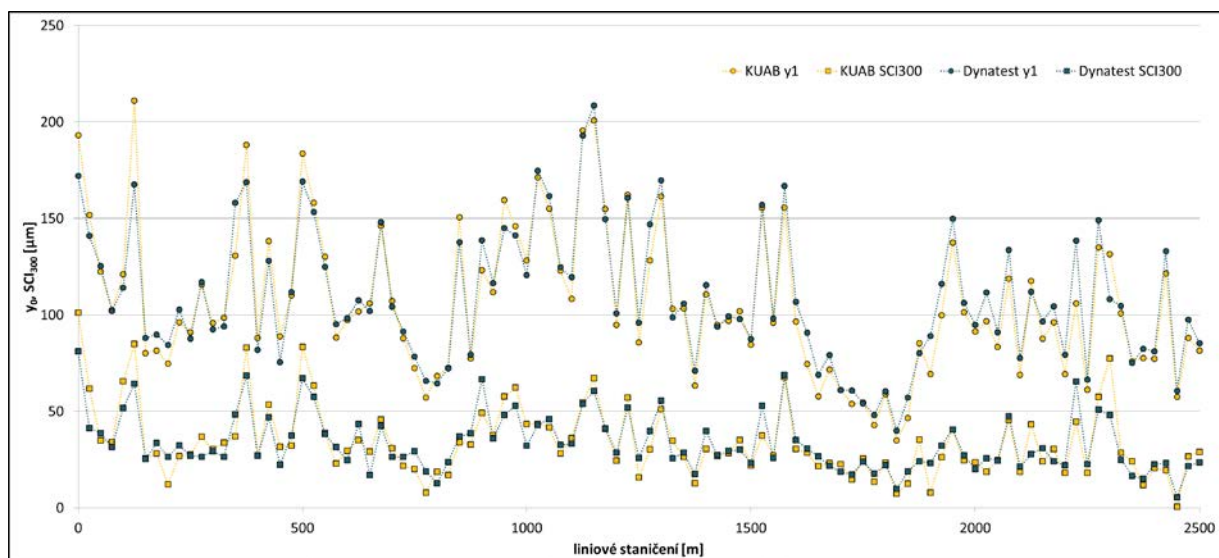
Obrázok 42: FWD verzus TSD – porovnanie indexov SCI_{300} na úseku D1 „Hybe“



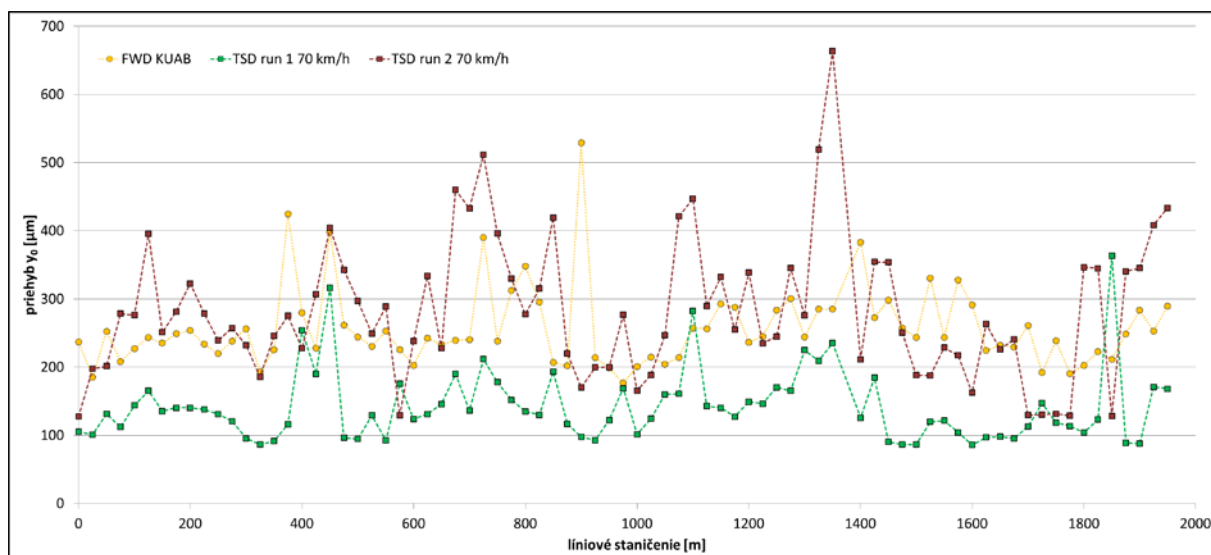
Obrázok 43: TSD pri troch rýchlostiach na úseku D1 „Hybe“ – priehyb y_0



