



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

HODNOCENÍ ÚNOSNOSTI ASFALTOVÝCH VOZOVEK NA ZÁKLADĚ DIAGNOSTIKY ZAŘÍZENÍM TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER

EVALUATION OF ASPHALT PAVEMENTS BEARING CAPACITY BASED ON TRAFFIC SPEED
DEFLECTOMETER DIAGNOSTICS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

ANOTATION OF Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ilja Březina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

Traffic Speed Deflectometer, Doppler-laserový snímač, rychlost deformace povrchu vozovky, sklon tečny (směrnice) průhybové křivky, rázové zařízení FWD, korelace, průhyb, únosnost, hodnocení, síťová úroveň.

KEY WORDS

Traffic Speed Deflectometer, Doppler-laser sensor, deflection velocity, deflection slope, Falling Weight Deflectometer device, correlation, deflection, bearing capacity, evaluation, network level.

ABSTRAKT

Předkládaná disertační práce bude zaměřena na výzkum využití zařízení Traffic Speed Deflectometer (TSD) při diagnostice únosnosti vozovek pozemních komunikací v podmínkách České republiky.

Teoretická část práce bude popisovat princip zařízení TSD a způsoby vyhodnocení změřených dat včetně příkladů použití ze zahraničí. Praktická část bude obsahovat vyhodnocení provedených měření zařízení TSD na asfaltových vozovkách v ČR.

Cílem výzkumu je ověření nové metody pro stanovení průhybů vozovek pozemních komunikací. Snahou disertační práce je vypracování kritérií pro orientační hodnocení únosnosti asfaltových vozovek zařízením TSD na síťové úrovni v ČR.

ABSTRACT

The submitted dissertation will be examined the use of Traffic Speed Deflectometer (TSD) for the diagnosis of bearing capacity of pavements in the Czech Republic.

The theoretical part will be described the principle of TSD device and the ways of evaluation of the measured data including the application of examples from abroad. The practical part will be included an evaluation of performed measurements by TSD device on asphalt roads in the Czech Republic.

The aim of the research is to test a new method to determine pavement deflections. The dissertation attempts to develop criteria for general evaluation of bearing capacity of asphalt pavements at the network level in the Czech Republic while using a TSD device.

OBSAH

1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY	6
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
2.1	POPIS ZAŘÍZENÍ TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER.....	7
2.2	PRINCIP MĚŘENÍ ZAŘÍZENÍ TSD	9
2.2.1	<i>Lasertová technologie pracující na principu Dopplerova jevu</i>	10
2.2.2	<i>Hodnota Deflection Slope</i>	12
2.3	Výpočet absolutní hodnoty průhybu	13
2.3.1	<i>Numerická integrace</i>	14
2.3.2	<i>Metoda „Greenwood“</i>	14
2.3.3	<i>Další metody.....</i>	16
2.4	TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER VE SVĚTĚ	17
2.4.1	<i>Austrálie.....</i>	17
2.4.2	<i>Dánsko</i>	18
2.4.3	<i>Itálie.....</i>	19
2.4.4	<i>Německo.....</i>	19
2.4.5	<i>Nizozemsko</i>	21
2.4.6	<i>Polsko.....</i>	21
2.4.7	<i>Velká Británie</i>	22
3	VÝSLEDKY VLASTNÍCH REALIZOVANÝCH MĚŘENÍ.....	23
3.1	SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ MEZI ZAŘÍZENÍM TSD A FWD REALIZOVANÉ NA SLOVENSKU A V ITÁLII	23
3.2	HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ZAŘÍZENÍM TSD A FWD	23
4	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	26
5	POSTUP ZPRACOVÁNÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	26
5.1	MATEMATICKÝ MODEL VOZOVKY.....	27
6	ZÁVĚR.....	30
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	31
	ŽIVOTOPIS.....	35

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Únosnost vozovky je proměnný parametr, který se v ČR sleduje především pomocí rázového zařízení FWD (Falling Weight Deflectometer) pro měření průhybů povrchu vozovky. To zatěžuje vozovku stacionárním impulzním zatížením a umožňuje nastavit parametry zatížení tak, aby se blížily reálnému zatížení od kol pohybujících se vozidel. Skutečnému průhybu povrchu vozovky však nejlépe odpovídá průhyb měřený při pohyblivém (dynamickém) zatížení. Zařízením FWD se provádí lokální bodová měření, která vyžadují omezení provozu na sledovaném úseku vozovky. Z tohoto důvodu se FWD nevyužívá pro měření na síťové úrovni nebo se měření provádí s velkým krokem měření. Naopak vysokokapacitní a bezkontaktní měření zařízením Traffic Speed Deflectometer (TSD) umožní zjistit průhyby a vyhodnotit únosnost na diagnostikovaném úseku rychle a bezpečně.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Zařízení Traffic Speed Deflectometer (*obr. 1*) umožňuje stanovit průhyby a hodnotit únosnost vozovky kontinuálně při rychlosti až 80 km/h. Tím se zvyšuje bezpečnost provozu na pozemních komunikacích. Zvyšuje se také kapacita měření, díky které je zařízení schopno za jeden den změřit řádově několik set kilometrů vozovek.

Testování s TSD ukazuje, že zařízení je schopno produkovat výsledky, které dobře korelují s výsledky rázového zařízení FWD. To naznačuje, že zařízení lze používat při měření na síťové úrovni pro orientační hodnocení únosnosti vozovek. Případně lze zařízení TSD uplatnit v kombinaci s FWD tak, že TSD může sledovat celou silniční síť v běžném provozu a poukazovat na slabá místa vozovek, které následně podstoupí podrobnějšímu měření za použití zařízení FWD.

V současné době pracuje po celém světě 14 těchto zařízení. Z toho 6 zařízení je provozováno v Evropě (Dánsko – 2 ks, Itálie, Německo, Polsko, Velká Británie). Z důvodu ověření použitelnosti dat produkovaných zařízením TSD a korelace mezi rázovým zařízením FWD a zařízením TSD se po celém světě konají srovnávací měření mezi oběma zařízeními a pilotní projekty pro začlenění nového zařízení do systému hodnocení únosnosti vozovek především na síťové úrovni (např. v roce 2015 v Slovenské republice).

První prototyp Traffic Speed Deflectometru byl vyrobený a patentovaný v roce 2000 v Dánsku, kde ve společnosti Greenwood Engineering A/S vznikla myšlenka s cílem vyvinout zařízení, které je schopné sledovat bezkontaktně únosnost vozovky pomocí vyspělé technologie pracující na principu reflexe laserového paprsku.

V Evropě zajišťují měření zařízením TSD tyto organizace:

- Azienda Nazionale Autonoma delle Strade (ANAS) – Itálie,

- Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) – Německo,
- Danish Road Directorate – Dánsko,
- Greenwood Engineering A/S – Dánsko,
- Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) – Polsko,
- Transport Research Laboratory (TRL) – Velká Británie.



Obr. 1 Traffic Speed Deflectometer, vlastník IBDiM (Polsko) [foto: archiv autora]

Posádku zařízení TSD tvoří řidič vozidla a operátor, který ovládá činnost měření a řídí záznam dat během měření.

Přímé nasazení zařízení TSD v ČR zatím nebylo zrealizováno. Disertační práce si bere za cíl vyhodnotit konkrétní měření zařízením TSD na reálných vozovkách v ČR.

2.1 POPIS ZAŘÍZENÍ TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER

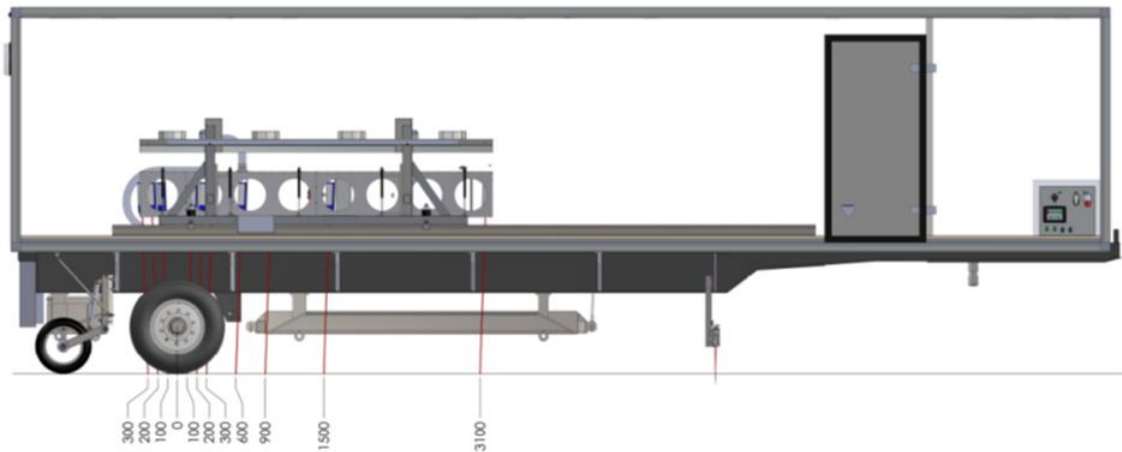
Traffic Speed Deflectometer slouží k zjišťování průhybů povrchu vozovky při rychlostí 40 – 80 km/h. Průhyb, získaný při pohyblivém (dynamickém) zatížení, vyvolaný pohybujícím se kolem vozidla, nejvíce odpovídá skutečnému průhybu při zatížení nákladními vozidly pohybujícími se rychlostí dopravního proudu. Zařízení TSD tak vnáší do konstrukce vozovky během jízdy podobné dynamické zatížení (velikost, doba trvání) jako ostatní nákladní vozidla pohybující se v reálném provozu.

Výhodou je také možnost zaznamenat průhyb vozovky v celé linii průjezdu vozidla, což neomezuje pouze na měření lokálních míst, jako je tomu u rázového zařízení FWD. Průhyby zjištěné zařízením TSD jsou vyhodnocovány po vzdálenostech 10 m, což je nejmenší možný krok pro export změřených dat zařízením TSD. Tato mezní hodnota je dána softwarem pro následné zpracování změřených hodnot, který slouží pro výpočet průhybů vozovky. Existuje i možnost vyhodnotit data na vzdálenost menší než 10 metrů, ale bez hodnot vypočítaných průhybů. Při výpočtu průhybů po konstantních vzdálenostech se vypočítá reprezentativní hodnota průhybu pro každou stanovenou konstantní vzdálenost (např. 10 metrů) pomocí statistických metod, které jsou součástí softwaru.

Z výsledků zařízení TSD získá uživatel kompletní informaci o únosnosti vozovky v celém měřeném úseku. Odpadá také problém s omezováním provozu na pozemních komunikacích jako při měření zařízením FWD, které může v případě vysokých intenzit dopravy způsobit značné dopravní problémy. Zvyšuje se bezpečnost účastníků silničního provozu a osádky měřicího zařízení během měření. Velkou výhodou je rovněž vysoká kapacita měření, která umožňuje měřit až několik set kilometrů vozovek denně (průměrně cca 350 – 450 km; dle informací od polské organizace IBDiM není výjimkou ani více než 800 km). Kvůli laserovým snímačům nelze měření provádět za deště nebo na mokré vozovce.

Zařízení tvoří jízdní souprava těžkého nákladního vozidla skládající se ze standardního tahače návěsů a z modifikovaného návěsu. Uvnitř jednonápravového návěsu je umístěn měřicí systém pro účely snímání odezvy vozovky na zatížení. Standardní zatížení na nápravu je 10 tun, ale např. italský TSD zatěžuje vozovku 12 tunami. Z tohoto důvodu je na podvozku návěsu nainstalována odpovídající zátěž. V klimatizovaném návěsu je umístěn tuhý nosník s příslušným počtem laserových snímačů pracujících na bázi Dopplerova jevu (dále jen Doppler-laser snímače), které snímají povrch vozovky pravé stopy vozidla v ose dvojmontáže návěsu a další podpůrné a výpočetní systémy (*obr. 2*), které slouží např. ke stanovení polohy pomocí GPS, stanovení ujeté vzdálenosti DMI zařízením nebo digitálnímu obrazovému záznamu měřené komunikace. Většina zařízení TSD je schopna měřit podélné nerovnosti pro stanovení IRI, nejmodernější zařízení TSD (např. Jihoafrická republika; Austrálie) jsou vybavena laserovými skenery pro zjišťování stavu komunikace (např. příčné nerovnosti, trhliny, makrotextura) či georadarem pro měření tloušťek vrstev vozovky. Pomocí tenzometrů instalovaných na zatěžovací nápravě se zaznamenává a vyhodnocuje dynamické zatížení této nápravy během měření. První generace TSD měřila pomocí 4 snímačů (3 uvnitř a 1 vně průhybové mísy). Současná zařízení mají až 11 snímačů (10 uvnitř a 1 vně průhybové mísy).

