

MĚŘENÍ PRŮHYBŮ A HODNOCENÍ ÚNOSNOSTI VOZOVEK RÁZOVÝM ZAŘÍZENÍM FWD

Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

2013

Zpracovatel: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
Ing. Pavel Herrmann - RODOS

Autoři: Ing. Josef Stryk, Ph.D.
Ing. Pavel Herrmann
Ing. Vladimír Chupík, CSc.
Pavel Šmejkal
Ing. Ilja Březina
Ing. Jiří Grošek

Oponenti: Ing. Petr Meluzin (IMOS Brno, a.s.)
Ing. Zsolt Benkó (Slovenská správa ciest)

Obsah

1. Úvod	1
2. Definice a zkratky	2
2.1 Definice.....	2
2.2 Použité zkratky	2
3. Všeobecně.....	3
3.1 Princip rázové zatěžovací zkoušky.....	3
3.2 Účel rázové zatěžovací zkoušky.....	4
3.3 Rázové zařízení FWD	4
3.3.1 Měřicí systém	5
3.3.2 Ovládací software.....	6
3.3.3 Kalibrace a ověření zařízení.....	6
3.4 Software pro zpětný výpočet a výpočet zbytkové životnosti.....	6
3.4.1 Aktualizace softwaru DG Laymed FWD	7
3.4.2 Využití softwaru DG Laymed FWD v rámci experimentu přesnosti	7
4. Příprava a postup měření průhybů vozovek.....	7
4.1 Všeobecně	7
4.2 Měření průhybů na vozovkách s asfaltovým krytem	8
4.2.1 Podmínky měření	8
4.2.2 Stanovení bodů pro měření.....	8
4.2.3 Měření teplot.....	8
4.3 Měření průhybů na vozovkách s cementobetonovým krytem	8
4.3.1 Podmínky měření	8
4.3.2 Stanovení bodů pro měření.....	9
4.3.3 Měření teplot.....	10
4.3.4 Rázová zkouška na střezech CB desek	10
4.3.5 Rázová zkouška na hranách desek - přenos zatížení	11
4.3.6 Sonická metoda	11
4.3.7 Zkouška s odstupňovaným zatížením.....	11
4.4 Zkušební protokol.....	12
5. Hodnocení únosnosti	13
5.1 Všeobecně	13
5.2 Vyloučení chybných údajů.....	13
5.3 Hodnocení únosnosti vozovek na síťové úrovni.....	13
5.3.1 Vozovky s asfaltovým krytem	13
5.3.2 Vozovky s cementobetonovým krytem.....	14
5.4 Hodnocení únosnosti vozovek na projektové úrovni	14
5.4.1 Vozovky s asfaltovým krytem	14
5.4.2 Vozovky s cementobetonovým krytem.....	15
6. Literatura a další zdroje.....	15

Příloha 1: Hodnocení únosnosti vozovek na síťové úrovni

Příloha 2: Manuál pro práci s programem DG Laymed FWD

1. ÚVOD

Účelem této metodiky je definovat podmínky pro měření průhybů vozovek pozemních komunikací rázovým zařízením FWD (Falling Weight Deflectometer - zařízení skupiny A dle ČSN 73 6192), upřesnit způsoby vyhodnocení naměřených dat a hodnocení únosnosti vozovek.

Jde o výstup projektu Technologické agentury České republiky TA01030464: Optimalizace vyhodnocení výsledků měření rázovým zařízením FWD.

Tato metodika upřesňuje postupy jak provádět:

- měření průhybů vozovek s AB a CB krytem pomocí rázového zařízení FWD,
- hodnocení únosnosti vozovek na základě změřených průhybů

a nezabývá se měřením průhybů a hodnocením únosnosti vozovek zařízeními, jako jsou pákový průhyboměr, deflektograf a další zařízení, která se k tomuto účelu používají v zahraničí.

Metodika platí pro:

- silniční a dálniční vozovky včetně parkovišť,
- odstavné a manipulační plochy,
- v přiměřeném rozsahu i pro letištní dráhy a plochy.

Tato metodika navazuje na následující české normy a technické předpisy:

- ČSN 73 6192: Rázové zatěžovací zkoušky vozovek a podloží, 1996
- TP 87: Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek, 2010
- TP 87: Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek, příloha 4, 1996 (v současnosti již neplatné),
- TP 91: Rekonstrukce vozovek s cementobetonovým krytem, 1997
- TP 92: Navrhování údržby a oprav vozovek s cementobetonovým krytem, 2011
- TP 170: Navrhování vozovek pozemních komunikací + dodatek, 2010
- TP 207: Experiment přesnosti - Zařízení pro měření povrchových vlastností a průhybů vozovek pozemních komunikací, příloha D, 2009

Nově je/jsou zde:

- zavedeny parametry pro hodnocení únosnosti vozovky na síťové úrovni,
- definovány korekce průhybů a počítaných modulů pružnosti vozovek s AB kryty na teplotu (na základě provedených experimentů),
- uvedena aktualizace softwaru DG Laymed FWD, včetně nové, uživatelsky přívětivé masky pro vkládání vstupních údajů, pro výpočet a generování výsledků výpočtu,
- uveden návrh jak rozšířit srovnávací měření zařízení FWD dle TP 207 o výpočet modulů pružnosti jednotlivých vrstev a výpočet zbytkové životnosti vozovky.

Tato metodika je určena především pro:

- firmy provádějící měření průhybů vozovek rázovými zařízeními FWD a hodnocení únosnosti vozovek (za účelem sjednocení podmínek pro měření - vzdálenosti snímačů, definování podmínek pro měření, teplotní korekce naměřených průhybů, atd.),
- správce pozemních komunikací (hodnocení únosnosti na síťové a projektové úrovni, jako podklad pro plánování údržby a oprav vozovek),
- Ministerstvo dopravy (návrh jak rozšířit srovnávací měření zařízení FWD dle TP 207 o výpočet modulů pružnosti jednotlivých vrstev a výpočet zbytkové životnosti vozovky).

2. DEFINICE A ZKRATKY

2.1 Definice

Níže jsou uvedeny základní definice používané v této metodice, další definice jsou uvedeny v ČSN 73 6192 a TP 207.

Dynamický modul tuhosti vyjadřuje tuhost vozovky s CB krytem a počítá se jako podíl zatěžovací síly a průhybu povrchu při zkoušce provedené na středech desek CB krytu.

Ekvivalentní modul pružnosti je charakteristika únosnosti vozovky, která vychází z naměřených průhybů vozovky a teorie vrstevnatého lineárně pružného poloprostoru; zpravidla se používá jako nejjednodušší ukazatel hodnocení vozovek s AB krytem na úrovni sítě.

Index křivosti podkladu je charakteristika tuhosti podkladních vrstev vozovky, která se vypočítá jako rozdíl hodnoty průhybu povrchu ve vzdálenosti 600 mm a 1200 mm od středu zatěžovací desky.

Index křivosti povrchu je charakteristika tuhosti horních, zpravidla stmelovaných, vrstev vozovky, která se vypočítá jako rozdíl hodnoty průhybu povrchu pod středem zatěžovací desky a průhybu ve vzdálenosti 300 mm od středu zatěžovací desky.

Průhyb je svislý posun povrchu vozovky při zatížení.

Průhybová křivka je spojnice hodnot průhybů povrchu konstrukce vozovky, které se naměřily v bodech s různou vzdáleností od osy zatížení, přičemž body leží na společné přímce.

Rázový modul pružnosti je hodnota vyjadřující vztah napětí a pružného přetvoření zkoušeného prostředí při rázové zkoušce.

Rázové zařízení FWD je zařízení na vykonání rázové zatěžovací zkoušky, které tlumeným rázem zatěžuje povrch vozovky (případně vrstvu vozovky a podloží) zatížením odpovídajícím zatížení kolem nápravy těžkého nákladního vozidla a zároveň měří odezvu vozovky na toto dynamické zatížení.

Rázová zatěžovací zkouška je nedestruktivní zkouška, při které je konstrukce (vozovka s asfaltovým nebo cementobetonovým krytem, poklad vozovky nebo podloží) zatížena na povrchu tlumeným rázem; ten je generován pádem břemene na kruhovou zatěžovací desku prostřednictvím tlumícího systému (gumové tlumiče).

Tlumený ráz je průběh silového impulzu vyvolaný pádem břemene na kruhovou zatěžovací desku s gumovými tlumiči; je charakterizovaný zatěžovací silou a časem působení.

Únosnost vozovky je schopnost konstrukce vozovky a podloží přenášet dopravní zatížení, které se vyjadřuje zatížením nápravou nebo sestavou kol a počtem opakování těchto zatížení.

