národní
úložiště
šedé
literatury

Hodnocení stavu vozovek kombinací rázového zařízení FWD a georadaru

Stryk, Josef; Březina, Ilja; Matula, Radek; Grošek, Jiří; Janků, Michal
2019

Dostupný z http://www.nusl.cz/ntk/nusl-432130

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

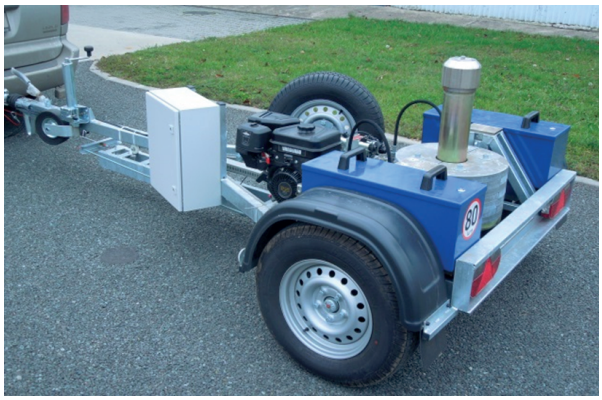
Datum stažení: 26.04.2024

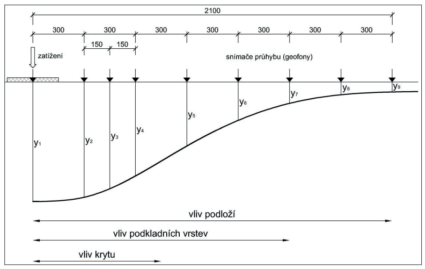
Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .

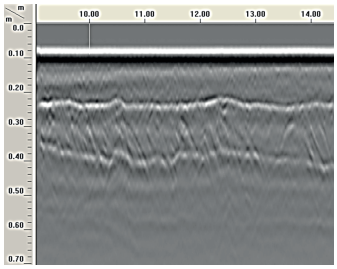
Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

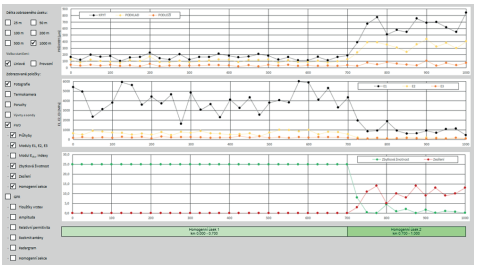
METODIKA

HODNOCENÍ STAVU VOZOVEK KOMBINACÍ RÁZOVÉHO ZAŘÍZENÍ FWD A GEORADARU









CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

T A
Č R

Program **Centra kompetence**

CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

HODNOCENÍ STAVU VOZOVEK KOMBINACÍ RÁZOVÉHO ZAŘÍZENÍ FWD A GEORADARU

certifikovaná metodika

2019

Tato metodika byla vytvořena se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Centra kompetence.

Název: **Hodnocení stavu vozovek kombinací rázového zařízení FWD a georadaru**

Zpracovatel: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Autoři: Ing. Josef Stryk, Ph.D.
Ing. Ilja Březina
Ing. Radek Matula, Ph.D.
Ing. Jiří Grošek, Ph.D.
Ing. Michal Janků

Oponenti: Ing. Pavel Herrmann, RODOS – česká firma vyrábějící FWD zařízení a provádějící diagnostický průzkum vozovek

prof. Dr. Ing. Jozef Komačka, Žilinská univerzita, Stavebná fakulta, Katedra cestného staviteľstva

Ing. Čestmír Kopřiva, Ředitelství silnic a dálnic ČR, Úsek kontroly kvality staveb, vedoucí samostatného oddělení technického rozvoje

Výstup projektu: TE01020168 Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)

Certifikační orgán: Ministerstvo dopravy

Datum certifikace: 19. 3. 2020

Vydavatel: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

ISBN 978-80-88074-31-1

Ministerstvo dopravy

nábřeží Ludvíka Svobody 1222/12
PO BOX 9, 110 15 Praha 1

Praha 19.3. 2020
Č. j.: 1/2020-710-VV/1

v y d á v á

O S V Ě D Č E N Í

o uznání uplatněné certifikované metodiky
v souladu s podmínkami „Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje“

s názvem
„Metodika hodnocení stavu vozovek kombinací rázového zařízení FWD a georadaru“

ŘEŠITEL
Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
Autoři:
Ing. Josef Stryk, Ph.D.
Ing. Ilja Březina
Ing. Radek Matula, Ph.D.
Ing. Jiří Grošek, Ph.D.
Ing. Michal Janků

Metodika byla vytvořena v rámci programu Centra kompetence, projektu CESTI (TE01020168: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu), podpořeného Technologickou agenturou České republiky, za využití výzkumné infrastruktury pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Zpracovatelé 3 nezávislých oponentních posudků:

- Ing. Pavel Herrmann, RODOS, rodos.praha@centrum.cz, +420 608 111 271
- prof. Dr. Ing. Jozef Komačka, zástupce vedoucího katedry cestného staviteľstva, Žilinská univerzita v Žilině, jozef.komacka@fstav.uniza.sk, +421 415 135 949
- Ing. Čestmír Kopřiva, Ředitelství silnic a dálnic ČR, Úsek kontroly kvality staveb, vedoucí samostatného oddělení technického rozvoje, cestmir.kopriva@rsd.cz, +420 241 084 245

JUDr. Václav Kobera
ředitel
Odbor ITS, kosmických aktivit a VaVaI

Anotace

Název:

Hodnocení stavu vozovek kombinací rázového zařízení FWD a georadaru

Autoři:

Ing. Josef Stryk, Ph.D., Ing. Ilja Březina, Ing. Radek Matula, Ph.D., Ing. Jiří Grošek, Ph.D., Ing. Michal Janků

Abstrakt:

V rámci provádění diagnostického průzkumu vozovek se čím dál častěji uplatňuje kombinace dvou nedestruktivních diagnostických zařízení – rázového zařízení FWD, které se používá pro účely hodnocení únosnosti vozovek, a georadaru, který se využívá ke zjišťování tlouštěk konstrukčních vrstev, k identifikaci nehomogenit, skrytých vad a poruch.

Účelem metodiky je upřesnit postup pro provádění měření kombinací těchto dvou zařízení, v kontextu provádění diagnostického průzkumu vozovek pozemních komunikací. Upozorňuje na přínosy, které plynou ze zpracování dat naměřených oběma zařízeními a jejich využití při tvorbě homogenních sekcí, které slouží jako podklad pro plánování údržby, oprav a rekonstrukcí vozovek.

Předkládaná metodika byla zpracována v rámci projektu TE01020168 – Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu Centra kompetence. Tato metodika je určena především pro zpracovatele diagnostického průzkumu vozovek.

Klíčová slova:

nedestruktivní diagnostické metody, FWD, georadar, diagnostický průzkum, vozovka

Certifikační orgán:

Ministerstvo dopravy

Annotation

Title:

Evaluation of pavement condition by combination of FWD device and ground penetrating radar

Authors:

Josef Stryk, Ilja Březina, Radek Matula, Jiří Grošek, Michal Janků

Abstract:

The combination of two non-destructive diagnostic devices – the Falling Weight Deflectometer (FWD) used to assess the bearing capacity of pavements and the Ground Penetrating Radar (GPR) used to determine the thickness of structural layers, to identify inhomogeneities, hidden defects and failures are increasingly being used in pavement diagnostics.

The purpose of the methodology is to specify the procedure for performing measurements of combinations of these two devices, in the context of conducting a diagnostic survey of pavements. It draws attention to the benefits of processing data measured by both devices and their use in creating homogeneous sections, which serve as a basis for planning of maintenance, repair and reconstruction of roads.

The presented methodology was prepared within project TE01020168 – Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure (CESTI), with state support of the Czech Technology Agency within the Centre of Competence Program. This methodology is intended primarily for companies dealing with pavement diagnostic surveys.

Keywords:

non-destructive diagnostic method, FWD, GPR, diagnostic survey, pavement

Certification Authority:

Ministry of Transport

Obsah

1. ÚVOD 1

1.1 Cíl metodiky 1

1.2 Řešený výzkumný projekt 1

2. VLASTNÍ POPIS METODIKY 2

2.1 Diagnostický průzkum vozovky 2

2.2 Rázové zařízení FWD 3

2.3 Georadar 5

2.4 Postup měření FWD a georadarem 8

2.5 Příklady uplatnění kombinace FWD a georadaru 10

2.5.1 Zpřesnění výpočtu modulů pružnosti konstrukčních vrstev vozovky 10

2.5.2 Zpřesnění při tvorbě homogenních sekcí 13

2.5.3 Upřesnění míst pro měření FWD na základě výsledků měření georadarem 15

2.5.4 Měření na spárách CB krytu vozovky 16

2.6 Vytváření homogenních sekcí 18

2.6.1 Síťová úroveň 18

2.6.2 Projektová úroveň 18

3. NOVOST POSTUPŮ, ZPŮSOB UPLATNĚNÍ A EKONOMICKÉ ASPEKTY 21

3.1 Srovnání novosti postupů 21

3.2 Popis uplatnění certifikované metodiky 21

3.3 Ekonomické aspekty 21

4. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY 22

5. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE 23

6. POUŽITÉ DEFINICE A ZKRATKY 25

PŘÍLOHA 1: UKÁZKA VÝSLEDKŮ Z MĚŘENÍ FWD A GEORADAREM

PŘÍLOHA 2: VIZUALIZACE VÝSLEDKŮ DIAGNOSTICKÉHO PRŮZKUMU

1. Úvod

Metodika uvádí postup pro použití kombinace dvou nedestruktivních diagnostických zařízení, které se používají při diagnostickém průzkumu vozovek pozemních komunikací: rázového zařízení FWD a georadaru.

1.1 Cíl metodiky

Cílem metodiky je uvést:

- zásady pro uplatnění kombinace rázového zařízení FWD a georadaru při diagnostickém průzkumu vozovek pozemních komunikací,
- postup při použití kombinace těchto dvou nedestruktivních diagnostických metod,
- upřesnění postupu při tvorbě homogenních sekcí,
- konkrétní příklady, při kterých je kombinace těchto zařízení využívána.

Metodika platí pro diagnostiku stavu:

- silničních a dálničních vozovek,
- parkovišť, odstavných a manipulačních ploch,
- v přiměřeném rozsahu i letištních drah a ploch.

Je určena především pro:

- firmy provádějící měření průhybů vozovek rázovými zařízeními FWD, měření georadarem a hodnocení stavu vozovek,
- správce pozemních komunikací (hodnocení stavu vozovek na síťové a projektové úrovni, jako podklad pro plánování údržby a oprav),
- projektanty a zhotovitele staveb pozemních komunikací,
- odbornou veřejnost.

Metodika navazuje na technické předpisy a metodiky Ministerstva dopravy uvedené v kap. 4.

1.2 Řešený výzkumný projekt

Tato metodika byla vypracována se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu Centra kompetence, projektu CESTI (TE01020168: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu, pracovní skupiny WP6: Bezpečnost, spolehlivost a diagnostika konstrukcí) na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

2. Vlastní popis metodiky

2.1 Diagnostický průzkum vozovky

Správu silniční sítě v rámci systému hospodaření s vozovkami zajišťuje příslušný správce komunikace ve dvou úrovních:

- síťová – zahrnuje pravidelné sledování vybraných parametrů na spravované síti pozemních komunikací, jako výskyt vybraných typů poruch, nerovnost, textura a protismykové vlastnosti povrchu vozovky,
- projektová – na úsecích identifikovaných pro zásah na síťové úrovni se provádí diagnostický průzkum, jako podklad pro přípravu projektové dokumentace.

Diagnostický průzkum zpravidla zahrnuje (TP 87, TP 92):

- hodnocení poruch na základě vizuální prohlídky, případně fotodokumentace/ video-dokumentace úseku,
- hodnocení únosnosti na základě výsledků měření rázovým zařízením FWD,
- zjištění skladby konstrukce vozovky:
  - lokálně – jádrovými vývrty a hloubkovými sondami,
  - kontinuálně – měřením georadarem.
- laboratorní zkoušky na odebraných vzorcích z konstrukčních vrstev vozovky a podloží,
- souhrnné zhodnocení stavu vozovky a stanovení příčin poruch,
- návrh údržby, opravy nebo rekonstrukce vozovky.

V rámci revize TP 87 se zavádí podrobnější členění diagnostického průzkumu na:

- předběžný – jeho výsledkem je zadání rozsahu pro podrobný diagnostický průzkum,
- podrobný – posoudí se stav konstrukce vozovky a navrhne údržba, oprava nebo rekonstrukce,
- doplňkový – provádí se, pokud se při podrobném diagnostickém průzkumu objeví skutečnosti, které nebylo možné předvídat; důvodem jsou obvykle výrazné nehomogenity, neočekávané výsledky laboratorních zkoušek apod.

V tab. 1 je uvedeno předpokládané uplatnění rázového zařízení FWD a georadaru v jednotlivých fázích diagnostického průzkumu.

Tabulka 1: *Uplatnění FWD a georadaru při diagnostickém průzkumu na projektové úrovni*

Fáze diagnostického průzkumu:	FWD	georadar
- předběžný	(X)	
- podrobný	X	X
- doplňkový	X	X

Rázové zařízení FWD a georadar se v současné době v ČR používají pouze na projektové úrovni. Podrobnosti k měření a hodnocení výsledků měření rázovým zařízením FWD a georadarem jsou uvedeny v kapitole 2.2 a 2.3.

2.2 Rázové zařízení FWD

Rázové zařízení FWD (Falling Weight Deflectometer, zařízení skupiny A podle ČSN 73 6192), viz obr. 1, se používá pro měření průhybů vozovek a hodnocení únosnosti vozovek podle TP 87 a TP 92 a metodiky Ministerstva dopravy [M1].

