

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Bc. Barbora Srnská

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Měření podélných nerovností vozovek pozemních komunikací pomocí
laserového skenování

Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Barbora Srnská**
Osobní číslo: **D19436**
Studijní program: **N0732A260017 Dopravní stavitelství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Měření podélných nerovností vozovek pozemních komunikací pomocí laserového skenování**
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

Na základě dat z opakovaných měření na vybraných úsecích PK popište výhody a nevýhody jednotlivých způsobů stanovení podélných nerovností. Proveďte jejich srovnání a formulujte vlastní doporučení. Popište metody měření a vyhodnocení získaných dat s důrazem na možnosti laserového skenování. Popište používaná zařízení a programové vybavení. Práci vypracujte v českém jazyce v rozsahu stanoveném vedoucím práce.

Úvod

Metody měření podélných nerovností

Laserové skenování (důraz na PK)

Popis použitého HW a SW

Vlastní měření pomocí dostupnými metodami

Zpracování naměřených dat, tvorba výstupů a porovnání metod

Doporučení a závěr

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Richter T., Metody měření podélné nerovnosti vozovek, bakalářská práce, UPa, 2014

ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovností povrchů vozovek

TP 207 Experiment přesnosti -Zařízení pro měření povrchových vlastností a průhybů vozovek pozemních komunikací

Manuály měřících zařízení a pomůcek

ČSN EN 13036 – 7: Měření jednotlivých nerovností povrchu vozovky – Zkouška latí

ČSN 736 121, ČSN 73 6175

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Borecký, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce: **26. října 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2020**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.

děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.

vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem „Měření podélných nerovností vozovek pozemních komunikací pomocí laserového skenování“ jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 13. 07. 2021

Bc. Barbora Srnská v. r.

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Vladislavu Boreckému, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, za jeho cenné rady, připomínky a v neposlední řadě za čas, který mi při měření a zpracování mé diplomové práce věnoval. Dále děkuji panu Ing. Pavlovi Lopourovovi, Ph.D. z Dopravní fakulty Jana Pernera, Katedry dopravního stavitelství za jeho pomoc během provádění samotného experimentu. Chtěla bych poděkovat panu Ing. Jiřímu Slámovi, majiteli firmy GEOPONT 3D s.r.o., za zodpovězení všech mých dotazů k tématu mé diplomové práce, za cenné rady a jeho obrovskou ochotu při zpracování dat v programu Atlas DMT. V neposlední řadě děkuji svým rodičům (především tátovi) za velkou vstřícnost a podporu během mého studia na vysoké škole. Můj dík patří taktéž všem kamarádům, kteří mi věřili, fandili mi a psychicky mne podporovali.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá tématem měření a vyhodnocování podélných nerovností povrchů vozovek v České republice. V teoretické části diplomové práce je uveden přehled zkoumaných parametrů podélných nerovností vozovek, dále jsou zde podrobně popsány normované metody měření a vyhodnocování podélných nerovností a alternativní metody měření podélných nerovností vozovek. Z alternativních metod měření podélných nerovností je v diplomové práci kladen důraz na laserové skenování.

Další část diplomové práce je věnována popisu zařízení a programovému vybavení dostupného pro provedení vlastního experimentu. Praktická část se skládá z opakovaného měření provedeného dostupnými měřicími technologiemi na zvolených úsecích vybrané pozemní komunikace. Následuje porovnání a zhodnocení použitých metod měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

pozemní komunikace, podélné nerovnosti vozovek, laserové skenování, diagnostika

TITLE

Measurement of longitudinal unevenness of road pavements using laser scanning diagnostics

ANNOTATION

The diploma thesis deals with the topic of measuring and evaluating longitudinal unevenness of road surfaces in the Czech Republic. The theoretical part of the diploma thesis provides an overview of the examined parameters of road longitudinal unevenness, there are also described standardized methods of measuring and evaluating longitudinal road unevenness and alternative methods . Laser scanning is an important alternative method of measurement in this thesis.

The next part of the diploma thesis is devoted to the description of the equipment and software available to perform the experiment itself. The practical part consists of an experiment with available measuring equipment on selected sections of the road, followed by evaluation of individual measurement methods and their advantages and shortcomings.

KEYWORDS

roads, longitudinal unevenness of roads, laser scanning, diagnostics

OBSAH

ANOTACE	7
KLÍČOVÁ SLOVA	7
TITLE	8
ANNOTATION	8
KEYWORDS	8
OBSAH	9
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	17
TERMINOLOGIE	18
1. Úvod.....	21
1.1 Cíle diplomové práce	21
1.2 Konstrukce vozovek	22
1.3 Klasifikace poruch vozovek.....	22
1.4 Povrchové vlastnosti vozovek pozemních komunikací	23
2. Nerovnosti vozovek	23
2.1 Parametry podélné nerovnosti povrchů vozovek.....	24
2.1.1 Hodnota dvojamplitudy nerovnosti $2a$	24
2.1.2 Míra nerovnosti C a vlnitost w	25
2.1.3 Mezinárodní index nerovnosti IRI (International Roughness Index)	25
2.2 Parametry příčných nerovností povrchů vozovek	26
2.3 Hodnocení nerovností povrchů vozovek	27
3. Metody měření podélných nerovností	29
3.1 Metody měření podélných nerovností vozovek podle ČSN 73 6175	30
3.1.1 Měřicí lať s příložným klínem	30
3.1.2 Planograf.....	34
3.1.3 Přesná nivelace	36
3.1.4 Profilometr s dvoumotovým odezвовým systémem	39
3.1.5 Měřicí vozidlo se snímačem svislého zrychlení	41
3.1.6 Profilometr Dipstick	44
3.1.7 Laserový profilometr SDP (South Dakota Profiler)	46
4. Alternativní technologie měření nerovností	49
4.1 Frekvenční analyzátor nerovností APL	50
4.2 Multifunkční diagnostické vozidlo CleveRA Car	50
4.3 Fotogrammetrie a laserové skenování	51
4.3.1 Fotogrammetrie.....	52

5. Laserové skenování.....	54
5.1 Rozdělení laserového skenování a skenerů	55
5.1.1 Podle metod sběru dat.....	55
5.1.2 Podle principu měření.....	57
5.1.3 Podle tvaru zorného pole	60
5.1.4 Podle dosahu vzdálenosti měření.....	60
5.1.5 Podle přesnosti skenování v závislosti na jejich dosahu.....	61
5.1.6 Podle rychlosti měření podrobných bodů (skenování)	61
5.1.7 Podle účelu, ke kterému slouží	62
5.2 Princip laserového skenování	63
5.3 Výhody a nevýhody laserového skenování	65
5.4 Chyby měření.....	66
5.5 Použití skenovacích systémů v inženýrské geodézii	68
5.6 Laserové skenování v dopravním stavitelství.....	68
6. Popis vybavení použitého k provedení a vyhodnocení experimentu.....	73
6.1 Použitý hardware	73
6.1.1 Měřicí lať s měřícím klínkem	74
6.1.2 Planograf 6.705 s elektronickým vyhodnocováním	74
6.1.3 Nivelační přístroj Leica DNA03.....	76
6.1.4 Multistanice Leica MS60.....	77
6.2 Použitý software	78
6.2.1 UniProt 32.....	79
6.2.2 ProVAL.....	79
6.2.3 Leica Captivate	81
6.2.4 Leica Infinity.....	81
6.2.5 Atlas DMT	83
6.2.6 AutoCAD Civil 3D 2018	83
7. Vlastní experiment.....	83
7.1 Měření latí.....	87
7.2 Měření planografem.....	87
7.3 Měření přesnou nivelací.....	90
7.4 Statické laserové skenování	91
8. Zpracování dat a vyhodnocení všech měření.....	93
8.1 Měřicí lať s klínkem.....	93
8.2 Planograf.....	96

8.3 Přesná nivelace	98
8.4 Statické laserové skenování	100
8.5 Porovnání měření laserovým skenováním s metodami dle ČSN 73 6175.....	106
ZÁVĚR	112
POUŽITÁ LITERATURA	114
PŘÍLOHY	118
PŘÍLOHA A – Měření čtyřmetrovou latí – naměřené hodnoty	119
PŘÍLOHA B – Laserové skenování – simulace měření latí - naměřené hodnoty	120
PŘÍLOHA C – Měření planografem – naměřené hodnoty	121
PŘÍLOHA D – Měření planografem – hodnoty převyšující limitní hodnotu 5 mm.....	132
PŘÍLOHA E – Měření přesnou nivelací – naměřené hodnoty	133