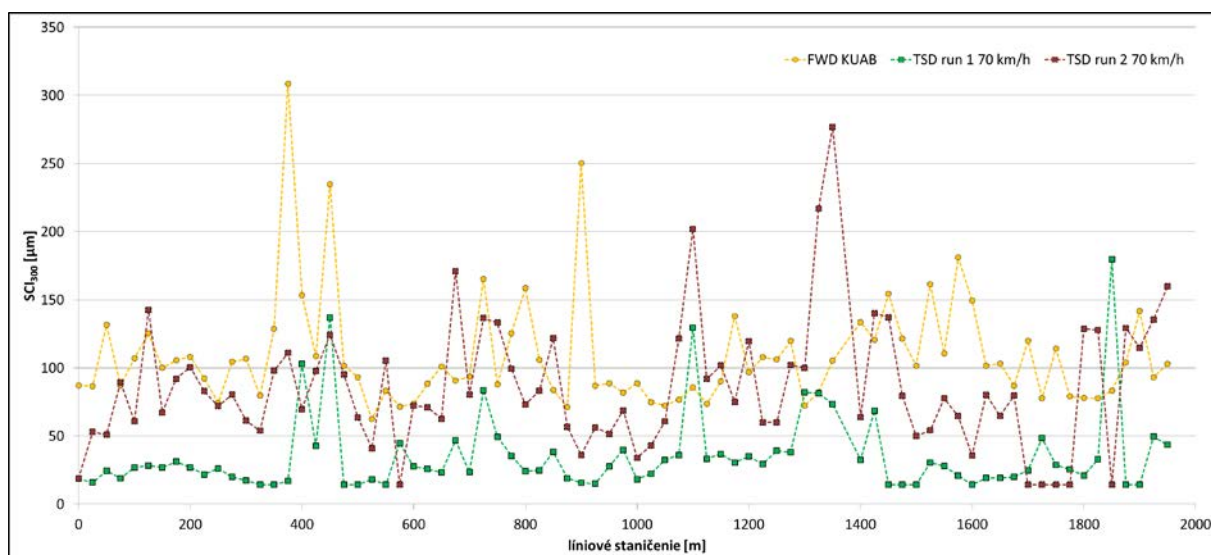
Obrázok 44: TSD pri troch rýchlostiach na úseku D1 „Hybe“ – index SCI_{300}