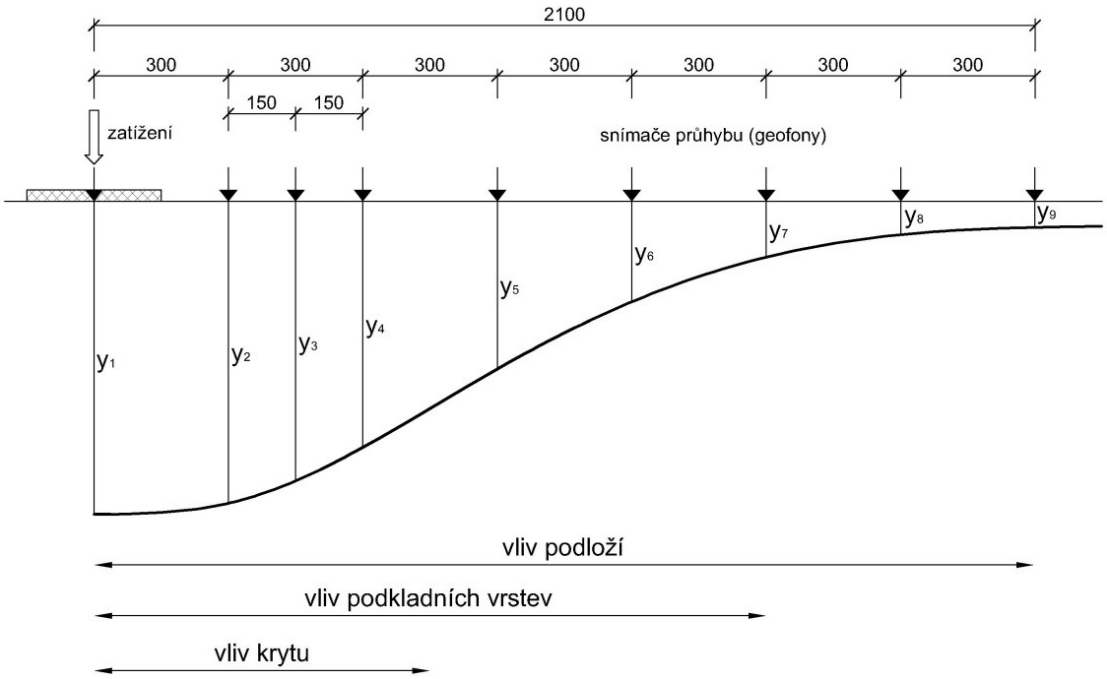
Obr. 1: *Příklad rázového zařízení FWD, zdroj: CDV*

Rázové zařízení FWD se skládá z následujících základních součástí:

- zatěžovací zařízení složené ze zatěžovací desky o průměru 300 mm, siloměru, kovadliny, gumových nárazníků, zvedáku, základní zatěžovací hmoty a přídavných segmentů zatížení,
- měřicí rám s minimálně sedmi snímači, které zaznamenávají průhyb povrchu vozovky při zatížení (v předepsaných vzdálenostech od středu zatěžovací desky),
- zařízení na měření ujeté vzdálenosti, pro účely lokalizace měřených bodů,
- teploměry pro měření teploty vzduchu a povrchu vozovky,
- počítač s ovládacím programem.

Princip zkoušky pomocí rázového zařízení FWD 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 a simuluje účinek zatížení těžkými nákladními vozidly.

Výstupem z rázové zatěžovací zkoušky na jednom měřeném bodě jsou hodnoty průhybů zaznamenané v časové ose jednotlivými snímači v různé vzdálenosti od středu zatížení. Spojnice maximálních hodnot průhybů zaznamenaných na jednotlivých snímačích tvoří průhybovou křivku, viz obr. 2.



***Obr. 2**: Průhybová křivka – vliv konstrukčních vrstev vozovky a podloží na velikost průhybu a tvar průhybové křivky [M1]*

Tvar průhybové křivky podléhá následujícím vlivům:

- velikosti zatěžovací síly,
- 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).

Naměřené hodnoty průhybu jsou podkladem pro výpočet následujících parametrů únosnosti vozovky [M1], které se používají pro tvorbu homogenních sekcí:

- síťová úroveň:
  - ekvivalentní modul pružnosti E_{ekv}, počítaný z průhybu měřeného v ose zatížení y_0,
  - index křivosti povrchu *SCI*, počítaný jako rozdíl průhybů $y_0 - y_{300}$,
  - Index křivosti podkladu *BCI*, počítaný jako rozdíl průhybů $y_{600} - y_{1200}$.
- projektová úroveň:
  - rázové moduly pružnosti E_r pro kryt vozovky, podkladní vrstvy a podloží (počítané pomocí programu pro zpětný výpočet),
  - zbytková doba životnosti vozovky t_Z v letech (počítaná ve vazbě na stávající a předpokládané budoucí dopravní zatížení, zejména počtu těžkých nákladních vozidel *TNV*),
  - návrh zesílení vozovky (ve vazbě na požadovanou životnost vozovky).

Příklad tabulkového výstupu z hodnocení únosnosti vozovky na projektové úrovni na 9 měřených bodech je uveden na obr. 3.

Staničení [m]	Číslo podúseku	Zatížení [MPa]	Naměřené průhyby [µm] 0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100	Moduly pružnosti [MPa] AC [15 cm]	$ŠD_A$ [25 cm]	Podloží ZEM_S-F
0	1	0,707	356	293	261	174	112	71	46	29	20	4731	448	63
25	1	0,707	380	322	292	206	139	91	56	32	20	6425	388	51
52	1	0,707	776	621	548	355	217	136	91	55	32	1833	197	32
75	1	0,707	1101	824	675	343	193	112	68	41	23	978	97	38
100	1	0,707	709	570	497	317	178	113	75	41	26	2303	157	39
125	1	0,707	519	406	335	184	98	56	33	21	12	2710	135	74
151	1	0,707	399	325	280	164	94	57	37	20	12	4463	193	78
175	1	0,707	756	572	465	247	129	72	45	26	17	1549	101	55
200	1	0,707	533	437	374	238	151	96	65	37	21	2716	275	47

Staničení [m]	Číslo podúseku	Zbytková životnost	Tloušťka zesílení	Klasif. třída	Kritická vrstva	N_{lim}	Relativní porušení	TNV po zes.	Rel. por. po zes.	Eps1	Eps2	EpsZ	Chyby Průměr [%]	Průměr [um]
0	1	22,5	1	2	3	514568	0,946	839708	0,580	1,31E-04	1,85E-04	-4,26E-04	3,24	1,75
25	1	18,7	1	3	3	428965	1,135	667030	0,730	1,25E-04	1,87E-04	-4,42E-04	3,11	2,23
52	1	0,4	10	5	3	10005	48,658	597356	0,815	3,09E-04	4,11E-04	-9,36E-04	3,02	4,68
75	1	0,1	14	5	1	1462	332,986	830240	0,586	6,17E-04	5,32E-04	-1,21E-03	3,52	3,50
100	1	0,7	8	5	3	16791	28,993	595767	0,817	3,05E-04	3,68E-04	-8,44E-04	3,60	4,84
125	1	3,7	5	5	1	84686	5,749	699885	0,696	2,74E-04	2,38E-04	-5,55E-04	2,83	0,95
151	1	17,0	1	3	3	388878	1,252	701197	0,694	1,84E-04	1,92E-04	-4,50E-04	2,91	1,36
175	1	0,4	10	5	1	9698	50,198	661664	0,736	4,23E-04	3,52E-04	-8,10E-04	3,51	1,85
200	1	2,8	5	5	3	64176	7,586	632644	0,770	2,15E-04	2,83E-04	-6,46E-04	2,05	1,71

***Obr. 3**: Příklad tabulkového výstupu z hodnocení únosnosti vozovky délky 200 m – zvýrazněny jsou vypočítané rázové moduly pružnosti krytu, podkladní vrstvy a podloží, vypočtená zbytková doba životnosti a navržená tloušťka zesílení, zdroj: CDV*

Postup provádění měření průhybů na vozovkách s asfaltovým a cementobetonovým krytem pomocí rázového zařízením FWD, včetně způsobů hodnocení únosnosti vozovek na síťové a projektové úrovni, je popsán v metodice Ministerstva dopravy [M1]. Další detaily jsou uvedeny v monografii prof. Komačky [1], zprávě evropského projektu COST 336 [2], ve slovenském technickém předpisu TP 031 a dalších zahraničních předpisech [3, 4].

Provozovatelé rázových zařízení FWD účastnících se srovnávacího měření (tzv. experimentu přesnosti) získávají, na základě splnění požadavků stanovených v TP 207, oprávnění Ministerstva dopravy k měření průhybů vozovek pozemních komunikací na území ČR. Jejich seznam je uveden na webové adrese: http://www.pjpk.cz/opravneni-k-mereni-pruhybu-vozovek-pozemnich-ko/. Organizují se také mezinárodní srovnávací měření [5].

Dalším požadavkem je oprávnění k provádění průzkumných a diagnostických prací souvisících s výstavbou, opravami, údržbou a správou pozemních komunikací od Ministerstva dopravy, v souladu s metodickým pokynem Systému jakosti pozemních komunikací (SJ-PK), jeho částí II/2. Seznam oprávněných osob je uveden na webové adrese: http://www.pjpk.cz/diagnosticky-pruzkum-konstrukci-vozovek/.

2.3 Georadar

Georadar (Ground Penetrating Radar, nebo Ground Probing Radar) je nedestruktivní diagnostické zařízení, které se využívá ke zjišťování tlouštěk konstrukčních vrstev, polohy zabudované výztuže, k identifikaci skrytých vad, poruch a k dalším aplikacím (obr. 4).

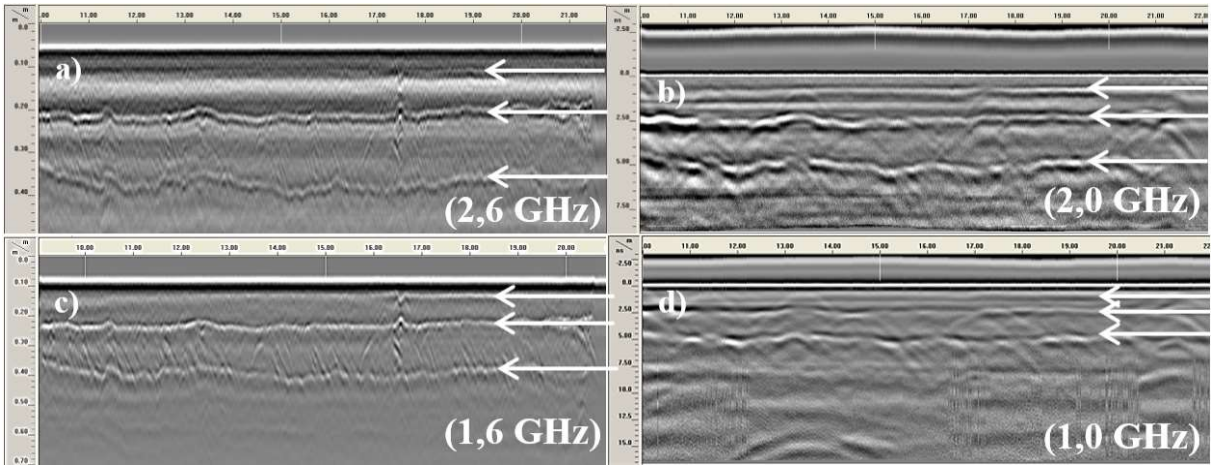
Základní informace o tomto zařízení, postupu měření a aplikacích georadaru na pozemních komunikacích jsou uvedeny v TP 233 a metodice Ministerstva dopravy [M2].

***Obr. 4**: Georadar osazený na měřicí vozidlo (vlevo), typy antén používaných pro měření na pozemních komunikacích (vpravo), zdroj CDV*

Georadar se skládá z následujících základních součástí:

- řídicí jednotka s jedním nebo více kanály pro měření,
- antény s požadovanými centrálními vysílacími frekvencemi (zpravidla od 200 MHz do 4 GHz, což koresponduje s jejich hloubkovým dosahem cca od 6 do 0,3 m), viz obr. 5,
- zařízení na měření ujeté vzdálenosti,
- počítač s ovládacím programem.

V ČR se používají především jedno a dvoukanálová zařízení.



***Obr. 5**: Příklady záznamů z měření georadarem, anténami s různou centrální vysílací frekvencí – úsek vozovky s vyznačením průběhu 3 vrstev [20]*

Princip metody spočívá v opakovaném vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického (EM) signálu do zkoumaného prostředí a záznamu odrazu části energie tohoto signálu od rozhraní vrstev a různých materiálů.

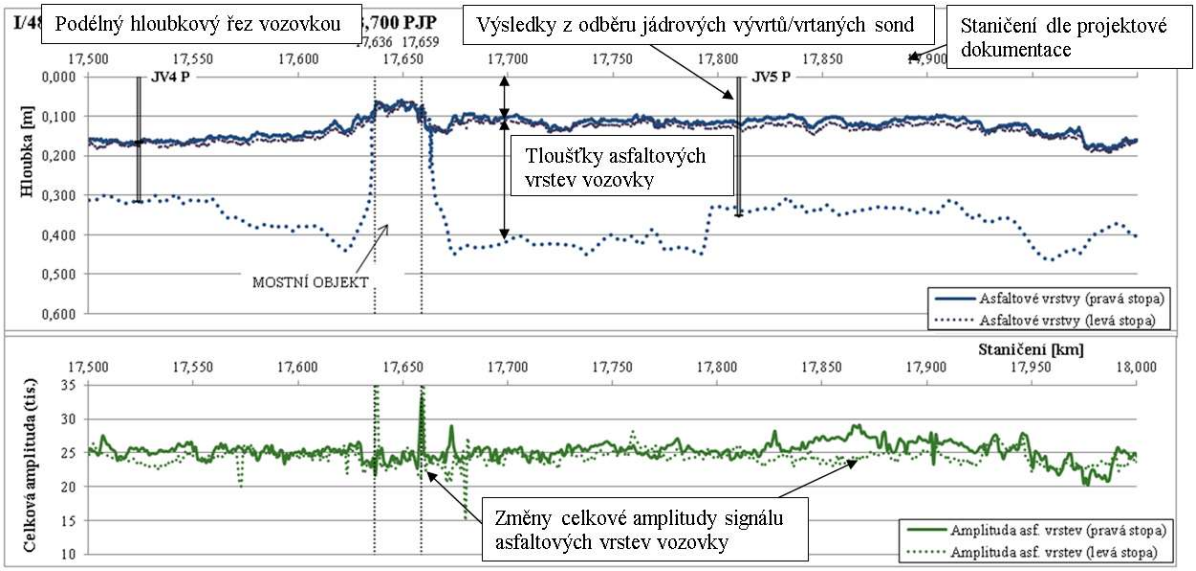
Měření georadarem na vozovkách se provádí kontinuálně se zadaným krokem měření (od cm po metry), a to buď rychlostí chůze (lokální měření), nebo vyšší rychlostí až 80 km/h (měření s využitím měřicího vozidla).