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1: Podélná nerovnost. [2]	25
Obrázek 2: Podélná nerovnost - dvouhmotový referenční odezvvový systém. [2]	26
Obrázek 3: Měřicí lať [2]	31
Obrázek 4: Měřicí klínek [2]	31
Obrázek 5: Postup měření podélných nerovností latí [2]	32
Obrázek 6: Měření podélných nerovností latí [vlastní fotografie]	33
Obrázek 7: Schématický bokorys a půdorys planografu [2]	34
Obrázek 8: Příklad viagramu mechanického záznamu podélných nerovností povrchu [2]	35
Obrázek 9: Digitální planograf s elektronickým vyhodnocováním dat [10]	35
Obrázek 10: Schéma geometrické nivelace ze středu [2]	36
Obrázek 11: Digitální nivelační přístroj Leica Spider se stabilním kompenzátozem [11]	36
Obrázek 12: Digitální nivelační lať s čárovým kódem a klasickou nivelační stupnicí [11]	37
Obrázek 13: Multifunkční zařízení TRT (tatra Runway Tester) [33]	41
Obrázek 14: Měřicí zařízení Profilometr Dipstick [2]	45
Obrázek 15: Profilometr Dipstick – schéma měření [2]	46
Obrázek 16: Speciální měřicí vůz ARAN [15]	49
Obrázek 17: Frekvenční analyzátor APL [17]	50
Obrázek 18: Multifunkční diagnostické vozidlo CleveRA Car [46]	51
Obrázek 19: Letecká fotogrammetrie [25]	54
Obrázek 20: Nosič (dron) pro letecké snímkování Leica Aibot AX20 [29]	56
Obrázek 21: Příklad pozemního laserového skenování [32]	56
Obrázek 22: Příklad pozemního laserového skenování [19]	57
Obrázek 23: Polární skener – princip přímého měření vzdálenosti [7]	58
Obrázek 24: Skener se základnou – jedno kamerový [7]	59
Obrázek 25: Skener se základnou – dvou kamerový [7]	59
Obrázek 26: Kamerový skener (vlevo) a panoramatický skener (vpravo) [20]	60
Obrázek 27: Letecké skenování – parametry vzdáleností [7]	62
Obrázek 28: Přístroj CARLSON C-ALS pro průzkum podzemních dutin [28]	63
Obrázek 29: Polární skener – způsoby rozmítání dálkoměrného svazku paprsků [22]	64
Obrázek 30: Schematické znázornění prostorové polární metody [8]	64
Obrázek 31: Ukázka statického pozemního skenování skenerem značky Riegl [21]	70
Obrázek 32: Ukázka výstupu statického pozemního skenování skenerem značky Riegl [21].	70

Obrázek 33: Mobilní skenovací systém Leica Pegasus Two Ultimate [34]	71
Obrázek 34: Mobilní skenovací systém Lynx HS600-D [35]	72
Obrázek 35: Mobilní skenovací systém Riegl VMX 2HA [36]	72
Obrázek 36: Mobilní skenovací systém Riegl VMX 2HA instalovaný na vozidle [37]	73
Obrázek 37: Použitý měřicí klínek MK27 [vlastní fotografie].....	74
Obrázek 38: Použitá duralová lať 1070 – E [vlastní fotografie].....	74
Obrázek 39: Planograf 6.705 s elektronickým vyhodnocováním [vlastní fotografie].....	75
Obrázek 40: Indikační zařízení pro elektronický záznam měřených hodnot [vlastní fotografie]	75
Obrázek 41: Digitální nivelační přístroj Leica DNA03 [vlastní fotografie].....	76
Obrázek 42: Multistanice MS60 - Leica [vlastní fotografie].....	77
Obrázek 43: Prostředí programu UniProt 32 [40]	79
Obrázek 44: Prostředí programu ProVAL32 [45]	80
Obrázek 45: Ukázka vyhodnocení IRI v programu ProVAL - zkušební úsek č. 1 [45].....	80
Obrázek 46: Prostředí programu Leica Captivate [vlastní fotografie]	81
Obrázek 47: Prostředí programu Leica Infinity [41]	82
Obrázek 48: Tvorba povrchu, vhodná volba velikosti trojúhelníků v TIN síti – úsek č. 1 [41]	82
Obrázek 49: Tvorba povrchu, nevhodná volba velikosti trojúhelníků v TIN síti – úsek č. 1 [41].....	82
Obrázek 50: Situace zvolených zkušebních úseků v Technologickém areálu UPCE [38].....	84
Obrázek 51: Příprava zkušebního úseku č. 1 [vlastní fotografie].....	85
Obrázek 52: Zkušební úsek č. 2 [vlastní fotografie].....	86
Obrázek 53: Průběh měření nerovností latí - zkušební úsek č. 2 [vlastní fotografie].....	87
Obrázek 54: Průběh měření nerovností planografem - zkušební úsek č. 2 [vlastní fotografie]	88
Obrázek 55: Průběh měření – přesná nivelace [vlastní fotografie]	91
Obrázek 56: Panoramatický snímek skenované oblasti č. 1, Leica MS60 [vlastní fotografie]	92
Obrázek 57: Panoramatický snímek skenované oblasti č. 2, Leica MS60 1 [vlastní fotografie]	92
Obrázek 58: Průběh skenování multistanicí Leica MS60 – zk. úsek č. 1 [vlastní fotografie]..	93
Obrázek 59: Detail poklopu šachty - měření v levé jízdni stopě, zk. úsek č. 1 [vlastní fotografie]	95
Obrázek 60: Detail místa neměřitelné podélné nerovnosti latí, zk. úsek č. 2 [vlastní fotografie]	96

Obrázek 61: Prostředí programu Infinity – report povrchů [41]	101
Obrázek 62: Znázornění poklesu hustoty bodů skenované oblasti - prostředí programu Leica Infinity [vlastní fotografie]	102
Obrázek 63: Podélné profily jízdnic stop (zk. úsek č. 1) generované v programu Atlas DMT [vlastní fotografie]	103
Obrázek 64: Tvar zápisu dat v Poznámkovém bloku [vlastní fotografie]	103
Obrázek 65: Simulace měření podélných nerovností vozovky čtyřmetrovou latí na profilu vytvořeném z mračna bodů [vlastní fotografie].....	106

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hodnoty parametrů referenčního odezvového systému – čtvrtiny vozidla [2]	25
Tabulka 2: Hodnocení podélné nerovnosti měřeného úseku délky 20 m podle <i>C</i> nebo <i>IRI</i> [2]	27
Tabulka 3: Hodnocení příčné nerovnosti v jednotlivých profilech dle hloubky vyjeté koleje <i>R</i> [2].....	27
Tabulka 4: Požadovaná klasifikace podélných nerovností povrchů vozovek [2].....	28
Tabulka 5: Maximální dovolené odchylky rovnosti povrchu z hutněných asfaltových směsí [1].....	28
Tabulka 6: Koeficienty naměřené simulací jízdy dvoumotového referenčního odezvového systému [9].....	38
Tabulka 7: Hodnoty indexu <i>IRI</i> vypočtené z měření přesnou nivelací [vlastní zpracování] .	100
Tabulka 8: Hodnocení podélných nerovností přiřazením klasifikačního stupně [vlastní zpracování].....	100
Tabulka 9: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti povrchů vozovek [vlastní zpracování]...	104
Tabulka 10: Hodnocení podélných nerovností přiřazením klasifikačního stupně [vlastní zpracování].....	104
Tabulka 11: Procentuální vyjádření nevyhovujících úseků překračující výchylku 5 mm [vlastní zpracování].....	107
Tabulka 12: Zhodnocení použitých metod měření [vlastní zpracování]	109
Tabulka 13: Zhodnocení použitých metod měření [vlastní zpracování]	109
Tabulka 14: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti povrchů vozovek [vlastní zpracování].	119
Tabulka 15: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti – laserové skenování [vlastní zpracování]	120
Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf [vlastní zpracování].....	121
Tabulka 17: Podélné nerovnosti převyšující 5 mm - planograf [vlastní zpracování]	132
Tabulka 18: Naměřená data – přesná nivelace [vlastní zpracování].....	133

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 1, levý jízdní pás (graf vlevo) [40].....	89
Graf 2: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 1, pravý jízdní pás (graf vpravo) [40].....	89

Graf 3: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 2, levý jízdní pás (graf vlevo) [40]	89
Graf 4: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 2, pravý jízdní pás (graf vpravo) [40]	89
Graf 5: Podélné nerovnosti vozovky měřené latí – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování] ..	94
Graf 6: Podélné nerovnosti vozovky měřené latí – zkušební úsek č. 2 [vlastní zpracování] ...	95
Graf 7: Podélná nerovnost vozovky měřená planografem – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]	97
Graf 8: Podélná nerovnost vozovky měřená planografem – zkušební úsek č. 2 [vlastní zpracování]	97
Graf 9: Podélná nerovnost vozovky měřená přesnou nivelací – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]	98
Graf 10: Podélná nerovnost vozovky měřená přesnou nivelací – zkušební úsek č. 2 [vlastní zpracování]	99
Graf 11: Podélný profil vozovky měřený laserovým skenováním – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]	105
Graf 12: Podélný profil vozovky měřený laserovým skenováním – zkušební úsek č. 2 [vlastní zpracování]	105

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

C – míra nerovnosti

ČR – Česká republika

ČSN – česká technická norma

ČSN EN – česká verze evropské normy

DMT – digitální model terénu

DP – diplomová práce

EU – Evropská unie

GIS – Geografický informační systém

GPS – globální polohový systém

I – globální přenosová charakteristika

IRI – Mezinárodní index nerovnosti, u podélných nerovností (International Roughness Index)

LS – laserové skenování

MD – Ministerstvo dopravy

PK – pozemní komunikace

R – poloměr oblouku nebo hloubka vyjeté koleje (dle kontextu)

SHV – Systém hospodaření s vozovkou

TIN – trojúhelníková síť (Triangulated Irregular Network)

TP – technické podmínky

TERMINOLOGIE

nerovnost povrchu

maximální svislá vzdálenost dvou bodů mezi měřeným povrchem pozemní komunikace a spodní hranou měřicí latě (která se dvěma body dotýká měřeného povrchu)

pracovní povrch

povrch, který byl vybrán pro měření povrchových vlastností vozovky při experimentu přesnosti

referenční povrch

povrch, jehož referenční hodnota je zjištěna přesnou měřicí metodou, která je stanovena normou, jiným závazným předpisem nebo stanoveným národním referenčním zařízením a která je udržována v čase pro pravidelnou kontrolu měřicích zařízení. Referenční povrch slouží jak pro pravidelnou kontrolu měřicích zařízení, tak pro jejich kalibraci.