2.2 Použité zkratky

AB	asfaltobetonový
BCI	index křivosti podkladu (Base Curvature Index)
CB	cementobetonový
E_{ekv}	ekvivalentní modul pružnosti
E_r	rázový modul pružnosti příslušné vrstvy vozovky
F	síla
FWD	rázové zařízení pro měření na vozovkách (Falling Weight Deflectometer)
HWD	rázové zařízení pro měření na vozovkách, plochách určených pro nejvyšší zatížení, např. na letištích, skladovacích plochách (Heavy Weight Deflectometer)
ISM	dynamický modul tuhosti (Impulse Stiffness Modulus)
k_T	opravný součinitel na teplotu pro snímač v konkrétní vzdálenosti od osy zatížení
LTE	spolupůsobení (přenos zatížení) na hranách CB desek a trhlinách (Load Transfer Efficiency)

PK	pozemní komunikace
SCI	index křivosti povrchu (Surface Curvature Index)
T_{asf}	průměrná teplota asfaltových vrstev
T_p	teplota povrchu vozovky
TP	technické podmínky
y_i	průhyb ve vzdálenosti i od středu zatěžovací desky
μ	Poissonovo číslo

3. VŠEOBECNĚ

3.1 Princip rázové zatěžovací zkoušky

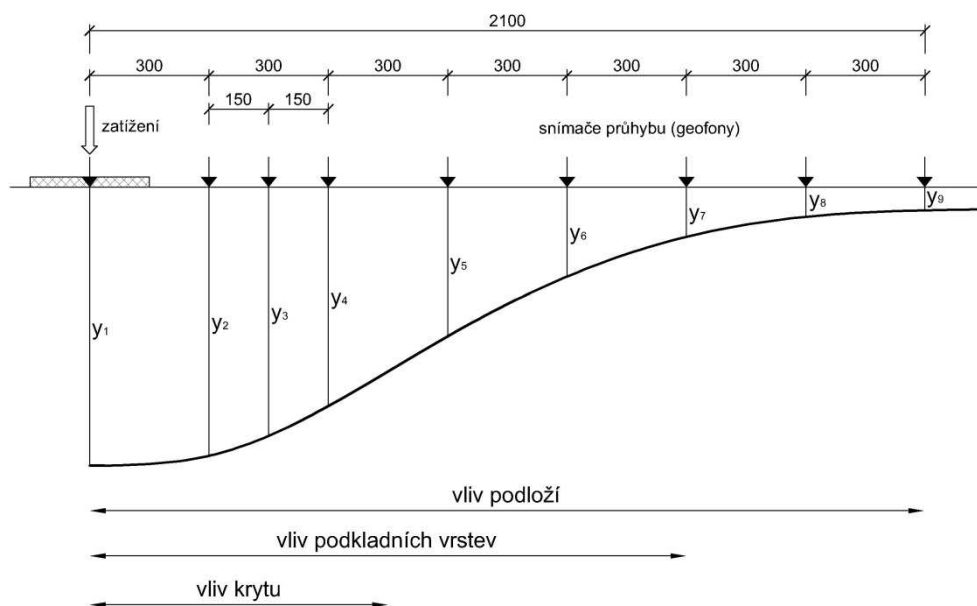
Rázová zatěžovací zkouška, při které je vozovka na povrchu zatížena tlumeným rázem, se pro účely měření průhybu vozovky a hodnocení únosnosti provádí rázovými zařízeními dle ČSN 73 6192, metody A.

Princip rázové zatěžovací zkoušky spočívá v měření odezvy (průhybů) vozovky při jejím zatížení tlumeným rázem. Zatížení je generováno pádem břemene na gumové tlumiče a přenáší se přes kruhovou zatěžovací desku na povrch zkoušeného místa.

Výstupem z měření na diagnostikovaném bodě jsou hodnoty průhybu v závislosti na vzdálenosti od středu zatížení pod definovaným zatížením charakterizujícím účinek zatížení těžkými nákladními vozidly, viz obr. 1.

Naměřená průhybová křivka je veličina podléhající následujícím vlivům:

- aplikovanému zatížení (velikosti zatěžovací síly, doba trvání a rozdělení zatížení pod zatěžovací deskou),
- skladbě konstrukce vozovky (počet, tloušťky a stav jednotlivých vrstev vozovky),
- parametrům podloží vozovky (deformační charakteristiky, homogenita, sezónní změny),
- klimatickým podmínkám (především vliv teploty a vlhkosti),
- kvalitativním parametrům rázového zařízení (přesnost, opakovatelnost, reprodukovatelnost).



Obr. 1: Průhybová křivka – vliv konstrukčních vrstev vozovky a podloží na velikost průhybu a tvar průhybové křivky

3.2 Účel rázové zatěžovací zkoušky

Účelem rázové zatěžovací zkoušky je naměřit průhyby (pořadnice průhybové křivky), které jsou podkladem pro výpočet:

- Vozovky s AB krytem:
 - na síťové úrovni (vyhledávací, pro účely plánování) – E_{ekv} , SCI, BCI (viz příloha 1),
 - na projektové úrovni (detailní, pro úseky zařazené do plánu oprav) – E_r pro asfaltové vrstvy, podkladní vrstvy a podloží (pomocí programů pro zpětný výpočet) a následný výpočet zbytkové životnosti a návrh zesílení vozovky na jednotlivých měřených bodech, jako podklad pro tvorbu homogenních sekcí.
- Vozovky s CB krytem:
 - na síťové úrovni (vyhledávací, pro účely plánování) – zpravidla se vychází pouze z výskytu poruch CB krytu (především trhlin, poškozených rohů desek a nerovností na spárách), případně z ISM počítaných na středech desek (viz příloha 1),
 - na projektové úrovni (detailní, pro úseky zařazené do plánu oprav) – E_r pro CB kryt, podkladní vrstvy a podloží (pomocí programů pro zpětný výpočet), LTE a následný výpočet zbytkové životnosti vozovky na jednotlivých měřených bodech, jako podklad pro tvorbu homogenních sekcí.

Vypočítané hodnoty charakterizují deformační charakteristiky konstrukcí vozovek, podkladních vrstev a podloží vozovek PK.

Výsledky souvislých měření na delším úseku pozemní komunikace jsou podkladem pro hodnocení homogenity konstrukce vozovky z hlediska únosnosti.

Další možné účely měření jsou:

- kontrola homogenity a kvality vrstev nově zřizované vozovky,
- stanovení degradačních funkcí proměnných parametrů vozovek,
- řešení projektů výzkumu a vývoje apod.

3.3 Rázové zařízení FWD

Rázové zařízení FWD (HWD) dodávají různé firmy. V ČR a na Slovensku se můžeme setkat se zařízeními firem Carl Bro a jeho předchůdce Phoenix (Dánsko), Dynatest (Dánsko), Rodos (ČR) a Kuab (Švédsko), viz obr. 2.



Obr. 2: Ukázky rázových zařízení FWD – Carl Bro (vlevo nahoře), Dynatest (vpravo nahoře), Rodos (vlevo dole), Kuab (vpravo dole)

Zařízení se skládá z jednotlivých částí popsaných níže.

3.3.1 Měřicí systém

- Hlavní součástí systému mimo přívěsu je zatěžovací zařízení a měřicí rám se snímači.
- Zatěžovací zařízení sestává ze zatěžovací desky, siloměru, kovadliny, gumových nárazníků, zvedáku, základní zatěžovací hmoty a přídavných segmentů zatížení.
- Zatěžovací zařízení ovládá hydraulický systém.
- Vyvozené zatížení je převedeno z kovadliny přes siloměr na zatěžovací desku.
- Zatěžovací deska je tuhá nebo dělená o průměru 300 mm (pro speciální aplikace se používají i jiné průměry).
- Zatěžovací systém musí umožnit vyvození zatěžovací síly v rozsahu od 12 kN, pro masivní konstrukce (např. letištní vozovky) až do 250 kN.
- Gumové nárazníky slouží pro zatížení tlumeným rázem a jejich počtem/druhem je možno nastavit požadovanou dobu zatížení od 25 do 60 ms.
- Měřicí rám je osazen minimálně sedmi snímači, které zaznamenávají změnu polohy povrchu vozovky na základě měření zrychlení, rychlosti nebo výchylky v měřeném místě s přesností do 1 μm (základní rozmístění snímačů je po 300 mm od středu zatěžovací desky; některá zařízení mají snímače umístěny v podélném směru na obě strany od středu zatížení a také v příčném směru).
- Měřicí proces je řízen z notebooku z tažného vozidla.
- Rázové zařízení je osazeno měřičem ujeté vzdálenosti s přesností do 0,5 m / 1 km.
- Rázové zařízení je osazeno 2 teploměry pro záznam teploty vzduchu a povrchu vozovky s přesností do 0,2 $^{\circ}\text{C}$.

3.3.2 Ovládací software

- zobrazuje a zaznamenává ujetou vzdálenost,
- zobrazuje a zaznamenává teplotu vzduchu a povrchu vozovky,
- umožňuje zadat nebo zaznamenat teplotu uvnitř asfaltových vrstev (CB krytu),
- umožňuje manuální a automatické ovládání zatěžovacího zařízení,
- umožňuje nastavení velikosti požadované zatěžovací síly, počtu úderů, prodlevy mezi jednotlivými údery apod.,
- umožňuje nastavit délku časového okna záznamu průběhu zatěžovací síly a hodnot na jednotlivých snímačích min. 400 ms, pro tuto dobu umožňuje export časového průběhu hodnot průhybů na všech snímačích a průběhu síly do souboru (důležité pro využití zařízení pro výzkumné účely),
- umožňuje vkládat poznámky k výsledkům měření,
- umožňuje prohlížení naměřených dat v grafické a tabulkové podobě (pozice při měření, průběhy průhybů a síly, hodnoty dotykového tlaku, teploty) a export těchto dat do souboru pro zpětný výpočet,
- s výstupním souborem s naměřenými daty musí být schopen pracovat příslušný software pro zpětný výpočet.

3.3.3 Kalibrace a ověření zařízení

Kalibrace jednotlivých součástí měřícího zařízení se provádí dle pokynů výrobce minimálně v četnostech doporučených výrobcem nebo v případě jakýchkoliv pochybností o správnosti naměřených hodnot.

Ověření správnosti naměřených průhybů zařízení FWD se provádí v pravidelných intervalech v rámci srovnávacího měření (experimentu přesnosti) podle TP 207. Rázová zařízení FWD, která splní kritérium opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, obdrží od Ministerstva dopravy oprávnění k měření průhybů vozovek pozemních komunikací. Organizují se také pravidelná mezinárodní srovnávací měření, např. nizozemskou organizací CROW (Technology platform for infrastructure, traffic, transport and public space) nebo v rámci výzkumných projektů, např. SPENS (Sustainable Pavement for European New member States).

Ověření správnosti podle TP 207 nezahrnuje srovnání vypočtených rázových modulů pružnosti jednotlivých vrstev, vypočtené zbytkové životnosti ani návrhu zesílení vozovky.

3.4 Software pro zpětný výpočet a výpočet zbytkové životnosti

Na hodnocení únosnosti vozovek na projektové úrovni se používají komplexní výpočtové programy.