Prvotní záznam z měření, tzv. radargram, znázorňuje na ose x ujetou vzdálenost a na ose y čas průchodu signálu zkoumanou konstrukcí. Úprava záznamu se provádí pomocí vhodného software s cílem zvýraznění požadované oblasti a potlačení nežádoucích vlivů. Časový záznam se převádí na hloubkový řez. Využívají se k tomu nejčastěji údaje o skutečných tloušťkách jednotlivých vrstev vozovky zjištěné na odebraných vývrtech a sondách.

Nejčastější aplikace georadaru při diagnostickém průzkumu vozovek jsou [M2]:

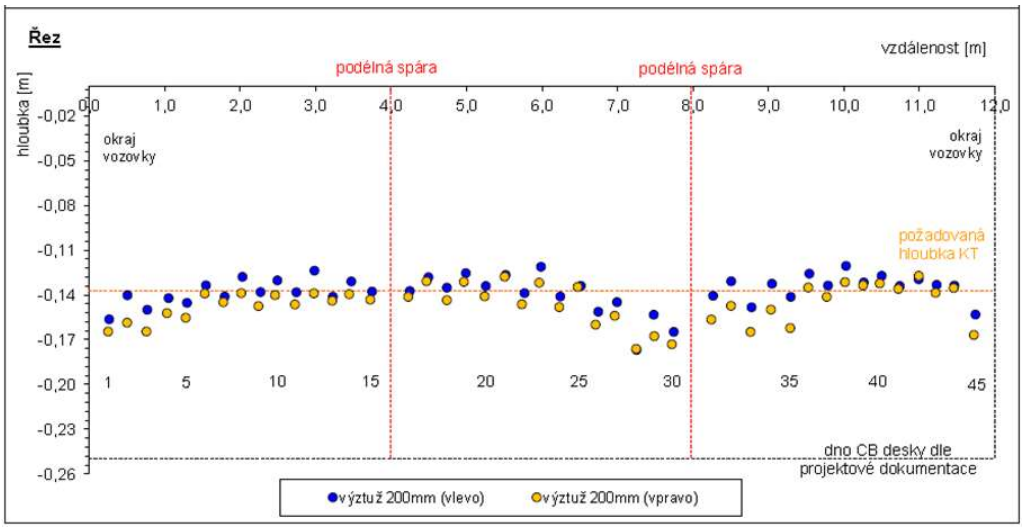
- stanovení tlouštěk konstrukčních vrstev vozovek ve volné trase, na mostech a v tunelech,
- stanovení polohy kluzných trnů a kotev v cementobetonovém (CB) krytu vozovky.

Možné způsoby začlenění výsledků do databáze správců jsou uvedeny v metodice M2. V případě tlouštěk vrstev vozovek měřených kontinuálně georadarem v podélném směru je to ve formě průměrných tlouštěk vrstev na délce min. 1 metr. Vyhodnocují se také další parametry, např. změna amplitudy odpovídající jednotlivým odrazům signálu a jejich vzájemný poměr, viz příklad uvedený na obr. 6.



***Obr. 6**: Příklad interpretace dat naměřených georadarem ve stopách vozidel – tloušťka asfaltových vrstev vozovky (nahoře), amplituda odrazu signálu (dole), [20]*

V případě polohy zabudované výztuže se provádí porovnání zjištěné polohy s požadavky projektové dokumentace a technických předpisů, viz obr. 7.



***Obr. 7**: Příklad interpretace dat naměřených georadarem – vyhodnocení polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu vozovky (měřeno 200 mm nalevo a napravo od spáry), zdroj: CDV*

Další detaily k této zkušební metodě jsou uvedeny v monografii CDV [20], ve slovenském technickém předpisu TP 055, americké normě ASTM D4748-10 a dalších zahraničních předpisech [6, 7].

První oficiální srovnávací měření georadarů podle TP 207 se plánuje v roce 2020. Několik firem již získalo akreditaci pro zkoušku stanovení tlouštěk konstrukčních vrstev vozovek a stanovení polohy kluzných trnů a kotev v CB krytech.

V souvislosti s prováděním diagnostického průzkumu vozovek se zpravidla, stejně jako v případě FWD, vyžaduje oprávnění od Ministerstva dopravy k provádění průzkumných a diagnostických prací souvisících s výstavbou, opravami, údržbou a správou pozemních komunikací.

Vzorové příklady uplatnění georadaru jsou přístupné on-line na webových stránkách projektu CESTI na adrese: http://www.cesti.cz/index.php?page=NDT.

2.4 Postup měření FWD a georadarem

V případě, že se měření rázovým zařízením FWD a georadarem provádí na síťové úrovni, zpravidla se provádí nezávisle na sobě. Způsob stanovení homogenních sekcí na síťové úrovni je popsán v kap. 2.6.1.

Diagnostika vozovky prováděná na projektové úrovni zahrnuje kroky uvedené v kap. 2.1. V případě, že podrobný diagnostický průzkum vozovky zahrnuje jak hodnocení únosnosti s využitím rázového zařízení FWD, tak měření georadarem, doporučuje se následující postup:

1. vizuální prohlídka posuzované vozovky s lokalizací poruch viditelných na jejím povrchu,
2. kontinuální měření georadarem v podélném směru (minimálně v jedné linii u směrově nerozdělených komunikací a samostatně v každém pásu u směrově rozdělených

komunikací, zpravidla v pomalém jízdním pruhu) s prvotním, orientačním vyhodnocením záznamu z měření (bez převodu na hloubkový řez, hodnocení amplitudy apod.),

3. určení zájmových oblastí (jiná skladba konstrukce vozovky, výskyt poruch, delaminace vrstev, dutiny a další anomálie v záznamu z měření georadarem) - jako podklad pro upřesnění míst pro měření rázovým zařízením FWD a odběr vývrtů a sond,
4. měření rázovým zařízením FWD ve zvoleném konstantním kroku v příslušných pruzích (zpravidla po 25 m), viz TP 87 a TP 92, s doplněním míst identifikovaných v předchozím bodě, s prvotním, orientačním vyhodnocením průhybových křivek (max. průhyb, tvar křivek apod.),
5. upřesnění zájmových oblastí na základě provedených měření rázovým zařízením FWD - jako podklad pro upřesnění míst pro odběr vývrtů a sond,
6. odběr jádrových vývrtů ze stmelených vrstev a sond z nestmelených vrstev a podloží, reprezentující homogenní úseky vozovky a identifikované zájmové oblasti; jejich obvyklé počty jsou uvedeny v TP 87 a TP 92,
7. provedení laboratorních zkoušek na odebraných vzorcích, podle požadavku TP 87, TP 92 a vyhlášky 130/2019 Sb.,
8. vyhodnocení (níže je uvedeno pouze zaměření ve vazbě na FWD a georadar):
   - vývrty a sondy – lokální stanovení tlouštěk jednotlivých vrstev vozovky a jejich stavu,
   - georadar – kontinuální stanovení tlouštěk vrstev vozovky (zejména krytu a podkladních vrstev), s kalibrací tlouštěk v místech provedených vývrtů a sond; lokalizace nehomogenit apod., viz kap. 2.3,
   - FWD – výpočet rázových modulů pružnosti vrstev vozovky (zejména krytu, podkladní vrstvy a podloží), zbytkové doby životnosti a návrhu zesílení v jednotlivých měřených bodech, s upřesněním tlouštěk vrstev zjištěných na vývrtech, sondách a měřením georadarem, viz kap. 2.2,
9. stanovení homogenních sekcí pro jednotlivé sledované parametry, viz kap. 2.6.2, pro účely následného návrhu údržby/opravy/rekonstrukce vozovky.

Poznámka 1: Zpravidla je snaha minimalizovat počet výjezdů na místo posuzované vozovky, zejména, pokud se tato nachází ve větší vzdálenosti. Někdy také diagnostiku vozovky provádí více samostatných pracovních týmů. V těchto případech je zejména důležitá koordinace jednotlivých prací a předávání informací mezi jednotlivými účastníky, a to zejména ve vazbě na určení vhodných míst pro odběr vývrtů a sond.

Poznámka 2: Lokální poruchy se posuzují samostatně, jelikož je není možné zohlednit v rámci členění do homogenních sekcí; většinou vyžadují individuální řešení.

Poznámka 3: Při finálním stanovení homogenních sekcí je potřeba přihlédnout také k technologickému hledisku, kdy se nedoporučuje provádět souvislou údržbu, opravy, nebo rekonstrukce na úseku vozovky kratším než 100 m.

2.5 Příklady uplatnění kombinace FWD a georadaru

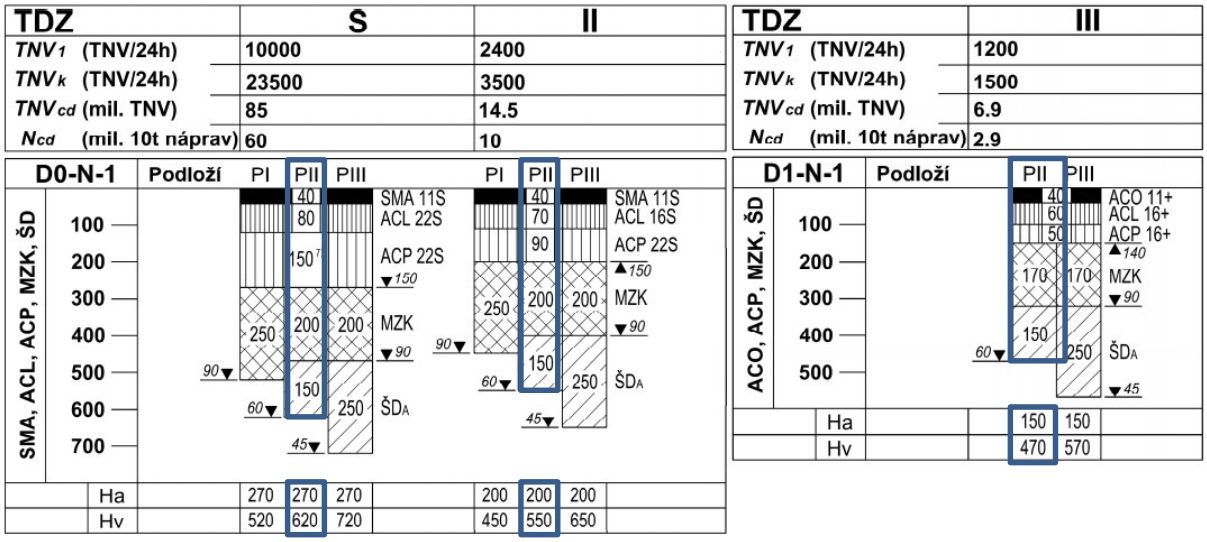
Znalost skladby a stavu konstrukčních vrstev a podloží vozovky je nezbytným podkladem pro rozhodování o vhodném způsobu údržby, oprav a rekonstrukcí vozovek.

Níže je uvedeno několik konkrétních příkladů kombinace rázového zařízení FWD a georadaru při diagnostickém průzkumu vozovky s demonstrováním přínosu jejich použití.

2.5.1 Zpřesnění výpočtu modulů pružnosti konstrukčních vrstev vozovky

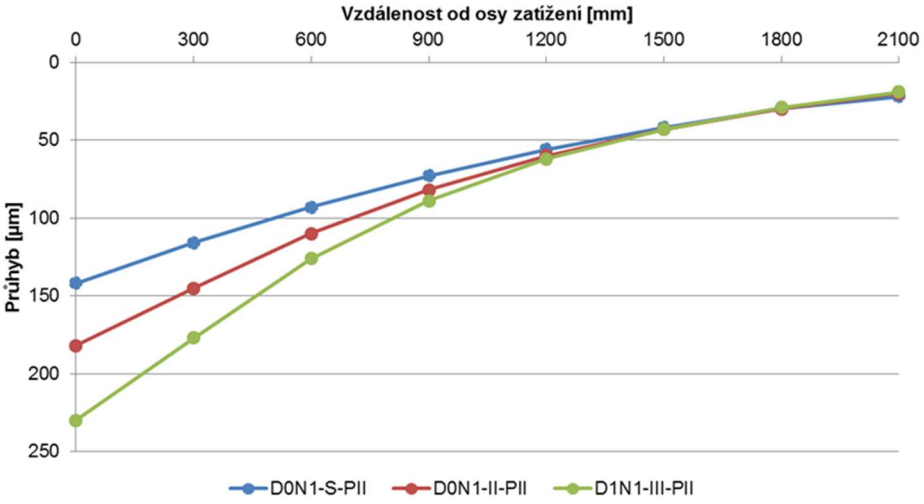
Výpočet rázových modulů pružnosti konstrukčních vrstev vozovky a podloží vychází z průhybů naměřených rázovým zařízením FWD. Další důležité vstupní údaje pro tento zpětný výpočet jsou typ, tloušťka a spolupůsobení jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky.

Od tlouštěk vrstev vozovky a jejich deformačních charakteristik se odvíjí celková tuhost vozovky. Menší tuhost vrstev vozovky způsobuje vyšší průhyb vozovky a opačně. Vliv skladby konstrukce vozovky na velikost naměřených průhybů ilustruje obr. 8 a 9.