Měřicí nosník s Doppler-laser snímači je vybaven stabilizačním hydraulickým servo-systémem, který kontroluje a limituje pohyby nosníku během jízdy a udržuje ho tak v horizontální poloze z důvodu zachování konstantní vzdálenosti snímačů od povrchu vozovky. Součástí měřicího nosníku je inerciální jednotka skládající se z akcelerometrů a gyroskopů, jejíž pomocí jsou určovány pohyby Doppler-laser snímačů, stejně jako úhly jejich nastavení vzhledem k povrchu vozovky. Případná korekce pohybů probíhá v softwaru pro následné zpracování naměřených dat. Inerciální jednotka a referenční snímač (snímač umístěný mimo průhybovou mísu měřicí nedeformovaný povrch vozovky) poskytují vstupní data servo-systému. Z důvodu eliminace tepelných deformací ocelového měřicího nosníku je pomocí klimatizace udržována teplota uvnitř návěsu na konstantní hodnotě 20 °C.



Obr. 2 Schéma návěsu zařízení TSD s tuhým nosníkem a Doppler-laser snímači [3]

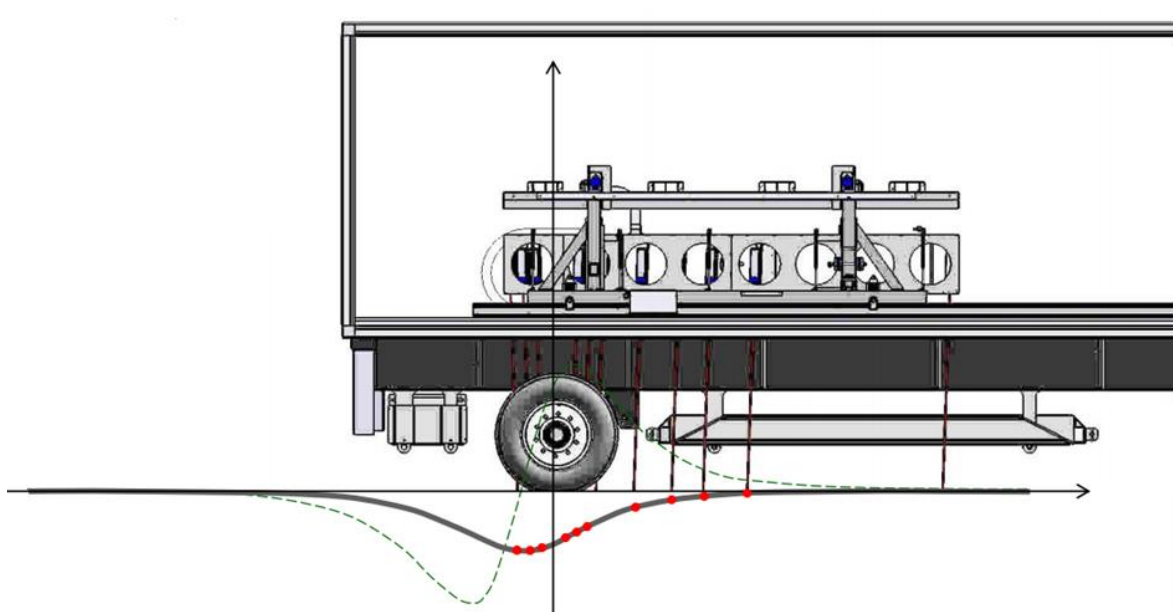
2.2 PRINCIP MĚŘENÍ ZAŘÍZENÍ TSD

Zatížení povrchu vozovky pohybujícím se kolem zařízení TSD způsobuje deformaci povrchu vozovky (průhybová mísa) v okolí nápravy návěsu. Uvnitř návěsu je umístěn tuhý servo-hydraulický nosník s příslušným počtem snímačů, instalovaných v různých vzdálenostech od osy zatížení (**obr. 3**), využívajících Dopplerův jev v laserovém paprsku k měření rychlosti, kterou je deformován povrch vozovky („rychlost průhybu“ – z angl. *deflection velocity*). Snímač měří rychlost krátkodobé vertikální deformace namáhaného povrchu vozovky ve směru vyslaného laserového paprsku, který se odrazí od povrchu vozovky (**obr. 4**) a dopadá zpět na snímač. Z hodnot rychlostí průhybu je následně možné vypočítat průhyb vozovky.



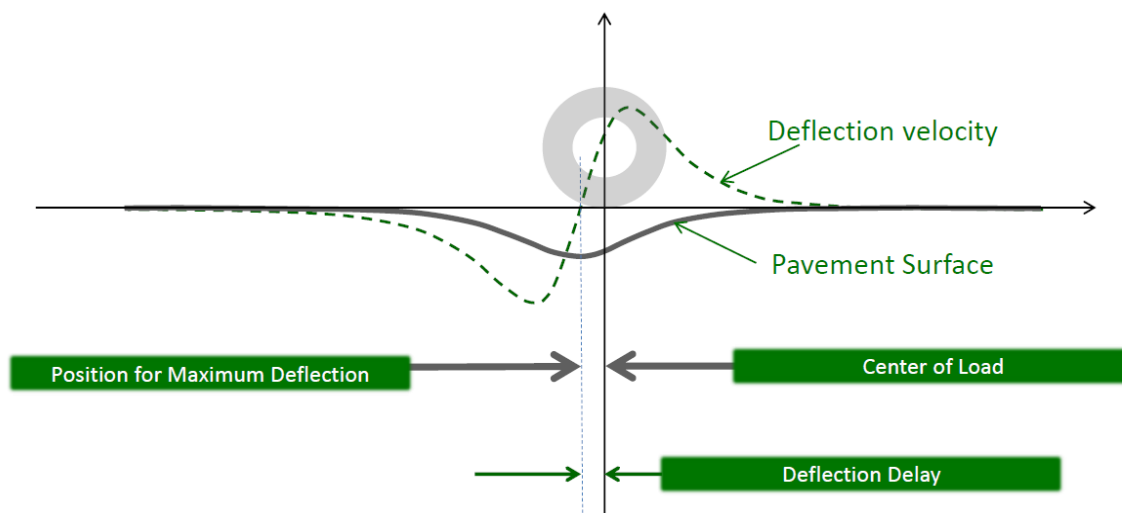
Obr. 3 a 4 Tuhý nosník s Doppler-laser snímači uvnitř návěsu zařízení TSD (vlevo); laserové paprsky třech snímačů na povrchu měřené vozovky (vpravo) [foto: archiv autora]

Čím více snímačů je na nosníku osazeno, tím má uživatel vyšší možnost pro interpretaci dat. Zvýšením počtu Doppler-laser snímačů a jejich odpovídajícím umístěním v nosném rámu je možno získat průhyby před vnesením zatížení a po něm, respektive před a za osou zatížení (**obr. 5**).



Obr. 5 Schéma TSD zařízení s Doppler-laserovými snímači i za osou zatížení [23]

Odvalující se kolo zařízení TSD způsobuje v důsledku viskoelastických vlastností asfaltové směsi asymetrickou průhybovou mísu (**obr. 6**). Vzhledem k tomu, že materiály určené ke stavbě vozovek nejsou homogenní, izotropní a lineárně pružné, je větev průhybové křivky vznikající při zatížení odlišná od větve vznikající při odlehčení. Maximální průhyb navíc nevzniká v místě maximálního zatížení, ale s časovou prodlevou (fázový posun) za osou zatížení. Stejně je to v případě určení polohy nulového sklonu průhybové křivky („deflection slope“ – viz kapitola 2.2.2).



Obr. 6 Asymetrická průhybová křivka Traffic Speed Deflectometru [23]

2.2.1 Laserová technologie pracující na principu Dopplerova jevu

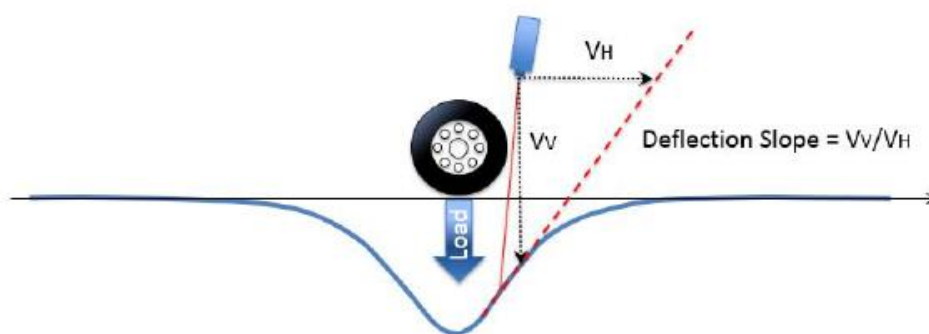
Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného signálu oproti vysílanému signálu způsobenou vzájemnou nenulovou rychlostí

vysílače a přijímače. Snímač, složený z vysílače a přijímače signálu, měří změnu frekvence signálu odraženého od povrchu vozovky. Užitím Doppler-laser snímačů se během měření vysílaný signál odráží od povrchu vozovky a dopadá zpět na přijímač o rozdílné frekvenci než signál vysílaný. Na základě této diference je odvozena rychlost deformace povrchu vozovky.

Rychlost, kterou je deformován povrch vozovky, je možné chápat jako časové protažení, resp. stlačení laserového paprsku v důsledku změny doby promítání, které je způsobeno tím, že se vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem během trvání signálu změní. Pokud je známa jízdní rychlost zařízení TSD, lze vypočítat i vertikální rychlost deformace povrchu vozovky v důsledku vnášeného zatížení. Kromě toho může být jako další výsledek stanovena hodnota sklonu tečny k průhybové křivce, v odborné literatuře označovaná jako „*deflection slope*“ (viz kapitola 2.2.2).

Doppler-laser snímače měří s vzorkovací frekvencí přibližně 1000 Hz (1000 snímků za sekundu) pro každý snímač. Vzhledem k tomu, že snímač není umístěn přesně kolmo k povrchu vozovky, dopadá laserový paprsek pod úhlem přibližně 2°. Díky tomu Doppler-laserový snímač registruje kromě požadované rychlosti deformace povrchu vozovky V_V i složku rychlosti jízdy vozidla V_H . Relativně malý úhel umožňuje vstup rychlosti jízdy vozidla do výpočtu a zároveň má jen malý vliv na svislou složku rychlosti deformace.

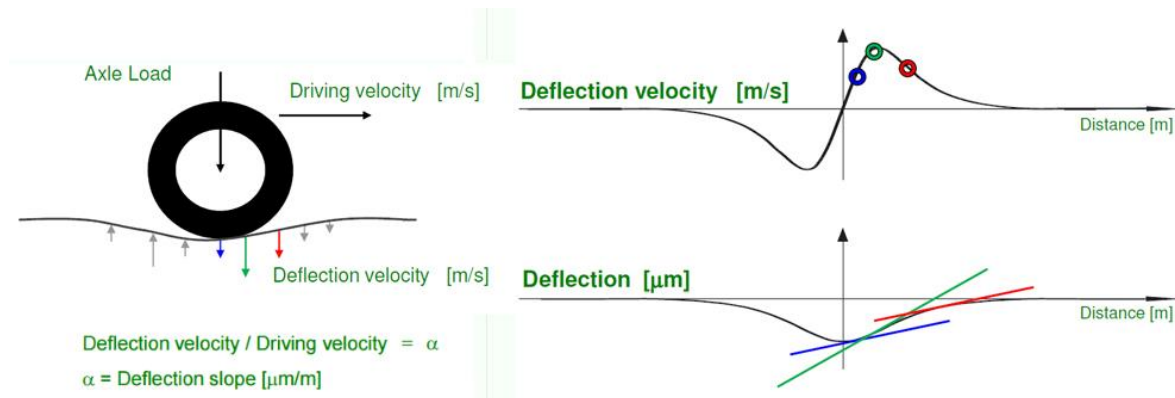
Pomocí současně měřené rychlosti vozidla a definovaného úhlu dopadu laserového paprsku oproti svislici je vypočítána hodnota „*deflection slope*“ (sklon tečny průhybové křivky v místě Doppler-laser snímače) v $\mu m/m$. Hodnota „*deflection slope*“ se vypočítá jako poměr V_V/V_H (**obr. 7**). Rychlost svislé deformace povrchu vozovky je měřena v jednotkách mm/s , zatímco rychlost zařízení TSD v m/s . Proto se hodnota „*deflection slope*“ uvádí v jednotkách mm/m , respektive $\mu m/m$.



Obr. 7 Výpočet hodnoty „*deflection slope*“ [31]

Ze znalosti rychlostí deformace povrchu vozovky na různých pozicích Doppler-laser snímačů je možné získat přehled o tvaru průhybové mísy. **Obr. 8** znázorňuje vektory rychlosti průhybu (*deflection velocity*) pod zatížením způsobeným odvalujícím se kolem. Společně s rychlostí průhybu je

znázorněna odpovídající průhybová křivka, kde jsou rovněž zobrazeny hodnoty „*deflection slope*“.