K tomuto účelu se zpravidla provádí porovnání vypočítané zbytkové životnosti vozovky s požadovanou životností. Zbytková životnost vozovky se určuje z hodnot napětí vypočítaných ve zjednodušeném modelu vozovky, přičemž se počítá s rázovými moduly pružnosti vrstev určenými zpětným výpočtem z průhybové křivky naměřené na povrchu vozovky rázovým zařízením FWD. Zohledňuje se únava materiálu a dopravní zatížení vozovky.

Moduly pružnosti jednotlivých vrstev modelu vozovky se určují zpětným výpočtem v každém měřeném bodě. Principem výpočtu je postupné přibližování vypočítané průhybové křivky k naměřené křivce v měřeném bodě, dokud není dosaženo povoleného rozdílu mezi naměřenou a vypočítanou průhybovou křivkou.

V případě, že je vozovka hodnocena jako neúnosná, navrhuje se její zesílení nebo rekonstrukce. Tloušťka zesílení se odvíjí od předpokládaného dopravního zatížení, kvality materiálu zesilující vrstvy, únavových procesů ve vozovce apod.

Tyto výpočty je možné provádět některým z programů pracujících na základě řešení vícevrstvého lineárně pružného poloprostoru.

V ČR a na Slovensku používají provozovatelé rázových zařízení FWD následující programy: Alize (Francie), Canuv (Slovensko), DG Laymed FWD (ČR), Elmod (Dánsko), LayEPS (ČR), Modulus (UK), Padal (UK), Pavers (Nizozemsko), Pcase (USA), RoSy Design (Dánsko).

3.4.1 Aktualizace softwaru DG Laymed FWD

V rámci řešení projektu TA01030464 byl aktualizován software DG Laymed FWD, který byl poskytnut všem provozovatelům FWD zařízení vlastním oprávněním Ministerstva dopravy k měření průhybů vozovek PK a také Ředitelství silnic a dálnic, oddělení silniční databanky.

Uživatelský manuál k tomuto softwaru je uveden v příloze 2 této metodiky.

3.4.2 Využití softwaru DG Laymed FWD v rámci experimentu přesnosti

Experiment přesnosti (srovnávací měření jednotlivých zařízení FWD) podle TP 207 se týká hodnocení naměřených průhybů a nezahrnuje srovnání vypočtených rázových modulů pružnosti jednotlivých vrstev, vypočtené zbytkové životnosti ani návrhu zesílení vozovky. K tomuto účelu se podle této metodiky doporučuje použít:

1) Softwaru, které běžně používají jednotliví provozovatelé FWD zařízení, při dodržení níže uvedených sjednocujících podmínek:

- provedení korekce průhybů na porovnávací zatěžovací sílu,
- provedení korekce modulů pružnosti asfaltových vrstev vozovky na teplotu, dle kap. 5.4.1,
- při zpětném výpočtu se počítá s jednotným počtem vrstev, zpravidla stačí třívrstvý systémem (kryt, podkladní vrstva a podloží),
- při zpětném výpočtu se zadávají pro jednotlivé vrstvy totožné parametry (tloušťka, Poissonovo číslo, spolupůsobení vrstev na styčných plochách apod.),
- při výpočtu zbytkové životnosti vozovky se postupuje v souladu s TP 170 a používají se stejné vstupní údaje (dopravní zatížení, návrhová úroveň porušení, klimatické poměry apod.).

2) Souběžně s tím musí být výpočet pro kontrolu proveden také softwarem DG Laymed FWD, aby se minimalizovaly vlivy použití různých softwarů.

4. PŘÍPRAVA A POSTUP MĚŘENÍ PRŮHYBŮ VOZOVEK

4.1 Všeobecně

Před započítáním vlastního měření je nutné mimo vlastní diagnostikované body provést několik zkušebních měření za účelem zjištění funkčnosti všech součástí zařízení.

Samostatné měření si vyžaduje vykonat na každém měřeném bodě tyto úkony:

- nastavit způsob měření (hodnota zatěžovací síly, počet měřících úderů apod.),
- najet rázovým zařízením na měřený bod s požadovanou přesností (dle účelu a kroku měření),
- zatáhnout ruční brzdu,
- pomocí počítače dát povel, který obsahuje:
 - usazení zatěžovací desky a měřícího nosníku na povrch diagnostikovaného bodu,
 - provedení usazovacího úderu,
 - provedení měřících úderů,
 - automatické uložení naměřených hodnot do paměti počítače,

- zdvih zatěžovací desky a měřícího nosníku.
- odbrzdění vozidla a přesun rázového zařízení na další měřený bod.

4.2 Měření průhybů na vozovkách s asfaltovým krytem

4.2.1 Podmínky měření

Při měření průhybů vozovek PK s asfaltovým krytem je nutné dodržet následující podmínky:

- rozmístění snímačů je 0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 mm od osy zatížení, plus případné další pro zpřesnění tvaru křivky (nejčastěji 450 a 2100 mm od osy zatížení),
- na měření je nutné použít zatěžovací desku o průměru 300 mm,
- na měření je nutné použít zatěžovací sílu 50 ± 5 kN,
- povrch měřeného místa musí zabezpečit dostatečné dosednutí zatěžovací desky po celé její ploše a snímačů po celé délce měřícího rámu,
- zatěžovací deska a měřící nosník se snímači průhybu musí být umístěny tak, aby kraj zatěžovací desky i poslední snímač průhybu byly vzdáleny od trhlin a pracovních spár minimálně 0,5 m,
- teplota povrchu vozovky při měření musí být v rozsahu 5 - 30 °C.

4.2.2 Stanovení bodů pro měření

Měření se musí provádět v pravé stopě kol těžkých nákladních vozidel ve směru jejich jízdy.

V návaznosti na účel měření a stav vozovky je třeba volit optimální vzdálenost mezi jednotlivými body měření. Maximální vzdálenost měřících bodů vychází z doporučení, uvedeném v kap. 5.1.1 TP 87:

- 25 m při návrhu zesílení nebo opravě vozovek (projektová úroveň),
- 100 - 250 m při posuzování vozovky pro rozhodnutí o provedení údržby nebo opravy (síťová úroveň).

4.2.3 Měření teplot

Při měření průhybů na síťové úrovni se měří pouze teplota povrchu vozovky na každém měřeném bodě za pomoci infračerveného teploměru, který je součástí rázového zařízení FWD.

Při měření průhybů na projektové úrovni se měří teplota asfaltových vrstev vozovky na vybraných místech v hloubce 40 mm podle ČSN 73 6192. Počet těchto míst a jejich lokalizace záleží na délce sledovaného úseku vozovky. Ideální je kontinuální měření teplot během celého měření se záznamem. Pokud není prováděno kontinuální, pak musí být měřena teplota minimálně každou hodinu. Teploměry nesmí být umístěny na zastíněném místě. Pokud se však testovaná vozovka nachází v zastíněném prostoru, pak je nutno měřit teploty na zastíněných plochách.

4.3 Měření průhybů na vozovkách s cementobetonovým krytem

4.3.1 Podmínky měření

Při měření průhybů vozovek PK s CB krytem je nutné dodržet následující podmínky:

- rozmístění snímačů je 0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 mm od osy zatížení, plus případné další (nejčastěji 2100 mm od osy zatížení); v případě měření LTE je potřeba mít snímač také ve vzdálenosti 200 mm od osy zatížení,
- na měření je nutné použít zatěžovací desku o průměru 300 mm (u letišť je možno použít desku o větším průměru),
- na měření je nutné použít takovou zatěžovací sílu, aby na snímači ve vzdálenosti 1800 mm od osy zatížení byl vyvozen průhyb alespoň 40 μ m:

- u letištních ploch je možno zvýšit zatěžovací sílu až na 250 kN,
- vyšší velikost rázu se doporučuje jen v ojedinělých případech a v omezeném počtu zkoušek, např. při provádění rázových zkoušek provedených s odstupňovaným zatížením (vyšší velikosti rázu mohou rozkmitat desku do nedefinovatelných frekvencí, prodlužují dobu zkoušky a zbytečně namáhají vlastní rázové zařízení).
- hlavními podklady pro posouzení, zda je deska vhodně podepřena pro provedení zkoušky, je sonická metoda (kap. 4.3.6) a vyhodnocení výsledků rázových zkoušek provedených s odstupňovaným zatížením (kap. 4.3.7),
- povrch měřeného místa musí zabezpečit dostatečné dosednutí zatěžovací desky po celé její ploše a snímačů po celé délce měřicího rámu,
- teplota povrchu krytu CB vozovek musí být vyšší než 5 °C:
 - vhodné období je charakterizováno nulovým, resp. velmi malým teplotním a vlhkostním spádem v CB desce, který ještě nezpůsobuje deformaci desek a ztrátu podporování desky v celé ploše, na které je uložena zatěžovací deska zařízení FWD a nosník se všemi snímači,
 - doporučuje se provádět zkoušky v noci při malém záporném teplotním spádu, resp. ve dne při zatažené obloze bez velkých teplotních změn,
 - vzhledem k obtížím, jak měřit teplotní spád v CB desce (zejména problémy s lineárním a nelineárním teplotním spádem a dále problémy spojené s přesným měřením teploty povrchu spodního líce CB desky), nejsou definovány povolené hodnoty teplotních spádů,
 - v období kladného teplotního spádu se nesmí rázové zkoušky provádět,
 - nedoporučuje se plánovat zkoušky v měsících prosinec až březen a květen až srpen,
 - zkoušky přenosu zatížení (spolupůsobení) na hranách desek jsou výrazně ovlivněny průměrnou teplotou desky (t.j. rozevřením spáry, které vytváří zaklínění desek na spáře a tím i přenos zatížení) – proto je nutno uvádět teplotu desky minimálně ve 4 hloubkách CB desky, viz kapitola 4.3.3
 - měření teplotního (případně vlhkostního) spádu neposkytuje vhodné podklady; slouží při měření průhybů na střezech desek jako pomocné kritérium a při měření spolupůsobení na hranách desek jako kritérium pro relativní porovnání následných měření, resp. pro vyhodnocení přenosu zatížení vzhledem k rozevření spár posuzovaných desek.