referenční čára

čára, jehož referenční hodnota je zjištěna přesnou měřicí metodou, která je stanovena normou, jiným závazným dokumentem

nerovnost povrchu vozovky pozemních komunikací

jedna z vlastností vozovky, která má rozhodující význam pro pohodlí a bezpečnost jízdy a životnost vozovky a vozidel; je tvořena svislými rozdíly mezi teoretickým povrchem vozovky určeným projektovou dokumentací a skutečným povrchem vozovky [2]

podélná nerovnost

odchylka povrchu vozovky od filtrovaného skutečného rovného povrchu ve vlnovém rozsahu od 0,5 m do 50 m odpovídající vlnové délce textury v třetinooktávových pásmech se střední vlnovou délkou od 0,63 m do 50 m [2]

příčná nerovnost

odchylka skutečného příčného profilu od přímé referenční čáry v kolmém směru na směr jízdy dopravních prostředků [2]

podélný profil

průnik mezi povrchem vozovky a referenční rovinou kolmou k povrchu vozovky a rovnoběžnou se směrem jízdního pásu

příčný profil

průnik mezi povrchem vozovky a referenční rovinou kolmou k povrchu vozovky a ke směru jízdního pásu

příčný sklon

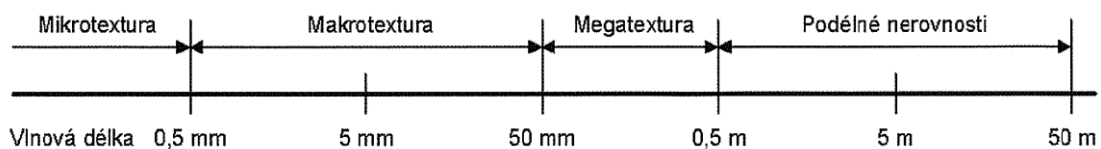
sklon příčného profilu jízdního pruhu nebo jízdního pásu měřený kolmo k ose vozovky, obvykle vyjadřovaný v %

vlnová délka

vzdálenost mezi periodicky se opakujícími částmi sinusové křivky

megatextura

odchylka povrchu vozovky od filtrovaného skutečného rovného povrchu ve vlnovém rozsahu od 50 mm do 500 mm odpovídající vlnové délce textury v třetinooktávových pásmech se střední vlnovou délkou od 63 mm do 500 mm



zdroj: ČSN 73 6175 [2]

síťová úroveň Systému hospodaření s vozovkou (SHV)

shromažďuje základní informace o umístění a kategorii pozemní komunikace (PK), jejím stavu a zatížení PK, slouží pro dlouhodobé a průběžné sledování stavu vozovek sítě PK a pro strategické plánování údržby a oprav [5]

projektová úroveň SHV

na základě provedených diagnostických průzkumů a získaných podkladů ze síťové úrovně je stanoven návrh údržby nebo opravy vybraných úseků PK [5]

zorné pole

maximální rozdíl úhlů krajních výstupních svazků paprsků, které dokáže skener zaměřit, měří se v horizontálním i vertikálním směru

georeferencování

umístění zobrazeného rastrového obrazu (obrazové mapy) v kartografickém zobrazení do souřadnicového systému

šum

v souvislosti s mračny bodů, jsou to chybně zaměřené body v mračnu

trojúhelníková síť

interpolace dat, tedy spojení (triangulace) vstupních bodů o určité hustotě pomocí algoritmu do trojúhelníků a tvorba datové sítě, vstupní body udávají nadmořskou výšku

vlíčovací body

ostré hrany, výstupky, kulové cílové značky, odrazné folie, kruhové terče s vysokou odrazivostí – bývají zaměřeny nejčastěji klasickými geodetickými metodami - totální stanicí. Dodávají skenovaným bodům měřítko (ve fotogrammetrii), umístění i orientaci v prostoru a ovlivňují celkovou přesnost měření. Slouží k převodu souřadnic zjištěných vyhodnocením měřických snímků (fotogrammetrie) do požadovaného geodetického souřadného systému. Slouží k zpřesňování geodetických měření a snímkování.

odrazivost povrchu

optická vlastnost materiálu, udává jaké množství dopadeného světla (paprsku) se od materiálu odrazí. Bílé předměty mají lepší odrazivost než předměty tmavé, také záleží na struktuře povrchu.

1. Úvod

Vlivem namáhání vozovek dopravou a klimatickými vlivy vznikají jejich poruchy. Některé poruchy pozemních komunikací se projevují na povrchu vozovky a jsou viditelné velmi brzy, jiné prostupují od spodních konstrukčních vrstev postupně k pojížděnému povrchu. Příčiny vzniku poruch je velmi důležité zjistit co nejdříve pro následnou eliminaci poruch a jejich odstranění. Při pozdním zjištění příčiny poruch se náklady na lokální opravy zvyšují a mohou vyžadovat i velmi nákladnou rekonstrukci celé vozovky. Ke včasnému zjištění příčiny poruch je nutné provádět pravidelné prohlídky komunikace a cyklicky provádět diagnostiku. Tím lze zjistit možné příčiny vzniku poruch a včasným zásahem předejít jejich rozvoji.

Pro diagnostiku a monitoring stavu komunikace existuje celá řada zkušebních metod a měřicích systémů.

1.1 Cíle diplomové práce

Ve své práci se budu zabývat metodami měření nerovností vozovek – konkrétně metodami měření podélných nerovností pojížděného krytu vozovek pozemních komunikací.

V teoretické části diplomové práce budou zpracovány metody měření a zkoumané parametry při měření podélných nerovností, které stanovuje norma *ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek*, v dalších částech diplomové práce se zaměřím na alternativní způsoby měření nerovností pozemních komunikací. Důraz bude kladen především na laserové skenování, jako na jednu z alternativních metod měření podélných nerovností.

V praktické části práce provedu vlastní experiment měření podélných nerovností na vybraných zkušebních úsecích dopravní plochy v Technologickém areálu Univerzity Pardubice v Doubravících. Pro samotný experiment použiji jak některá měřicí zařízení, která uvádí *norma ČSN 73 6175*, tak zařízení pro měření nerovností alternativními způsoby. Konkrétně se bude jednat o normalizované měření latí a měřičským klínem, měření planografem, měření přesnou nivelací digitálním nivelačním přístrojem Leica DNA03 a alternativní měření za použití multistanice Leica MS60, která bude v této práci reprezentovat statické laserové skenování.

Na základě provedení experimentu, zpracování dat a vyhodnocení těchto dat získaných ze všech čtyř metod měření provedených na vybraných zkušebních úsecích, porovnáám tyto zkušební metody a formuluji doporučení.

Konkrétní dílčí cíle práce lze formulovat následovně:

- Zpracování rešerše týkající se metod a parametrů měření podélných nerovností
- Zpracování problematiky laserového skenování v dopravním stavitelství
- Provedení srovnání konkrétních metod měření podélných nerovností na základě experimentu
- Vyhodnocení výsledků a formulace doporučení pro měření podélných nerovností

1.2 Konstrukce vozovek

Návrh vozovek pozemních komunikací (PK) je prováděn podle návrhové metody účinků dopravního zatížení, podle Katalogu vozovek z běžných konstrukčních vrstev a podle technických podmínek *TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Návrhové období nově budovaných konstrukcí vozovek je 25 let.

1.3 Klasifikace poruch vozovek

U každé vozovky se vlivem času zhoršuje její stavební stav. Z tohoto důvodu je nutné pravidelně sledovat stav vozovek, zaznamenávat ho a na základě vyhodnocení nashromážděných dat je nutné provádět běžnou údržbu a případně opravy vzniklých poruch.

Ke kontrole stavebního stavu vozovky, ke sběru, zařídění a klasifikaci poruch slouží příslušné technické podmínky - *TP 82 Katalog poruch netuhých vozovek* a *TP 62 Katalog poruch vozovek s cementobetonovým krytem*. K plánování, navrhování a realizaci údržby, oprav a rekonstrukcí vozovek PK jsou zpracovány technické podmínky *TP 87 Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek* a *TP 92 Navrhování údržby a oprav vozovek s cementobetonovým krytem*.

Podklady pro plánování údržby nebo opravy musí vycházet ze zařídění PK, dopravního zatížení, parametrů provozní způsobilosti, poruch vozovky a dopravní nehodovosti. Aktuální podklady stavu PK se zpravidla zpracovávají v rámci SHV (*Systém hospodaření s vozovkou*), který slouží k optimalizaci celoživotních nákladů na provoz a údržbu PK – v optimálním čase, vhodnými technologiemi i optimálním využití nákladů. [5] Pro plánování a projektovou úroveň je nutné provést na vybraných úsecích PK podrobnou diagnostiku včetně doplňujících měření, laboratorních zkoušek a rozborů.