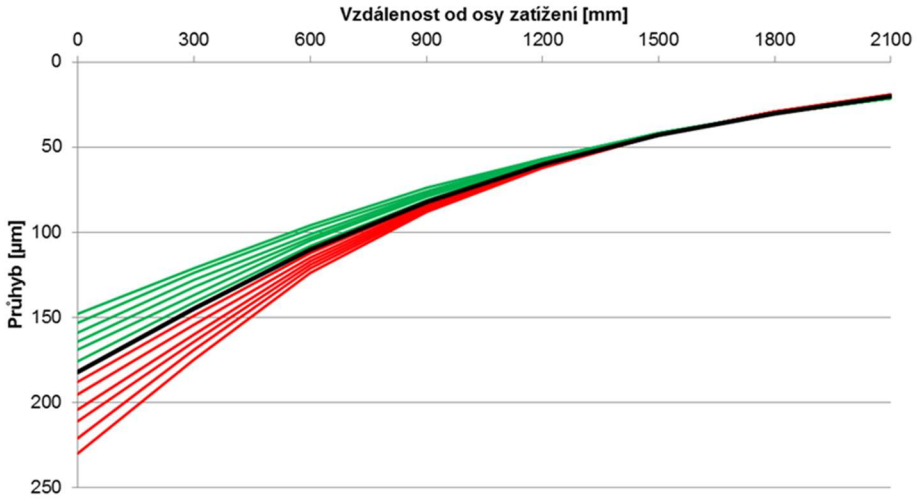
TDZ – třída dopravního zatížení (S, I, II až VI)
TNV_1 – průměrná denní intenzita provozu těžkých nákladních vozidel (TNV) v roce zahájení provozu PK
TNV_k – charakteristická hodnota denní intenzity TNV, jako průměrný počet TNV v návrhovém období
TNV_{cd} – návrhová hodnota celkového počtu přejezdů TNV za návrhové období
N_{cd} – návrhová hodnota celkového počtu přejezdů návrhových náprav (100 kN) v návrhovém období
D0 a D1 – návrhová úroveň porušení
N – netuhá vozovka = vozovka s asfaltovým krytem
PI, PII a PIII – typy podloží vozovky
SMA – asfaltový koberec mastixový
ACO, ACL, ACP – vrstvy z asfaltového betonu (obrusná, ložní a podkladní)
MZK – vrstva z mechanicky zpevněného kameniva
ŠD – vrstva ze štěrkodrti
Ha – tloušťka asfaltových vrstev
Hv – celková tloušťka vozovky

Obr. 8: *Skladba vozovky pro katalogové listy D0-N-1-S, D0-N-1-II, D1-N-1-III uvedené v TP 170*



***Obr. 9**: Průhybové křivky vozovek uvedených na obr. 8, vypočítané dopředným výpočtem na základě tabulkových hodnot v programu LayEPS, pro podloží typu PII, zdroj: CDV*

Obr. 10 demonstruje změny průhybové křivky pro vozovku podle katalogového listu D0-N-1-II-PII v závislosti na změně tloušťky asfaltových vrstev vozovky *20 +/- 6 cm, s krokem 1 cm*.



***Obr. 10**: Průhybové křivky vozovky D0-N-1-II-PII s tloušťkou asfaltových vrstev 20 +/- 6 cm, s krokem 1 cm; vypočítáno v programu LayEPS, zdroj: CDV*

Tloušťky jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky představují důležitý vstupní údaj zpětného výpočtu rázových modulů pružnosti konstrukčních vrstev vozovky.

V případech, kdy jsou k dispozici údaje o tloušťkách vrstev vozovky pouze z provedených vývrtů a sond, uvažuje se průběh tlouštěk vrstev v úsecích, které tyto vývrty a sondy reprezentují, za konstantní.

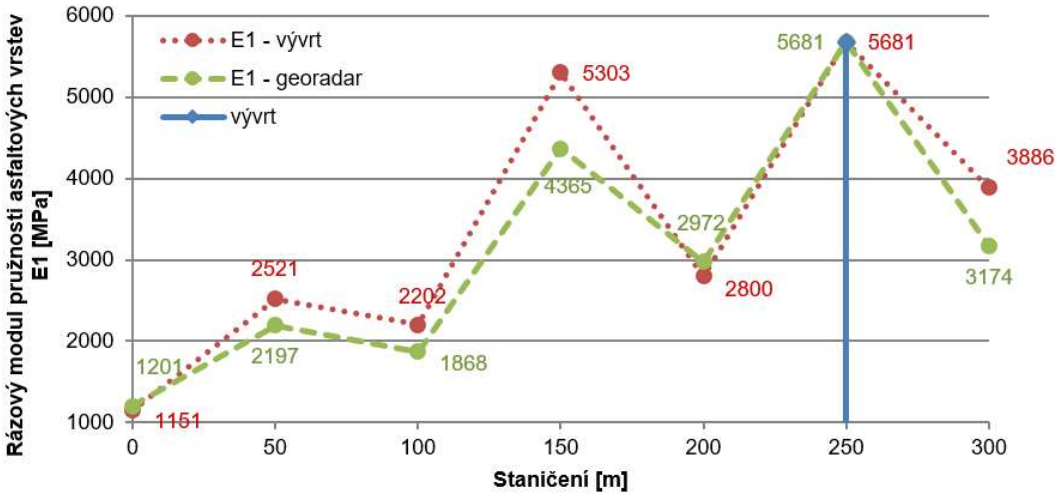
Georadarové měření umožňuje kontinuální záznam tlouštěk konstrukce vozovky, což umožňuje zpřesňovat výpočet rázových modulů pružnosti použitím reálnějších hodnot tlouštěk vrstev vozovky na jednotlivých bodech, kde bylo provedeno měření rázovým zařízením FWD.

Příklad demonstrující rozdíly plynoucí z použití různých tlouštěk vrstev vozovky, při zpětném výpočtu rázových modulů pružnosti, je uveden v tab. 2. Tloušťka asfaltových vrstev je zde v rozsahu 150 až 270 mm.

***Tabulka 2**: Hodnoty rázových modulů pružnosti vypočítané zpětným výpočtem v programu DG_Laymed_FWD pro průhyby uvedené na obr. 9*

Skladba vozovky - katalogový list	Tloušťka asfaltových vrstev [mm]	Rázový modul pružnosti [MPa]		
		Asfaltové vrstvy	Podkladní vrstvy	Podloží
D0-N-1-S, podloží PII	270	9659	584	77
D0-N-1-II, podloží PII	200	9532	603	77
D1-N-1-III, podloží PII	150	8801	667	77

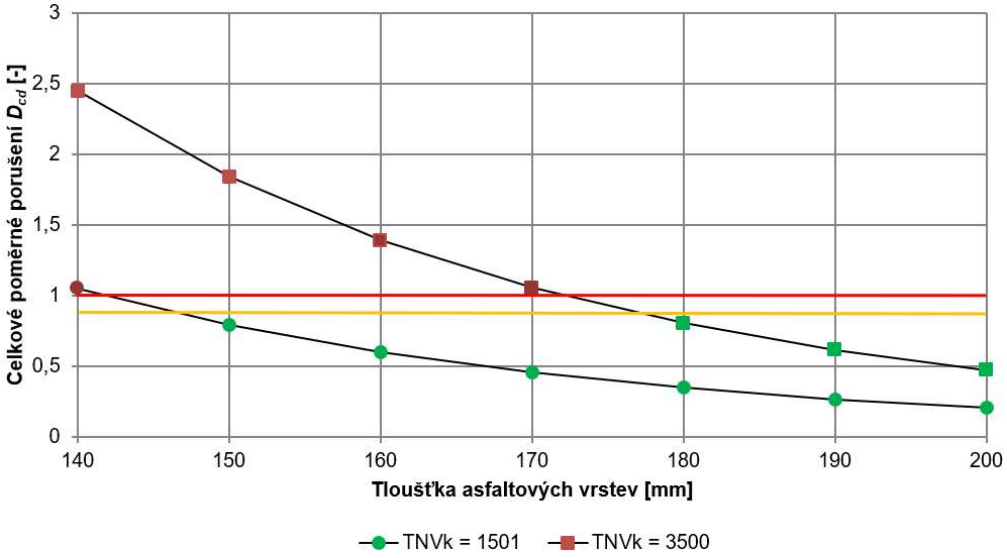
Další srovnání provedené na reálném úseku diagnostikované vozovky je uvedeno na obr. 11. Na základě tlouštěk vrstev zjištěných z odběru jednoho jádrového vývrtu ve staničení 250 m (22 cm) a kontinuálně pomocí georadaru (od 20 do 26 cm) byly vypočítány rázové moduly pružnosti asfaltových vrstev na 7 bodech.



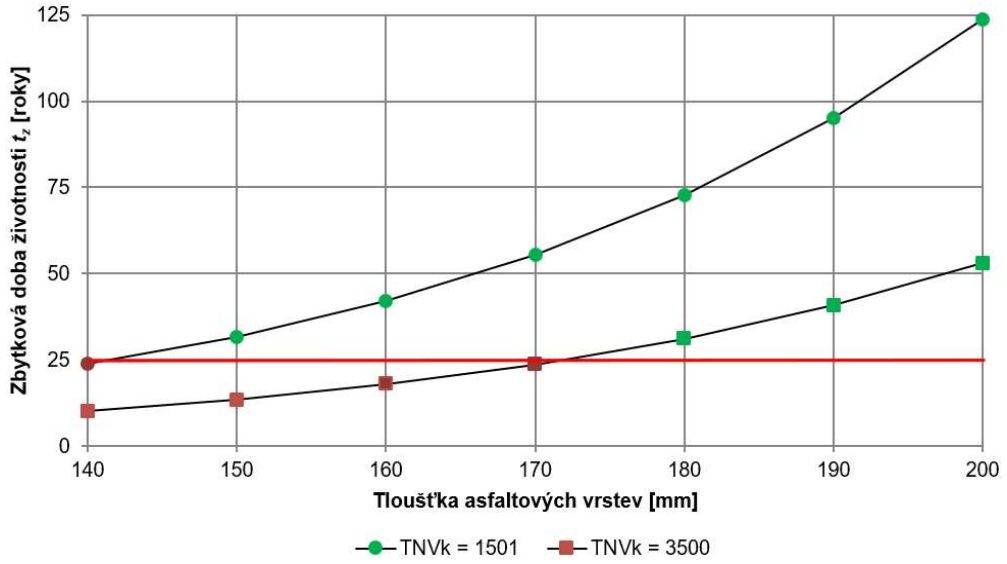
***Obr. 11**: Srovnání rázových modulů pružnosti asfaltových vrstev vypočítaných s použitím tlouštěk vrstev zjištěných kontinuálně georadarem (E1 - georadar) a na základě jednoho vývrtu ve staničení 250 m (E1 - vývrt = při použití konstantní tloušťky vrstvy)*

Pro dokreslení toho, jak se tloušťka asfaltových vrstev promítá do výpočtu zbytkové doby životnosti vozovky ve vazbě na dopravní zatížení, jsou na obr. 12 a 13 uvedeny hodnoty z dopředného výpočtu provedeného programem LayEPS pro posouzení vozovky D0-N-1-II-PII.

Návrhové období bylo zvoleno 25 let, třída dopravního zatížení byla zvolena II (průměrný počet těžkých nákladních vozidel v návrhovém období TNV_k = 1501 až 3500), meziroční nárůst dopravy m = 0 %, součinitel C_1 = 0,5, C_2 = 1,0, C_3 = 0,5, C_4 =1,0. Při posouzení vozovky se vychází z vypočítaných hodnot celkového poměrného porušení v průběhu návrhového období D_{cd}.



***Obr. 12**: Celkové poměrné porušení D_{cd} vozovky D0-N-1-II-PII v závislosti na tloušťce asfaltových vrstev vozovky a dopravním zatížení, zdroj: CDV*



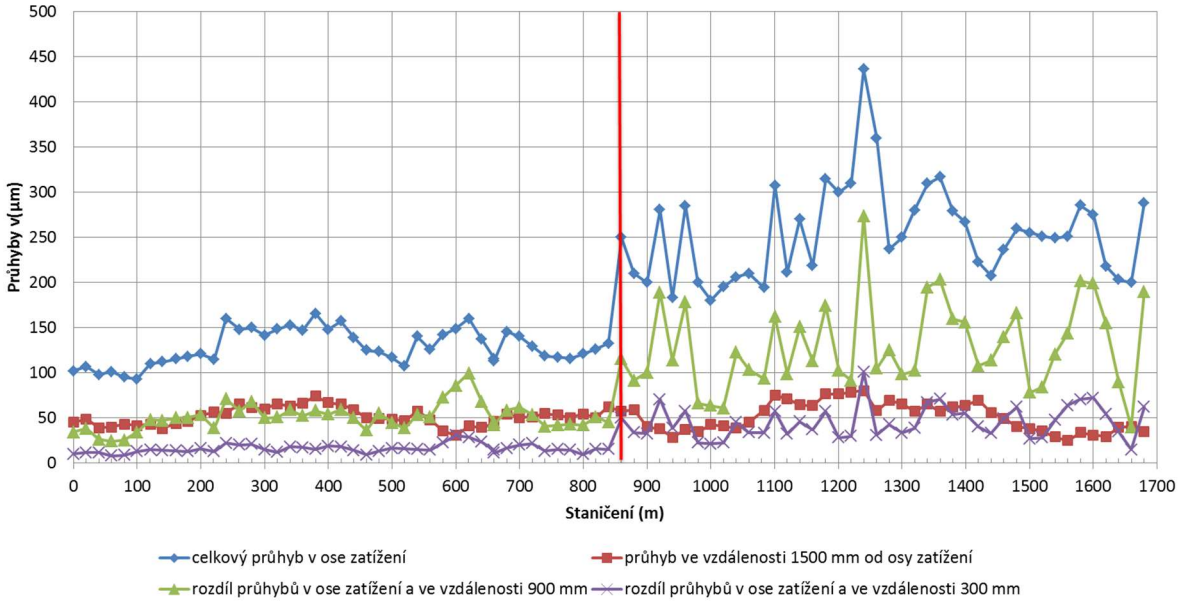
***Obr. 13**: Zbytková doba životnosti t_z vozovky D0-N-1-II-PII v závislosti na tloušťce asfaltových vrstev vozovky a dopravním zatížení, zdroj: CDV*

2.5.2 Zpřesnění při tvorbě homogenních sekcí

V rámci podrobného diagnostického průzkumu je výhodné měřit jak rázovým zařízením FWD, tak georadarem.