Obr. 8 Vlevo: Průhybová mísa a vektory rychlosti průhybu pod kolem TSD. Vpravo: Rychlost deformace povrchu vozovky (rychlost průhybu) a průhybová křivka s tečnami. [23]

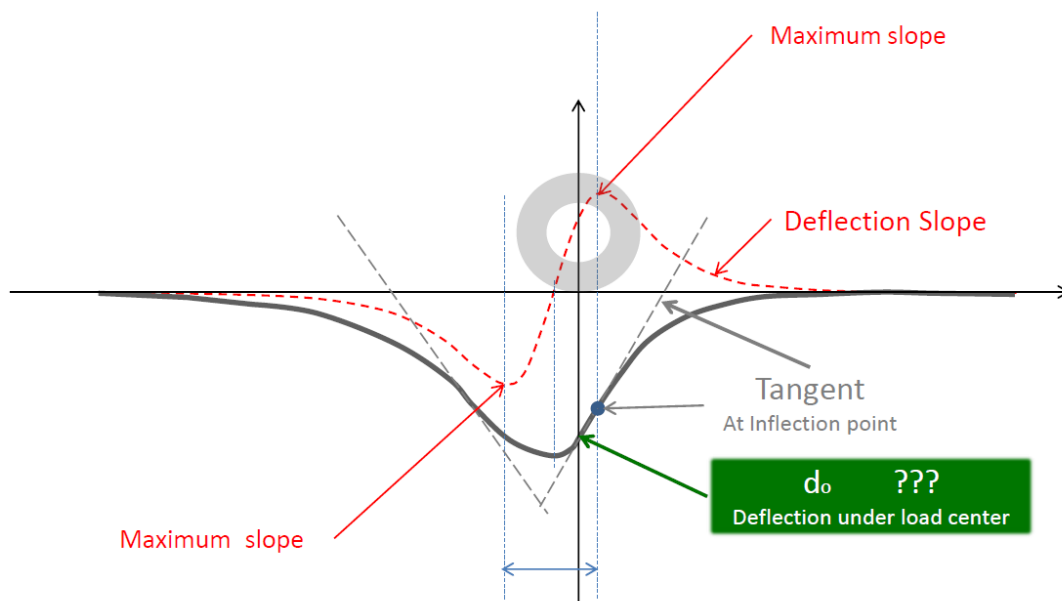
2.2.2 Hodnota Deflection Slope

Hodnota „*deflection slope*“ se určí z poměru rychlosti deformace povrchu vozovky V_V a rychlosti jízdy TSD zařízení V_H . Podle poznatků mechaniky je zřejmé, že poměrný přírůstek průhybu je roven směrnici tečny k průhybové křivce. Díky tomu, že směrnice (sklon) tečny průhybové křivky odpovídá derivaci průhybové křivky (sklon, respektive směrnice tečny odpovídá derivaci funkce v bodě), je možné vypočítat svislý posun povrchu vozovky (průhyb). To znamená, že z hodnoty „*deflection slope*“ je možné vypočítat průhyb.

UK Highway Agency používá hodnotu „*deflection slope*“ přímo pro posouzení stavu vozovky. Další možností hodnocení je výpočet charakteristik únosnosti, které jsou tradičně používány pro hodnocení vozovek pomocí zařízení FWD, jako je například průhyb v ose zatížení d_0 a index křivosti povrchu SCI_{300} . Ten se dle [7] vypočítá jako rozdíl průhybů v ose zatížení a ve vzdálenosti 300 mm od osy zatížení ($SCI_{300} = d_0 - d_{300}$).

Za předpokladu rovnoměrně aplikovaného zatížení a v případě zanedbání viskoelastických účinků asfaltového pojiva je hodnota „*deflection slope*“ v ose zatížení rovna nule. Viskoelastické účinky asfaltového pojiva ale způsobují mírné zpoždění reakce vozovky na aplikované zatížení od pohybujícího se kola a hodnota bude skutečně nulová v místě těsně za osou zatížení (**obr. 9**). Maximální sklon se nachází v inflexním bodě průhybové křivky.

Zvláště u nových asfaltových vozovek souvisí viskoelastická odezva vozovky s rychlostí zařízení TSD. Proto se v [3] doporučuje se měřit rychlostí vyšší než 40 km/h, kdy je vozovka namáhána frekvencemi, při nichž jsou viskoelastické reakce asfaltových směsí téměř zanedbatelné. Minimální provozní rychlost 40 km/h je rovněž uvedena v [1].



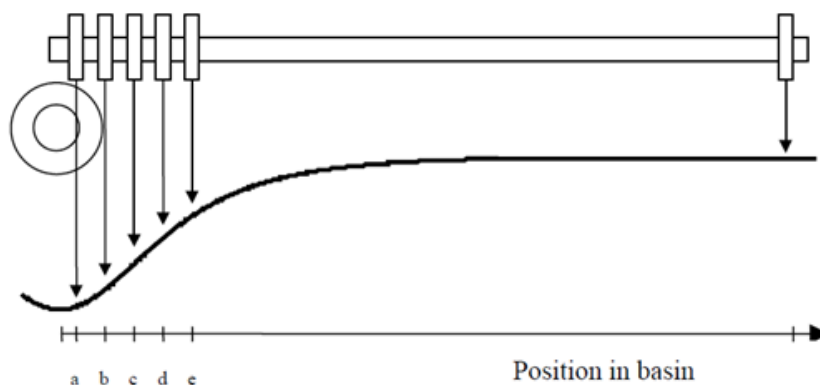
Obr. 9 Asymetrická průhybová křivka Traffic Speed Deflectometru [23]

2.3 Výpočet absolutní hodnoty průhybu

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, zařízení TSD měří aktuální rychlost jízdy V_H a rychlost průhybu V_V . Na základě těchto dat je možné určit sklony průhybu pro každý snímač. Absolutní hodnota průhybu se následně získá integrací sklonů průhybu buď numericky, nebo užitím vhodného výpočtového modelu nahrazujícího skutečné mechanické účinky a reálnou konstrukci vozovky.

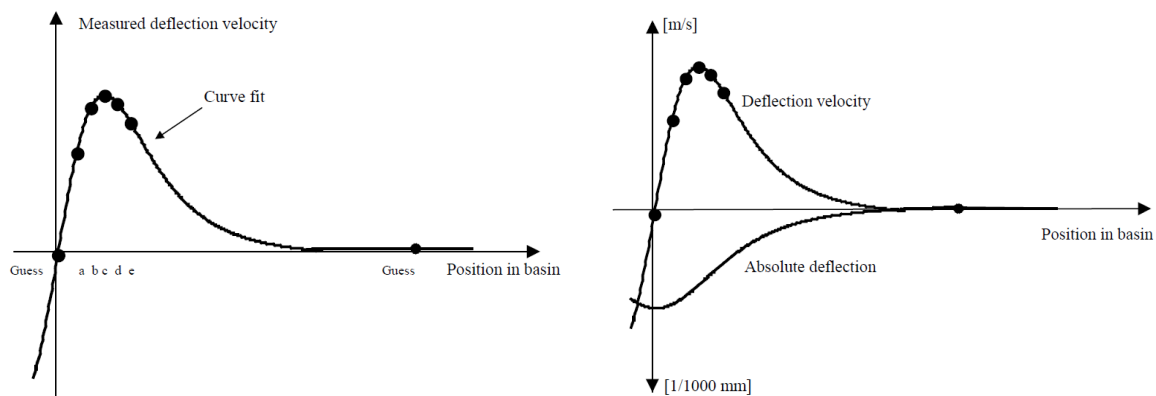
Obr. 10 - 12 ukazují získání průhybové křivky ze znalosti rychlostí deformace povrchu vozovky. **Obr. 10** znázorňuje průhybovou mísu pod kolem TSD a měřící nosník s 6 Doppler-laser snímači (5 uvnitř a 1 mimo průhybovou mísu). Polohy snímačů a - e jsou ve vztahu k zatížení známy.

Rychlosti deformace jsou vyneseny jako body v souřadnicovém systému (**obr. 11**). Na osu x se vynášejí poloha v průhybové míse, na osu y měřené rychlosti deformace. Dále jsou vykresleny další dva body za předpokladu nulové rychlosti deformace v ose zatížení a mimo průhybovou mísu.



Obr. 10 Průhybová mísa a nosník s Doppler-laser snímači pod kolem zařízení TSD [16]

Ze znalostí polohy 7 bodů je vypočítána aproximační křivka pomocí polynomické regrese. Integrací aproximační křivky se získají znalosti o tvaru průhybové mísy (**obr. 12**).



Obr. 11 a 12 Aproximační křivka (vlevo); rychlost deformace a průhybová křivka (vpravo) [16]

2.3.1 Numerická integrace

Stanovení průhybů pomocí numerické integrace za použití lichoběžníkové metody bylo aplikováno v [20] podle následující rovnice:

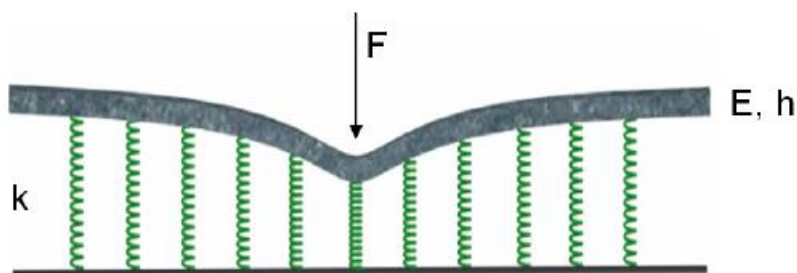
$$SCI_{300} = \int_0^{300} s(x)dx = d(300) - d(0), \quad (\text{rov. 1}) [20]$$

kde: $s(x)$ = sklon tečny průhybové křivky v bodě x (*deflection slope*),
 $d(x)$ = průhyb v bodě x .

Výpočet byl v [20] proveden v integračním intervalu [0 mm; 300 mm] za předpokladu, že je hodnota „*deflection slope*“ v ose zatížení rovna nule. Tento předpoklad je platný pouze v případě rovnoměrně aplikovaného zatížení (např. pomocí zařízení FWD) a při zanedbání viskoelastických účinků, díky čemuž vznikne pod zatížením symetrická průhybová křivka. Za předpokladu nulové hodnoty „*deflection slope*“ v ose zatížení však není výpočet SCI_{300} významně ovlivněn (viz obr. 3-41 a 3-42 v [12]).

2.3.2 Metoda „Greenwood“

V Greenwood Engineering A/S vyvinuli metodu, která modeluje konstrukci vozovky jako nosník na pružném Winklerově podloží. Software pro následné zpracování změřených dat, který slouží pro výpočet průhybů vozovky, pracuje právě na tomto principu. Navržené řešení uvedené v [22] představuje diferenciální rovnice průhybové křivky podle Euler-Bernoulliho nosíkové teorie, kde F = bodová síla, EI = ohybová tuhost (E = modul pružnosti, I = moment setrvačnosti), h = tloušťka vozovky, k = pružinová konstanta (koeficient tuhosti), viz **obr. 13** a *rov. 2*.



Obr. 13 Pružný nosník na podloží z lineárních pružin [27]

$$EI \frac{d^4}{dx^4} w(x) + kw(x) = -F\delta(x). \quad (\text{rov. 2}) [27]$$

Výsledkem této diferenciální rovnice je 2parametrický model pro $x \geq 0$, $A > 0$ a $B > 0$, kde $d(x)$ = průhyb v kterémkoliv místě průhybové křivky, x = vzdálenost průhybu od osy zatížení, A B = experimentálně stanovené konstanty. Řešení je uvedeno na **obr. 14**.