4.3.2 Stanovení bodů pro měření

Při stanovení bodů pro měření průhybů a hodnocení únosnosti se vychází z výskytu konstrukčních poruch na jednotlivých deskách CB krytu. Minimální doporučená vzdálenosti měřících bodů není dána. Zpravidla se provádí měření v nejméně zatíženém jízdním pruhu vícepruhových komunikací (kap. 4.2.1.1 TP 92).

Upřesnění pro jednotlivé typy zkoušek je uvedeno níže:

- měření průhybů na střezech CB desek – v ose jízdního pruhu,
- měření spolupůsobení CB desek na příčných spárách:
 - bez kluzných trnů – v ose jízdního pruhu; po dohodě se zadavatelem diagnostiky i v pravé stopě kol těžkých nákladních vozidel,
 - s trny zabudovanými po celé šíři pásu při betonáži – v ose jízdního pruhu; po dohodě se zadavatelem diagnostiky i v pravé stopě kol těžkých nákladních vozidel,
 - s trny dodatečně vkládanými do pojížděných stop vozidel (obvykle 3 ks) – nad prostředním trnem v pravé stopě těžkých nákladních vozidel; po dohodě se zadavatelem diagnostiky i v ose jízdního pruhu.
- měření spolupůsobení CB desek na podélných a volných hranách:
 - doporučuje se měřit zejména v případech, kdy jsou tyto hrany často pojížděné těžkými nákladními vozidly – např. parkoviště, vícepruhové komunikace, letištní dráhy a plochy, atd.

4.3.3 Měření teplot

Při měření průhybů na síťové i projektové úrovni se měří teplota vozovky podle ČSN 73 6192, s doplněním o následující údaje, za účelem měření teplotního spádu a průměrné teploty CB desky minimálně ve 4 hloubkách:

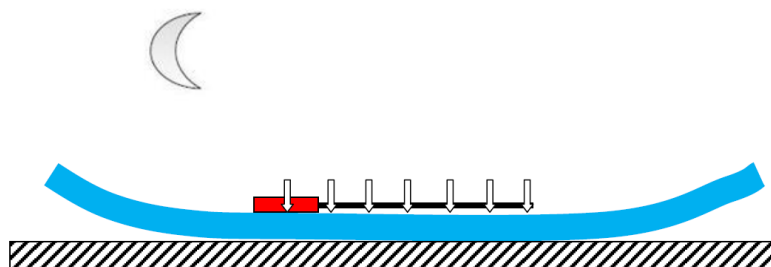
- povrch vozovky – v hloubce 3 - 4 mm (nejedná se o teplotu horního líce desky),
- 40 a 70 mm,
- 20 mm nad spodním lícem CB desky.

Průměrná teplota desky CB krytu je průměr z teplot měřených ve všech čtyřech hloubkách.

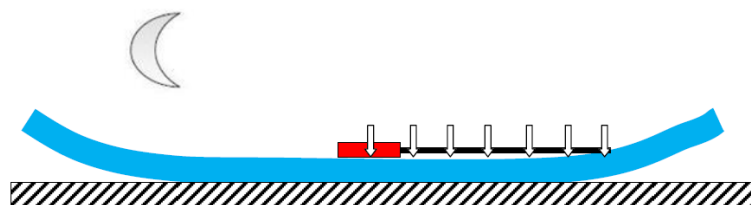
Ideální je kontinuální měření teplot během celého měření se záznamem. Pokud není prováděno kontinuální, pak musí být měřena teplota minimálně každou hodinu. Teploměry nesmí být umístěny na zastíněném místě. Pokud se však testované CB desky nachází v zastíněném prostoru, pak je nutno měřit teploty na zastíněných deskách.

4.3.4 Rázová zkouška na středech CB desek

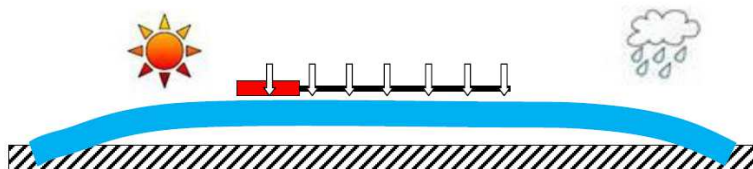
- zatěžovací deska a měřicí nosník se snímači průhybu musí být umístěny ve střední části testované CB desky tak, aby kraj zatěžovací desky i poslední snímač průhybu byly vzdáleny od spár a případných trhlin minimálně 0,5 m, lépe 0,75 m,
- grafické znázornění správného a nesprávného umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku je znázorněno na obrázcích 3 až 5,
- pokud jsou výsledky rázové zkoušky použity při zpětném výpočtu modulů pružnosti jednotlivých vrstev konstrukce, pak musí být CB deska pod měřícím nosníkem a pod zatěžovací deskou bez jakýchkoliv trhlin a spár (pokud během měření záznam průhybové číše ukáže umístění trhliny v podkladních vrstvách - zlomená průhybová číše nebo nepřiměřený skokový posun, pak je nutno zkoušku opakovat na další desce).



Obr. 3: Správné umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku – nulový, malý teplotní spád (v noci, ráno, večer, při zatažené obloze)



Obr. 4: Nesprávné umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku v případě umístění zatěžovací desky do geometrického středu testované CB desky (krajní snímače průhybu se mohou nacházet na nepodporované části CB desky)

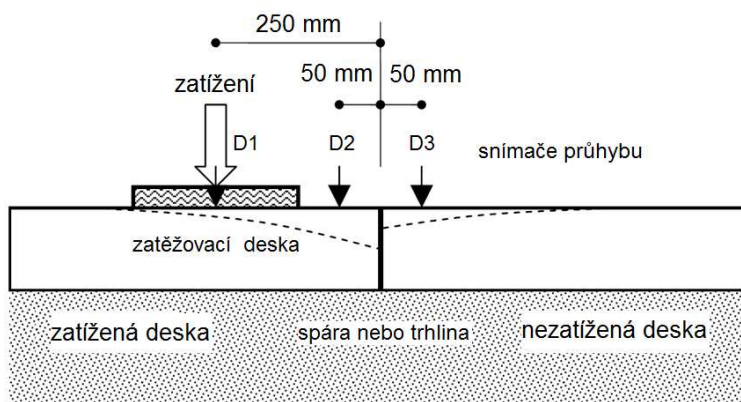


Obr. 5: Nesprávné umístění zatěžovací desky a měřícího nosníku v případě kladného teplotního spádu (přes den na slunci, za deště)

4.3.5 Rázová zkouška na hranách desek - přenos zatížení

Při posuzování přenosu zatížení se rázové zařízení FWD umísťuje tak, aby se měřená spára (trhlina) nacházela mezi snímači průhybu, které jsou umístěny ve vzdálenostech 200 a 300 mm od středu zatěžovací desky (jiná kombinace snímačů průhybu v jiných vzdálenostech není přípustná).

Doporučuje se ověřit umístění kluzných trnů (resp. kotev) ve spárách a posoudit případná defektní uložení. Současně je nutno znát i tloušťku desky v místech uložení trnů.



Obr. 6: Schéma rozmístění zatěžovací desky a snímačů při měření spolupůsobení desek na hranách a trhlinách

4.3.6 Sonická metoda

Pomocí sonické metody je možné přesně určit, zda je CB deska podporovaná u hran a rohů nebo zdeformovaná v důsledku teplotního a vlhkostního spádu. Na základě dlouhodobých zkušeností je známo, že se charakter ozvěny mění vlivem dutiny pod CB deskou.

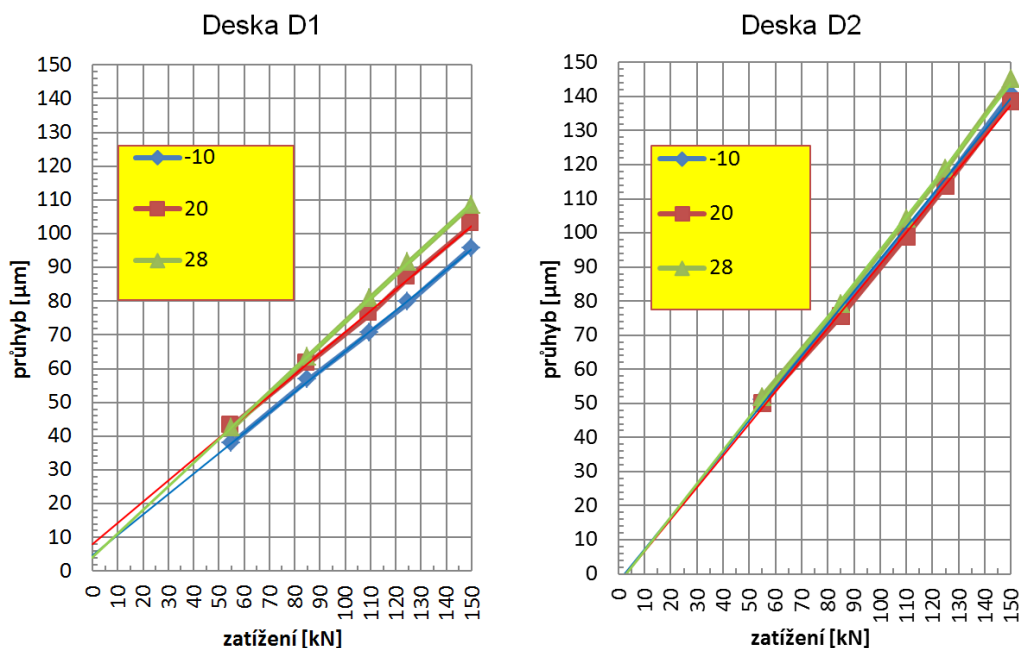
Princip sonické metody spočívá v subjektivním vyhodnocení zvukové odezvy, která je vyvozena pádem ocelové koule hmotnosti 4 - 5 kg z výšky cca 1 m na zkoušené místo CB desky. Hlubší (dutý) tón indikuje dutinu pod deskou.