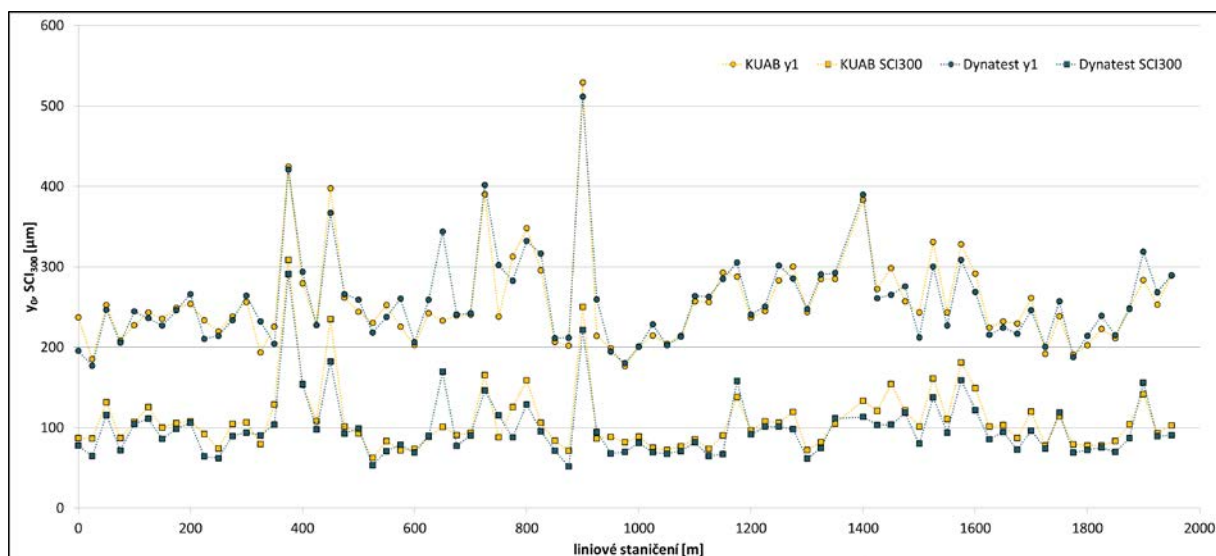
Obrázok 45: Porovnanie FWD KUAB a Dynatest na úseku D1 „Hybe“ – priehyb y_0 , index SCI_{300}



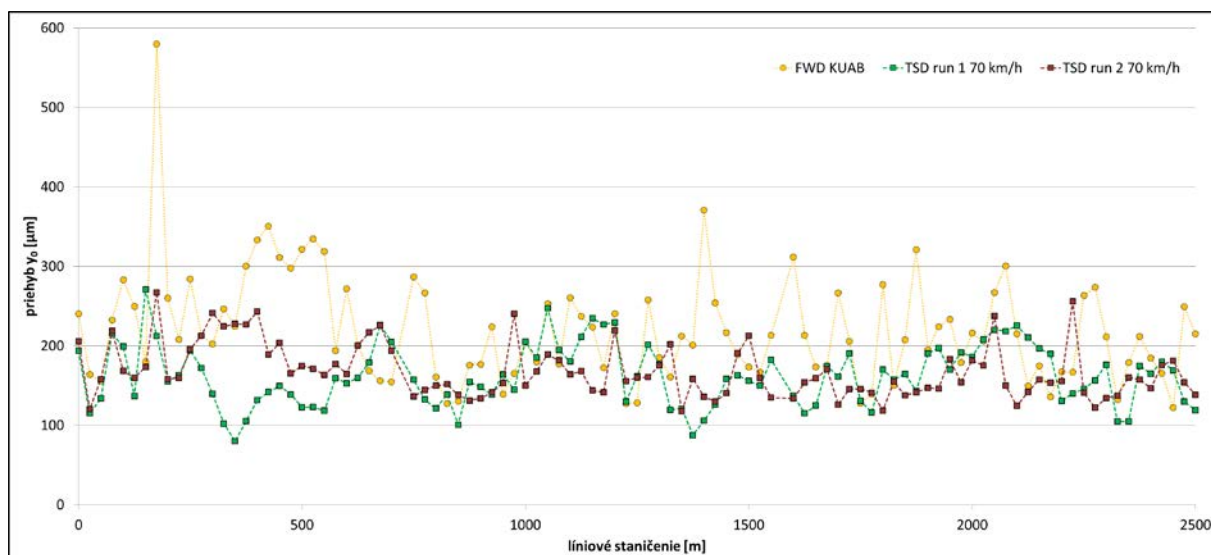
Obrázok 46: FWD verzus TSD – porovnanie priehybov y_0 v osi zaťaženia na úseku I/18 „Podtureň“