Bearing Capacity Equations and Characteristics			
Deflection	:	$d(x) = -\frac{A}{2B}(\cos(Bx) + \sin(Bx))e^{-Bx}$	(Eq. 2)
Deflection Slope	:	$d'(x) = A(\sin(Bx))e^{-Bx}$	(Eq. 3)
Curvature	:	$d''(x) = AB(\cos(Bx) - \sin(Bx))e^{-Bx}$	(Eq. 4)
Elasticity	:	$E = \frac{F^2}{4A^2kI} = \frac{F}{4LAB^2}$	(Eq. 5)
Stiffness	:	$k = 4B^2EI = \frac{FB^2}{A}$	(Eq. 6)
Maximum Deflection	:	$d(0) = -\frac{A}{2B}$	(Eq. 7)
Structural Curvature Index 300	:	$SCI_{300} = d(0) - d(300)$	(Eq. 8)
Maximum Slope	:	$d'(\frac{\pi}{4B}) = \frac{e^{-\pi/4}}{\sqrt{2}} A$	(Eq. 9)
Curvature under the wheel	:	$d''(0) = AB$	(Eq. 10)

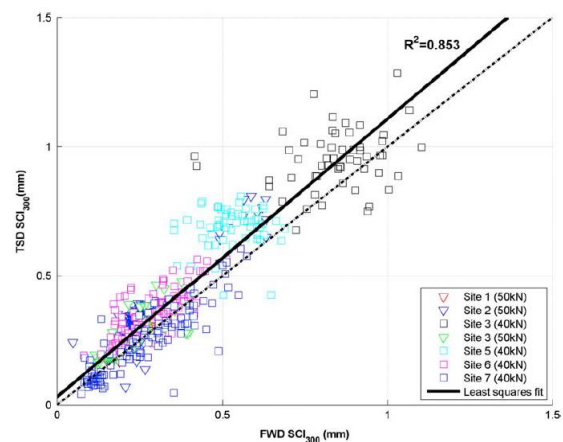
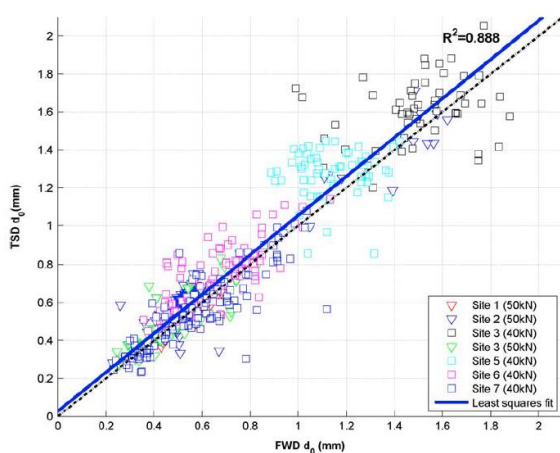
Obr. 14 Řešení 2parametrické Euler-Bernoulliho nosníkové rovnice (rovnice 2) a některé charakteristiky únosnosti [27]

Výpočtový model byl vyvinutý v době, kdy zařízení TSD měřila v konfiguraci tří Doppler-laser snímačů na pozicích 100, 200 a 300 mm od osy zatížení (dánské a britské TSD). Čtvrtý referenční snímač byl umístěný ve vzdálenosti 3,6 m od osy zatížení. Pomocí tří změřených hodnot „deflection slope“ (ze snímačů 100, 200 a 300 mm od osy zatížení) a použitím rovnice 3 z **obr. 18** (Eq. 3) jsou

odhadnuty konstanty A B . Tyto konstanty se poté použijí v rovnici 2 z **obr. 18** (Eq. 2) pro výpočet hodnot průhybů. Model je však podle [27] omezen přesností, protože má pouze dva parametry.

2.3.3 Další metody

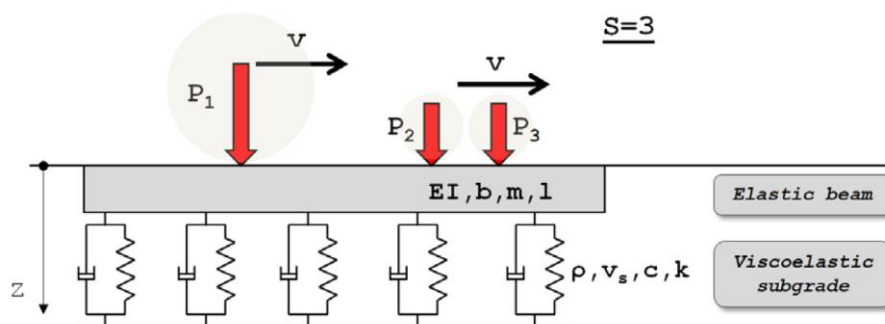
V roce 2010 vyvinula australská ARRB novou metodu analýzy změřených dat pro vytvoření průhybové křivky. Princip metody AUTC (Area Under The Curve – „metoda oblasti pod křivkou“) je popsán v [24; 25; 28]. Průhyby vypočítané touto metodou dosahují vysoké korelace s průhyby změřenými rázovým zařízením FWD. Koeficient determinace R^2 dosahuje hodnot téměř 0,9, z čehož vyplývá velmi vysoká těsnost vztahu mezi zařízením TSD a FWD pro hodnoty d_0 a SCI_{300} (**obr. 15 a 16**).



Obr. 15 Srovnání maximálního průhybu d_0 mezi zařízením TSD a FWD [25]

Obr. 16 Srovnání parametru SCI_{300} mezi zařízením TSD a FWD [25]

Unikátní analytický postup pro stanovení průhybů vozovky na jednovrstvém modelu vozovky bylo uvedeno v [13]. V navrhovaném řešení (**obr. 17**) je vozovka modelována jako Euler-Bernoulliho nosník na viskoelastickém podloží nekonečné hloubky v podobě 2parametrického Kelvin-Voigtova modelu. Na nosník konečné délky působí zatížení ve formě sady sil pohybujících se konstantní rychlostí.



Obr. 17 Pohybující se zatížení na pružném nosníku konečné délky (Euler-Bernoulliho nosník) podporovaném viskoelastickým podložím nekonečné hloubky [13]

Alternativní přístup zpracování dat z TSD byl uveden v [18]. Studie uvádí, že průhyby generované zařízením TSD mohou být přesně modelovány pomocí zjednodušeného modelu pro výpočet průhybů publikovaným v [17], který uvažuje s nelineárním chováním podloží. Srovnání mezi průhyby z TSD a FWD ukázalo vysoký stupeň korelace (koeficient determinace $R^2 = 0,88$).

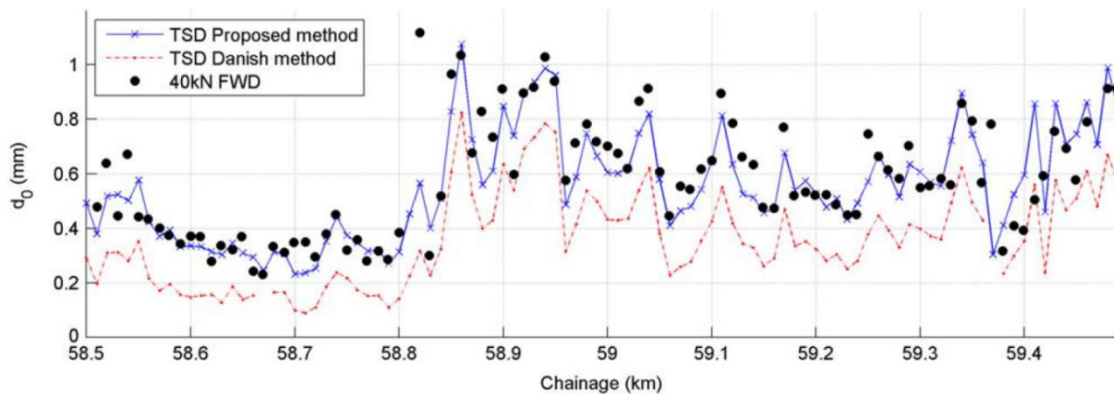
2.4 TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER VE SVĚTĚ

V současné době se vykonává ověřování TSD zařízení a nastavení systému jejich používání. Po celém světě probíhají rozsáhlá měření Traffic Speed Deflectometrem, zjišťuje se reprodukovatelnost s dalšími zařízeními na měření průhybu, opakovatelnost měření zařízením TSD, použitelnost na síťové úrovni. I přesto, že toto nové diagnostické zařízení má jen relativně krátkou historii, existuje mnoho publikací, které popisují zkušenosti s měřením a vyhodnocením výsledků.

2.4.1 Austrálie

V roce 2010 provedlo TSD první generace, ve vlastnictví Danish Road Directorate, měření na více než 18000 km vozovek na území dvou australských států (Nový Jižní Wales 13000 km, Queensland 5000 km). Měření proběhlo ve spolupráci s ARRB Group (Australian Road Research Board). Výsledky měření byly prezentovány v příspěvku [2], který obsahuje podrobnosti o srovnávacích měřeních se zařízeními FWD, TSD a deflektografem DFG. Zaměřuje se na výsledky testů na síťové úrovni a aplikaci výsledků pro plánování oprav vozovek. V článku je uvedeno, že zařízení TSD poskytuje dobrou shodu ve srovnání s tradičními metodami pro měření průhybů.

Na základě měření s dánským TSD v roce 2010 vyvinula ARRB metodu analýzy naměřených dat pro vytvoření průhybové křivky, která je považována za klíč k budoucí australské práci s TSD (viz kapitola 2.3.3). Průhyby vypočítané touto metodou dosahují vysoké korelace s průhyby změřenými rázovým zařízením FWD. Koeficient determinace R^2 dosahuje hodnot téměř 0,9, z čehož vyplývá velmi vysoká těsnost vztahu mezi zařízením TSD a FWD pro hodnoty d_0 a SCI_{300} . Rozdíl v hodnotách d_0 při použití původní dánské a navrhované metody AUTC (Area Under The Curve) je znázorněn na **obr. 18**. Zpráva [28] uvádí, že nástup třetí generace TSD s více než 4 Doppler-laser snímači by mohl umožnit použití AUTC metody.

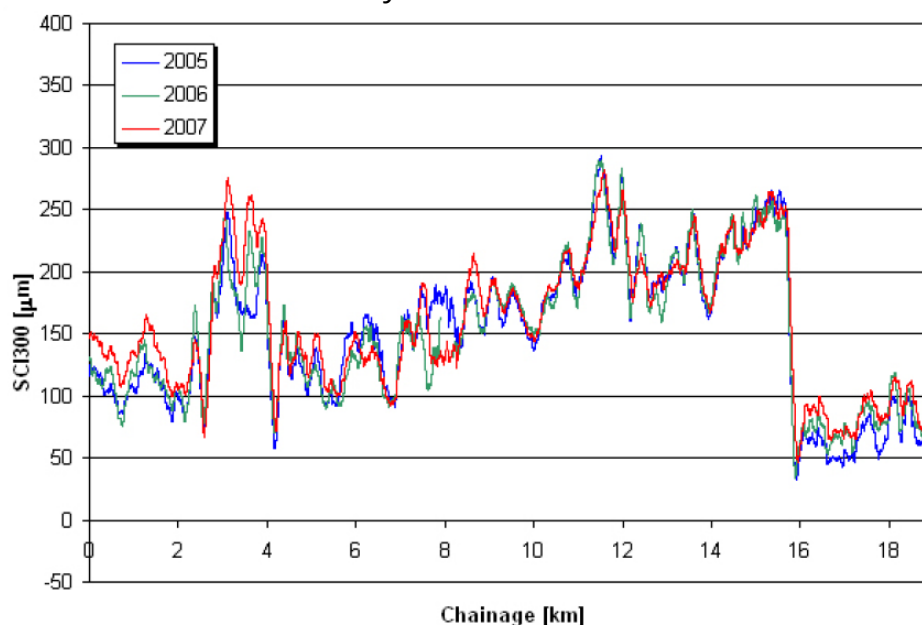


Obr. 18 Rozdíl v hodnotách d_0 – původní dánská a navrhovaná metoda AUTC [25]

V roce 2014 získala ARRB Group zařízení Traffic Speed Deflectometer třetí generace. Od té doby se zařízení TSD pravidelně používá pro hodnocení únosnosti na síťové úrovni v Austrálii a také na Novém Zélandu.

2.4.2 Dánsko

Dánské ředitelství silnic zahájilo v roce 2005 měření zařízením TSD na síťové úrovni. V období 2005 – 2007 byla během jednoho roku změřená celá státní síť vozovek, která před rokem 2007 měla délku 2000 km. Důvodem byla potřeba získání nových zkušeností s TSD. V současné době je celková délka měřených komunikací přibližně 3600 km (1600 km silnic, 2000 km dálnic). Celá síť se sleduje po jednotlivých částech, v intervalech od 3 do 5 let. Silniční síť po dobu 3 let (1/3 celkové délky 1600 km ročně), dálniční síť po dobu 5 let (1/5 celkové délky 2000 km ročně). Souhrnně se tak za 1 rok změří zhruba 1000 km vozovek (v průběhu 2 týdnů). Výstupem z měření jsou hodnoty povrchového indexu křivosti SCI_{300} . **Obr. 19** znázorňuje příklad výsledků měření od roku 2005 do roku 2007 na úseku délky 19 km.



Obr. 19 Porovnání výsledků indexu SCI_{300} z tříletého měření [27]

Výsledky indexu SCI_{300} jsou použity pro orientační hodnocení únosnosti. Úseky s nevyhovující únosností jsou určeny k zesílení vozovky. Potřebná tloušťka zesílení je stanovena na základě měření rázovým zařízením FWD.

Hodnoty nevyhovující únosnosti pro potřebu zesílení vozovky na základě měření zařízením TSD byly potvrzené zkouškami rázovým zařízením FWD. Klasifikace únosnosti pro výsledky z měření TSD byla vyvinuta podle obdobné klasifikace pro výsledky z FWD. Následně pak byla klasifikace pro TSD upravená na základě srovnávacích testů mezi FWD a TSD.