Sonická metoda umožňuje jednoduše a rychle stanovit plošný rozsah případné ztráty podporování desek s přesností ± 50 mm.

4.3.7 Zkouška s odstupňovaným zatížením

Další možností jak hodnotit přítomnost eventuálních dutin pod CB deskou, je provedení rázových zkoušek provedených s odstupňovaným zatížením na stejném místě (např. 50 kN, 75 kN, 90 kN a 120 kN) a následné grafické vynesení závislosti mezi zatěžovací silou (osa x) a průhybem měřeným ve středu zatěžovací desky (osa y).

Pokud je deska podporována, uvedená závislost by měla být lineární a protínat osu y přibližně v počátku souřadnic. Špatné podporování a eventuální přítomnost dutiny je charakterizováno protnutím osy y regresní přímkou nad počátkem souřadnic, viz obr. 7.



Obr. 7: Způsob hodnocení přítomnosti dutin pod CB deskou pomocí rázové zkoušky s odstupňovaným zatížením (deska D2 je dokonale podepřena, u desky D1 především zkouška označená „20“ odhaluje výskyt dutiny pod deskou)

4.4 Zkušební protokol

Zkušební protokol se zpracovává pro celý měřený úsek a musí obsahovat následující informace:

- identifikační údaje měřeného úseku – třída a číslo komunikace, počáteční a koncový uzlový bod,
- datum měření,
- směr měření, měřený pruh,
- druh povrchu,
- typ použitého měřicího zařízení,
- jméno osob, které vykonaly měření,
- poloměr zatěžovací desky,
- vzdálenost snímačů od osy zatížení,
- naměřené údaje pro každý měřený bod, které obsahují:
 - staničení jednotlivých bodů,
 - velikost zatěžovací síly a dotykového tlaku,
 - hodnoty průhybů všech snímačů průhybu,
 - teplota vzduchu a vozovky,
 - čas měření.
- veškeré informace, které by mohly ovlivnit naměřené výsledky (počasí, poruchy vozovky atd.)
- při měření na CB deskách musí být navíc uvedena:
 - poloha umístění zatěžovací desky a měřicího nosníku,
 - rozměry CB desek,
 - hodnocení sonické metody na středech, hranách a v rozích zkoušených CB desek.

5. HODNOCENÍ ÚNOSNOSTI

5.1 Všeobecně

Způsob vyhodnocení naměřených údajů závisí od účelu, na který mají být výsledky hodnocení použity. Vyhodnocení se může provést pro:

- orientační hodnocení únosnosti na síťové úrovni pro účely plánování,
- hodnocení únosnosti na projektové úrovni pro úseky vozovek zařazené do plánu oprav,
- další účely uvedené v kapitole 3.2.

5.2 Vyloučení chybných údajů

Během měření se mohou vyskytnout systematické i náhodné chyby.

Systematické chyby způsobené zařízením je nutné odstranit při kalibraci zařízení.

Náhodné chyby vznikající při měření ovlivňují získané výsledky a následné vyhodnocení, a proto se musí takové údaje před vyhodnocením vyloučit.

Chybné údaje se vyloučí z vyhodnocení, jestliže:

- hodnota zatěžovací síly není v rozsahu 50 ± 5 kN (vozovky s AB krytem) a $75-250$ kN ± 10 % (vozovky s CB krytem),
- průhybová křivka nemá klesající tendenci s nárůstem vzdálenosti od středu zatěžovací desky (s výjimkou měření přenosu zatížení na spárách a trhlinách),
- výsledky opakovaného měření na stejném místě v rámci jednoho měření se při jednotlivých pádech závaží ze stejné výšky liší o víc jak 5 %,
- teplota AB vozovky při měření není v rozsahu 5 - 30 °C,
- desky CB krytu jsou zdeformovány teplotním a vlhkostním spádem tak, že neumožňují získání všech korektních průhybů.

5.3 Hodnocení únosnosti vozovek na síťové úrovni

Toto hodnocení vychází pouze z naměřených průhybů, nepočítá se zde zbytková životnost vozovky ani návrh zesílení.

5.3.1 Vozovky s asfaltovým krytem

Při zpracování získaných údajů z vozovek s AB krytem na síťové úrovni se naměřené průhyby v prvním kroku opravují na velikost zatěžovací síly a dále na teplotu vozovky. Vypočítá se ekvivalentní modul pružnosti, případně indexy charakterizující stav asfaltových vrstev, podkladních vrstev a podloží v každém diagnostikovaném bodě.

To umožňuje provádět poměrové srovnání únosnosti vozovek s obdobnou konstrukcí (tloušťkou konstrukce vozovky a skladbou vrstev) a následné vytváření homogenních sekcí.

Dokud nebudou stanoveny hodnoty únosnosti pro klasifikační stupně 1 až 5 v ČR, může být využito hodnocení prováděné na Slovensku [9].

Podrobnosti k hodnocení únosnosti vozovek s AB krytem na síťové úrovni jsou uvedeny v příloze 1 této metodiky.

V kapitole P 1.1.2 je uveden vzorec pro přepočtení průhybů naměřených na jednotlivých snímačích při různé teplotě asfaltových vrstev, na srovnávací teplotu 20 °C, jako jeden z výstupů projektu TA01030464.

5.3.2 Vozovky s cementobetonovým krytem

Při hodnocení únosnosti vozovek s CB krytem se zpravidla vychází pouze z výskytu poruch CB krytu (především trhlin, poškozených rohů desek a nerovností na spárách).

Na základě průhybu naměřeného v ose zatížení a vypočítaného dynamického modulu tuhosti se může provádět poměrové srovnání únosnosti vozovek s obdobnou konstrukcí (tloušťkou konstrukce vozovky a skladbou vrstev), které umožní zpřesnění při vytváření homogenních sekcí.

Podrobnosti k hodnocení únosnosti vozovek s CB krytem na síťové úrovni jsou uvedeny v příloze 1 této metodiky.

5.4 Hodnocení únosnosti vozovek na projektové úrovni

Jako podklad je nutné zajistit dostatečné informace o tloušťkách jednotlivých vrstev včetně kvality podloží (projektové podklady, jádrové vývrty, georadarová měření, kopané sondy do podloží včetně statických a penetračních zkoušek), viz TP 87 a TP 92.

5.4.1 Vozovky s asfaltovým krytem

Hodnocení únosnosti na projektové úrovni se provádí pomocí softwarů uvedených v kapitole 3.4 a zahrnuje výpočet zbytkové životnosti a návrh zesílení vozovky.

Jednotlivé kroky výpočtu jsou následující:

- zkompletovat vstupní údaje potřebné na hodnocení únosnosti a stanovení tloušťky zesílení,
- sestavit zjednodušený model konstrukce vozovky sloučením materiálově příbuzných vrstev,
- z naměřené průhybové křivky na povrchu vozovky určit hodnoty rázových modulů pružnosti vrstev zjednodušeného modelu (tzv. zpětný výpočet),
- vypočítat napětí v kritických místech modelu konstrukce vozovky,
- vypočítat zbytkovou provozní výkonnost jednotlivých vrstev modelu a určit kritickou vrstvu,
- vypočítat zbytkovou životnost a porovnat ji s požadovanou hodnotou,
- pokud je vozovka hodnocena jako neúnosná (vypočítaná zbytková životnost je menší jak požadovaná), vypočítat napětí v upraveném modelu vozovky, který vznikne po přidání zesilující vrstvy,
- výpočty opakovat pro různé tloušťky zesílení, dokud není požadavek splněn.

V běžných případech konstrukcí vozovek se doporučuje pracovat s třívrstevným modelem, zahrnujícím asfaltové vrstvy, podkladní vrstvy a podloží.

Při zpracování naměřených dat pomocí programů na zpětný výpočet se zpravidla neprovádí přepočítání průhybů na porovnávací teplotu, ale tato korekce se provádí přímo na modulech pružnosti asfaltových vrstev.

V rámci řešení projektu TA01030464 byla na souboru měření, při použití třívrstvého modelu, zjištěna následující závislost modulů pružnosti asfaltových vrstev na teplotě:

$$E1_{20} = E1_m \cdot e^{-0,0387 \cdot (20 - T)}, \quad (1)$$

- kde $E1_{20}$ - modul pružnosti asfaltové vrstvy přepočítaný na porovnávací teplotu 20 °C [MPa],
 $E1_m$ - modul pružnosti asfaltové vrstvy naměřený při teplotě T [MPa],
 e - Eulerovo číslo,
 T - naměřená teplota [°C].

Tato závislost je podobná jako závislost, kterou uvádí závěrečná zpráva projektu COST 336 a která se používá na Slovensku.

5.4.2 Vozovky s cementobetonovým krytem

Hodnocení únosnosti vozovek s CB krytem je složitější a neprovádí se tak často, jako hodnocení únosnosti vozovek s AB krytem.

Při výpočtech se mimo průhybů naměřených na středech desek zohledňují také další faktory, jako velikost desek, způsob vyztužení spár, přenosy zatížení na spárách a trhlinách apod.

K dispozici nejsou softwary, které by toto vyhodnocení prováděly komplexně.

Ověřování správnosti výsledků se doporučuje pomocí softwarů pracujících s metodou konečných prvků. Podrobnosti k těmto výpočtům nejsou v této metodice uvedeny, pouze je níže uveden způsob výpočtu přenosu zatížení na spáře, který se často používá.