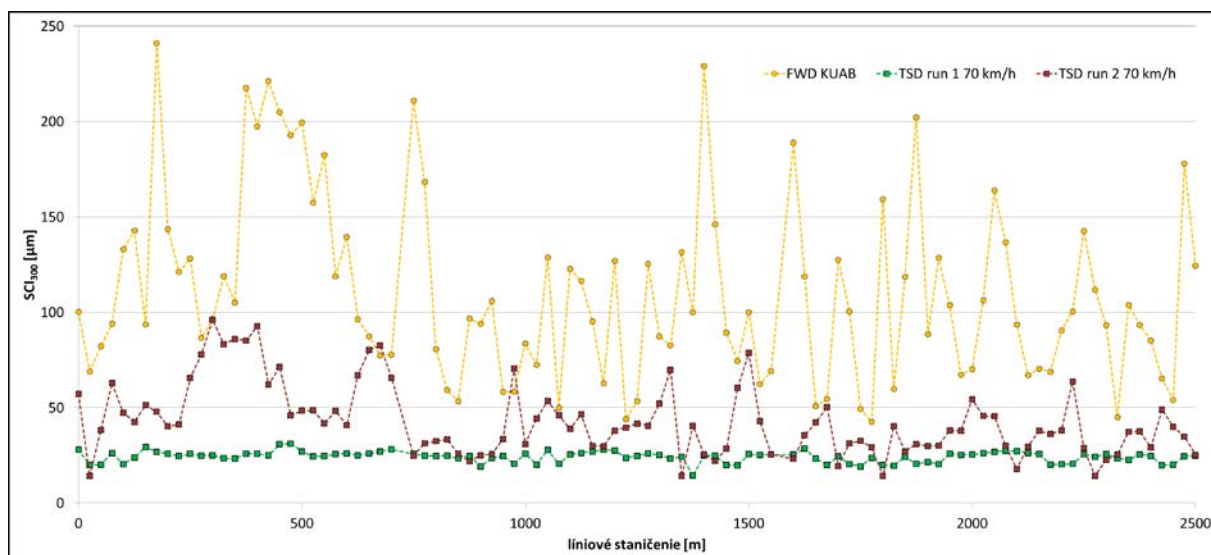
Obrázok 47: FWD verzus TSD – porovnanie indexov SCI_{300} na úseku I/18 „Podtureň“



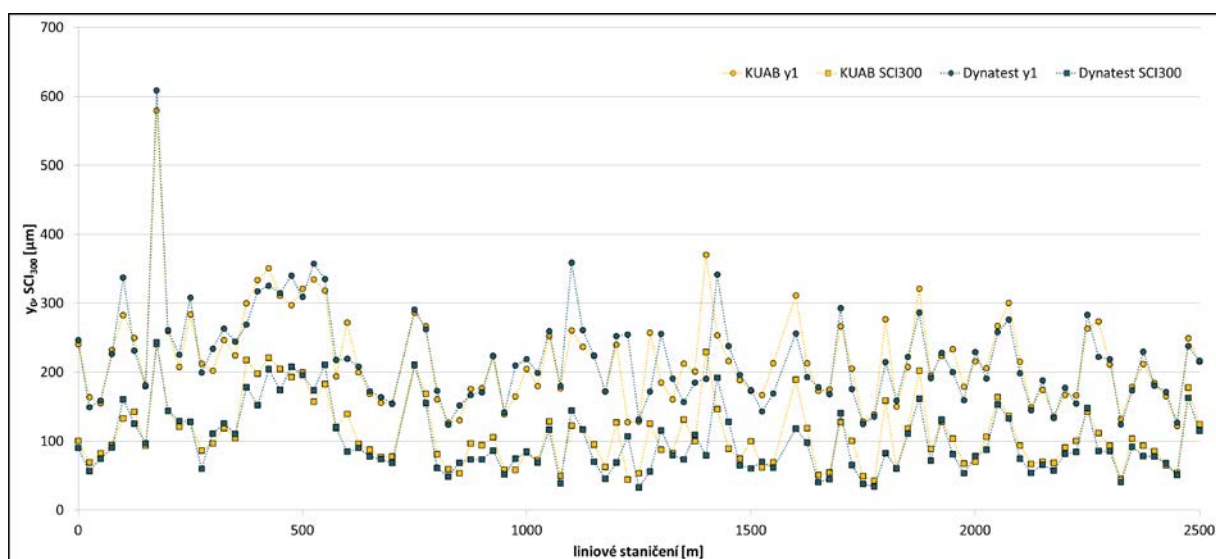
Obrázok 48: Porovnanie FWD KUAB a Dynatest na úseku I/18 „Podtureň“ – priehyb y_0 , index SCI_{300}