Měření a vyhodnocení proměnných parametrů vozovek PK se provádí pomocí měřících zařízení s oprávněním k měření parametrů vozovek podle technických podmínek *TP 207 Experiment přesnosti zařízení pro měření povrchových vlastností a dalších parametrů*

vozovek pozemních komunikací. Na základě požadavků stanovených v těchto TP získají provozovatelé jednotlivých měřicích zařízení oprávnění k měření povrchových vlastností, průhybů a tloušťek vrstev vozovek PK na území ČR. Požadavky kladené na způsobilost provozovatelů zařízení k měření povrchových vlastností, průhybů vozovek a tloušťek vrstev vozovek jsou dány *Metodickým pokynem Systém jakosti v oboru pozemních komunikací*. Veškerá měření se provádějí podle příslušných ČSN nebo TP.

1.4 Povrchové vlastnosti vozovek pozemních komunikací

Mezi sledované povrchové vlastnosti vozovek patří:

- nerovnosti povrchu vozovky (příčné, podélné, jednotlivé)
- protismykové vlastnosti povrchu vozovky (mikro/makro-textura, součinitel tření, vodorovné drenážní vlastnosti)
- hlukové emise (NV č. 272/2011 Sb. ve znění pozdějších předpisů definuje imisní limitní hodnoty hluku)

Měření nerovností povrchů vozovek je jedním ze standardně a opakovaně kontrolovaných parametrů povrchových vlastností dopravních staveb.

Tato měření se provádějí u novostaveb při přejímkách povrchu vozovky pro uvedení do provozu a při posouzení na konci záruční doby. Dále se kontrolní měření pravidelně provádějí v průběhu životnosti vozovky pro údržby a případných oprav. Kontrolní měření pro přejímku prací stanovuje KZP (kontrolní zkušební plán) dle ZTKP (Zvláštní technické kvalitativní podmínky) investora.

Nevyhovující nerovnosti obrusné vrstvy ovlivňují provozuschopnost dané komunikace, její bezpečnost, plynulost jízdy, snižují jízdní komfort účastníků provozu a přispívají k degradaci vozovky a urychlení opotřebení dopravních prostředků. Velmi časté je také zvyšování hluku, jako jednoho z faktorů vlivu na životní prostředí. [5]

2. Nerovnosti vozovek

Způsoby měření nerovností povrchů vozovek PK (tedy krytů a všech konstrukčních/podkladních vrstev), letištních ploch a dalších dopravních ploch stanovuje norma *ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek*. [2] Tato norma stanovuje definice, účel měření, možné způsoby měření, průběh a vyhodnocení výsledků měření podélné a příčné nerovnosti vozovek. Zabývá se klasickými standardními metodami měření a standardním měřicím zařízením.

Nerovnosti dělíme na:

- Jednotlivé
- Příčné
- Podélné

Jednotlivé nerovnosti se na povrchu vyskytují náhodně v jakémkoliv směru. Jejich měření je popsáno v ČSN EN 13036-7 *Povrchové vlastnosti vozovek pozemních komunikací a letištních ploch – Zkušební metody – Část 7: Měření jednotlivých nerovností povrchu vozovky – Zkouška latí*. Jednotlivé nerovnosti se měří třímetrovou latí a měřícím klínem šířky 25 milimetrů. [3] Měření jednotlivých nerovností, tak jak je popsáno v ČSN EN 13036-7, nemá stanovené hodnocení a klasifikaci, proto se v ČR nepoužívá.

Příčná nerovnost je měřena na povrchu vozovky v kolmém směru na jízdní směr (viz terminologie v této diplomové práci). Příčná nerovnost může být buď v podobě vyjetých kolejí, nebo v podobě podélných nepravidelných hrbolů způsobených mnoha různými vlivy.

Podélné nerovnosti jsou měřeny v předpokládané stopě jízdního vozidla. Hodnota podélné nerovnosti je svislý rozdíl mezi teoretickým a skutečným podélným profilem. V diplomové práci se právě podélnými nerovnostmi zabývám.

2.1 Parametry podélné nerovnosti povrchů vozovek

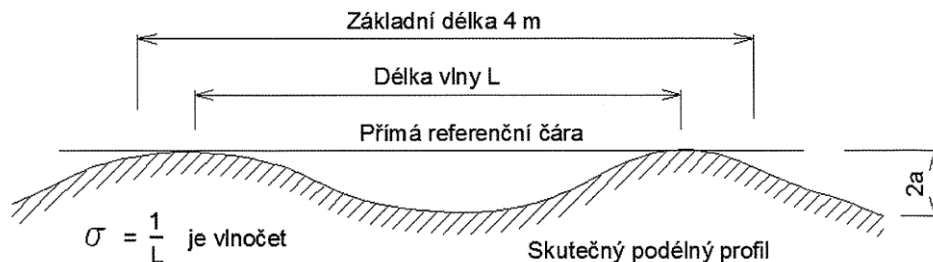
Podélná nerovnost povrchu vozovky pozemní komunikace je reprezentována buď výškovým údajem, nebo parametrem nerovnosti odvozeným ze statistické teorie náhodných funkcí nebo stanoveným z odezvy zkušebnímu systému, jedoucího přes nerovnosti. Tyto parametry vystihují úroveň komfortu jízdy v daném úseku vozovky.

Zkoumané parametry podélných nerovností jsou:

- maximální hodnota dvojamplitudy nerovnosti povrchu $2a$ (výškový údaj)
- míra nerovnosti povrchu C a vlnitost w
- mezinárodní index nerovnosti povrchu IRI

2.1.1 Hodnota dvojamplitudy nerovnosti $2a$

Hodnota amplitudy nerovnosti je maximální výškový údaj v milimetrech, měří se pod latí délky 4 metry položené kolmo na povrch vozovky. Délka vlny L je měřena v metrech. Odečet měření je názorný na obrázku 1.



Obrázek 1: Podélná nerovnost. [2]

2.1.2 Míra nerovnosti C a vlnitost w

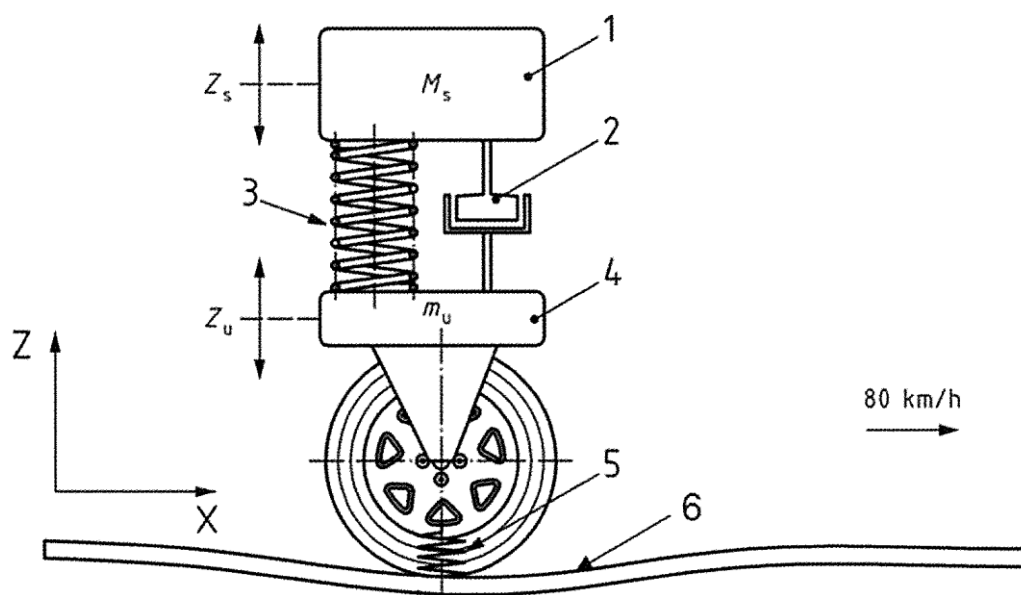
Parametr míry nerovnosti C (v jednotkách $\cdot 10^{-6}$ rad·m) a vlnitost w , stanovené přímkovým vyrovnáním funkce výkonové spektrální hustoty (VSH) S_h (v jednotkách Ω) podélné nerovnosti zjištěné přesnou nivelací a vynesené do log-log grafu, přičemž nerovnost $C = S_h$ a w je záporná směrnice vyrovnávající přímky. Parametr C a vlnitost w lze určit také z odezvy svislých zrychlení ve vhodně zvoleném referenčním místě kalibrovaného měřicího zařízení (vozu) přejíždějícího za specifických podmínek po zkoušeném povrchu. Míra nerovnosti C a vlnitost w se v současnosti pro hodnocení podélných nerovností nevyužívají.

2.1.3 Mezinárodní index nerovnosti IRI (International Roughness Index)

Mezinárodní index nerovnosti IRI (v jednotkách m/km) je parametr podélné nerovnosti stanovený simulací jízdy dvoumotového referenčního odezvového systému (obrázek 2) s parametry specifikovanými v tabulce 1 (ČSN 73 6175, tabulka 1) [2]. Systém se pohybuje rychlostí 80 km/h po podélných nerovnostech, jejichž průběh může být zjištěn přesnou nivelací nebo profilometrem Dipstick. Referenční odezvový systém – čtvrtina vozidla je definován na obrázku 2. Zmíněné metody měření jsou podrobněji popsány v kapitole 3 této diplomové práce.