Výpočet přenosu zatížení (spolupůsobení) na spárách CB desek:

Přenos zatížení na spárách sousedících CB desek (viz obr. 6) charakterizuje hodnota *LTE*, která se vypočítá z průhybů naměřených na hranách zatížené a nezatížené CB desky podle vztahu:

$$LTE = \frac{y_{300}}{y_{200}} \cdot 100, \quad (2)$$

kde *LTE* - hodnota přenosu zatížení [%],

*y*₃₀₀ - průhyb naměřený na nezatížené CB desce, 300 mm od osy zatížení [mm],

*y*₂₀₀ - průhyb naměřený na zatížené CB desce, 200 mm od osy zatížení [mm].

Přenos zatížení na spárách je parametr výrazně závislý na teplotně-vlhkostním spádu a zejména průměrné teplotě desky - což prakticky neumožňuje relativní srovnávání naměřených hodnot v různých časových obdobích.

6. LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE

Normy a technické předpisy

- [1] ČSN 73 6192: Rázové zatěžovací zkoušky vozovek a podloží, 1996
- [2] STN 73 6192: Rázová zaťažovacia skúška vozoviek a podložia, 2011
- [3] TP 87: Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek, 2010
- [4] TP 87: Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek, příloha 4: Rázová zařízení - Měření únosnosti, stanovení zbytkové doby životnosti a zesílení netuhých vozovek, 1996 (v současnosti neplatné)
- [5] TP 91: Rekonstrukce vozovek s cementobetonovým krytem, 1997
- [6] TP 92: Navrhování údržby a oprav vozovek s cementobetonovým krytem, 2011
- [7] TP 170: Navrhování vozovek pozemních komunikací + dodatek, 2010
- [8] TP 207: Experiment přesnosti - Zařízení pro měření povrchových vlastností a průhybů vozovek pozemních komunikací, příloha D: Experiment přesnosti zařízení měřících průhyb vozovek pozemních komunikací, 2009
- [9] TP 01/2009: Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB, Bratislava, MDPaT (Slovensko), 2009
- [10] Design Manual for Roads and Bridges 7.3.2. HD 29: Data for Pavement Assessment, Highways Agency (UK), 2008
- [11] Design Manual for Roads and Bridges 7.3.3. HD 30: Maintenance Assessment Procedure, Highway Agency (UK), 2008

Výzkumné zprávy

- [12] COST 336 Final report: Use of Falling Weight Deflectometer in Pavement Evaluation, 2nd edition Luxembourg, 392 p., 2005
- [13] Závěrečná zpráva projektu TA01030464: Optimalizace vyhodnocení výsledků měření rázovým zařízením FWD. Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2013

Publikace

- [14] Komačka, J., Benkó, Z. Diagnostika únosnosti asfaltových vozoviek deflektometrami FWD: Žilinská univerzita v Žilině, 137 p., ISBN 978-80-554-0327-4, 2011

PŘÍLOHA 1: HODNOCENÍ ÚNOSNOSTI VOZOVEK NA SÍŤOVÉ ÚROVNI

P 1.1 Hodnocení únosnosti vozovek s AB krytem

P 1.1.1 Přepočítání průhybu na velikost porovnávací síly

Při měření průhybů vozovek na jednotlivých bodech má být hodnota zatěžovací síly 50 kN. Tato síla je však proměnlivá i při pádu závaží ze stejné výšky. Naměřené průhyby je tak nutné přepočítat na porovnávací sílu 50 kN. Tato síla odpovídá zatížení dvojmontáže návrhové nápravy podle TP 170. Přepočítání se vykoná dle vztahu:

$$y_{R(50)} = y_{R,m} \cdot \frac{F_C}{F_m}, \quad (1)$$

kde: $y_{R(50)}$ - průhyb ve vzdálenosti R od osy zatížení přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN [mm],
 $y_{R,m}$ - průhyb naměřený při skutečném zatížení silou F_C ve vzdálenosti R od osy zatížení [mm],
 F_C - porovnávací zatěžovací síla $F_C = 50$ kN,
 F_m - zatěžovací síla při měření [kN].

Přepočítání podle vztahu (1) platí, jestliže je zatěžovací síla F_m v rozsahu 45 – 55 kN.

Vzdálenosti R odpovídají poloze snímačů průhybu od osy zatížení: 0 mm (y_0), 300 mm (y_{300}), 600 mm (y_{600}), 900 mm (y_{900}), 1200 mm (y_{1200}), 1800 mm (y_{1800}).

P 1.1.2 Přepočítání na porovnávací teplotu

Průhyby naměřené na povrchu asfaltových vozovek je nutné upravit na teplotu při měření, protože ta ovlivňuje tuhost asfaltových vrstev a tím i velikost průhybu.

V prvním kroku se stanoví průměrná teplota asfaltových vrstev T_{asf} ze vztahu:

$$T_{asf} = T_p + \Delta T, \quad (2)$$

kde: T_p - teplota povrchu vozovky naměřená rázovým zařízením [°C],
 ΔT - teplotní rozdíl mezi teplotou povrchu vozovky a průměrnou teplotou asfaltových vrstev dle tabulky P1.1 [°C].

Tabulka P1.1: Teplotní rozdíl mezi teplotou povrchu vozovky a průměrnou teplotou asfaltových vrstev (převzato z [9])

Hodina měření v rámci dne	Teplota povrchu vozovky (T_p) v °C					
	$0 < T_p \leq 5$	$5 < T_p \leq 10$	$10 < T_p \leq 15$	$15 < T_p \leq 20$	$20 < T_p \leq 25$	$25 < T_p \leq 30$
0:00 - 1:00						
1:00 - 2:00						
2:00 - 3:00						
3:00 - 4:00	+ 2					+ 4
4:00 - 5:00		+ 3				
5:00 - 6:00						
6:00 - 7:00						
7:00 - 8:00						
8:00 - 9:00						
9:00 - 10:00		+ 1				
10:00 - 11:00				0		- 1
11:00 - 12:00						
12:00 - 13:00						
13:00 - 14:00			- 1		- 2	- 3
14:00 - 15:00	0					
15:00 - 16:00						
16:00 - 17:00						
17:00 - 18:00			0			- 1
18:00 - 19:00						
19:00 - 20:00		+ 1				
20:00 - 21:00					+ 2	
21:00 - 22:00						
22:00 - 23:00		+ 2			+ 3	
23:00 - 0:00						

V druhém kroku se provede přepočítání na srovnávací teplotu 20 °C podle vztahu:

$$y_{R(50,T20)} = y_{R(50,Tp)} \cdot [1 - k_{T(R)} \cdot (T_{asf} - 20)], \quad (3)$$

kde $y_{R(50,T20)}$ - průhyb ve vzdálenosti R od osy zatížení přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN a porovnávací teplotu 20 °C [mm],

$y_{R(50,Tp)}$ - průhyb ve vzdálenosti R od osy zatížení naměřený při teplotě povrchu vozovky T_p a přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN [mm],

T_{asf} - průměrná teplota asfaltových vrstev vypočítaná ze vztahu (2) [°C],

$k_{T(R)}$ - opravný součinitel na teplotu pro snímač ve vzdálenosti R od osy zatížení, který má hodnotu podle tabulky P1.2.

Tabulka P1.2: Hodnoty opravných součinitelů průhybu na teplotu (hodnoty získané v rámci řešení projektu TA01030464)

Vzdálenost snímače od osy zatížení [mm]	0	300	600	900	1200	1500
$k_{T(R)}$	0,018	0,012	0,008	0,004	0	0

P 1.1.3 Hodnocení na základě ekvivalentního modulu pružnosti

Hodnocení na základě ekvivalentního modulu pružnosti, v souladu s teorií pružného poloprostoru, vychází z maximální amplitudy průhybu na povrchu vozovky v středě zatěžovací desky y_0 . Ekvivalentní modul pružnosti E_{ekv} se vypočítá ze vztahu:

$$E_{ekv} = A \cdot (1 - \mu^2) \cdot \frac{\sigma \cdot a}{y_{0(50,T20)}}, \quad (4)$$

kde E_{ekv} - ekvivalentní modul pružnosti vozovky [MPa],

$y_{0(50,T20)}$ - průhyb ve středu zatěžovací desky přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN a porovnávací teplotu 20 °C [mm],

σ - kontaktní napětí [MPa],

a - poloměr zatěžovací desky [mm],

μ - Poissonovo číslo ($\mu = 0,35$),

A - konstanta podle typu zatěžovací desky ($A = \pi/2$ pro tuhou desku a $A = 2$ pro dělenou zatěžovací desku).

Na základě vypočítané hodnoty E_{ekv} se může provádět poměrové srovnání únosnosti vozovek s obdobnou konstrukcí (tloušťkou konstrukce vozovky a skladbou vrstev). Dokud nebudou stanoveny hodnoty únosnosti pro klasifikační stupně 1 až 5 v ČR, může být využito hodnocení prováděné na Slovensku [9].

P 1.1.4 Hodnocení na základě indexů

Pro tento účel se z naměřených průhybů vypočítají následující indexy:

Index křivosti povrchu $SCI = y_{0(50,T20)} - y_{300(50,T20)}, \quad (5)$

Index křivosti podkladu $BCI = y_{600(50,T20)} - y_{1200(50,T20)}, \quad (6)$

kde $y_{0(50,T20)}$ - průhyb ve středu zatěžovací desky přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN a porovnávací teplotu 20 °C [mm],

$y_{300(50,T20)}$ - průhyb ve vzdálenosti 300 mm od středu zatěžovací desky přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN a porovnávací teplotu 20 °C [mm],

$y_{600(50,T20)}$ - průhyb ve vzdálenosti 600 mm od středu zatěžovací desky přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN a porovnávací teplotu 20 °C [mm],

$y_{1200(50,T20)}$ - průhyb ve vzdálenosti 1200 mm od středu zatěžovací desky přepočítaný na porovnávací sílu 50 kN a porovnávací teplotu 20 °C [mm].