Obrázok 49: FWD vs TSD – porovnanie priehybov y_0 v osi zaťaženia na úseku II/537 „Vavrišovo“



Obrázok 50: FWD verzus TSD – porovnanie indexov SCI₃₀₀ na úseku II/537 „Vavrišovo“



Obrázok 51: Porovnanie FWD KUAB a Dynatest na úseku II/537 „Vavrišovo“ – y_0 , SCI₃₀₀

Korelačné koeficienty pre jednotlivé úseky a sledované parametre sú zhrnuté v tabuľke 3. Korelačné koeficienty popisujú vzájomný vzťah nameraných výsledkov medzi zariadením TSD a FWD Kuab.

Tabuľka 3: Korelačné koeficienty pre jednotlivé úseky a parametre y_0 a SCI_{300}

Parameter	y_0			SCI_{300}		
	60 km/h	70 km/h	80 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
D1 "Hybe"	0,55635	0,57265	0,42735	0,25053	0,36459	0,19196
I/18 "Podtureň"	-	0,17804	-	-	0,05353	-
II/537 "Vavrišovo"	-	0,20128	-	-	0,32809	-

6 Záver

Výsledky vykonaných porovnávacích meraní medzi zariadeniami FWD a TSD v jednotlivých krajinách boli prezentované v kapitole 4 a 5. Niektoré výsledky dopadli lepšie, iné horšie. Prevádzkovatelia jednotlivých zariadení TSD v spolupráci s firmou *Greenwood Engineering A/S* stále zdokonaľujú proces merania i vyhodnotenia, pribúda počet snímačov pre presnejšie vyhodnotenie nameraných priehybov, aktualizujú sa spôsoby prepočtu priehybov na teplotu a pod.

Potvrdilo sa, že TSD je schopný produkovať výsledky, ktoré dobre korelujú s výsledkami z rázového zariadenia FWD. To naznačuje, že toto nové zariadenie je možné používať pri meraniach na úrovni cestnej siete pre orientačné hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek. Prípadne je možné Traffic Speed Deflectometer uplatniť v kombinácii s FWD tak, že TSD môže sledovať cestnú sieť v bežnej premávke a poukazovať na slabé miesta vozoviek, ktoré následne podrobí podrobnejšiemu meraniu použitím FWD.

Pri porovnaní výsledkov TSD a FWD nie je možné z dôvodu rôznych okrajových podmienok (napr. rôzne spôsoby zaťaženia vozovky – stacionárne impulzné zaťaženie/pohyblivé dynamické zaťaženie) očakávať rovnaké výsledky. Oba systémy však pripúšťajú porovnateľnú klasifikáciu a homogenizáciu únosnosti.

6.1 SWOT analýza

Nižšie sú uvedené silné a slabé stránky zariadenia TSD a príležitosti a hrozby, ktoré plynú z jeho použitia.

Silné stránky

Doterajšie výsledky jednoznačne preukázali vhodnosť použitia vysokorýchlostného deflektometra TSD na meranie priehybov asfaltových vozoviek a pre stanovenie charakteristík únosnosti pri orientačnom hodnotení na úrovni cestnej siete. Ďalšie výhody, ktoré táto technológia ponúka, sú:

- získanie kontinuálnych informácií o únosnosti sledovanej vozovky;
- možnosť záznamu dát pri vysokých rýchlostiach neobmedzujúcich plynulosť cestnej premávky;
- zvýšenie bezpečnosti cestnej premávky pri meraní;
- zaťaženie povrchu vozovky je veľmi podobné skutočnému zaťaženiu nákladnou dopravou;
- vysoká kapacita merania (možnosť merania stoviek kilometrov vozoviek v priebehu jedného dňa);
- opakovanie diagnostiky v čase umožňuje identifikovať vzniknuté zmeny únosnosti vozovky.