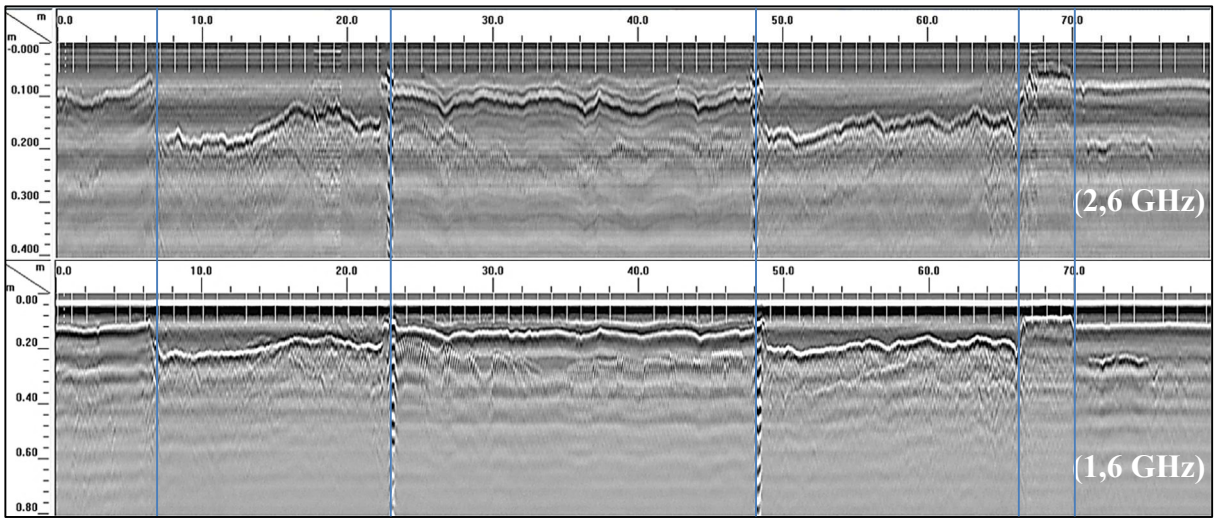
Ze záznamů obou měření se vytvářejí homogenní sekce, viz kap. 2.6.2.

Na obr. 14 je uveden příklad rozdělení úseku měřeného rázovým zařízením FWD na dvě homogenní sekce, a to na základě změřených průhybů vozovky.

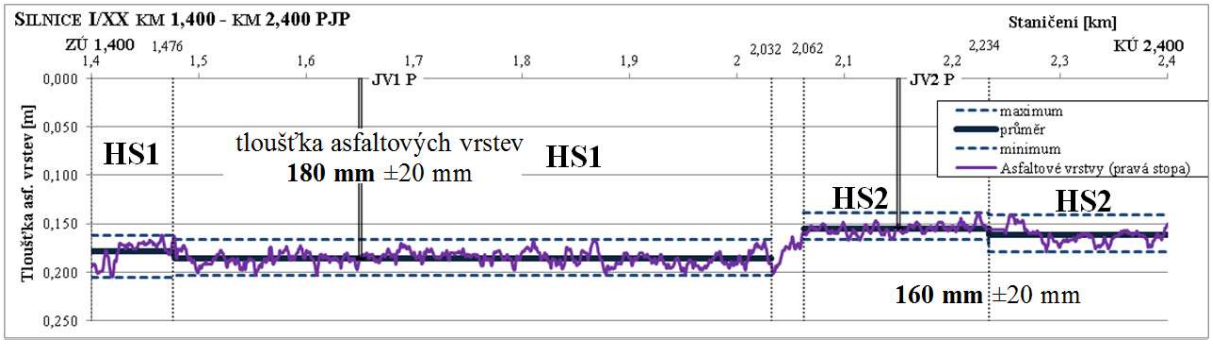


***Obr. 14**: Záznam z měření rázovým zařízením FWD – příklad rozdělení měřeného úseku vozovky na 2 homogenní sekce, zdroj: CDV*

Na obr. 15 je zobrazeno vytvoření homogenních sekcí v záznamu z kontinuálního měření georadarem. Rozdělení bylo provedeno na základě rozdílných tlouštěk asfaltových vrstev vozovky. Další příklad je uveden na obr. 16, kde již jde o interpretaci naměřených dat v Excelu.



***Obr. 15**: Záznam z podélného měření vozovky s asfaltovým krytem georadarem, anténami 2,6 GHz (nahoře) a 1,6 GHz (dole), s rozdělením do homogenních sekcí [20]*



***Obr. 16**: Interpretace naměřených dat z měření georadarem v Excelu – tvorba homogenních sekcí na základě tloušťky asfaltových vrstev [20]*

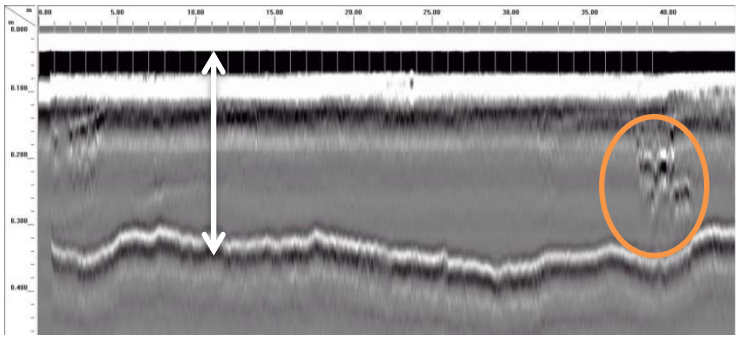
Vyhodnocení dat z měření georadarem může vysvětlit rozdíly identifikované při měření rázovým zařízením FWD, zejména z hlediska skladby konstrukčních vrstev vozovky, jejich tlouštěk a homogenity.

2.5.3 Upřesnění míst pro měření zařízením FWD na základě výsledků měření georadarem

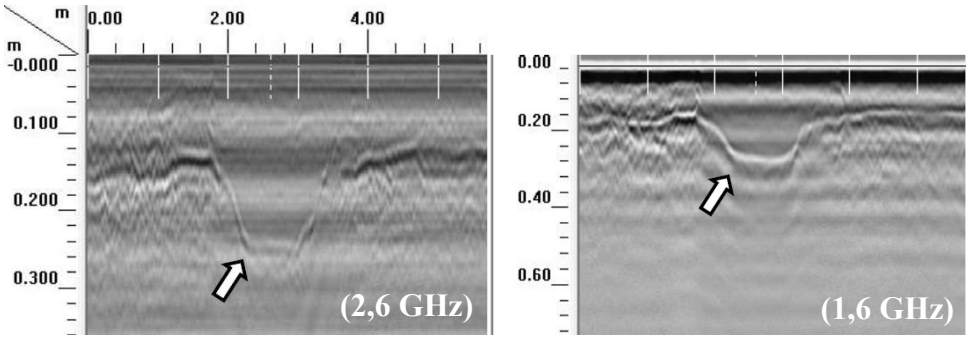
Měření georadarem se má provádět před měřením rázovým zařízením FWD, jelikož vyhodnocení záznamu z měření georadarem umožní identifikovat místa, na která se má zaměřit detailní diagnostika, provedení vývrtů a sond, nebo naopak určit místa, kde není vhodné provádět měření zařízením FWD, jelikož by výsledky nebyly dostatečně reprezentativní.

Tímto způsobem se také dají lokalizovat místa, která musí být před zesílením vozovky opravena, nebo je při jejich opravě potřeba přistupovat jiným způsobem než na zbytku vozovky. Jde o potencionální slabá místa, na nichž by se následně poruchy projevily nejdříve.

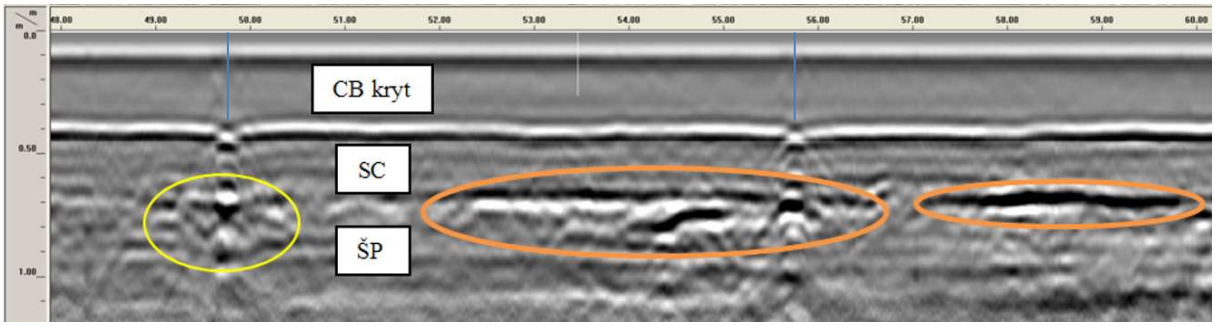
Na obr. 17 až 19 jsou uvedeny příklady takto identifikovaných míst v záznamu z měření georadarem.



***Obr. 17**: Záznam z měření georadarem – ukázka lokální nehomogenity v asfaltovém krytu vozovky, zdroj: CDV*



***Obr. 18**: Záznam z měření georadarem v příčném směru vozovky anténami 2,6 GHz (vlevo) a 1,6 GHz (vpravo) - identifikace změn ve skladbě vrstev vozovky [20]*

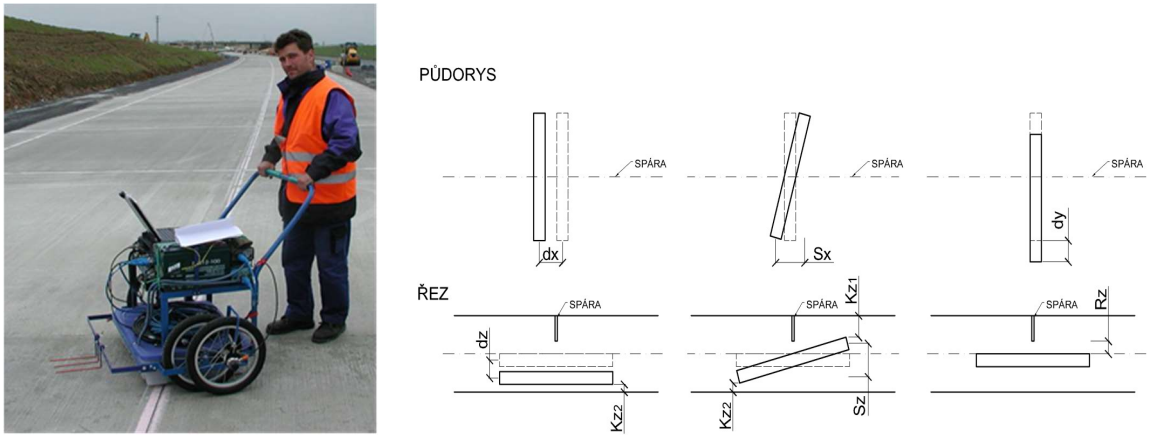


***Obr. 19**: Záznam z měření georadarem – identifikace porušení a nadměrného obsahu vody v podkladních vrstvách pod dvěma deskami CB krytu vozovky [20]*

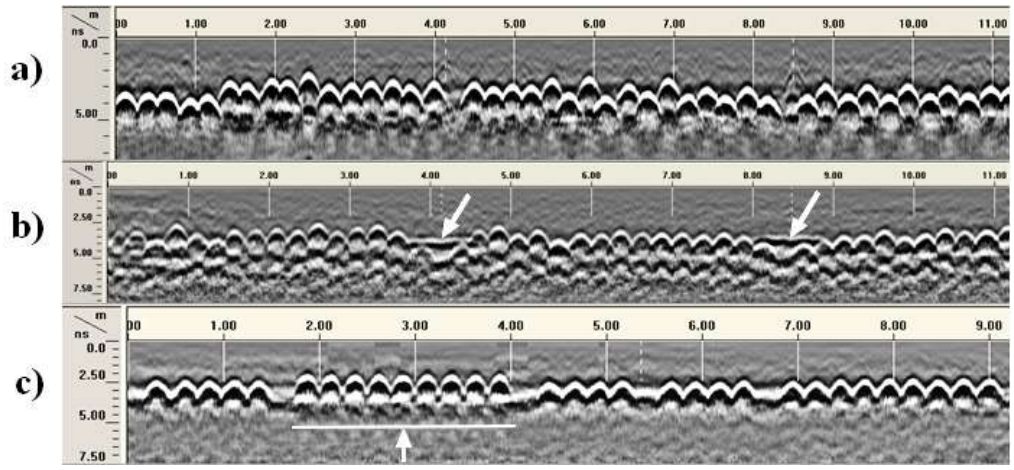
2.5.4 Měření na spárách CB krytu vozovky

Diagnostický průzkum vozovky s CB krytem je sám o osobě specifický [M1]. Jednou z aplikací, kde se dá demonstrovat synergie použití FWD a georadaru je měření na příčných spárách CB krytu, které se vyztužují kluznými trny.

Na obr. 20 je uveden dvoukanálový georadar, který se požívá pro měření polohy kluzných trnů a normové parametry, které se sledují v rámci přejímky nové vozovky. Na obr. 21 jsou uvedeny příklady záznamů z tohoto měření (poloha výztuže odpovídá vrcholům hyperbol na záznamu).

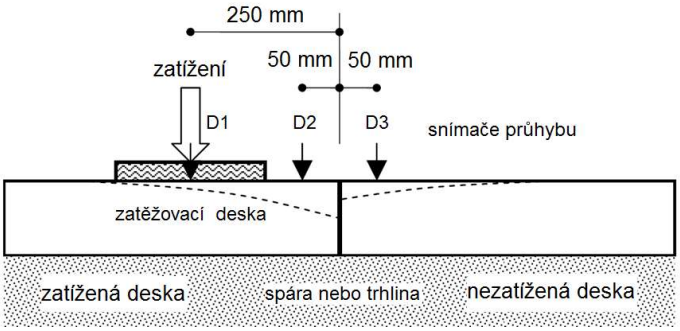


***Obr. 20**: Vozík pro měření polohy kluzných trnů a kotev se dvěma anténami 1,6 GHz (vlevo), sledované normové parametry uložení kluzných trnů (vpravo), zdroj: CDV*



***Obr. 21**: Záznamy z měření georadarem na příčné spáře: a) variabilita polohy kluzných trnů, b) zatlačení kluzných trnů kotvami směrem dolů v místě křížení příčné a podélné spáry, c) kluzné trny uložené v několika různě rozmístěných ocelových koších [24]*

Na obr. 22 je uvedeno rozmístění snímačů rázového zařízení FWD při měření přenosu zatížení na spárách CB krytu (spolupůsobení sousedních desek), které se provádí v rámci diagnostického průzkumu.