2.4.3 Itálie

Použití TSD v Itálii bylo popsáno v [5; 6]. *ANAS S.p.A. – Centro Sperimentale Stradale (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade)* používá Traffic Speed Deflectometer pro účely kontroly únosnosti v souvislosti s opravami a stavbou vozovek. Italské zařízení TSD má zatížení na nápravu 12 tun (maximální standardní zatížení používané v Itálii). Od roku 2010 se zařízení TSD používá pro kontrolu únosnosti vozovek na veškeré práce provedené dodavatelem stavebních prací. Požadované hodnoty únosnosti jsou zahrnuty ve smlouvách pro výstavbu nových i opravovaných konstrukcí vozovek. Únosnost je hodnocena na základě indexů SCI_{200} a SCI_{300} opravených na referenční teplotu 14 °C.

V případě nedodržení požadovaných hodnot může být dodavatel sankcionován. Hodnocení diagnostikované vozovky je založeno na průměrné hodnotě indexu SCI pro homogenní sekci. Kontrola vozovky zařízením TSD má být provedena do jednoho roku po zkonstruování finální vrstvy.

Hlavní italská silniční a dálniční síť pod správou *ANAS S.p.A.* sestává ze zhruba 25000 km silnic a dálnic. V rámci pravidelného monitorování únosnosti této sítě je stanoven indikátor výkonnosti I_{BC} na základě hodnoty indexu IS_{300} při referenční teplotě 14 °C. Mezní hodnoty pro index IS_{300} a hodnocení sledované sítě vozovek jsou uvedeny v [6].

2.4.4 Německo

V rámci pilotního projektu v Bavorsku, o kterém se zmiňuje článek [30] byla v letech 2012 zkoumána použitelnost systému TSD ve srovnání s jinými metodami měření průhybů (FWD, Deflectograph Lacroix, Curviameter) na dálnicích a silnicích o celkové délce 300 km. V příspěvku [19] byly doplněny výsledky z roku 2014. Polské TSD měřilo na asfaltových vozovkách s odlišnou konstrukcí a různými třídami zatížení. Měření proběhlo převážně na vozovkách, které byly změřeny rázovým zařízením FWD nebo Curviameterem. Cílem projektu bylo získat co nejširší datovou základnu pro prozkoumání souvislostí mezi dosud používanými měřicími systémy.

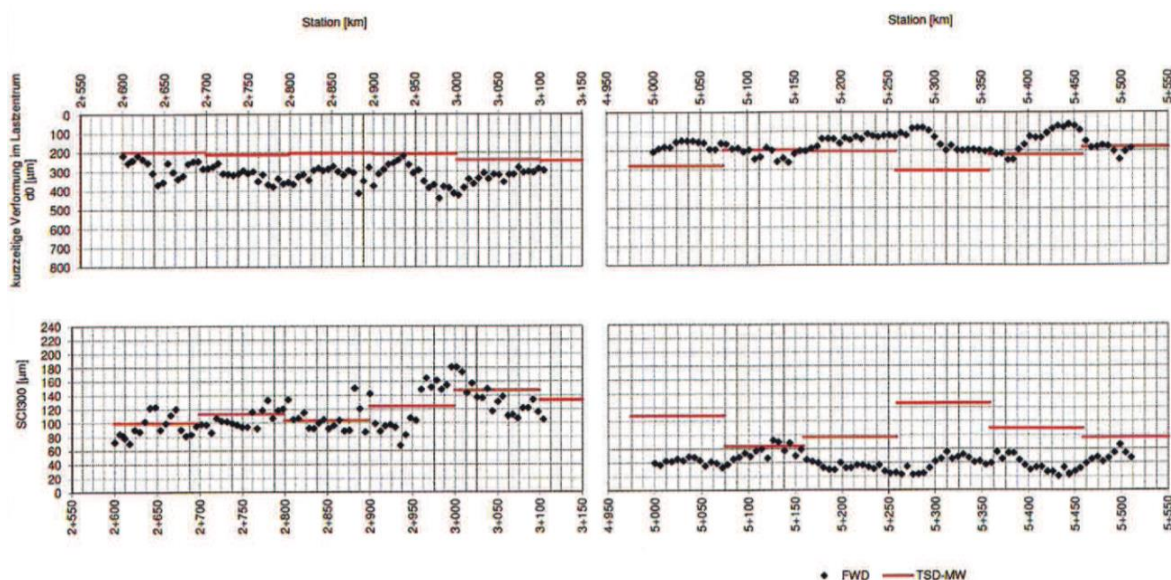
Paralelně s měřením zařízením TSD bylo výzkumným ústavem BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen), na některých z uvedených úseků, současně provedeno srovnávací měření deflektometrem FWD a zařízením Lacroix.

V [30] je uvedeno, že porovnání jednotlivých hodnot (SCI_{300} a d_0) ukázalo rozdíly mezi výsledky z měření TSD a FWD. Měření rovněž prokázalo velký rozptyl hodnot SCI_{300} a d_0 stanovených zařízením TSD. Při porovnání průměrných hodnot výsledků z TSD (100 m úsek) s jednotlivými výsledky FWD (**obr. 20**) však bylo možné v některých oblastech nalézt dobrou shodu mezi oběma systémy, především pro průhyb v ose zatížení. Na některých úsecích jsou ovšem části s protichůdnými tendencemi charakteristických veličin (především SCI_{300}) mezi oběma systémy.

Jednoznačnou příčinu se nepodařilo zjistit, i když je možné uvést, že u větších nerovností vozovky byly výsledky mezi TSD a FWD značně divergentní. Použité polské TSD nebylo v době měření vybaveno dynamickým záznamem zatížení nápravy vozidla, proto v této souvislosti nebylo možné provést žádné další vyhodnocení.

Cílem projektu uveřejněného v [30] bylo především porovnání hodnot průhybů mezi TSD a dalšími zařízeními. Porovnatelnost výsledků však byla zatížena různými okrajovými podmínkami (např. uvedené úseky komunikací byly měřeny v různých letech).

Mezi výsledky z měření TSD a FWD nebyl stanoven žádný korelační vztah, jak je uvedeno také v [26]. Na základě výsledků měření však bylo stanoveno, že zařízení TSD má velký potenciál pro hodnocení únosnosti.



Obr. 20 Porovnání výsledků TSD a FWD na komunikaci St 2181 [30]

Pro účely měření a vyhodnocení dat z TSD byl v roce 2015 vydán technický předpis [11]. Německý BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) v roce 2017 zakoupil pro svoji potřebu nový Traffic Speed Deflectometer.

2.4.5 Nizozemsko

Použitelnost Traffic Speed Deflectometru byla ověřena v rámci projektu publikovaného v závěrečné zprávě [14] nizozemského pilotního projektu. Projekt prokázal způsobilost TSD zařízení provádět měření při rychlosti dopravního proudu bez nutnosti omezení provozu. Měření však neměla uspokojivou úroveň a nepotvrdily schopnost zařízení vyhledat slabé úseky vozovek na nizozemské silniční a dálniční síti. Zpráva projektu se zmiňuje o poměrně špatné korelaci mezi zařízením FWD a TSD. Ačkoliv projekt nepodal přesvědčivý důkaz o vhodnosti přímého nasazení zařízení TSD, závěry projektu popisují potenciál TSD pro účely stanovení únosnosti. Z doporučení vyplývá nutnost dalšího zkoumání a podrobnějších analýz.

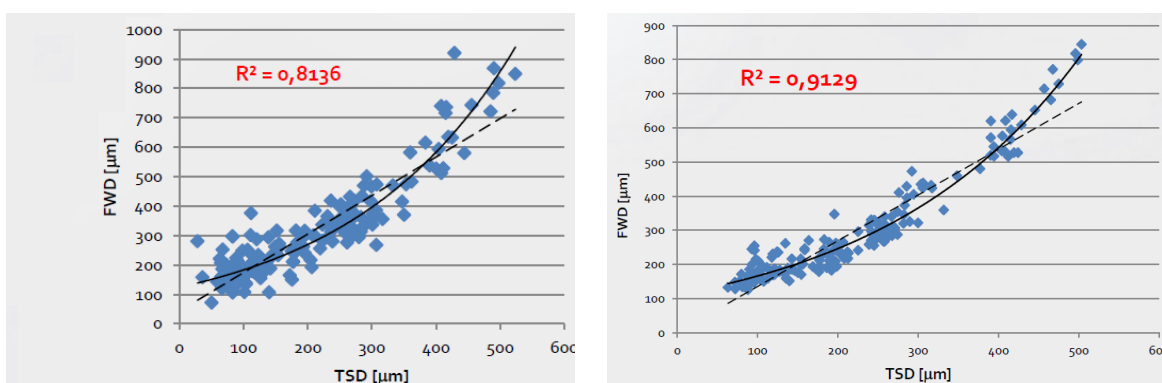
V rámci projektu bylo použito původní dánské zařízení TSD první generace s 3+1 Doppler-laser snímači. Od té doby prošlo zařízení významným vývojem.

2.4.6 Polsko

Polské zařízení TSD, které je v polském IBDiM od roku 2011, pravidelně měří v rámci různých národních i nadnárodních projektů po celé Evropě. V příspěvku [15] je možné zjistit, že kromě měření ve Finsku, Německu, Švédsku, zkontroloval Traffic Speed Deflectometer v letech 2013 – 2015 více než 20 000 km komunikací v Polsku. V roce 2015 se zařízení zúčastnilo projektu realizovaného na Slovensku [4].

Měření realizované na pokusných úsecích poblíž Varšavy [29] srovnávalo výsledky mezi zařízením FWD a TSD. Získané průhyby byly přepočítány na velikost srovnávací síly a na srovnávací teplotu. Korelaci mezi FWD a TSD byl stanoven koeficient determinace $R^2 = 0,81$. Po korekci dat na srovnávací teplotu a sílu se zvýšil koeficient determinace na hodnotu 0,91. Vliv korekce je uveden na **obr. 21 a 22**.

Polský výzkum rovněž představil unikátní analytický postup pro stanovení průhybů vozovky na jednovrstvém modelu vozovky [13].

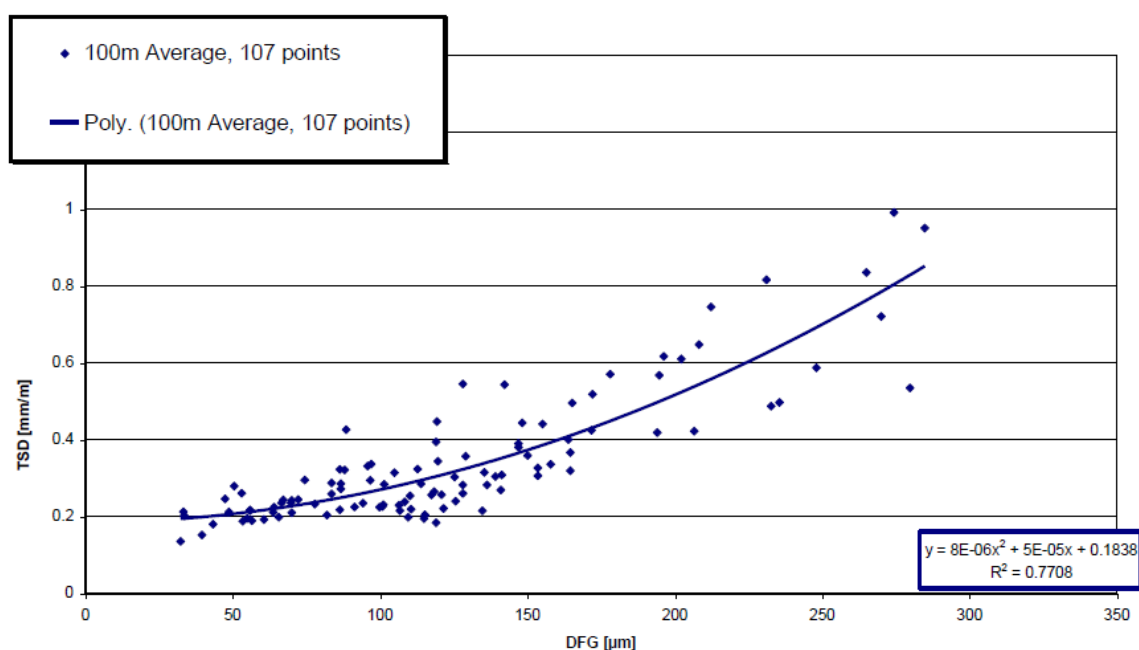


Obr. 21 a 22 Vliv korekce teploty (vlevo: před korekcí, vpravo: po korekci) [29]

2.4.7 Velká Británie

Měření zařízením TSD na síťové úrovni ve Velké Británii je popsáno v [10]. V období let 2009 – 2012 provedla Transport Research Laboratory pro UK Highways Agency měření na víc jak 50 000 km strategické silniční a dálniční sítě. Z britských zkušeností vyplývá, že TSD je vhodné zařízení pro stanovení únosnosti vozovky [8, 9].

Postup interpretace naměřených hodnot zařízením TSD na strategické anglické síti je založen na vztahu mezi průhybem měřeným deflektografem DFG a hodnotou „deflection slope“ ve vzdálenosti 100 mm od osy zatížení (**obr. 23**). Srovnáním mezi zařízením TSD a DFG byl dosažen koeficient determinace $R^2 = 0,77$.