Tabulka 1: Hodnoty parametrů referenčního odezvového systému – čtvrtiny vozidla [2]

$K_1 = k_t / M_s = 653 \text{ s}^{-2}$	$k_2 = k_s / M_s = 63,3 \text{ s}^{-2}$
$u = m_u / M_s = 0,15$	$c = C_s / M_s = 6,0 \text{ s}^{-1}$



Legenda

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1 odpružená hmota M_s | 4 neodpružená hmota m_u |
| 2 součinitel lineárního tlumení podvozku, C_s | 5 součinitel tuhosti pneumatiky k_t |
| 3 součinitel tuhosti podvozku, K_s | 6 podélný profil $Z(x)$ |
| Z_s vzdálenost odpružené hmoty od povrchu vozovky | |
| Z_u vzdálenost neodpružené hmoty od povrchu vozovky | |

Obrázek 2: Podélná nerovnost - dvouhmotový referenční odezvoový systém. [2]

2.2 Parametry příčných nerovností povrchů vozovek

Příčná nerovnost povrchu vozovky pozemní komunikace je reprezentována maximální hodnotou dvojamplitudy $2a$ (mm) pod latí základní délky 2 000 milimetrů. Postup měření a vyhodnocení výsledků měření je popsáno v normě [2] v kapitole 8. Příčné nerovnosti a jejich parametry nejsou předmětem této diplomové práce a tak jsou zde zmíněny pouze okrajově.

Měřené parametry příčné nerovnosti jsou [2]:

- výška schůdku l_S (vertikální posun od referenční přímky povrchu)
- podélné hřbety l_R , výšky hrbolů l_B a hloubky poklesů l_D (parametry zde závisí na výšce nerovnosti oproti referenčnímu povrchu/čáře)
- pokles hrany l_E povrchu vozovky v příčném profilu
- hloubka vyjeté koleje R v povrchu vozovky PK v ose jízdní stopy
- teoretická hloubka vody W (nejvyšší výška vodního sloupce, která může ve vyjeté koleji vzniknout)

2.3 Hodnocení nerovností povrchů vozovek

Způsob hodnocení nerovností povrchů vozovek je uvedeno v příloze A, ČSN 73 6175 [2]. Podélné i příčné nerovnosti povrchů vozovek je možné hodnotit v pětiúrovňové klasifikační stupnici 1 – 5, viz tabulka 2 a 3. Klasifikační stupeň odpovídá rozmezí velikosti měřeného parametru - buď příčné nerovnosti R (hloubka vyjeté koleje v milimetrech), nebo podélné nerovnosti C (míra nerovnosti) nebo IRI (mezinárodnímu indexu nerovnosti).

Vyhodnocení nerovností a přiřazení klasifikačních stupňů slouží jako podklad pro správce komunikace, k přijetí dalších opatření podle tabulky A.5 *Požadovaná klasifikace podélné nerovnosti povrchu vozovky* [2], (v této diplomové práci je tabulkou 4), nebo podle dalších předpisů.

Tabulka 2: Hodnocení podélné nerovnosti měřeného úseku délky 20 m podle C nebo IRI [2]

Parametr	Klasifikační stupeň				
	1	2	3	4	5
$C [10^{-6} \text{ rad}\cdot\text{m}]$	$C \leq 0,9$	1,0 až 2,2	2,3 až 4,6	4,7 až 10,0	$C > 10,0$
$IRI [\text{m}/\text{km}]$	$IRI \leq 1,9$	2,0 až 3,0	3,1 až 4,2	4,3 až 6,3	$IRI > 6,3$

Tabulka 3: Hodnocení příčné nerovnosti v jednotlivých profilech dle hloubky vyjeté koleje R [2]

Parametr	Klasifikační stupeň				
	1	2	3	4	5
$R [\text{mm}]$	$R < 5 (4)^a$	$(4)^a 5 \text{ až } 10 (8)^a$	$(8)^a 11 \text{ až } 22$	23 až 35	$R > 35$
^a Hodnota v závorce platí pro PK s dovolenou rychlostí vyšší než $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.					

Požadovaná klasifikace podélných nerovností povrchů vozovek sjednaná ve smluvních podmínkách nesmí snižovat požadavky v tabulce 4.

U přejímek nových povrchů je přípustné maximálně 5 % hodnot C nebo IRI vyšších, než klasifikační stupeň 1 a zároveň nesmí překročit polovinu rozpětí klasifikačního stupně 2. [2]

Tabulka 4: Požadovaná klasifikace podélných nerovností povrchů vozovek [2]

Klasifikační stupeň	1	2	3	4	5
1. PK s dovolenou rychlostí vyšší než 50 km·h ⁻¹					
2. PK s dovolenou rychlostí 50 km·h ⁻¹ a nižší					
	Přejímka povrchu pro uvedení vozovky do provozu ^a				
	Posouzení povrchu vozovky na konci záruční doby ^b				
	Plán souboru opatření pro zvýšení provozní způsobilosti povrchu vozovky				
	Provedení opatření pro zvýšení provozní způsobilosti povrchu vozovky ^c				
^a Pro přejímku povrchu vozovky se připouští výjimka podle A.6.3. ^b Délka záruční doby podle příslušného předpisu ^{b)} nebo podle smluvních podmínek. ^c Do doby provedení opatření se na úseku osadí dopravní značky A 7 „Nerovnost vozovky“, případně se sníží nejvyšší dovolená rychlost jízdy dopravní značkou B 20a.					

Podle tabulky 2 (tabulky 3), se na základě vypočtení parametru *IRI* (*C*, *R*) získá klasifikační stupeň, který hodnotí příslušnou nerovnost. Ten je pak rozhodujícím kritériem pro zhodnocení požadavků provozní způsobilosti příslušného měřeného úseku PK – viz tabulka 4.

Norma uvádí přepočtový vztah mezi mezinárodním indexem nerovnosti *IRI* a mírou nerovnosti *C*. Tento vztah (1) platí pro průměrnou vlnitost $w = 2,25$, avšak v současnosti se jeho použití neuplatňuje.

$$IRI = 2,0 \cdot C^{0,5} \Leftrightarrow C = (IRI/2)^2 \quad (1)$$

Dalším hodnotícím parametrem podélných nerovností je maximální povolená odchylka rovnosti jednotlivých vrstev (v milimetrech) podle třídy dopravního zatížení. Hodnoty maximálních povolených odchylek podélných nerovností pro hutněné asfaltové vrstvy stanovuje ČSN 73 6121 – *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy* [1], maximální podélné nerovnosti povolené u vrstev z litého asfaltu stanovuje ČSN 73 6121 – *Stavba vozovek – Lité asfaltové směsi*. Pro účely DP je zde uvedena pouze tabulka s maximálními dovolenými odchylkami povrchu s hutněných asfaltových směsí.

Tabulka 5: Maximální dovolené odchylky rovnosti povrchu z hutněných asfaltových směsí [1]

Zkoušený parametr	Zkušební norma ^{c)}	Maximální povolená odchylka pro jednotlivé vrstvy (mm) podle třídy dopravního zatížení ^{c)}					
		S, I (D, R)			II – VI, CH		
		obrusná	ložní	podkladní	obrusná	ložní	podkladní
Podélná nerovnost ^{a) b)}	ČSN 73 6175	5 (4) ^{e)}	10(8) ^{e)}	20 (15) ^{e)}	5 (8) ^{d)}	10	20
Mezinárodní index nerovnosti IRI	ČSN 73 6175	≤ 1,9 m/km u letišť, dálnic, rychlostních silnic a rychlostních místních komunikací. U ostatních kategorií komunikací se hodnota IRI nepředepisuje, pokud hodnota objednatele se zhotovitelem nestanoví jinak.					

Vysvětlení hodnot v tabulce 5 [1]:

- a) Podélná nerovnost se měří latí o délce 4 m. Je možno použít i jiné zařízení, poskytující shodné výsledky.
- b) Dovolené odchylky nerovnosti povrchu se mohou na vozovkách vyskytovat jen s pozvolným přechodem a nikoliv v krátkých stejnoměrných vzdálenostech a vždy musí být zajištěno dobré odvodnění povrchu vozovky.
- c) Pro letištní dráhy a ploch platí zvláštní předpisy.
- d) Hodnoty v závorkách platí při lokální výměně asfaltové vrstvy vozovek, na místních komunikacích s povrchovými znaky inženýrských sítí (např. vpustěmi, poklopy) a všeobecně při měření na chodnících.
- e) Hodnoty v závorkách platí pro dálnice (D) a rychlostní silnice (R).
- f) S, I označuje silnice I. třídy, II – VI označuje silnice II.-VI. třídy a CH značí chodníky.