Slabé stránky

- odborná náročnosť pri vyhodnotení dát a interpretácii výsledkov, ktorá vyžaduje dlhoročnú prax;
- vykonania merania a vyhodnotenia zahraničnými inštitúciami podľa nimi zavedenými postupmi;
- nezjednotenie sledovaných parametrov medzi jednotlivými užívateľmi;
- nejednoznačné určenie korelačných vzťahov pri meraní zariadeniami TSD a FWD;
- metóda sa overuje a zatiaľ nie je začlenená do noriem a technických predpisov;
- vysoká cena zariadenia v prípade obstarania vlastného TSD.

Príležitosti

- možnosť začlenenia výsledkov do databázy cestnej databanky či iných správcoch PK;
- kontinuálne hodnotenie únosnosti na úrovni cestnej siete;
- možnosť kontroly únosnosti po dokončení stavby alebo po rekonštrukcii vozovky (zmluvná požiadavka);
- možnosť sledovania vývoja únosnosti vozoviek v čase (napr. v päťročných intervaloch);
- nasadenie TSD na zistenie únosnosti vozoviek pred skončením záručnej doby.

Hrozby

- voľba nevhodného dodávateľa merania TSD;
- riziko zhoršenia kvality dodávaných dát v prípade zmeny dodávateľa;
- obmedzenie rozsahu merania rázovým zariadením FWD v prípade zavedenia merania TSD.

6.2 Analýza nákladov súvisiacich s hodnotením únosnosti vozoviek zariadením TSD v SR

Hodnotenie únosnosti vozoviek na úrovni cestnej siete na Slovensku pomocou zariadenia TSD je možno uskutočniť niekoľkými spôsobmi, zakúpením TSD u spoločnosti *Greenwood Engineering A/S* alebo objednaním komerčného merania u vlastníkov TSD. V spoločnosti *Greenwood Engineering A/S* sa tiež rysuje myšlienka týkajúca sa možného dlhodobého prenájmu TSD súčasne pre viacerých zákazníkov. Pre tieto účely je momentálne k dispozícii TSD, ktoré sa na jeseň roku 2015 vrátilo z USA.

7 Návrh uplatnenia TSD na Slovensku

Na záver uvádzame odporúčania, ktoré vychádzajú z doterajších skúseností s týmto zariadením v jednotlivých krajinách. Toto odporúčanie sa týka jednak toho, aké ďalšie kroky sú potrebné pre nasadenie TSD na Slovensku, ale taktiež toho, aké parametre prostredníctvom TSD sledovať.

Po vykonaní prvého porovnávacieho merania na Slovensku na troch úsekoch vozoviek, odporúčame vykonanie ďalšieho porovnávacieho merania na podstatne väčšej vzorke komunikácií, napr. pre určitý región/kraj, ktoré by umožnilo štatistické vyhodnotenie stavu komunikácií. Vytýpané najlepšie a najhoršie úseky by sa overili pomocou rázového zariadenia FWD.

K tomuto účelu odporúčame využiť zariadenie TSD z Talianska.

Po úspešnom nasadení na úrovni regiónu by sa mohlo prejsť k nasadeniu na diaľniciach a následne tiež cestách I. triedy. Odporúčaný interval pre opakovanie merania na rovnakom mieste je 5 rokov.

Ako sledovaný parameter sa v súčasnej dobe odporúča:

- priehyb v osi zaťaženia (y_0);
- index SCI_{300} , reprezentujúci rozdiel priehybu v osi zaťaženia a priehybu 300 mm od osi zaťaženia;
- prípadne index BCI podľa [18] – ten sa ale zatiaľ príliš neoveroval.