***Obr. 22**: Schéma rozmístění zatěžovací desky a snímačů při měření spolupůsobení desek na spárách CB krytu vozovky [M1]*

Přenos zatížení na spárách CB krytu se vypočte podle následujícího vzorce:

$$LTE = \frac{y_{300}}{y_{200}} \cdot 100 \qquad (1)$$

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

y_{300} - průhyb naměřený na nezatížené desce CB krytu, 300 mm od osy zatížení [mm],

y_{200} - průhyb naměřený na zatížené desce CB krytu, 200 mm od osy zatížení [mm].

Porovnáním hodnot *LTE*, počítaných z průhybů měřených v rámci stejného dne (za stejných podmínek), je možné identifikovat spáry, které vykazují nízký přenos zatížení na spárách a na těchto následně provést měření georadarem. Pokud se provádí pouze měření georadarem, zpravidla se kontrolují spáry v předem stanoveném kroku měření, např. každá desátá spára.

2.6 Vytváření homogenních sekcí

Způsob vytváření homogenních sekcí z naměřených hodnot závisí na velikosti souboru vyhodnocovaných dat a jeho vlastnostech.

2.6.1 Síťová úroveň

V případě vyhodnocování parametru vozovky na síťové úrovni se používá rozdělení do tříd, zpravidla 5, viz hodnocení nerovností povrchu vozovky, makrotextury a protismykových vlastností povrchu vozovky uvedené v ČSN 73 6175 a ČSN 73 6177. Obdobným způsobem je možné provádět hodnocení únosnosti vozovky vyjádřené zbytkovou dobou životnosti t_z, viz tab. 3. Pro členění tloušťky vrstev vozovky měřené georadarem je možné použít vícero tříd, např. s odstupem po 5 cm pro krytové vrstvy a 10 cm pro podkladní vrstvy.

Tabulka 3: *Hodnocení zbytkové doby životnosti vozovky klasifikačními stupni podle TP 87*

klasifikační stupeň	1	2	3	4	5
zbytková doba životnosti t_z	25 let	20–24	10–19	5–9	$<$ 5 let
	při uvedení do provozu	v záruční době	při provádění údržby		při provedení opravy

Stejně lze postupovat i u dalších parametrů vozovek sledovaných na síťové úrovni.

2.6.2 Projektová úroveň

V případě vyhodnocování parametru vozovky na projektové úrovni, které se týká podstatně kratších úseků vozovek, se postupuje následovně:

1. Hodnoty *x* představují staničení (ujetou vzdálenost), hodnoty *y* sledovaný parametr (např. průhyb naměřený v ose zatížení rázovým zařízením FWD či tloušťku vrstvy z měření georadarem).
2. Spočítají se hodnoty součtové čáry Z_i podle následujících vztahů [7]:

$$a_i = \frac{y_i + y_{i-1}}{2} * (x_i - x_{i-1}) \quad (2)$$

$$A = \sum_{i=2}^{n} a_i \; / \; \sum_{i=2}^{n} x_i - x_{i-1} \quad (3)$$

$$Z_i = \sum_{j=2}^{i} a_j - A * \sum_{j=2}^{i} x_j - x_{j-1} \quad (4)$$

Ukázka tohoto výpočtu pro tloušťku asfaltového krytu vozovky z měření georadarem je uvedena v tab. 4.

Tabulka 4: *Ukázka výpočtu hodnot* součtové čáry Z_i

poč. měření =	71									
min y =	95							měřítko Zi =	20,5	
max y =	200									
aritm. průměr ȳ =	**147,0**							**A = ∑a_i / ∑Δx_i =**	**147,4**	
číslo měření	**staničení m**	**tloušťka vrstvy mm**	**součt. čára** (pro různý krok měření)							
						a_i		Z_i		
i	**x_i**	**y_i**	**Δx_i**	**∑Δx_i**	**$\Delta y_i/2$**	**$\Delta y_i/2 * \Delta x_i$**	**∑a_i**	**∑a_j - A * ∑Δx_j**		
1	0	150	0	0	0	0	0	0	0	
2	5	150	5	5	150	750	750	13	1	
3	10	155	5	10	153	763	1513	39	2	
4	15	155	5	15	155	775	2288	77	4	
5	20	155	5	20	155	775	3063	115	6	
6	25	160	5	25	158	788	3850	166	8	
7	30	155	5	30	158	788	4638	217	11	

3. Použije se kritérium pro výpočet rozhraní mezi homogenními sekcemi, nebo kombinace vícero kritérií, například:
   - max. změna sklonu součtové čáry,
   - % o kolik se smí lišit hodnota y_i od průměru ze stanoveného počtu předchozích hodnot,
   - max. hodnota variačního koeficientu předchozích hodnot ve stejné homogenní sekci.

   Příklad navazující na tab. 4 je uveden v tab. 5.

Tabulka 5: *Příklad výpočtu rozhraní mezi homogenními sekcemi*

					počet hodnot =	2		počet h. =	5		
					rozdíl h.s. =	0,25		rozdíl h.s. =	7,5	%	
číslo měření	**staničení m**	**tloušťka vrstvy mm**	**součtová čára**		**dělení do h. sekcí**			**dělení do h. sekcí 2**			
			Z_i		**směrnice t.**		**sekce**	**klouz.p.**	**sekce**		
i	**x_i**	**y_i**	**∑a_j - A * ∑Δx_j**		**$\Delta Z_i/\Delta x_i$**	**Δ (2)**		**$\bar{y}$ (5)**			
52	255	130	3849	188	0,603	0,542	ok	135	ok		
53	260	130	3762	183	0,846	0,725	ok	134	ok		
54	265	130	3675	179	0,846	0,846	ok	133	ok		
55	270	125	3576	174	0,968	0,907	ok	131	ok		
56	275	100	3402	166	1,700	1,334	nová s.	123	nová s.		
57	280	95	3153	154	2,431	2,066	nová s.	116	nová s.		
58	285	95	2891	141	2,553	2,492	nová s.	109	nová s.		
59	290	100	2641	129	2,431	2,492	ok	103	ok		
60	295	100	2405	117	2,309	2,370	ok	98	ok		
61	300	100	2168	106	2,309	2,309	ok	98	ok		
62	305	110	1956	95	2,066	2,187	ok	101	nová s.		
63	310	110	1769	86	1,822	1,944	ok	104	ok		
64	315	110	1583	77	1,822	1,822	ok	106	ok		

4. Vypočtou se následující parametry stanovených homogenních sekcí [1]:
   - aritmetický průměr $\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$ (5)
   - rozptyl $S^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$ (6)

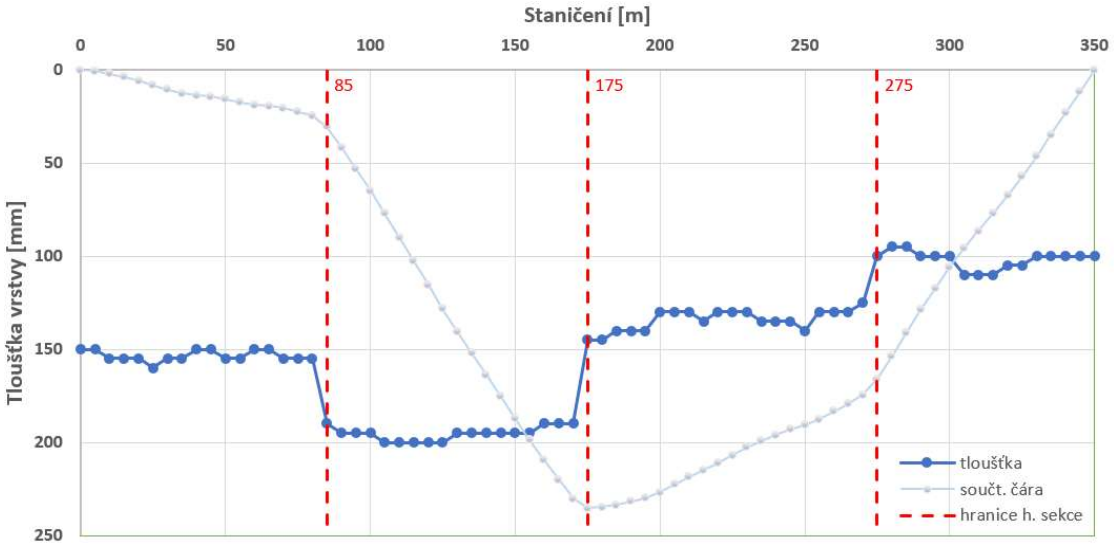
- směrodatná odchylka $\sigma_y = \sqrt{S^2}$ (7)
- variační koeficient $v = \frac{\sigma_y}{\bar{y}}$ (8)

Příklad navazující na tab. 4 a 5 je uveden v tab. 6.

Tabulka 6: *Vypočtené parametry stanovených homogenních sekcí*

									požadavek: v < 5 %
číslo sekce	staničení		počet m. v sekci	průměr v sekci	rozptyl	směr. odchylka	variační koeficient	kontrola
i	od [m]	do [m]	n	$\bar{y}$	S^2	σ_y	v	
1	0	80	17	154	8,1	2,9	0,019	ok
2	85	170	18	195	12,4	3,5	0,018	ok
3	175	270	20	134	30,7	5,5	0,041	ok
4	275	350	16	102	21,5	4,6	0,045	ok

5. Provede se grafické zobrazení výsledků, viz obr. 24, navazující na předchozí tabulky.



Obr. 24: Příklad zobrazení průběhu sledovaného parametru, součtové čáry a hranic vypočtených homogenních sekcí, zdroj: CDV

6. Provede se kontrola stanovených homogenních sekcí; v případě potřeby se upraví kritéria pro výpočet rozhraní mezi homogenními sekcemi, provede se vyloučení extrémních hodnot apod.
7. Výsledkem je finální členění posuzovaného úseku vozovky do homogenních sekcí z hlediska sledovaného parametru.

Následně probíhá porovnání homogenních sekcí stanovených z hlediska různých parametrů a jejich slučování do homogenních sekcí určených pro účely plánování údržby, oprav a rekonstrukcí vozovky.

3. Novost postupů, způsob uplatnění a ekonomické aspekty

3.1 Srovnání novosti postupů

Tato metodika nově uvádí, jak postupovat při měření rázovým zařízením FWD a georadarem, ve vztahu k dalším činnostem prováděným v rámci diagnostického průzkumu vozovky, viz kap. 2.4. Jsou zde uvedeny konkrétní příklady demonstrující přínos měření oběma těmito zařízeními, viz kap. 2.5. Dále je zde uveden konkrétní postup, jak vytvářet homogenní sekce při vyhodnocování naměřených dat, s možností jejich automatického zpracování, viz kap. 2.6.

Uvádí odkazy na aktuální předpisy, metodiky, články a jiné zdroje, které mohou zpracovatelé diagnostického průzkumu vozovek využít.

Metodika vychází ze:

- zkušeností účastníků projektu CESTI: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu, http://www.cesti.cz/index.php?page=ucast_prj
- zkušeností pracovníků CDV při provádění diagnostického průzkumu vozovek,
- informací z revize TP 87 zaměřené na údržbu vozovek s asfaltovým krytem,
- zkušeností z revize TP 207 a přípravy nové přílohy E: Experiment přesnosti zařízení měřících tloušťky vrstev vozovek pozemních komunikací georadarem.

3.2 Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika je určena především pro:

- firmy provádějící měření průhybů vozovek rázovými zařízeními FWD, měření georadarem a hodnocení stavu vozovek,
- zpracovatele diagnostického průzkumu vozovek,
- správce pozemních komunikací, projektanty a zhotovitele staveb pozemních komunikací.

Bude uplatněna výše uvedenými subjekty v souvislosti se správou vozovek pozemních komunikací.

3.3 Ekonomické aspekty

Výsledky diagnostiky staveb jsou podkladem pro návrh vhodného způsobu opatření či zásahu (údržba/ oprava/ rekonstrukce). Pokud jsou tyto podklady v dostatečném rozsahu a kvalitě vede to k optimalizaci nákladů a zvyšování životnosti staveb. K tomuto účelu může nemalou měrou přispět uplatnění kombinace nedestruktivních diagnostických metod jako je rázové zařízení FWD a georadar.

V kap. 2.5 jsou uvedeny konkrétní příklady kombinace rázového zařízení FWD a georadaru při diagnostickém průzkumu vozovky s demonstrováním přínosu jejich použití.

4. Seznam použité související literatury

Normy, technické předpisy apod.:

Systém jakosti v oboru pozemních komunikací (SJ-PK), II. Metodické pokyny k jednotlivým oblastem SJ-PK, Část II/2: Průzkumné a diagnostické práce, v aktuálním znění

vyhláška 130/2019 Sb. o kritériích, při jejichž splnění je asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem

ČSN 73 6192: Rázové zatěžovací zkoušky vozovek a podloží, 1996

ČSN 73 6175: Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek, 2015

ČSN 73 6177: Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchů vozovek ,2015

TP 87: Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek, 2010, v revizi

TP 92: Navrhování údržby a oprav vozovek s cementobetonovým krytem, 2011

TP 170: Navrhování vozovek pozemních komunikací – všeobecná část, katalog, návrhová metoda, včetně dodatku, 2010

TP 207: Experiment přesnosti – Zařízení pro měření povrchových vlastností a dalších parametrů vozovek pozemních komunikací, 2017

TP 233 Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací, 2011

TP 031: Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB, slovenské TP, původní označení TP 01/2009

TP 055: Využitie Georadaru (GPR) pri návrhu rehabilitácie/rekonštrukcie vozoviek, slovenské TP, původní označení TP 03/2012

ASTM D4748-10: Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar, 2015

Ostatní:

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

[2] COST 336 final report: Use of Falling Weight Deflecometers in Pavement Evaluation: 2nd edition, European Commission, 392 p., 2005

[3] FGSV-Nr. 433 B 2: Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen, Teil B 2: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung, 2012

[4] FGSV-Nr. 433 C 2: Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen, Teil C 2 Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung, 2017

[5] CROW Falling Weight Deflectometer Correlation Trial, CROW report D17-05, 2017

[6] FGSV-Nr. 443 A: Arbeitspapier - Anwendung des Georadars zur Substanzbewertung von Straßen, Teil A: Bestimmung von Schichtdicken des Oberbaus von Verkehrsflächenbefestigungen mit dem Georadar-Impulssystem, 2016

[7] Golkowski G. Entwicklung von Auswertealgorithmen für Georadardaten unter Anwendung statistischer Verfahren zur Bildung von Abschnitten homogenen Aufbaus, Bundesanstalt für Straßenwesen, Nachricht Nr. F1100.3408006, 55 s., 2014

5. Seznam publikací, které předcházely metodice

Metodiky:

M1 Měření průhybů a hodnocení únosnosti vozovek rázovým zařízením FWD, certifikovaná metodika Ministerstva dopravy, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Ing. Pavel Herrmann – RODOS, 26 s., 2014

M2 Metodika pro použití jednotlivých NDT zařízení v konkrétních situacích – zaměření na laserové skenování a georadar, certifikovaná metodika Ministerstva dopravy, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Geovap, spol. s r.o., 19 s., 2015

Užitné vzory a patenty:

[8] Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. *Distanční zařízení pro dvoukanálový georadar*. Původce vynálezu: Matula R., Stryk J., Pospíšil K. Česká republika. Užitný vzor, 28267. 2015-06-20.