Obr. 23 Vztah mezi zařízením TSD (deflection slope) a deflektografem DFG [10]

Použitím tohoto vztahu je možné zjistit stav vozovky na základě dat ze zařízení TSD. Každé 100 m sekci měřené vozovky je přidělena kategorie stavu vozovky se 4 klasifikačními stupni (**obr. 24**).

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

Obr. 24 Kategorie stavu vozovky podle UK Highways Agency [10]

3 VÝSLEDKY VLASTNÍCH REALIZOVANÝCH MĚŘENÍ

3.1 SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ MEZI ZAŘÍZENÍM TSD A FWD REALIZOVANÉ NA SLOVENSKU A V ITÁLII

V rámci řešení projektu Technologické agentury č. TE01020168 (CESTI) proběhla v letech 2014 a 2015 srovnávací měření mezi zařízeními TSD a FWD. V listopadu 2014 se v okolí Říma uskutečnilo srovnávací měření italského TSD ve vlastnictví výzkumné instituce ANAS S.p.A. – Centro Sperimentale Stradale a rázového zařízení FWD RODOS 2012 české výroby, jehož majitelem je Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. Měření proběhlo na několika úsecích vozovek s asfaltovým krytem. Jednou z komunikací byla silnice SS1 (Strada Stanale 1 Via Aurelia), s délkou měřeného úseku 3 km. Zařízení TSD měřilo průhyby povrchu vozovky při rychlosti 60-80 km/h v závislosti na rychlosti dopravního proudu. Krok měření rázového zařízení FWD byl 20 m. Po vyloučení chybných údajů bylo změřeno více než 150 průhybových křivek. Export dat ze zařízení TSD byl uskutečněn ve stejném kroku měření, tedy 20 metrů.

V červnu 2015 proběhlo srovnávací měření, kterého se zúčastnilo totožné rázové zařízení FWD a zařízení TSD vlastněné polským výzkumným ústavem IBDiM. Měření proběhlo na 3 úsecích vozovek s asfaltovým krytem na komunikacích D1 (2,5 km), I/18 (1,95 km), II/537 (2,5 km) v okolí Liptovského Mikuláše na Slovensku.

Na silnicích I/18 a II/537 byly průhyby měřené zařízením TSD při rychlosti cca 70 km/h. Na dálnici D1 byly navíc průhyby změřené při různých rychlostech TSD zařízení (cca 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h). Krok měření rázového zařízení FWD byl 25 m na všech měřených úsecích. Po vyloučení chybných údajů tak bylo změřeno více než 250 průhybových křivek. Export dat ze zařízení TSD byl uskutečněn ve stejném kroku měření, tedy 25 metrů.

3.2 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ZAŘÍZENÍM TSD A FWD

Srovnávací měření mezi zařízeními FWD a TSD, které byly provedeny na úsecích popsaných v předchozí kapitole, byly vyhodnoceny pro účely zjištění korelace mezi průhyby z obou zařízení.

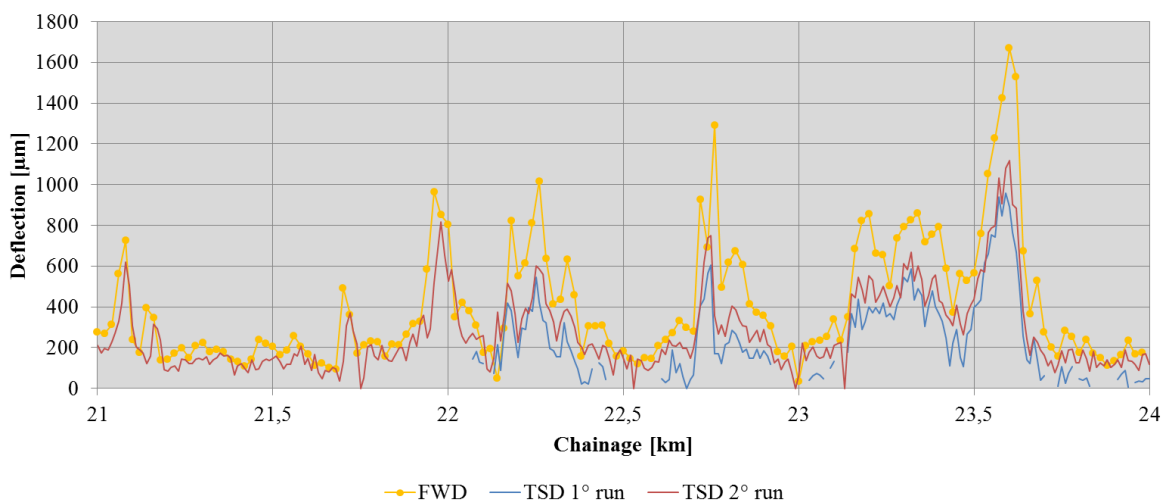
Pro vzájemnou korelaci byly použity hodnoty průhybu po korekcích na zatěžovací sílu a teplotu. Průhyby změřené zařízením FWD i TSD byly opravené na srovnávací sílu 60 kN (italské TSD má zatížení na nápravu 12 tun), respektive 50 kN (polské TSD má zatížení na nápravu 10 tun). Pro teplotní korekci byly použity hodnoty používané v Itálii [5, 6], respektive na Slovensku [21]. Teplotní korekce se výrazně neprojevila z důvodu měření FWD i TSD zařízení ve stejných teplotních podmínkách.

Stupeň korelace mezi hodnotami průhybů změřených zařízeními TSD a FWD na Slovensku byl zjišťován pomocí lineární regrese, přičemž spolehlivost korelace byla vyjádřena součinitelem spolehlivosti R^2 . Hodnoty součinitelů R^2

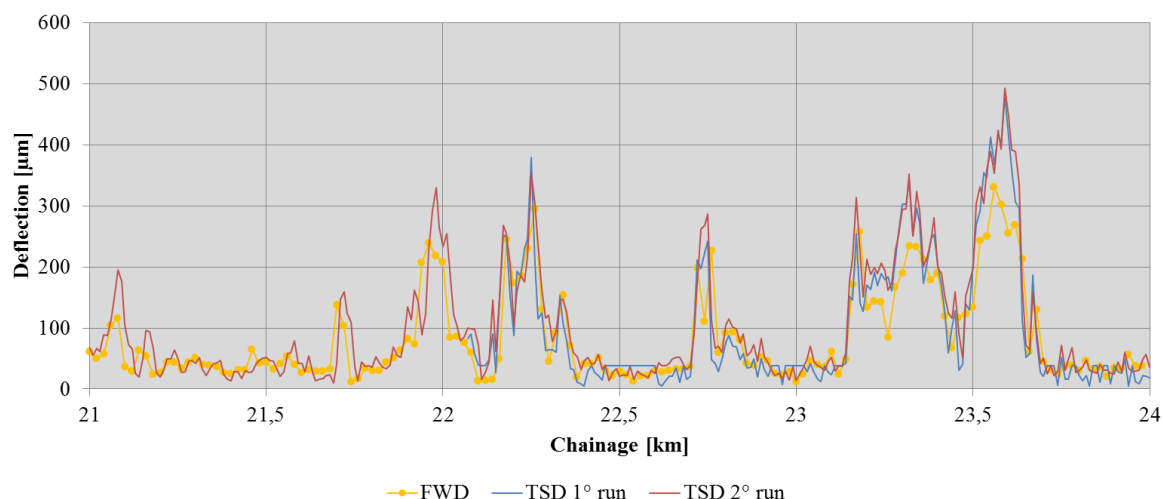
se pohybovaly v relativně nízkých hodnotách ($R^2 = 0,4$), což neodpovídá výsledkům zjištěným ve světě (viz kapitola 2.4).

Vzhledem k rozdílům ve způsobu zatěžování vozovky je při měření TSD jiná doba zatížení v úrovni podloží a spodních vrstev vozovky ve srovnání s FWD. Přibližná shoda je v době zatížení asfaltových vrstev vozovky. Na jejich hodnocení se užívá hodnota indexu SCI_{300} . Proto se v další etapě zkoumala korelace indexu SCI_{300} uvedeného ve výstupech TSD a vypočítaného z výstupů FWD. Podobně jako při průhybu v ose zatížení byla těsnost vztahu mezi hodnotami indexů SCI_{300} zjišťována pomocí lineární regrese a součinitele spolehlivosti R^2 . Hodnoty součinitelů R^2 se však rovněž pohybovaly v nízkých hodnotách ($R^2 = 0,3$).

Ze zjištěných výsledků je možné konstatovat, že mezi hodnotami průhybů změřených zařízeními TSD a FWD existuje jen mírná vzájemná závislost. Pro parametr SCI_{300} byla zjištěna velmi nízká těsnost. Je však nutné zmínit, že během měření se vyskytl problém s přesností lokalizace měření mezi oběma zařízeními. To může být jeden z důvodů nízké vzájemné závislosti. Přesnost lokalizace má při srovnávacím měření stejný význam, jako správné měření dat. Vyhodnocení výsledků z Itálie prokázalo stejnou tendenci průhybů, tj. nárůst hodnot FWD odpovídal nárůstu hodnot TSD (**obr. 25, 26**). To znamená, že jestli byly pomocí TSD identifikované rozdíly v únosnosti jednotlivých sekcí vozovky (tzn., že byly zjištěny rozdíly v hodnotách průhybů), tendence (směrování) rozdílu je stejná, jako při výsledcích diagnostiky FWD. To je důležité z hlediska využitelnosti TSD pro diagnostiku únosnosti na síťové úrovni.

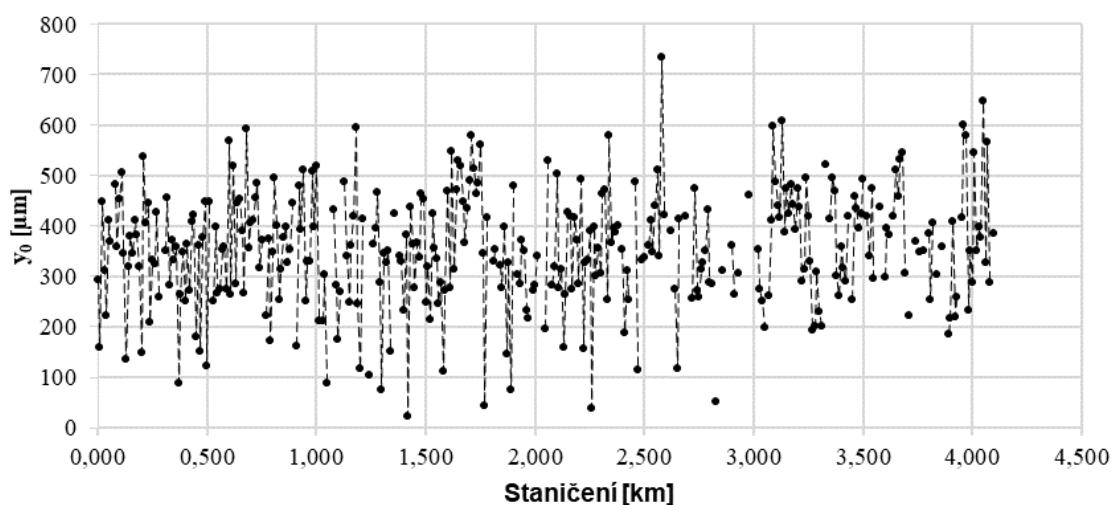


Obr. 25 Srovnání průhybu v ose zatížení d_0 na komunikaci SS1 (Itálie)



Obr. 26 Srovnání indexu SCI_{300} na komunikaci SS1 (Itálie)

Hodnoty změřených průhybů povrchu vozovky ve stanovených vzdálenostech od osy zatížení určují tvar průhybové křivky, která je celkovým vyjádřením ohybové tuhosti vozovky. Tuhost asfaltové vozovky není po její délce konstantní a do jisté míry se v podélném směru mění. Zařízení TSD však často generuje neočekávaně velké rozdíly průhybů dvou sousedních hodnot, které mnohdy dosahují i stovky mikrometrů (**obr. 27**). Jednou z příčin vysoké variability tuhosti konstrukce vozovky v podélném směru může být nekorektní přepočítání rychlostí průhybu povrchu vozovky na hodnotu průhybu vyhodnocovacím programem zařízení TSD, který pracuje podle metody „Greenwood“ (viz kapitola 2.3.2). To potvrzuje např. výzkum uveřejněný v [25; 28], jehož výsledkem bylo vyvinutí vlastní metody analýzy změřených dat pro vytvoření průhybové křivky (viz kapitola 2.3.3). Průhyby vypočítané touto metodou dosahují vysoké korelace s průhyby změřenými rázovým zařízením FWD. Koeficient determinace R^2 dosahuje hodnot téměř 0,9, z čehož vyplývá velmi vysoká těsnost vztahu mezi zařízením TSD a FWD pro hodnoty d_0 a SCI_{300} .