V otázke korekcie nameraných priehybov nezostáva nič iné než spoliehať sa na metodiku používanú konkrétnym vlastníkom TSD zariadenia.

Z hľadiska vzdialenosti a ceny pripadajú v súčasnosti do úvahy 2 dodávateľia:

- Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) – Poľsko;
- Azienda Nazionale Autonoma delle Strade (ANAS) – Taliansko.

V rámci vykonaného porovnávacieho merania na Slovensku sa tiež ukázalo, aký veľký význam sa musí prikladať lokalizácii merania. V dnešnej dobe sa už vykonáva lokalizácia nielen prostredníctvom prejdenej vzdialenosti, ale tiež pomocou súradníc GPS, alebo podobného systému. Navyše sa

odporúča mať na trase referenčné body so známymi súradnicami, na ktorých sa dá overiť presnosť lokalizácie.

Presnosť lokalizácie merania pri jazde vo vysokých rýchlostiach má rovnaký význam, ako správne meranie priehybov.

8 Literatúra

8.1 Citovaná literatúra

- [1] BALTZER, S. – PRATT, D. – WELIGAMAGE, J. – ADAMSEN, J. – HILDEBRAND, G. 2010. *Continuous Bearing Capacity Profile of 18 000 km Australian Road Network in 5 Months*. In 24th Australian Road Research Board Conference. Melbourne, Australia 2010.
- [2] CESOLINI, E. 2014. *Efficiency and Environmental Sustainability in Based Performance Approach in Building Italian Pavements*. In 3rd International Conference on Transportation Infrastructure. Pisa, Italy 2014.
- [3] ČELKO, J. – REMIŠOVÁ, E. 2012. *Diagnostika vozoviek*. Rozborová úloha. Žilina: ŽU v Žiline. 2012. 16 s.
- [4] DRUSIN, S. 2014. *Evaluating the Performance of New and In-Service Pavements in Italy Using High-Speed Non-Destructive Testing*. In National Pavement Evaluation Conference. Blacksburg, Virginia, USA 2014.
- [5] EUROPEAN COMMISSION. 2005. *COST 336 Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation: Final report*, 2nd edition. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities 2005. 392 p.
- [6] FERNE, B. – LANGDALE, P. – WRIGHT, M. A. 2013. *Developing and Implementing Traffic-speed Network Level Structural Condition Pavement Surveys*. In 9th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Trondheim, Norway 2013.
- [7] FERNE, B. – LANGDALE, P. 2010. *International Developments in Traffic-speed Deflection Measurement*. In 6th European FWD User's Group Meeting. Brussels, Belgium 2010.
- [8] HARASIM, P. – SUDYKA, J. 2014. *TSD Application in High Speed Bearing Capacity Evaluation of Road Networks*. Prezentace projektu TRIMM (Tomorrow's Road Infrastructure Monitoring & Management). 2014.
- [9] HILDEBRAND, G. – RASMUSSEN, S. 2002. *Development of a High Speed Deflectograph*. Report 117. Denmark: Road Directorate, Danish Road Institute 2002. 42 p. ISBN 87-91177-03-0.
- [10] <http://www.arrb.com.au/Equipment-services/TSD.aspx>
- [11] <http://www.cdb.sk>
- [12] <http://www.fhwa.dot.gov/research/tfhrc/projects/projectsdb/projectdetails.cfm?projectid=FHWA-PROJ-13-0095>
- [13] <http://www.greenwood.dk>
- [14] JANSEN, D. 2014. *Evaluation of the TSD in Germany*. In National Pavement Evaluation Conference 2014. Blacksburg, Virginia, USA 2014.
- [15] KANNEMEYER, L. – LATEGAN, W. – MCKELLAR, A. 2014. *Verification of Traffic Speed Deflectometer measurements using Instrumented Pavements in South Africa*. In National Pavement Evaluation Conference. Blacksburg, Virginia, USA 2014.
- [16] KANNEMEYER, L. 2013. *South African Pavement Design Method (SAPDM): Revision Status Report*. In 26th Roads Pavements Forum Meeting. Cape Town, South Africa 2013.
- [17] KOMAČKA, J. – BENKÓ, Z. 2011. *Diagnostika únosnosti asfaltových vozoviek deflektometrami FWD*. Žilina: ŽU v Žiline 2011. 137 s. ISBN 978-80-554-0327-4.
- [18] KOMAČKA, J. 2009. *TP 01/2009 Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB*. Technické podmienky. Bratislava: MDPaT SR 2009. 41 s.
- [19] KRARUP, J. 2012. *Traffic Speed Deflectometer TSD*. In 21th FWD User's Group Meeting. Sacramento, California, USA 2012.