[9] Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. *Automatizované zařízení pro ovládání dvoukanálového georadaru*. Původce vynálezu: Matula R., Stryk J., Pospíšil K. Česká republika. Patentový spis, 305724. 2016-01-06.

Výzkumné zprávy:

[10] Databáze nových a progresivních diagnostických metod se vzorovými příklady jejich uplatnění, zpráva projektu CESTI, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 18 příloh, 2014

[11] Analýza způsobů lokalizace při měření proměnných parametrů vozovek, zpráva projektu CESTI, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 16 s., 2017

[12] Technicko-ekonomické srovnání NDT metod – vozovky, zpráva projektu CESTI, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 30 s., 2017

Články a knihy:

[13] Janků M., Cikrle P., Grošek J. et al. Comparison of Infrared Thermography, Ground-Penetrating Radar and Ultrasonic Pulse Echo for Detecting Delaminations in Concrete Bridges. *Construction and Building Materials*, 2019, No. 225, p. 1098-1111.

[14] Stryk J., Janků M. Ground Penetrating Radar, chapter in report: *State of the Art in Monitoring Road Condition and Road/Vehicle Interaction*, World Road Association (PIARC) report, 6 p., 2019

[15] Pospíšil K., Lopour P. Nedestruktivní metody pro diagnostiku staveb dopravní infrastruktury. *Dopravní infrastruktura: sborník příspěvků*, Litomyšl, 15. - 16. 5. 2019, s. 66-70.

[16] Matula R., Gulej M., Navrátil J., Prokop J., Stryk J., Janků M. Stanovení tlouštěk stmelených a nestmelených podkladních vrstev vozovek z průzkumu pomocí georadaru. *Podkladní vrstvy a podloží vozovek: sborník příspěvků*, Brno, 28. 11. 2018, s. 62-70.

[17] Stryk J., Matula R., Pospisil K. et al. Comparative Measurements of Ground Penetrating Radars Used for Road and Bridge Diagnostics in the Czech Republic and France. *Construction and Bulding Materials*, 2017, No. 154, p. 1199-1206.

[18] Stryk J. Uplatnění nových diagnostických metod při hodnocení stavu vozovek PK. *Silniční konference: sborník příspěvků*, Brno, 18. - 19. 10. 2017, s. 107-111.

[19] Stryk J., Matula R., Březina I., Janků M. Přínosy uplatnění nedestruktivních diagnostických metod při plánování údržby a oprav. *Aktuální otázky správy a údržby pozemních komunikací: sborník příspěvků*, Znojmo, 3. - 4. 5. 2017, 7 s.

[20] Matula R., Stryk J., Pospisil K. *Georadar a jeho uplatnění při diagnostice objektů dopravní infrastruktury*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2016, 146 s., ISBN 978-80-88074-48-9.

[21] Matula R., Stryk J., Gulej M. et al. Měření polohy kluzných trnů a kotev dvoukanálovým georadarem. *Betonové vozovky: sborník příspěvků*, Praha, 22. 9. 2016, s. 78-83.

[22] Stryk, J., Alani, A.M., Matula, R., Pospisil, K. Innovative Inspection Procedures for Effective GPR Surveying of Critical Transport Infrastructures (pavements, bridges and tunnels), chapter in the book: *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar,* Springer International Publishing Switzerland, 2015, p. 71-95.

[23] Březina I., Grošek J., Stryk J. Měření průhybů a možnosti hodnocení tuhosti vozovek s cementobetonovým krytem prostřednictvím rázového zařízení FWD. *Silniční obzor*, 2015, roč. 76, č. 2, s. 48-52.

[24] Stryk J., Matula R., Pospisil K. Possibilities of Ground Penetrating Radar Usage within Acceptance Tests of Rigid Pavements. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, Vol. 97, No. 10, p. 11-26.

[25] Stryk J., Pospíšil K., Matula R. Měření tlouštěk vrstev konstrukce vozovky georadarem. *Letiskové vozovky*, Štrbské Pleso, 21. - 22. 5. 2012.

[26] Stryk J., Matula R. Georadar jako užitečný doplněk při diagnostice vozovek PK. *Asfaltové vozovky: sborník příspěvků*, České Budějovice, 22. - 23. 11. 2011, 8 s.

Ostatní:

[27] Sláma J., Stryk J. Úvodní prezentace k bloku I.: Technologie laserového skenování a georadaru v praxi, workshop Státního fondu dopravní infrastruktury: Nové technologie, Praha, 28. 6. 2016

[28] vzorové příklady uplatnění NDT metod: http://www.cesti.cz/index.php?page=NDT

6. Použité definice a zkratky

Definice:

Anténa georadaru je elektronické zařízení, umožňující vysílání elektromagnetického pulzu do zkoumaného prostředí a zaznamenávající odrazy, vznikající na rozhraní různých materiálů tohoto prostředí.

Centrální vysílací frekvence antény (střední frekvence antény) je největší zastoupení frekvence ve vysílaném frekvenčním spektru.

Diagnostický průzkum vozovky je soubor nezbytných kroků pro zjištění druhu a rozsahu poruch, stavu konstrukčních vrstev a podloží, únosnosti a vypracování technicky správného a efektivního návrhu údržby, opravy nebo rekonstrukce vozovky.

DG_Laymed_FWD je jeden ze softwarů sloužících ke zpětnému výpočtu rázových modulů pružnosti vrstev vozovky a podloží z průhybů naměřených rázovým zařízením FWD a pro výpočet zbytkové životnosti vozovky, při respektování pravidel uvedených v TP 170

Ekvivalentní modul pružnosti (E_{ekv}) je charakteristika únosnosti vozovky, která vychází z naměřených průhybů vozovky a teorie vrstevnatého lineárně pružného poloprostoru; zpravidla se používá jako ukazatel hodnocení vozovek s asfaltovým krytem na síťové úrovni.

Georadar (GPR: Ground Penetrating Radar, občas také: Ground Probing Radar) je nedestruktivní diagnostické zařízení, které se v silničním stavitelství využívá ke zjišťování tlouštěk konstrukčních vrstev vozovky, měření polohy zabudované výztuže, k identifikaci vad a poruch vozovek a k dalším aplikacím.

Georadarový záznam (radargram) je kontinuální záznam z měření elektromagnetických vlastností zkoumaného prostředí, který je prvotním výsledkem měření georadarem.

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

Index křivosti povrchu (*SCI*) je charakteristika tuhosti horních, zpravidla stmelených, vrstev vozovky, která se vypočítá jako rozdíl hodnoty průhybu povrchu v ose zatěžovací desky a průhybu ve vzdálenosti 300 mm od osy zatěžovací desky.

Krok měření je interval vysílání elektromagnetických impulsů do zkoumaného prostředí (georadar), nebo interval měření průhybů vozovky (FWD).

LayEPS je software sloužící k výpočtu a posouzení konstrukce netuhých vozovek podle TP 170; výpočet napětí a přetvoření je založen na řešení lineárně pružného vrstevnatého poloprostoru.

Průhyb na povrchu vozovky 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.

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).

Rychlost šíření EM signálu je rychlost, kterou se šíří vyslaný elektromagnetický impulz ve formě vlnění zkoumaným prostředím, které je zpravidla složeno z různých vrstev a objektů z různých materiálů; tato rychlost je pro různé materiály různá a je závislá na dielektrické konstantě příslušného materiálu.

Tlumený ráz je průběh silového impulzu vyvolaný pádem břemene na kruhovou zatěžovací desku s gumovými tlumiči; je charakterizovaný zatěžovací sílou 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.

<u>Vybrané zkratky</u>:

AC - asfaltobetonový, vrstva krytu vozovky

BCI - index křivosti podkladu (Base Curvature Index)

CB - cementobetonový, kryt vozovky

CDV - Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

E_{ekv} - ekvivalentní modul pružnosti

EM - elektromagnetický

E_r - rázový modul pružnosti příslušné vrstvy vozovky

FWD - rázové zařízení (Falling Weight Deflectometer)

LTE - hodnota přenosu zatížení na spárách CB krytu vozovky (Load Transfer Efficiency)

NDT - nedestruktivní zkoušení (Non-destructive testing)

PK - pozemní komunikace

SCI - index křivosti povrchu (Surface Curvature Index)

SJ-PK - Systém jakosti pozemních komunikací

TNV - těžké nákladní vozidlo, parametr používaný při vyjádření dopravního zatížení vozovky

TDZ - třída dopravního zatížení

TP - technické podmínky Ministerstva dopravy

t_z - zbytková doba životnosti vozovky z hlediska únosnosti

Příloha 1: Ukázka výsledků z měření FWD a georadarem

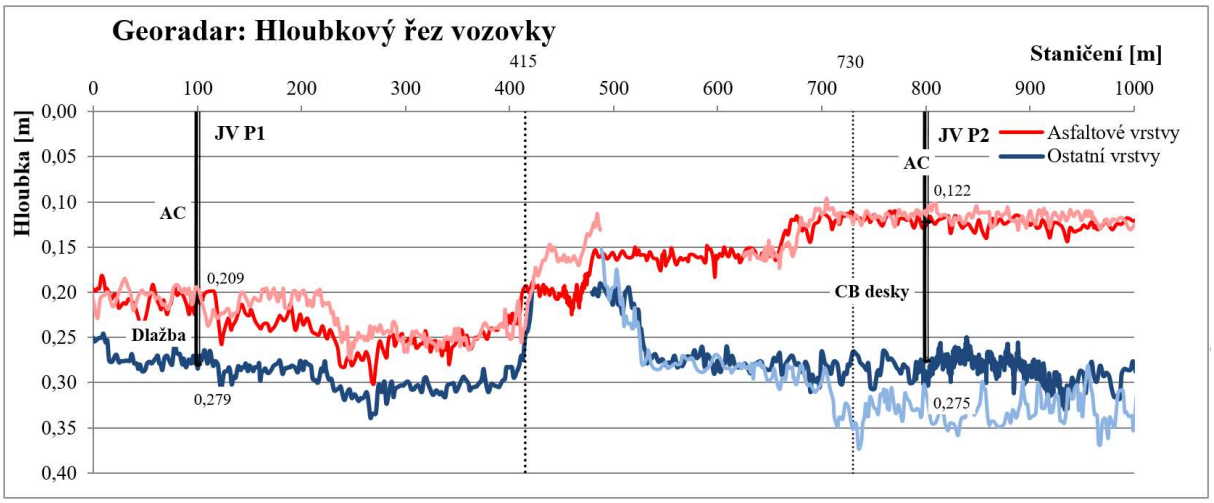
Příklad grafického zpracování výsledků měření rázovým zařízením FWD a georadarem na úseku vozovky délky 1 km je uveden níže. Jednotlivé sledované parametry jsou:

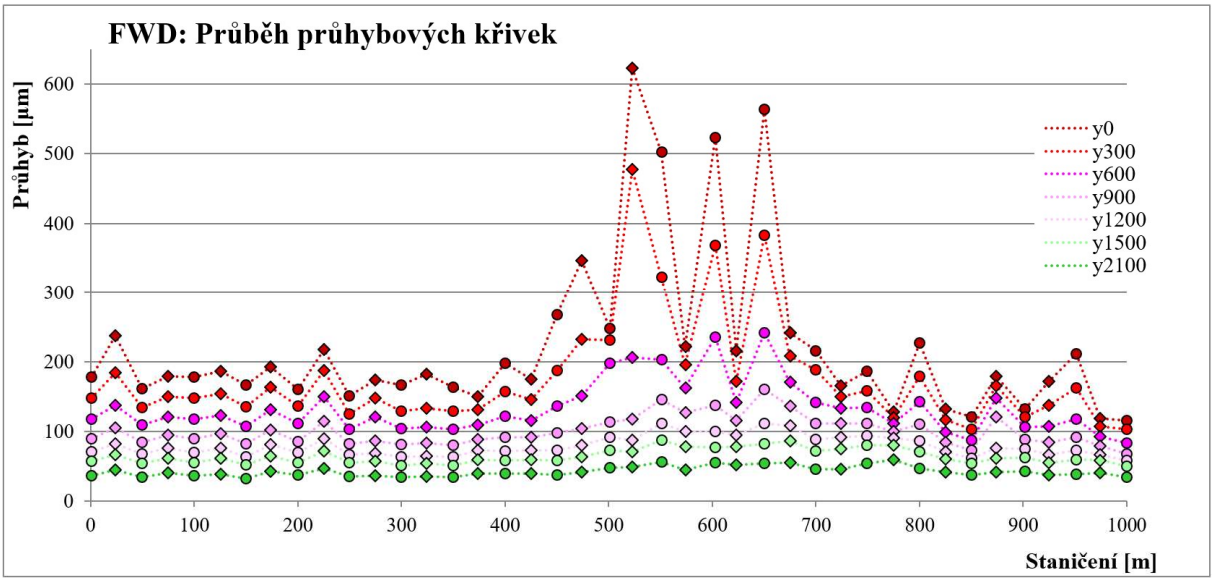
Georadar:

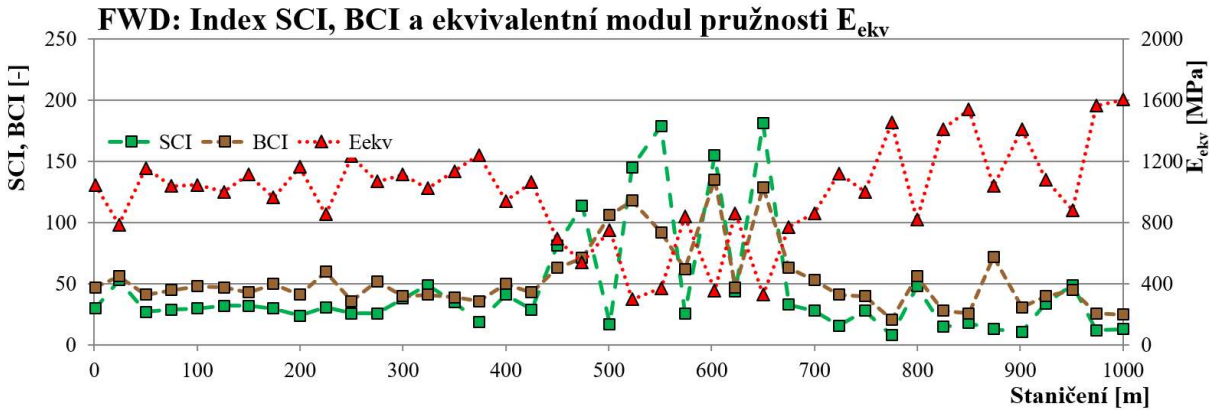
- hloubkový řez,
- amplituda odrazu signálu od povrchu vozovky.