Na základě průhybu naměřeného ve vzdálenosti 1500 mm od osy zatížení a hodnot vypočítaných indexů SCI a BCI se může provádět poměrové srovnání únosnosti vozovek s obdobnou konstrukcí (tloušťkou konstrukce vozovky a skladbou vrstev). Dokud nebudou stanoveny hodnoty únosnosti pro klasifikační stupně 1 až 5 v ČR, může být využito hodnocení prováděné na Slovensku [9].

P 1.2 Hodnocení únosnosti vozovek s CB krytem

P 1.2.1 Přepočet průhybu na velikost porovnávací síly

Při měření průhybů vozovek na jednotlivých bodech má být hodnota zatěžovací síly např. 100 kN (tak, aby byla zachována podmínka, že na snímači ve vzdálenosti 1800 mm od osy zatížení je vyvozen průhyb alespoň 40 μm). Tato síla je však proměnlivá i při pádu závaží ze stejné výšky. Naměřené průhyby je tak nutné přepočítat na porovnávací sílu 100 kN. Přepočet se vykoná dle vztahu:

$$y_{R(100)} = y_{R,m} \cdot \frac{F_C}{F_m}, \quad (7)$$

kde: $y_{R(100)}$ - průhyb ve vzdálenosti R od osy zatížení přepočítaný na porovnávací sílu 100 kN [mm],
 $y_{R,m}$ - průhyb naměřený při skutečném zatížení silou F_C ve vzdálenosti R od osy zatížení [mm],
 F_C - porovnávací zatěžovací síla $F_C = 100$ kN,
 F_m - zatěžovací síla při měření [kN].

Přepočet podle vztahu (7) platí, jestliže je zatěžovací síla F_m v rozsahu 90 – 110 kN (10 % od porovnávací zatěžovací síly).

Vzdálenosti R odpovídají poloze snímačů průhybu od osy zatížení: 0 mm (y_0), 300 mm (y_{300}), 600 mm (y_{600}), 900 mm (y_{900}), 1200 mm (y_{1200}), 1800 mm (y_{1800}).

P 1.2.2 Hodnocení na základě dynamického modulu tuhosti

Dynamický modul pružnosti konstrukce vozovky s CB krytem *ISM* se vypočítá jako poměr zatěžovací síly a průhybu v ose zatížení při zkoušce provedené na středech desek CB krytu. Zahrnuje v sobě tuhost desky i podkladu. Vypočítá se podle vztahu:

$$ISM = \frac{F_m}{y_0}, \quad (8)$$

kde *ISM* - dynamický modul tuhosti [kN/mm]
 F_m - zatěžovací síla při měření [kN]
 y_0 - maximální průhyb v ose zatížení [mm]

Na základě průhybu naměřeného v ose zatížení a vypočítaného dynamického modulu tuhosti se může provádět poměrové srovnání únosnosti vozovek s obdobnou konstrukcí (tloušťkou konstrukce vozovky a skladbou vrstev). Pro tuhé vozovky nebyly zatím v ČR stanoveny hodnoty únosnosti pro klasifikační stupně 1 až 5.

PŘÍLOHA 2: MANUÁL PRO PRÁCI S PROGRAMEM DG LAYMED FWD

P 2.1 Instalace programu

Po vložení instalačního CD se spustí průvodce instalací, který provede instalaci do zvoleného adresáře. Výchozí nastavení cesty je „C:\DG_Laymed_FWD“.

Cílový adresář po instalaci obsahuje následující:

Podadresář **PGM_Soubory** – obsahující databáze konstrukcí vozovek a jejich materiálových charakteristik, číselníky administrativních jednotek, jízdnic směřů, jízdnic pruhů a nastavení parametrů výpočtu. Do této složky uživatel nevstupuje.

Soubory:

DG_Laymed_FWD.exe – hlavní program

DGLAY_Solver.exe – podprogram pro výpočet

P 2.2 Spuštění programu a jeho položky

Program se spouští zástupcem DG_Laymed_FWD, nainstalovaným na ploše, nebo z nabídky Start → DG_Laymed_FWD → DG_Laymed_FWD.

Po spuštění programu se vybere vstupní soubor dat. Podporovanými formáty jsou jednotný formát dat AASHTO PDDX 2.0 (Pavement Deflection Data Exchange File) (soubory *.ddx) a formát Dynatest R32/R80 (soubory *.fwd).

Po načtení souboru měřených průhybů se automaticky doplní údaje o měřeném úseku a měřícím zařízení (počet a umístění snímačů, poloměr desky) z informací obsažených ve vstupním souboru dat.

Vstupní údaje zadávají v jednotlivých položkách „Identifikace“, „Zařízení“, „Konstrukce“ a „Sčítání dopravy“. Většina hodnot se zadává pomocí rozbalovacích seznamů tak, aby nemohlo docházet k zadání neplatných údajů.

P 2.2.1 Položka „Identifikace“

V položce „Identifikace“ je možné zadat údaje o měřené akci (název, uzlová lokalizace, ...), které vstupují do původních sestav pro Silniční databanku.

Soubor: C:\Data\Studenec.fwd

Poslední úder
 Nejmenší chyba

Identifikace | Zařízení | Konstrukce | Sčítání dopravy

Název akce: Studenec

Operátor: *

Administrativní jednotka: CZ0514 Semily

Číslo úseku: 0343A052 -0343A085

Délka úseku: 2560

Číslo komunikace: II/263

Směr měření: 1. - souhlasí s orientací úseku

Měřený pruh: 1. n. jízdní pruh obousměr. komunikace

Datum měření: 6. 7. 2013

OK

Obrázek P2.1: Zadání identifikačních údajů o měřeném úseku

P 2.2.2 Položka „Zařízení“

V položce „**Zařízení**“ se zadávají parametry měřicího zařízení, nejsou-li obsaženy v souboru měřených dat, jako je poloměr zatěžovací desky, počet snímačů (max. 20) a jejich pozice (X, Y) od středu zatížení.

Zadáním hodnoty do pole „**Normativní zatížení [kN]**“ dojde před výpočtem k přepočítání průhybů na zadanou hodnotu, hodnota 0 vypne přepočet. Výchozí hodnota je 50 kN.

D1 [X]	D2 [X]	D3 [X]	D4 [X]	D5 [X]	D6 [X]	D7 [X]
0	300	600	900	1200	1500	2100

D1 [Y]	D2 [Y]	D3 [Y]	D4 [Y]	D5 [Y]	D6 [Y]	D7 [Y]
0	0	0	0	0	0	0

Obrázek P2.2: Zadání údajů o měřicím zařízení

P 2.2.3 Položka „Konstrukce“

V části „**Konstrukce**“ se zadává konstrukce vozovky volbou počtu konstrukčních vrstev (max. 10), výběrem materiálu jednotlivých vrstev z rozbalovacího seznamu a zadáním tloušťek vrstev.

U běžných silničních vozovek se doporučuje zadávat asfaltové vrstvy jednou zástupnou vrstvou s jednou tloušťkou. Pro výpočet modulů jednotlivých asfaltových vrstev by byla potřeba více snímačů průhybu v těsnějším osazení.

Program umožňuje zadání spolupůsobení mezi jednotlivými vrstvami pomocí koeficientů v rozsahu 0,0 (dokonalý prokluz vrstev) až po 1,0 (dokonalý kontakt vrstev), případně zaškrtnutím volby „**Dokonalý kontakt všech vrstev**“ (výchozí nastavení).

Podkladní vrstvy je možno rozdělit na dvě vrstvy dle zjištěné kvality.

Nedoporučuje se provádět více než 4-vrstvý výpočet.

Po zadání začátku a konce podúseku (liniové staničení měření) je možno přidat konstrukci následujících podúseků tlačítkem „**Přidat**“. V tomto případě program rozdělí měřený úsek podle staničení a každý z podúseků vypočte samostatně. Výstupy uloží do výsledného .xls souboru do samostatných listů.

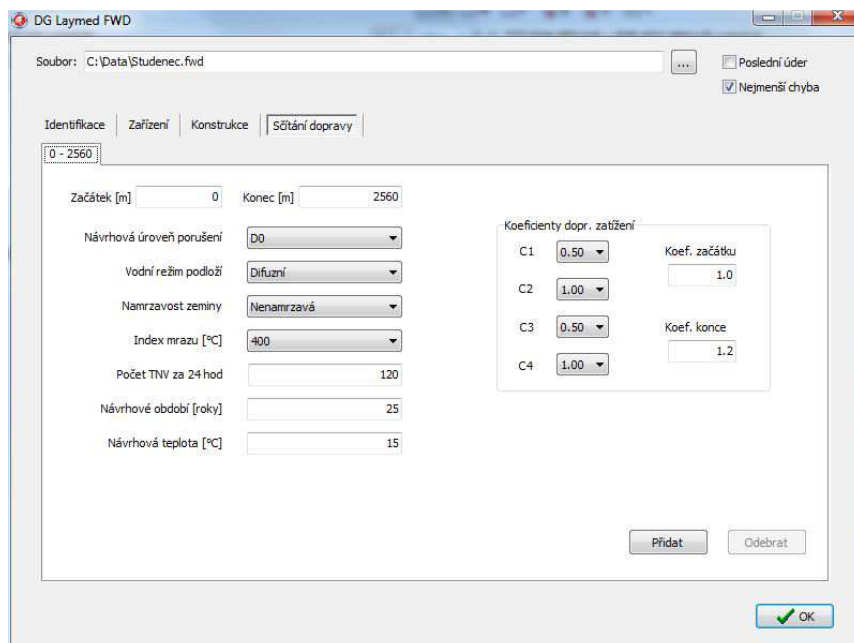
Totéž platí i pro rozdělení úseku na podúseky z důvodu změny dopravního zatížení.

Obrázek P2.3: Zadání údajů o konstrukci vozovky

Obrázek P2.4: Zadání údajů o konstrukci vozovky (další podúsek)

P 2.2.4 Položka „Sčítání dopravy“

V části „**Sčítání dopravy**“ se zadávají údaje potřebné pro výpočet zbytkové doby životnosti a potřebné tloušťky zesílení, s možností zadání více sčítacích úseků, podobně jako u zadávání konstrukcí.