Obr. 27 Hodnoty průhybů v ose zatížení změřené zařízením TSD

4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Účelem disertační práce je získání poznatků týkajících se použití zařízení Traffic Speed Deflectometer při diagnostice únosnosti vozovek pozemních komunikací na síťové úrovni a případné využití této metody v běžné praxi v podmínkách České republiky. Hlavní cíle disertační práce jsou:

1. Ověření správnosti interpretace změřených hodnot (rychlostí povrchu vozovky) zařízením TSD včetně analýzy správnosti výpočtu průhybů vyhodnocovacího softwaru zařízení TSD pomocí vlastního matematického modelu.
2. Zkoumání vzájemného vztahu mezi odezvou na zatížení (průhyby) generovanou zařízením TSD a FWD.
3. Posouzení možnosti hodnocení únosnosti asfaltových vozovek zařízením TSD na síťové úrovni v ČR.

Výzkum v této oblasti přispěje k pokroku v oboru hodnocení únosnosti při diagnostice vozovek pozemních komunikací.

5 POSTUP ZPRACOVÁNÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

K dosažení stanovených cílů disertační práce budou využity změřené hodnoty zařízením TSD a FWD. V rámci řešení se provede vyhodnocení srovnávacího měření mezi zařízením TSD a FWD a dále se vyhodnotí průhyby stanovené zařízením TSD na vozovkách pozemních komunikací (různých tříd a konstrukcí) pro účely zhodnocení na síťové úrovni.

Disertační práce bude zaměřená na ověření správnosti přepočtu změřených rychlostí deformace vozovky na průhyb vozovky a stanovení vzájemných korelačních vztahů mezi zařízením FWD a TSD. V případě nalezení vzájemného korelačního vztahu mezi zařízením FWD a TSD bude navržen způsob hodnocení únosnosti asfaltových vozovek zařízením TSD na síťové úrovni v ČR. Kritéria pro hodnocení změřených hodnot zařízením TSD se pomocí přepočítacích vztahů určí z hodnot pro rázové zařízení FWD, které jsou zakotveny v technických předpisech.

Metodika zpracování disertační práce:

- Shrnutí informací o současném stavu technologie a provedení rešerše odborné literatury týkající se dané problematiky včetně analýzy zkušeností s měřeními TSD v porovnání se zařízením FWD (spolupráce s výrobcem a provozovateli těchto zařízení v Evropě a Austrálii).
- Srovnávací měření mezi zařízením TSD polského výzkumného ústavu IBDiM a rázovým zařízením FWD RODOS 2012 ve vlastnictví Centra dopravního výzkumu, v. v. i.
- Vyhodnocení změřených hodnot zařízením TSD a FWD pomocí korelační a regresní analýzy.

- Pro porovnání budou použity hodnoty průhybů ze zařízení TSD:
 - generované automaticky softwarem, který přepočítává změřené rychlosti deformace povrchu vozovky na průhyby,
 - vypočítané pomocí vlastního matematického modelu z hodnot rychlostí deformace povrchu vozovky (ve vhodném softwaru, např. Matlab, Adina,),
- V případě nalezení vzájemného vztahu mezi zařízeními FWD a TSD bude možné uvažovat s využitím kritérií hodnocení únosnosti vozovek platných pro FWD na odvození kritérií hodnocení podle výsledků měření TSD,
 - na základě zjištěných kritérií bude navržen způsob hodnocení únosnosti asfaltových vozovek zařízeními TSD na síťové úrovni v ČR.

5.1 MATEMATICKÝ MODEL VOZOVKY

Pro individuální výpočet průhybů je nutné mít k dispozici hodnoty rychlosti deformace povrchu vozovky na každém snímači v čase, ze kterých by se dala vypočítat hodnota průhybu. To však není běžně dostupný údaj. V současné době probíhá jednání s výrobcem i provozovateli zařízení TSD o poskytnutí těchto prvotních dat.

Dalším možným řešením je modelovat vozovku jako desku nebo nosník dle následující teorie.

1. Deska

Ohybovou čáru desky, která je daná vzájemným součinem funkce w_0 a funkce průběhu zatížení v čase $q(t)$, popisuje rovnice:

$$w(x, y, t) = w_0(x, y) \cdot q(t). \quad (\text{rov. 3})$$

Pokud jsou známé obě funkce, je možné vypočítat změnu hodnoty průhybu v libovolné době zatížení.

Z kinematiky je známé, že okamžitá rychlost je dána první derivací dráhy podle času. Derivací rovnice ohybové čáry tudíž získáme hodnotu rychlosti se souřadnicemi $[x; y]$. Platí:

$$\dot{w}(x, y, t) = \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t} \rightarrow \dot{w}(x, y, t) = w_0(x, y) \cdot \frac{dq(t)}{dt}. \quad (\text{rov. 4})$$

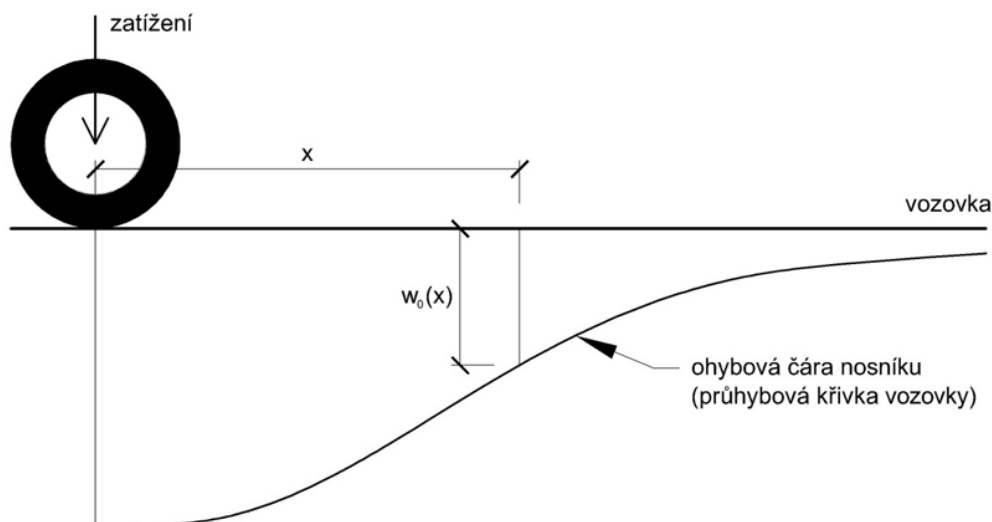
2. Nosník

Řešení matematického modelu vozovky v podobě desky by mohlo být komplikované, a proto je možné úlohu řešit také jako prostý nosník. Vzhledem k tomu, že kolo vozidla projíždí jednou stopou vozovky a snímače zařízení TSD jsou osazené v jedné linii, je možné řešit model vozovky jako desku šířky např. 1 m. Za těchto podmínek je možné úlohu řešit jako nosník.

Pro rovnici ohybové čáry nosníku platí:

$$w(x, t) = w_0(x) \cdot q(t). \quad (\text{rov. 5})$$

Ohybovou čáru v jednom časovém okamžiku t popisuje **obr. 28**. Z obrázku je zřetelné, že veličina $w_0(x)$ představuje hodnotu průhybu ve vzdálenosti x od osy zatížení v daném časovém okamžiku.



Obr. 28 Parametry charakterizující přetvoření ohybové čáry nosníku (průhybové křivky vozovky) v určitém časovém okamžiku

Působící zatížení vyvolá časovou změnu průhybu, která je reprezentovaná funkcí $q(t)$.

Derivací ohybové čáry nosníku podle času získáme hodnotu rychlosti daného bodu ve vzdálenosti x .

$$\dot{w}(x, t) = \frac{\partial(w_0(x) \cdot q(t))}{\partial t} \rightarrow \dot{w}(x, t) = w_0(x) \cdot \frac{dq(t)}{dt}. \quad (\text{rov. 6})$$

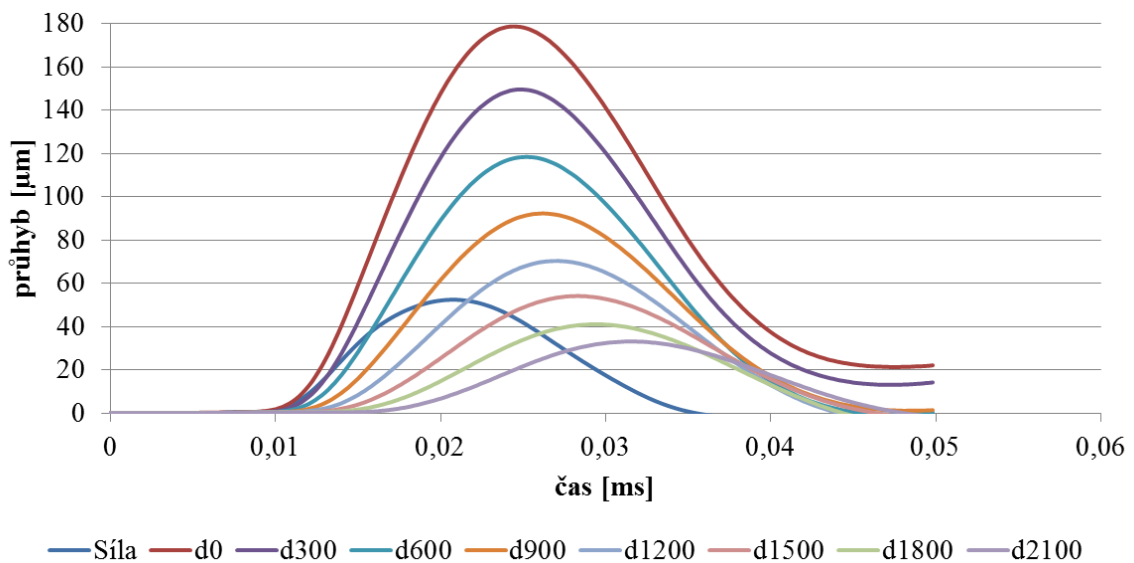
Výpočet rychlosti daného bodu z ohybové čáry je dán součinem hodnoty průhybu $w_0(x)$ a parciální derivace funkce změny průhybu podle času.

Pro hodnotu rychlosti v ose zatížení tedy platí:

$$\dot{w}(0, t) = w_0(0) \cdot \frac{dq(t)}{dt}. \quad (\text{rov. 7})$$

Problémem při řešení úlohy výběr funkce změny průhybu v čase. Řešením je použití tvaru funkce, která je k dispozici z grafu časového záznamu (tzv. „time history“). Jeho grafická prezentace (**obr. 29**) dokladuje nárůst a pokles hodnoty zatěžovací síly a změnu polohy povrchu vozovky v místě jednotlivých snímačů (nárůst a pokles průhybu vozovky) během měření. Kromě toho je ze záznamu zjevný časový posun mezi začátkem působení zatěžovací síly a začátkem změny polohy povrchu vozovky v ose zatížení d_0 a taktéž časový posun mezi

začátkem změny polohy povrchu vozovky v místě jednotlivých snímačů. Zjednodušeně, „time history“ popisuje změnu zatěžovací síly a průhybů změřených jednotlivými snímači v čase.



Obr. 29 Time history – časový záznam síly a průhybů $d_0 - d_{2100}$; silnice I/11

Křivkou popisující změnu průhybu v čase je sinusoida, takže rychlost je dána součinem hodnoty průhybu a derivace rovnice sinusoidy. Funkce změny průhybu v jednotlivých vzdálenostech od osy zatížení (na jednotlivých snímačích) je stejná, pouze se mění parametry sinusoidy tak, aby odpovídaly průběhu změny průhybů v dané vzdálenosti, tj. aby se shodovaly, pokud jde o velikost a dobu trvání.

Takto vypočítané hodnoty rychlosti se v rámci řešení disertační práce porovnají s hodnotami generovanými softwarem zařízení TSD. Ze získaných dat se zhodnotí, zda přepočítání z rychlosti na průhyb používaný v softwaru zařízení TSD je korektní či nikoliv.

6 ZÁVĚR

Cílem disertační práce je ověření nové metody pro stanovení průhybů a hodnocení únosnosti vozovek pozemních komunikací na síťové úrovni v ČR.

Na základě vyhodnocení výsledků měření zařízení TSD a jejich srovnání s výsledky měření zařízení FWD je možno učinit vícero závěrů z pohledu možnosti využití zařízení TSD pro diagnostiku únosnosti asfaltových vozovek na síťové úrovni.

V první řadě je nutno konstatovat vysokou výkonnost zařízení TSD, které je schopno diagnostikovat v krátké době velký rozsah silniční sítě.

Další výhodou je diagnostika při rychlosti odpovídající reálnému provozu na pozemní komunikaci, přičemž není nutno zajistit ochranná opatření pro měřicí zařízení a jeho osádku. V porovnání s diagnostikou zařízeními FWD je to zásadní výhoda z hlediska bezpečnosti silničního provozu. Kromě toho, výstupy diagnostiky více zodpovídají reálným podmínkám zatěžování, jelikož v sobě zahrnují i dynamické aspekty z důvodu podélné nerovnosti povrchu vozovky. Také doba zatížení v jednotlivých úrovních (vrstvách) konstrukce vozovky odpovídá reálnému způsobu zatěžování.