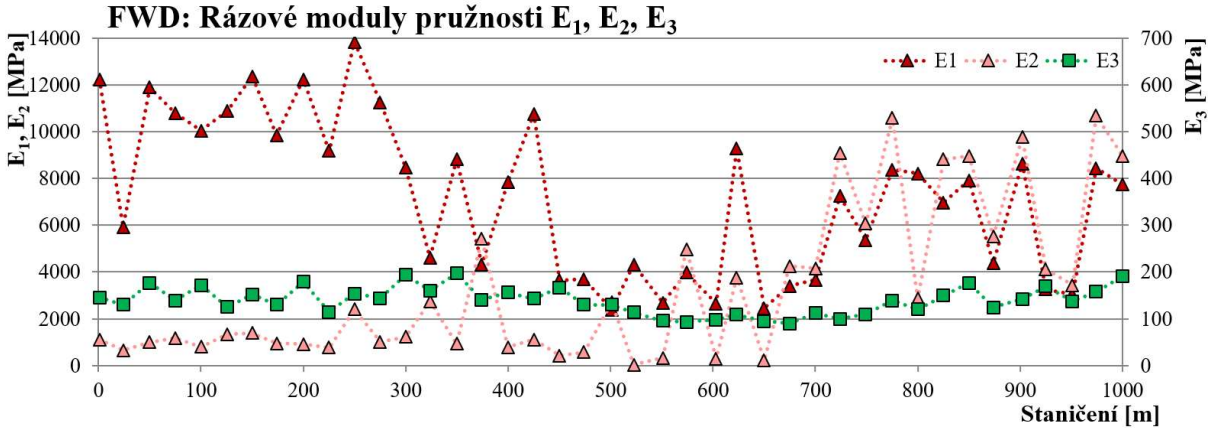
FWD:

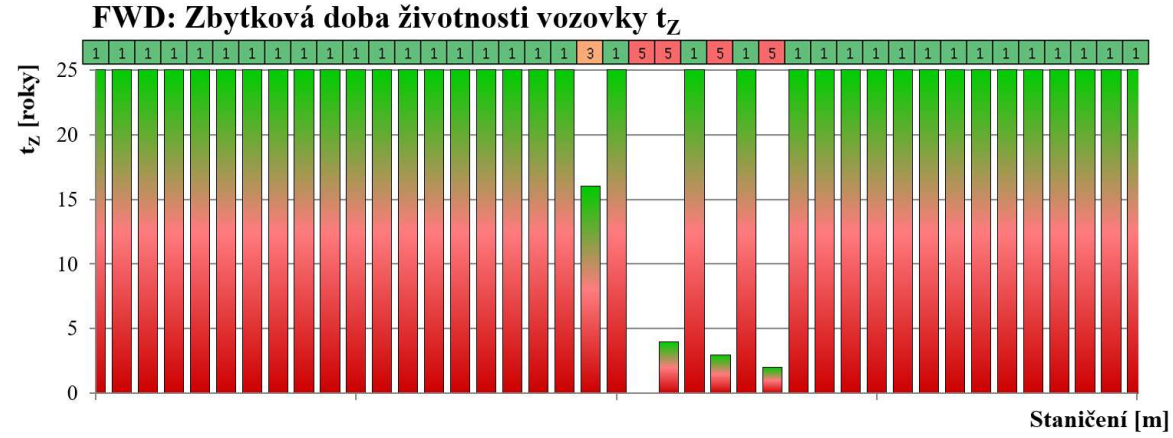
- průhybové křivky,
- rázové moduly pružnosti asfaltových vrstev, podkladních vrstev a podloží E_r,
- zbytková doba životnosti vozovky t_Z,
- indexy *SCI*, *BCI* a ekvivalentní modul pružnosti E_{ekv}.

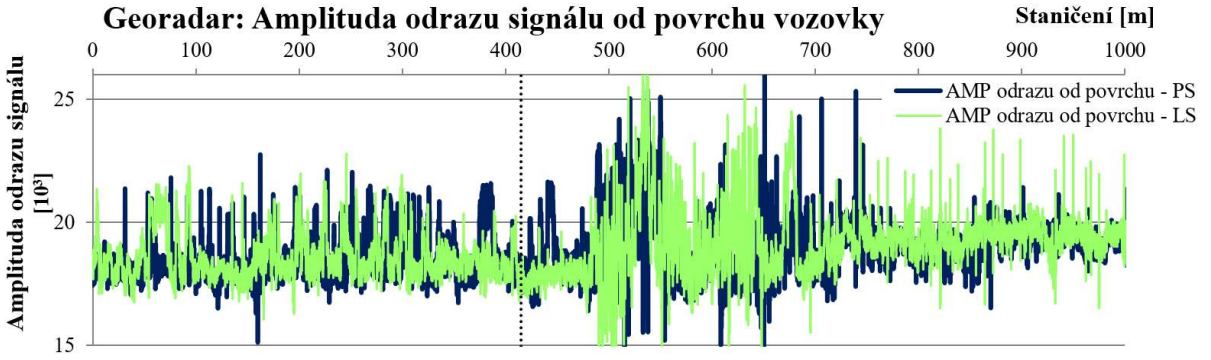





FWD: Index SCI, BCI a ekvivalentní modul pružnosti E_{ekv}
SCI, BCI [-]
E_{ekv} [MPa]
SCI
BCI
Eekv
Staničení [m]


FWD: Rázové moduly pružnosti E_1, E_2, E_3
E_1, E_2 [MPa]
E_3 [MPa]
E1
E2
E3
Staničení [m]


FWD: Zbytková doba životnosti vozovky t_Z
t_Z [roky]
Staničení [m]


Georadar: Amplituda odrazu signálu od povrchu vozovky
Staničení [m]
Amplituda odrazu signálu [10³]
AMP odrazu od povrchu - PS
AMP odrazu od povrchu - LS

Příloha 2: Vizualizace výsledků diagnostického průzkumu

Za účelem vizualizace a vyhodnocení výsledků provedeného diagnostického průzkumu se používají různé softwary a nástroje.

Některé sledované parametry se zde pouze načítají a zobrazují, jiné se přímo počítají.

Níže je uveden jeden příklad vizualizace založený na prostředí MS Excel.

Základní vizualizační okna

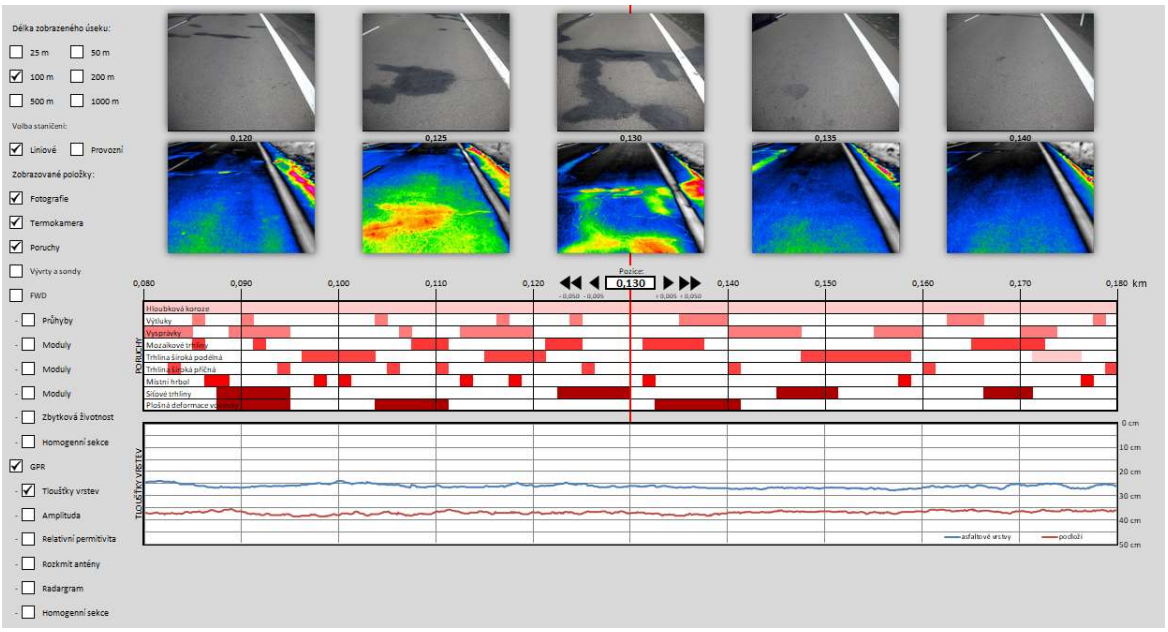
Je možné zobrazovat data z videokamery a termokamery ve vazbě na zvolené staničení (ujetou vzdálenost), s možností se posouvat doleva a doprava. Lze přepínat mezi zobrazením různé délky, např. 25 m (5 snímků) nebo 1 km. Fotografie se zobrazují pro nejbližší okolí zvoleného staničení.

Jednotlivé sledované parametry lze zapínat a vypínat v samostatných pásech. Možná zobrazení zahrnují níže uvedené parametry:

- záznamy z kamer,
- povrchové vlastnosti (podélná a příčná nerovnost, protismykové vlastnosti, makrotextura, hlučnost) - pokud jsou k dispozici,
- hodnocení únosnosti z výsledků měření rázovým zařízením FWD,
- hodnocení založené na záznamech z měření georadarem,
- poruchy,
- vývrty a sondy (lokalizace plus záznam v samostatném okně).

Předpokládá se ve všech případech stejný směr měření/provedeného záznamu, v jiném případě se musí vstupní data nejdříve upravit, aby splňovala tento požadavek.

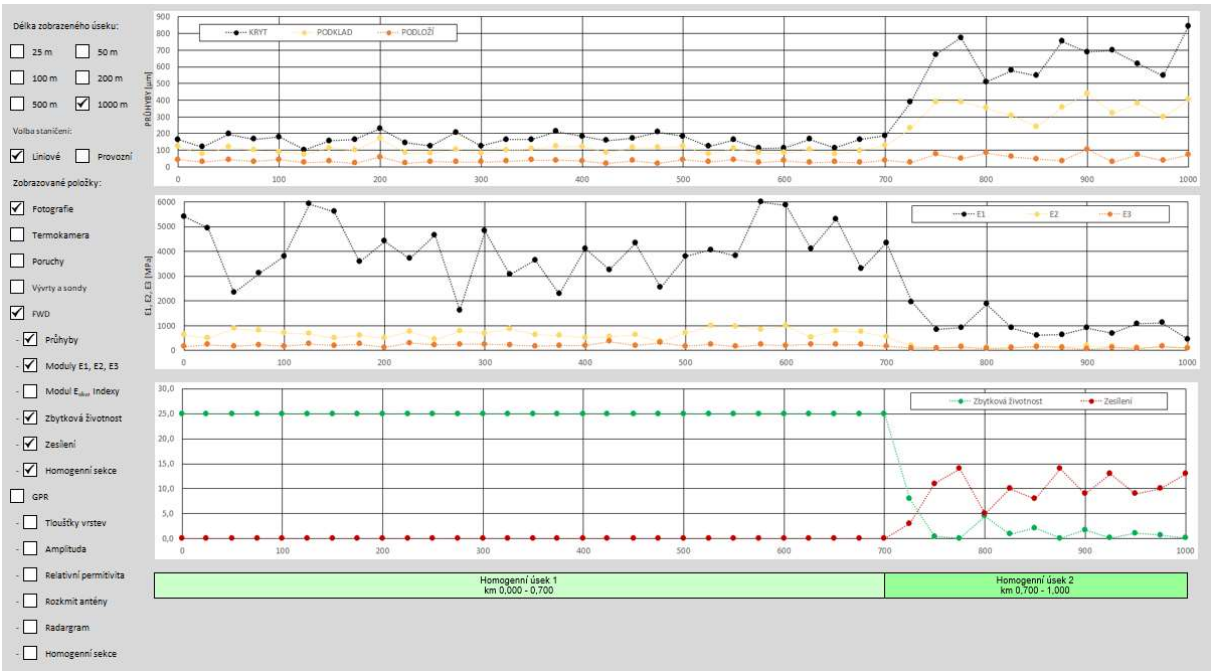
Níže je uveden příklad se zapnutým zobrazením videozáznamu, termokamery, poruch a georadaru:



Tvorba homogenních sekcí

Pro jednotlivé sledované parametry (FWD, georadar, poruchy, povrchové vlastnosti) se vytváří homogenní sekce, které je možné tvořit manuálně, volbou na základě zobrazovaných údajů nebo automaticky, výpočtem se zadáním rozhodných hodnot (max. rozdíl, průměr zadaného počtu po sobě jdoucích hodnot atd.).

Níže je uveden příklad tvorby homogenních sekcí pro hodnocení únosnosti na základě výsledků měření rázovým zařízením FWD:



Následně se z těchto dílčích hodnocení vytvoří celkové rozdělení do homogenních sekcí, jako podklad pro plánování zásahu na vozovce.

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
Líšeňská 33a
636 00 Brno
www.cdv.cz