Obrázek P2.5: Údaje potřebné pro posouzení vozovky (sčítání dopravy)

Pokud byly měřeny sekvence s více úderů na měřeném bodě (typicky tři), lze zvolit výpočet pouze posledního úderu pro každý měřený bod (volba „**Poslední úder**“) nebo lze zvolit výpočet pro všechny měřené úder s automatickým výběrem toho, který má pro daný měřený bod nejmenší průměrnou chybu nahrazení teoretickou průhybovou křivkou (volba „**Nejmenší chyba**“).

Po stisku tlačítka „**OK**“ dojde ke spuštění výpočtu. Po dokončení běhu výpočtu se zobrazí předpřipravený výstup v aplikaci MS Excel.

P 2.3 Výstupní sestava

Původní výstupní sestavy programu se ukládají do adresáře RESULTS_XXX (kde XXX je název akce v části identifikace) umístěného v adresáři, kde je nainstalován program (standardně C:\DG_Laymed_FWD). Výstup ve formátu MS Excel se ukládá do adresáře, ve kterém je vstupní soubor měřených dat.

Výstupní sestava z programu umožňuje uživateli správné a úplné vyhodnocení únosnosti, zbytkové doby životnosti a zesílení hodnocené vozovky. Výstupní údaje byly rozvrženy tak, aby měřené a výsledné hodnoty byly uspořádány pro oblast tisku, která je publikována jako výstup do zprávy o stanovení únosnosti a návrhu technologie opravy vozovky. Další nezbytně nutné informace, sloužící pouze pro uživatele programu, byly přesunuty do oblasti, která se netiskne.

Studenec

Poloměr zat. desky: 150 mm
Referenční teplota: 15°C
Normováno na: 50 kN

Návrhová úroveň porušení: D0
Délka návrhového období: 20
Intenzita dopravy: 150 TNV/24hod
Celkový počet přejezdů: 602000 TNV

Staničení [km]	Zatížení [MPa]	D0	D30	Naměřené průhyby [μm]						Moduly pružnosti [MPa]			Zbytková životnost	Tloušťka zesílení	Klasifikační třída
				D60	D90	D120	D150	D210	ACO 16 [15,0]	MZK [40,0]	Podloží				
0,000	0,707	428	300	179	101	67	48	33	4928	95	188	13,2	1	3	
0,057	0,707	431	303	193	119	81	57	33	5981	82	178	20	0	1	
0,101	0,707	453	279	145	75	47	35	22	3158	100	265	3,6	4	5	
0,149	0,707	634	359	214	122	78	54	37	1930	89	165	0,6	9	5	
0,202	0,707	376	287	196	127	85	56	27	11429	51	227	20	0	1	
0,256	0,707	389	334	244	165	118	84	44	15329	41	152	20	0	1	
0,304	0,707	612	425	266	163	110	74	38	4467	49	151	3,9	4	5	
0,326	0,707	620	423	258	153	102	70	36	3939	52	156	2,7	5	5	
0,352	0,707	621	421	216	134	89	61	36	2861	67	157	1,3	7	5	
0,400	0,707	477	347	221	138	95	68	40	5692	74	149	15,2	1	3	
0,425	0,707	368	285	193	127	91	67	38	9826	85	159	20	0	1	
0,450	0,707	360	297	212	143	99	68	37	14482	52	174	20	0	1	
0,478	0,707	360	248	180	129	95	67	39	8867	113	158	20	0	1	
0,502	0,707	303	238	168	108	74	51	29	14019	78	212	20	0	1	
0,534	0,707	235	182	134	96	73	54	32	19454	138	200	20	0	1	
0,554	0,707	192	149	112	79	61	45	27	24663	169	239	20	0	1	
0,605	0,707	772	484	252	139	90	64	37	1967	57	150	0,3	10	5	
0,625	0,707	173	142	106	76	58	45	28	27968	218	230	20	0	1	
0,653	0,707	268	205	144	99	74	58	41	10138	234	162	20	0	1	
0,678	0,707	224	183	132	92	68	50	34	18889	167	194	20	0	1	
0,702	0,707	248	187	126	80	55	40	28	11853	159	233	20	0	1	
0,753	0,707	499	308	164	98	69	51	37	2416	124	175	2,2	6	5	
0,801	0,707	355	277	192	120	69	38	15	13116	39	383	20	0	1	

Obrázek P2.6: Výstupní sestava pro tisk do zprávy

Studenec

Staničení [km]	TNV lim	Relativní porušení	TNV po zes.	Rel. por. po zes.	Chyby			Vypočtené průhyby [μm]													Longitude	Latitude	Altitude
					Průměr [%]	Průměr [um]		Epst1	Epst2	Epsz	D0	D30	D60	D90	D120	D150	D210						
0,000	398000	1,283	663000	0,771	0,7	0,96	1,95E-04	6,88E-05	1,81E-04	427,8	301,1	176,1	103,6	66,7	48,5	33,2	0	0	0				
0,057	648000	0,79	648000	0,79	4,29	4,64	1,77E-04	6,40E-05	1,73E-04	425,9	312,3	191,1	115	73,6	52,3	34,8	0	0	0				
0,101	108000	4,729	679000	0,76	2,95	2,21	2,53E-04	5,90E-05	1,55E-04	451,4	282,7	141,3	73,3	44,9	33,1	23,7	0	0	0				
0,149	18000	28,015	789000	0,654	6,39	10,55	3,61E-04	1,05E-04	2,63E-04	627,1	380,1	192,1	107,1	71,1	54,4	38,6	0	0	0				
0,202	4844000	0,106	4844000	0,106	3,64	4,38	1,18E-04	2,93E-05	9,40E-05	369,8	295,3	199,2	125,8	78	49,9	26,6	0	0	0				
0,256	12026000	0,043	12026000	0,043	1,55	2,48	9,86E-05	3,38E-05	1,10E-04	391,5	330	243,6	170,4	116,8	80,8	44,2	0	0	0				
0,304	116000	4,391	799000	0,645	6,87	9,75	2,49E-04	6,85E-05	1,96E-04	601,5	442,3	267	154,3	92,9	62,3	39,9	0	0	0				
0,326	81000	6,267	841000	0,609	7,12	9,07	2,67E-04	7,23E-05	2,03E-04	610,6	438,3	256,4	144,8	86,7	59	38,9	0	0	0				
0,352	38000	13,436	816000	0,627	5,88	6	3,12E-04	8,92E-05	2,36E-04	621,1	416,3	227,1	125,6	75,3	56,8	39,7	0	0	0				
0,400	458000	1,117	748000	0,684	3,03	3,34	1,89E-04	7,53E-05	2,02E-04	474	352,4	220,6	135,9	86,5	63,3	41,9	0	0	0				
0,425	3960000	0,129	3960000	0,129	2,63	2,45	1,23E-04	5,84E-05	1,59E-04	365,6	287,4	194,2	127,6	86,1	61,8	39,5	0	0	0				
0,450	11784000	0,043	11784000	0,043	0,86	0,93	9,90E-05	3,50E-05	1,09E-04	359,3	297,2	213,2	144,9	97,2	66,5	37,1	0	0	0				
0,478	3643000	0,14	3643000	0,14	6,77	9,34	1,25E-04	6,79E-05	1,77E-04	348,7	268,6	178,8	118,1	81,6	60,5	40,2	0	0	0				
0,502	15220000	0,034	15220000	0,034	1,21	1,59	9,40E-05	3,61E-05	1,06E-04	300,6	241,4	166,2	109,2	72	49,6	29,5	0	0	0				
0,534	85761000	0,006	85761000	0,006	3,42	3,36	6,65E-05	4,17E-05	1,12E-04	230,5	188,6	135,6	95,1	67,7	50,2	32,3	0	0	0				
0,554	266426000	0,002	266426000	0,002	2,98	2,48	5,30E-05	3,43E-05	9,22E-05	188	154,6	112	79,1	56,7	42,2	27,1	0	0	0				
0,605	8000	59,216	697000	0,734	5,57	5,53	4,19E-04	1,00E-04	2,66E-04	769,2	490,4	250	130,9	79,9	58,4	41,5	0	0	0				
0,625	526216000	0,001	526216000	0,001	1,36	0,9	4,63E-05	3,61E-05	9,42E-05	172,1	142,9	105,7	76,8	56,6	43,2	28,5	0	0	0				
0,653	15007000	0,034	15007000	0,034	0,69	0,73	9,43E-05	7,13E-05	1,73E-04	267,7	205,7	141,8	100,2	74,5	58,4	40,4	0	0	0				
0,678	90723000	0,006	90723000	0,006	0,86	0,66	6,58E-05	4,62E-05	1,20E-04	224,5	182,8	131,5	93	67,3	50,8	33,4	0	0	0				
0,702	17219000	0,03	17219000	0,03	0,94	0,87	9,17E-05	4,72E-05	1,23E-04	247,6	188,6	123,6	80,5	55,1	40,7	27,2	0	0	0				
0,753	67000	7,568	777000	0,658	1,27	1,06	2,78E-04	9,82E-05	2,41E-04	498,9	307,1	163,2	97	67	51,8	36,6	0	0	0				
0,801	7337000	0,07	7337000	0,07	1,26	2,05	1,09E-04	1,26E-05	4,79E-05	351,8	283,2	191,1	117,7	68,3	38,7	15	0	0	0				

Obrázek P2.7: Část výstupní sestavy určená pro uživatele programu (netiskne se)

Část určená pouze pro uživatele slouží ke kontrole platnosti naměřených dat (chyby nahrazení, vypočtená průhybová čára) a pro účely navrhování opravy vozovky (relativní porušení, poměrná přetvoření vrstev a GPS souřadnice).

V případě potřeby jiné tiskové výstupní sestavy může uživatel libovolně přesouvat sloupce – standardní postup v MS Excel.