Rozsah dat z měření TSD je dostatečně obsáhlý. Je pozitivní, že kromě identifikačních dat týkajících se měřeného úseku a údajů o podmínkách měření obsahuje i všechny důležité výstupní údaje používané při standardním hodnocení únosnosti vozovky. Ve výstupech jsou uvedeny nejen průhyby v ose zatížení a různých (standardně užívaných) vzdálenostech od této osy, ale i hodnoty různých indexů počítaných z uvedených průhybů.

Na základě vyhodnocení byla zjištěna stejná tendence průhybů zařízení FWD a TSD. To je důležité z hlediska využitelnosti TSD pro diagnostiku únosnosti na síťové úrovni.

Pokud jde o kritéria hodnocení, byla prokázána existence vzájemného vztahu mezi z TSD a FWD, i když těsnost vztahu na jednotlivých zkušebních sekcích byla relativně nízká. Přesto je opodstatněné předpokládat, že by bylo možné použít zařízení TSD jako alternativní zařízení k zařízení FWD a využít kritéria hodnocení únosnosti vozovek z měření FWD na odvození kritérií hodnocení na základě výsledků měření TSD. K tomu je zapotřebí provést rozsáhlejší měření pro získání většího statistického souboru naměřených dat (vozovky různých tříd a konstrukcí, s různou tloušťkou asfaltových i podkladních vrstev a s různou únosností podloží) a případně navrhnout způsob hodnocení únosnosti vozovek na síťové úrovni na základě měření TSD.

Relativně malý statistický soubor změřených dat získaných během měření v Itálii a na Slovensku mohl zapříčinit nízkou spolehlivost výsledků. Proto bude v rámci řešení disertační práce shromážděno větší množství dat pro účely podrobného rozboru výsledků obou metod za účelem zjištění rozdílů mezi metodami včetně analýzy možného uplatnění zařízení TSD v českých podmínkách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALTZER, S. 2009. *Three years of high speed deflectograph measurements of the Danish state road network*. In 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCR²A'09). Champaign, Illinois, USA 2009. Taylor and Francis, London, pp. 443-50. DOI: 10.1201/9780203865286.ch48. ISBN 978-0-415-87199-0.
- [2] 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.
- [3] BECKEDAHL, H. J. – KRARUP, J. – FERNE, B. 2015. *Optimierung der Erhaltungsplanung durch den Einsatz des Tragfähigkeitsmesssystems Traffic Speed Deflectometer (TSD) für die Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB)*. In Straße und Autobahn. 2015, no. 3, p. 202-209. ISSN 0039-2162.
- [4] BŘEZINA, I. – STRYK, J. 2015. *Vysokorýchlostný deflektometer TSD – možnosti jeho využitia při hodnotení únosnosti vozoviek na úrovni cestnej siete na Slovensku*. Rozborová úloha. Brno. Centrum dopravného výzkumu, v. v. i. 33 s.
- [5] CESOLINI, E. 2014. *Efficiency and Environmental Sustainability in Based Performance Approach in Building Italian Pavements*. In 3rd International Conference on Transportation Infrastructure (ICTI 2014). Pisa, Italy 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] FERNE, B. W. – LANGDALE, P. – ROUND, N. – FAIRCLOUGH, R. 2009a. *Development of a Calibration Procedure for the UK Highways Agency Traffic Speed Deflectometer*. In 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 2009. DOI: 10.3141/2093-13.

- [9] FERNE, B. W. – LANGDALE, P. – ROUND, N. – FAIRCLOUGH, R. 2009b. *Development of the UK Highways Agency Traffic Speed Deflectometer*. In 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields. Champaign, Illinois, 2009. DOI: 10.1201/9780203865286.ch44. ISBN 978-0-415-87199-0.
- [10] FERNE, B. W. – LANGDALE, P. – WRIGHT, M. A. – FAIRCLOUGH, R. – SINHAL, R. 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.
- [11] FGSV - Nr. 433 B 5. Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen Teil B 5 Schnell fahrendes Messsystem Traffic Speed Deflectometer (TSD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung. AP Trag Teil B 5. FGSV Verlag, Köln 2015. ISBN 978-3-86446-134-7.
- [12] FLINTSCH, G. W. – KATICHA, S. W. – BRYCE, J. – FERNE, B. – NELL, S. – DIEFENDERFER, B. 2013. *Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies*. Second Strategic Highway Research Program (SHRP2), report S2-R06F-RW-1. The National Academies, Washington, D.C.
- [13] GRACZYK, M. – ZOFKA, A. – SUDYKA, J. – RAFA, J. 2014. *Analytical solution of pavement deflections and its application to the TSD measurements*, In 26th ARRB Conference – Research Driving Efficiency. Sydney, New South Wales, 2014.
- [14] van GURP, CH. – WESTERA, G. E. 2009. *Pilot study applicability of Traffic Speed Deflectometer*. Case number RWS-DVS 31023340. Final Report e0901237. KOAC•NPC Institute for Research of Materials and Pavement Structures. Apeldoorn, 2009.
- [15] HARASIM, P. – SUDYKA, J. 2014. *TSD Application in High Speed Bearing Capacity Evaluation of Road Networks*. In National Workshop of TRIMM project (Tomorrow's Road Infrastructure Monitoring & Management). Warsaw, Poland 2014.
- [16] HILDEBRAND, G. – RASMUSSEN, S. 2002. *Development of a High Speed Deflectograph*. Report 117, Danish Road Institute 2002. 42 p. ISBN 87-91177-03-0.

- [17] CHAI, G. – KELLY, G. – HUANG, A. – CHOWDHURY, S. H. – MANOHARAN, S. – GOLDING, A. 2015. *New Approaches for Modeling Non-linearity of Subgrade in asphalt pavements*. In 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, paper no. 15-2466. Washington D. C., 11-15 Jan. 2015.
- [18] CHAI, G. – MANOHARAN, S. – GOLDING, A. – KELLY, G. – CHOWDHURY, S. 2016. *Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer Data Using Simplified Deflection Model*. In 6th Transport Research Arena. Warsaw, Poland, 18-21 April 2016. Transportation Research Procedia [online]. 2016, 14, 3031-3039 [cit. 2017-04-17]. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.444. ISSN 23521465.
- [19] JANSEN, D. 2014. *Evaluation of the TSD in Germany*. In National Pavement Evaluation Conference 2014. Blacksburg, Virginia, USA 2014.
- [20] KATICHA, S. W. – FLINTSCH, G. W. 2015. *Field Demonstration of the Traffic Speed Deflectometer in New York*. In 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, paper no. 15-4630. Washington D. C., 11-15 Jan. 2015.
- [21] KOMAČKA, J. 2009. *TP 01/2009 Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB*. Technické podmienky. Bratislava: MDPaT SR 2009. 41 s.
- [22] KRARUP, J. – RASMUSSEN, S. – AAGAARD, L. – HJORTH, P. G. 2006. *Output from the Greenwood Traffic Speed Deflectometer*. In 22nd Australian Road Research Board Conference. Canberra, Australia 2006.
- [23] KRARUP, J. 2016. *TSD Basics, and Latest Software Update*. In ERPUG forum (European Road Profile Users´ Group), DaRTS6 group (Deflection at Road Traffic Speed). Praha, 2016.
- [24] 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, NDW, Australia 2014. 31 p. ISBN 978-1-925037-90-6.
- [25] 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. ISSN 1029-8436.
- [26] 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.

- [27] 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.
- [28] ROBERTS, J. – AI, U. – TOOLE, T. – MARTIN, T. 2014. *Traffic Speed Deflectometer: Data Review and Lessons Learnt*. Austroads technical report AP-T279-14. Sydney, NSW, Australia 2014. 49 p. ISBN 978-1-925037-91-3.
- [29] SUDYKA, J. – HARASIM, P. 2013. *Traffic Speed Deflectometer – a Modern Tool in Road Network Evaluation of Bearing Capacity*. In Presentation of Project SPID (System for Pavement Infrastructure Diagnosis).
- [30] 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.
- [31] WIX, R. – WHITEHEAD, D. 2015. *Innovations in Pavement Condition Management in New Zealand Using Strength Information From Traffic Speed Deflectometer Data*. In IFME World Congress & IPWEA International Public Works Conference. Rotorua, New Zealand, paper 813.

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ilja Březina

Bydliště Leska Horní 2145/9b, 669 02 Znojmo

Datum narození: 24.8.1984

Telefon: 541 641 326

Emailová adresa: ilja.brezina@cdv.cz

Vzdělání

2013 – současnost

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorský studijní program
Stavební inženýrství, obor Konstrukce a dopravní stavby

2011 – 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, magisterský studijní program
Stavební inženýrství, obor Konstrukce a dopravní stavby

2006 – 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, bakalářský studijní program
Stavební inženýrství, obor Konstrukce a dopravní stavby

2000 – 2004

Gymnázium Dr. Karla Polesného, Znojmo; ukončeno maturitou

Pracovní zkušenosti

2012 – současnost

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Divize dopravní infrastruktury a
životního prostředí; výzkumný pracovník oblasti dopravní infrastruktury

- výzkumná činnost – diagnostika vozovek
- zpracovávání dílčích částí VaV projektů
- podílení se na prezentaci výsledků řešení
- měření v terénu a zpracování dat
- tvorba technických předpisů, znalecké posudky

Odborná vědecko-výzkumná činnost

- Spolupráce na řešení VaV projektu SFDI ISPROFOND 5006210261 „Uplatnění Traffic Speed Deflectometru (TSD) při únosnosti vozovek na síťové úrovni v ČR“, 04 – 12/2017.
- Spolupráce na řešení VaV projektu TAČR TE01020168 „Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)“, 03/2012 – 12/2019.
- Spolupráce na řešení VaV projektu TAČR TD020308 „Výzkum ekonomických dopadů zavedení mýtného na silnicích první třídy na krajské rozpočty ve vztahu ke zvýšeným nákladům na údržbu více zatížených silnic nižších tříd“, 2014 – 2015.

- Spolupráce na řešení VaV projektu TAČR TA02030759 „Nové diagnostické metody jako nástroje podporující rozhodování týkající se údržby a oprav vozovek – přínosy a možnosti jejich využití“, 2012 – 2014.
- Spolupráce na řešení VaV projektu TAČR TA02031239 „Systém sledování a analýzy nových a zavedených technologií v oblasti údržby a oprav vozovek PK z technickoekonomického hlediska“, 2012 – 2014; zástupce řešitele projektu
- Spolupráce na řešení VaV projektu TAČR TA01030464 „Optimalizace vyhodnocení výsledků měření rázovým zařízením FWD“, 2011 – 2013; zástupce řešitele projektu

Publikační činnost (výběr)

- STRYK, J., JANKŮ, M., GROŠEK, J., BŘEZINA, I. Diagnostika objektů dopravní infrastruktury nedestruktivními metodami. *Silniční obzor*. 2017, **78**(12), 323-327. ISSN 0322-7154.
- BŘEZINA, Ilja, Josef STRYK a Jiří GROŠEK. Using Traffic Speed Deflectometer to measure deflections and evaluate bearing capacity of asphalt road pavements at network level. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **236**. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/236/1/012102
- GROŠEK, Jiří, Vladimír CHUPÍK, Josef STRYK a Ilja BŘEZINA. Importance of dowels in transversal joints in concrete pavements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **236**. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/236/1/012032
- BŘEZINA, Ilja, Jiří GROŠEK a Michal JANKŮ. Measurement of Deflections and Determination of Jointed Plain Concrete Pavements Stiffness by Falling Weight Deflectometer. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **190**, 162-169. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.05.322
- JANKŮ, Michal, Ilja BŘEZINA a Jiří GROŠEK. Use of Infrared Thermography to Detect Defects on Concrete Bridges. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **190**, 62-69. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.05.308
- BŘEZINA, Ilja, Jiří GROŠEK a Josef STRYK. Měření průhybů a možnosti hodnocení tuhosti vozovek s cementobetonovým krytem prostřednictvím rázového zařízení FWD. *Silniční obzor*. 2015, **76**(2), 48-52. ISSN 0322-7154.
- TESAŘ, Ivan, Jan MAHDAL, Josef STRYK, Ilja BŘEZINA a Petr NEUVIRT. Sledování a analýza nových a zavedených technologií v oblasti údržby a oprav vozovek z technickoekonomického hlediska. Certifikovaná metodika. Brno: VARS BRNO a.s., 2015.

- STRYK, Josef, Karel POSPÍŠIL a Ilja BŘEZINA. TP 073. Katalóg porúch vozoviek s cementobetónovým krytom. Bratislava: Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, 2013.
- STRYK, Josef, Pavel HERRMANN, Vladimír CHUPÍK, Pavel ŠMEJKAL, Ilja BŘEZINA a Jiří GROŠEK. Měření průhybů a hodnocení únosnosti vozovek rázovým zařízením FWD. Certifikovaná metodika. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2013.