U úprav povrchů vozovek, například zdrsněním drceným kamenivem se nerovnost zkouší až po zajetí provozem, resp. po odstranění volných a nedostatečně přichycených zrn kameniva. Pro měření latí na místech s kanalizačními poklopy a uličními vpustěmi je rozhodující rám těchto zařízení, měřící klínek se nepřikládá pod lať v místech vnitřních ploch těchto odvodňovacích zařízení. [9]

3. Metody měření podélných nerovností

Pro měření nerovností vozovky se používá řada měřících přístrojů a zkušebních zařízení. Tato zařízení lze rozdělit do tří základních skupin – přístroje pro přímé měření nerovnosti, přístroje pro bezkontaktní měření nerovností a odezvové přístroje a zařízení. [9]

- Přístroje pro přímé měření nerovností

- Měřící lať s přiloženým klínem (podélné nerovnosti 4 metrovou latí, příčné nerovnosti 2 metrovou latí)
- Planograf (podélná nerovnost)
- Přesná nivelace (geodezie, podélná i příčná nerovnost)

- Odezvové přístroje a zařízení

- Měřící multifunkční vozidlo ARAN nebo ARGUS (Automatic Road Analyzer, podélná nerovnost)

- Profilometr s dvoumotovým odezvoým systémem
- Měřící vozidlo se snímačem svislého zrychlení
- Profilometr Dipstick (podélná a příčná nerovnost)
- Profilometr SDP – South Dakota Profiler (podélná nerovnost)

- Přístroje pro bezkontaktní měření nerovností

- Analyzátor podélné nerovnosti APL
- Bezkontaktní 3D profilometr
- Měření pomocí ultrazvuku
- Měření pomocí laseru

K současným trendům technologií měření patří využití chytrých mobilních telefonů uchycených v automobilech se zabudovanými detektory a akcelerometry. Akcelerometry umí určit rychlost, vzdálenost, umí rozlišit změny úhlu náklonů nebo měřit vibrace strojů. Chybovost měření však narůstá lineárně s délkou měřeného úseku. [9]

3.1 Metody měření podélných nerovností vozovek podle ČSN 73 6175

Kapitola se po teoretické stránce zabývá podrobněji metodami měření podélných nerovností povrchů vozovek, které uvádí norma ČSN 73 6175 [2]. Jsou zde popsána používaná měřící zařízení a přístroje jednotlivých metod měření, na jakém principu jednotlivé metody měření fungují, samotným postupem a průběhem měření, vyhodnocování naměřených dat a zpracovaných výsledků.

3.1.1 Měřící lať s příložným klínem

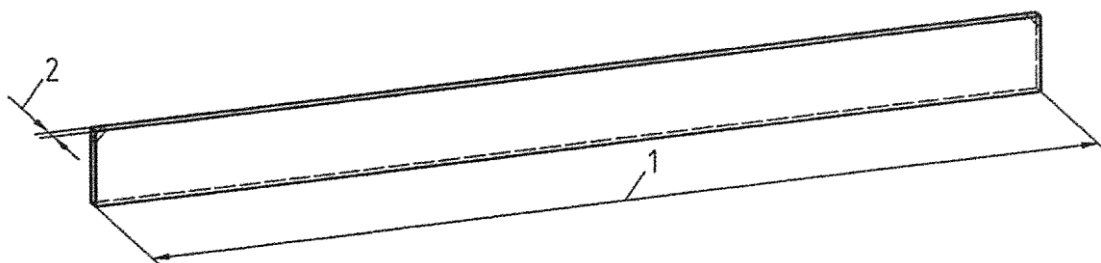
Měření jednotlivých nerovností povrchů vozovky PK pomocí latě stanovuje norma ČSN 73 6175 [2] a podrobněji se tím zabývá norma ČSN EN 13036-7 – *Povrchové vlastnosti vozovek a letištních ploch – zkušební metody – Část 7: Měření jednotlivých nerovností povrchu vozovky – Zkouška latí*. [3] Podstatou zkoušky je stanovení maximálních amplitud 2 σ nerovností pod měřící latí.

Latí měříme jak podélnou, tak i příčnou nerovnost. Pro zjišťování podélných nerovností profilu je užitá 4 metrová lať, pro příčné nerovnosti vozovky se používá lať 2 metrová.

- **Měřicí zařízení [2]:**

Jako měřicí zařízení se použije nejčastěji duralová měřicí lať (obrázek 3) a měřicí klínek (obrázek 4). Normalizovaná lať je dlouhá 4 metry, šířka spodní hrany měřicí latě je maximálně 18 milimetrů. Lať musí být dostatečně tuhá, aby nevykazovala větší deformace, než jsou povolené. Tedy kolmosti hran a průhyb latě nesmí přesáhnout hodnotu 0,3 milimetry ve směru měření a hodnotu 10 milimetrů v příčném směru.

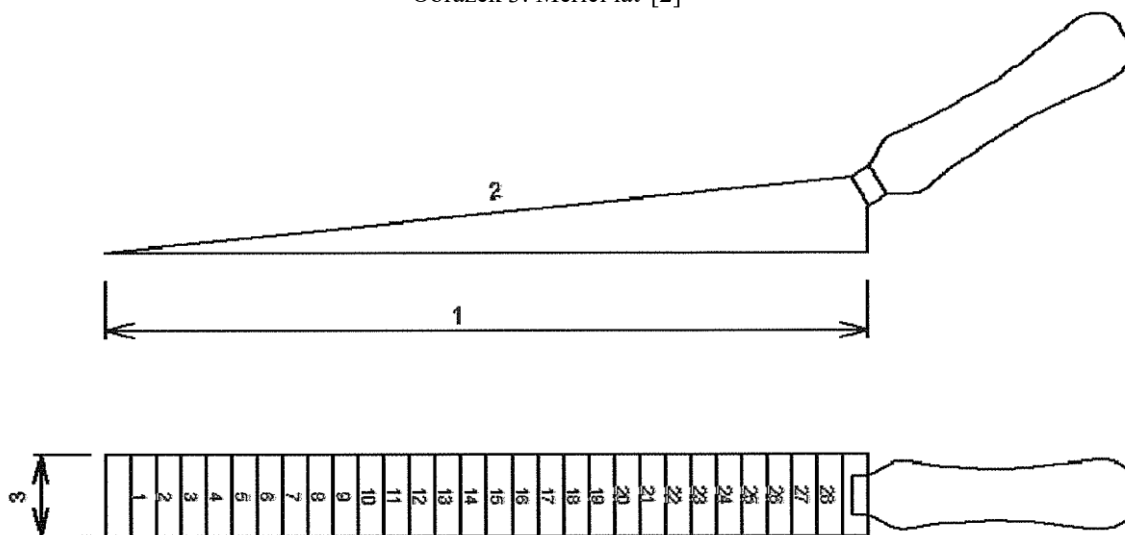
K odečtům velikosti naměření slouží normalizovaný měřicí klínek z odolného materiálu proti otěru (nejčastěji z duralu), který se vkládá pod měřicí lať. Kalibrovaný klínek má sklon horního povrchu 1:10 (1 mm výšky:10 mm délky). Maximální délka klínku je 300 milimetrů, jeho šířka se pohybuje mezi 25-35 milimetry. Do klínku je vyleptaná stupnice, ta je dělená po 1 milimetru.



Legenda

- 1 délka, $l = 4\ 000\ \text{mm}$ ($2\ 000\ \text{mm}$) $\pm 3\ \text{mm}$ ($\pm 1\ \text{mm}$)
- 2 šířka, $w = \text{max. } 18\ \text{mm}$

Obrázek 3: Měřicí lať [2]



Legenda

- 1 délka, $l = \text{max. } 300\ \text{mm}$
- 2 sklon, $s = 1:10$
- 3 šířka, $w = 25\ \text{mm}$ až $35\ \text{mm}$

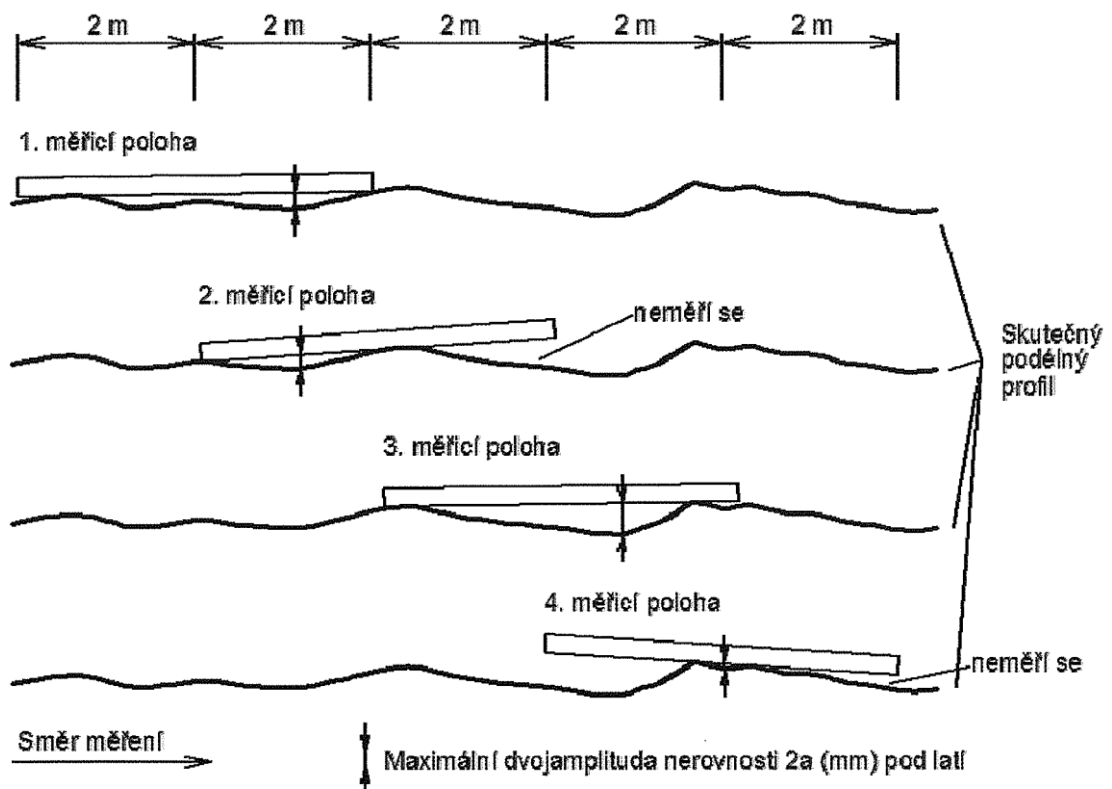
Obrázek 4: Měřicí klínek [2]

- **Postup měření [2]:**

Zjištění a vyznačení následujících parametrů komunikace: všechna zaoblení nivelety o poloměru $R \leq 2\,000$ metru a směrové oblouky o $R \leq 160$ metru, dostředný sklon směrových oblouků.