- [20] MOFFAT, M. – MARTIN, T. – MULLER, W. B. – AI, U. 2014. *Traffic Speed Deflectometer: Data Analysis Approaches in Europe and USA Compared with ARRB Analysis Approach*. Austroads technical report AP-T280-14. Sydney, NSW, Australia 2014. 31 p. ISBN 978-1-925037-90-6.
- [21] MOFFAT, M. – MARTIN, T. 2013. *State-of-the-art Traffic Speed Deflectometer Practice*. Austroads technical report AP-T246-13. Sydney, NSW, Australia 2013. 40 p. ISBN 978-1-925037-16-6.
- [22] MULLER, W. B. – ROBERTS, J. 2013. *Revised approach to assessing traffic speed deflectometer data and field validation of deflection bowl predictions*. In International Journal of Pavement Engineering. 2013, vol. 14, no. 4, p. 388-402. DOI: 10.1080/10298436.2012.715646
- [23] RABE, R. 2012. *Structural Pavement Monitoring with Non-Destructive Measuring Devices at Traffic Speed – Current Research and Experience in Germany*. In 4th European Pavement and Asset Management Conference. Malmö, Sweden 2012.
- [24] RASMUSSEN, S. – AAGAARD, L. – BALTZER, S. – KRARUP, J. 2008. *A Comparison of Two Years of Network Level Measurements with the Traffic Speed Deflectometer*. In 6th International Conference Transport Research Arena Europe. Ljubljana, Slovenia 2008.
- [25] ROBERTS, J. – AI, U. – TOOLE, T. – MARTIN, T. 2014. *Traffic Speed Deflectometer: Data Review and Lessons Learnt*. Austroads technical report AP-T279-47. Sydney, NSW, Australia 2014. 49 p. ISBN 978-1-925037-91-3
- [26] SIMONIN, J.-M. – LIÉVRE, D. – RASMUSSEN, S. – HILDEBRAND, G. 2005. *Assessment of the Danish High Speed Deflectograph in France*. In 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Trondheim, Norway 2005.
- [27] SUDYKA, J. – HARASIM, P. *Traffic Speed Deflectometer – a Modern Tool in Road Network Evaluation of Bearing Capacity*. Prezentácia.
- [28] WELLER, O. – DEGELMANN, R. – JANSEN, D. 2014. *Tragfähigkeitsmessungen mit dem Traffic Speed Deflectometer*. In Straße und Autobahn. 2014, no. 11, p. 870-879, ISSN 0039-2162.

8.2 Súvisiaca použitá literatúra

- [29] KRARUP, J. – RASMUSSEN, S. – AAGAARD, L. – HJORTH, P. G.: *Output from the Greenwood Traffic Speed Deflectometer*. In 22nd Australian Road Research Board Conference. Canberra, Australia 2006.
- [30] PRATT, D. – KELLEY, J. – MOFFAT, M.: *Review of the Traffic Speed Deflectograph – Final Project Report*. Austroads Publication No. AP-R395-12. Sydney, NSW, Australia 2012. 151 p. ISBN 978-1-921991-09-7.
- [31] RASMUSSEN, S. – KRARUP, J. A. – HILDEBRAND, G.: *Non-contact Deflection Measurement at High Speed*. In 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Lisbon, Portugal 2002.