Samotné měření podélných nerovností (postup je graficky znázorněn na obrázku 5), probíhá zpravidla v profilech komunikace ve vzdálenosti přibližně 0,75 metru od vnitřní hrany zpevněné krajnice (dříve od vnitřního okraje vodících proužků, tento pojem však zanikl), při více jízdnicích se měření provádí v jízdnicích stopách jízdnic pruhů PK.

Při měření je lať přikládána kolmo k povrchu vozovky ve směru jízdy, klínek se zasune pod měřicí lať a maximální naměřená hodnota na klínku je dvojamplituda nerovností ($2a$) v milimetrech, tato hodnota se průběžně zaznamenává do záznamového archu. Při překročení povolených odchylek je nutno do záznamového archu (popř. přímo na PK) poznačit místo nerovnosti a její charakter (vydutá/vypuklá nerovnost).



Obrázek 5: Postup měření podélných nerovností lať [2]

- **Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení [2]:**

Hodnoty naměřené v místech, kde zaoblení nivelety o poloměru $R \leq 2\,000$ metru a směrové oblouky o $R \leq 160$ metru se musí opravit s ohledem na zakřivení plochy, pomocí nomogramů, podle ČSN 73 6175 [2].

Kde je zaoblení nivelety o poloměru $R \leq 2\,000$ metru, tak se naměřené hodnoty nerovností sníží o hodnotu vzezpetí oblouku. V místech, kde jsou směrové oblouky o $R \leq 160$ metru, se naměřené hodnoty sníží v závislosti na poloměru směrového oblouku a dostředném sklonu směrového oblouku.

Vyhodnocení probíhá na základě maximálních povolených hodnot nerovností příslušných konstrukčních vrstev podle příslušných norem pro stavbu vozovek, nebo dle smluvních podmínek objednatele a zhotovitele pro přejímky krytů a podkladních vrstev vozovky. Příkladem pro vyhodnocování podélných nerovností vozovek (2a) je v této práci tabulka 6 [2], která stanovuje maximální dovolené odchylky rovnosti povrchu z hutněných asfaltových směsí.



Obrázek 6: Měření podélných nerovností latí [vlastní fotografie]

3.1.2 Planograf

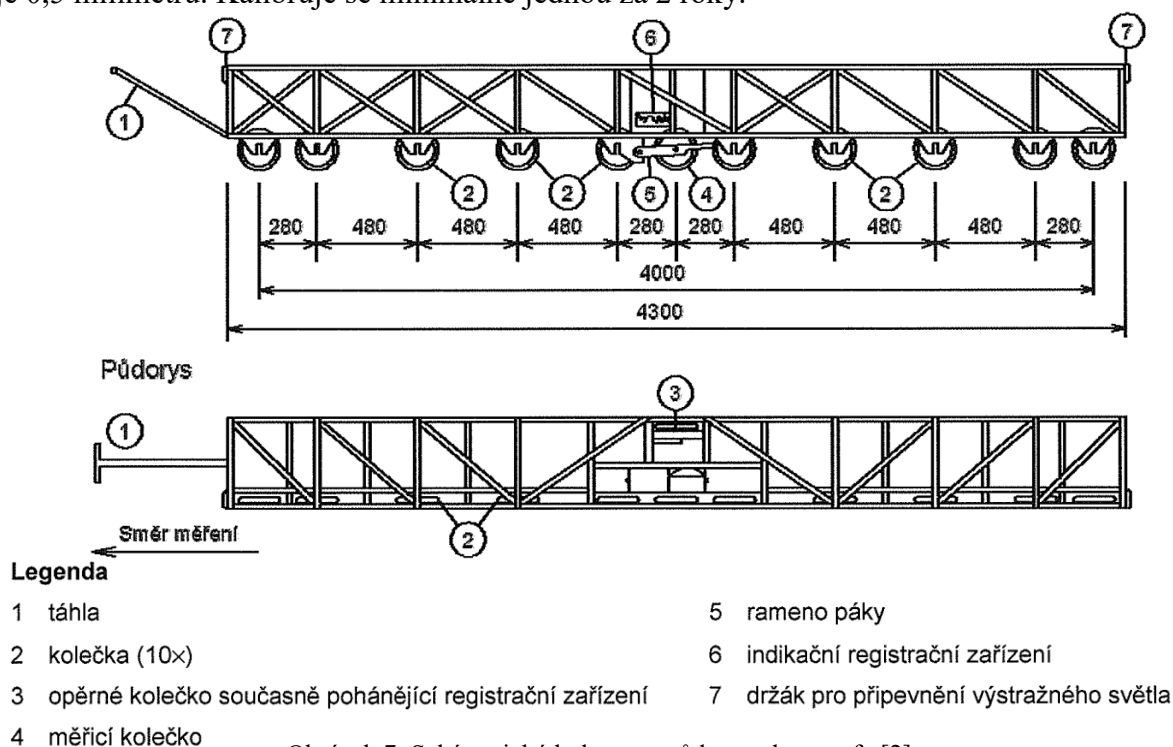
Kontrolní měření krytu vozovky PK pomocí planografu stanovuje ČSN 736175 [2]. Měření je prováděno s nízkou rychlostí a tak může být nevhodné pro provádění diagnostiky za provozu.

Podstatou zkoušky je měření podélných nerovností povrchu vozovky pod čtyřmetrovou příhradovou konstrukcí osazenou pojezdovými kolečky a měřícím kolečkem. Měřící kolečko měří výchylky a nerovnosti povrchu, tyto data jsou zaznamenávána pro následné porovnání skutečného stavu s povolenými normovými odchylkami.

- **Měřící zařízení [2]:**

Jako měřící zařízení se použije normalizovaný planograf (obrázek 7), který je tvořen příhradovou trubkovou konstrukcí délky 4 metry, soustavou deseti pojezdových koleček, jedním opěrným a jedním měřícím kolečkem. Při nerovnostech povrchu PK se jedno či více pojezdových koleček nedotýká měřeného povrchu. Měřící kolečko měří svislé pohyby (nerovnosti), které jsou zaznamenány a dále vyhodnocovány. Součástí vozíku je též měřič ujeté vzdálenosti během prováděné diagnostiky.

Součástí měřícího zařízení je dále registrační zařízení a identifikační zařízení. Registrační zařízení se nachází ve středu vozíku nad měřícím kolečkem a registruje naměřené hodnoty buď elektronicky, nebo mechanicky. Identifikační zařízení průběžně sleduje prováděné měření. Planograf má rozsah měření většinou 0 - 40 milimetrů, přesnost měření je 0,5 milimetrů. Kalibruje se minimálně jednou za 2 roky.



Obrázek 7: Schématický bokorys a půdorys planografu [2]

- **Postup měření [2]:**

Planograf se postaví 50 metrů před začátkem měřené stopy (v případě absence dostatku místa se postaví na začátek měřené stopy), pomocí táhla a vlečného zařízení se planograf zapojí za pohonnou jednotku (automobil).

Po zadání údajů o měření a nastavení hodnoty počátku měření (staničení) může začít vlastní měření, které má být prováděno s rychlostí maximálně 4 km/h, v profilu komunikace ve vzdálenosti přibližně 0,75 metru od vnitřní hrany zpevněné krajnice (dříve - od vnitřního okraje vodících proužků)

Při mechanickém záznamu se do planografu vkládá registrační papír, na který jsou naměřené údaje zaznamenávány – výstupem se stává tzv. viagram v měřítku 1:400 (1:100) – dle délky měřeného úseku. Při elektronickém snímání a záznamu naměřených hodnot se záznam ukládá do paměti počítače.

- **Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení [2]:**

Vyhodnocení probíhá na základě maximálních povolených hodnot nerovností druhu pozemní komunikace podle příslušných norem pro stavbu vozovek nebo dle smluvních podmínek objednatele a zhotovitele.



Obrázek 8: Příklad viagramu mechanického záznamu podélných nerovností povrchu [2]

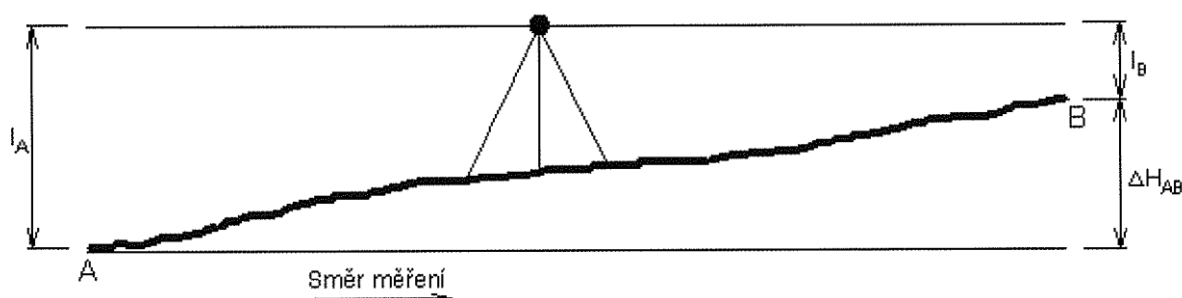


Obrázek 9: Digitální planograf s elektronickým vyhodnocováním dat [10]

3.1.3 Přesná nivelace

Měření podélného i příčného sklonu vozovky přesnou nivelací stanovuje norma ČSN 73 6175 [2]. Pro získání výšek podrobných bodů a tak i skutečného podélného profilu se využívá metoda přesné geodetické nivelace ze středu.

Podstatou zkoušky je jak zmíněné zjištění skutečného profilu povrchu vozovky PK, tak i zjištění parametru (zaměření) nerovnosti pomocí nivelačního přístroje a měřicí latě. Z hodnot přesné nivelace můžeme stanovit parametry *IRI* a *C*. Kalibrace latě i přístroje se provádí zároveň.



Obrázek 10: Schéma geometrické nivelace ze středu [2]

- **Měřicí zařízení [2]:**

K měření slouží přesný kompenzátorový nivelační přístroj umožňující čtení výšek záměrů s přesností na 0,1 milimetru, vybavený mikrometrem či automatickým odečtem na nivelační lať. Součástí měřicího zařízení je nivelační lať s čárkovým kódem nebo invarová lať s dvojitou stupnicí a s automatickým záznamem, nivelační lať je vybavena přesnou krabicovou libelou. Novější typy kompenzátorových přístrojů jsou vybaveny digitálními technologiemi, které zjednodušují a zrychlují standardní postupy při nivelačních pracích a minimalizují vliv lidského faktoru na výsledky měření [11].



Obrázek 11: Digitální nivelační přístroj Leica Spider se stabilním kompenzátozem [11]



Obrázek 12: Digitální nivelační lat' s čárovým kódem a klasickou nivelační stupnicí [11]

- **Postup měření [2]:**

Délka záměr je maximálně 40 metrů, výška záměr nesmí přesahovat 0,8 metru.

Podle *TP 207* je doporučená délka kroku vzorkování 20 metrů, *ČSN 73 6175* však stanovuje tuto hodnotu na 0,25 metrů v podélném směru pro maximální délku 500 metrů měřeného úseku pozemní komunikace.

V příčném směru se vzájemná vzdálenost stop podrobných bodů zvolí v rozmezí 1,25 metru až 1,6 metru a klade se do místa nejčtenějších přejezdů vozidel.

Nivelační přístroj snímá v jedné horizontální rovině hodnoty na měřicích nivelačních latích (čtení na lati vzad „I_A“ a čtení vpřed „I_B“), přístroj je staven zhruba uprostřed v ose, mezi latěmi (na obrázku 10 jsou to body A a B).

- **Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení [2]:**

Stanovíme výpočtem převýšení bodů A-B. Z převýšení bodů a známých měřených vzdáleností převýšení získáme průběh podélného profilu měřeného úseku.

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = I_A - I_B = Y_i - Y_{i-1} \quad (2)$$

Dále můžeme získat míru nerovnosti *C* a index nerovnosti *IRI*, tedy:

- Stanovení míry nerovnosti *C* [2,8]

- kontrola s případné vyloučení chyb ve čtení, popřípadě v zápisu.
- odstranění trendu v podélném sklonu nivelety (metoda nejmenších čtverců), vznikne podélný profil bez dlouhých vln a podélných sklonů, znázorňující průběh nerovností v požadovaných délkách

- výpočet výkonové spektrální hustoty nerovností $S_h(\Omega)$ ($m^3 \cdot rad^{-1}$), která umožňuje posoudit složení podélných nerovností podle pásem frekvencí
- vynesení závislosti logaritmu výkonové hustoty nerovností na logaritmu délkové kruhové frekvence Ω ($rad \cdot m^{-1}$)
- stanovení míry nerovnosti C ($10^{-6} rad \cdot m$) jako $C = S_h(\Omega = 1)$ a vlnitost w jako záporné směrnice prokládající přímky
- stanovení 20 metrových průměrů takto vyhodnocených měř nerovností C a vlnitost w v obou změřených jízdních stopách
- Stanovení mezinárodního indexu nerovnosti IRI [2,8]

- vyčíslení čtyř proměnných, které jsou funkcí výšek Y_i bodů podélného profilu.

Pro každý bod se řeší soustava čtyř rovnic (3):

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= s_{11} \cdot Z_1' + s_{12} \cdot Z_2' + s_{13} \cdot Z_3' + s_{14} \cdot Z_4' + p_1 \cdot Y' \\ Z_2 &= s_{21} \cdot Z_1' + s_{22} \cdot Z_2' + s_{23} \cdot Z_3' + s_{24} \cdot Z_4' + p_2 \cdot Y' \\ Z_3 &= s_{31} \cdot Z_1' + s_{32} \cdot Z_2' + s_{33} \cdot Z_3' + s_{34} \cdot Z_4' + p_3 \cdot Y' \\ Z_4 &= s_{41} \cdot Z_1' + s_{42} \cdot Z_2' + s_{43} \cdot Z_3' + s_{44} \cdot Z_4' + p_4 \cdot Y' \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

kde:

Z_j ... z předchozího vzorku, $j = 1, 2, 3, 4$

$Y' = (Y_i - Y_{i-1})/dx$... vstupní veličina sklonu

dx ... vzorkovací interval po 0,25 metrech

s_{ij} , p_j ... koeficienty, které jsou naměřené pro daný vzorkovací interval 0,25 metrech a pro simulaci jízdy dvoumotového referenčního odezvového systému (viz obrázek 2) při rychlosti 80km/h, tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6 níže.

Tabulka 6: Koeficienty naměřené simulací jízdy dvoumotového referenčního odezvového systému [9]

$S_{11} = 0,9966071000$	$S_{12} = 0,0109151400$	$S_{13} = -0,0020832740$	$S_{14} = 0,0003190014$
$S_{21} = -0,5563044000$	$S_{22} = 0,9438768000$	$S_{23} = -0,8324718000$	$S_{24} = 0,0506470100$
$S_{31} = 0,0215317600$	$S_{32} = 0,0021267600$	$S_{33} = 0,7508714000$	$S_{34} = 0,0082218880$
$S_{41} = 3,3350130000$	$S_{42} = 0,3376467000$	$S_{43} = -39,1276200000$	$S_{44} = 0,4347564000$
$p_1 = 0,0054761070$	$p_2 = 1,3887760000$	$p_3 = 0,2275968000$	$p_4 = 35,7926200000$

- výpočet rektifikovaného sklonu (RS) v každém vzorkovacím intervalu (po 25 metrech):

$$RS_i = |Z_3 - Z_1| \quad (4)$$

- výpočet *IRI* v každé jízdě (*IRI* = průměr proměnné veličiny rektifikovaného sklonu na měřené délce) podle vzorce (5):

$$IRI = \frac{1}{(n - 1)} \sum_{i=2}^n RS_i \quad , \text{ kde } n \dots \text{ počet měření} \quad (5)$$

- stanovení 20 metrových průměrů takto vyhodnocených mezinárodních indexů nerovnosti *IRI* v obou měřených jízdách PK, uvedený postup stanovení *IRI* neuvažuje s nerovnostmi o vlnových délkách kratších 0,5 metru
- vyhodnocení stanoveného indexu *IRI* podle klasifikačních stupňů se provede dle *přílohy A* normy [2] (viz tabulka 2 této diplomové práce), vyhodnocení lze použít pouze pro úseky délek 20 metrů, pozn: z hodnot přesné nivelace lze stanovit *IRI* i pomocí algoritmu v softwaru ProVAL (volně dostupný software)

3.1.4 Profilometr s dvoumotovým odezovým systémem

Měření podélných nerovností profilometrem s dvoumotovým odezovým systémem stanovuje norma ČSN 73 6175 [2]. Podstatou zkoušky je snímání hodnot svislého zrychlení neodpružené hmoty měřící nápravy a hodnot svislého zrychlení odpružené hmoty karoserie měřícího vozidla. Z přístrojem nasnímaných hodnot následně stanovujeme parametr reprezentující průběh podélných nerovností - index *IRI*. Snímače i měřící zařízení musí být kalibrovány.

- **Měřící zařízení [2]:**

K samotnému měření slouží osobní automobil, na němž je upevněno měřící zařízení profilometru s dvoumotovým odezovým systémem (obrázek 2), vozidlo však musí vyhovovat níže zmíněným parametrům, nimiž jsou:

- zajištění dostatečné pasivní bezpečnosti posádky, vybavení výstražným zařízením
- dostatečný výkon, který zajistí maximální rychlost měření 90 km/h
- vybavení vozidla soustavou snímačů svislého zrychlení s přesností měření $\pm 0,01 \text{ m/s}^2$
- vybavení vozidla počítačem s algoritmem pro stanovení *IRI*, který umí zohlednit změny hmotnosti vozidla v rozmezí $\pm 500 \text{ kg}$
- zařízení pro měření délek s přesností 0,1 %, snímače pro měření zrychlení, dráhy, času

- **Postup měření [2]:**

Před vlastním měřením je nutno zadat veškeré vstupní parametry, jako provozní údaje (datum měření, čas, teplota vzduchu během měření a počasí, teplota povrchu vozovky, směr měření a jeho účel, měřicí rychlost), a identifikační údaje o měřeném úseku (číslo PK, staničení měřeného úseku, označení jízdního pruhu), v průběhu měření je vhodné poznamenat průjezd významnými body (uzly) a doplňkové údaje (poznámky v průběhu měření).

Samotné měření probíhá obvykle v jízdní stopě, rychlost měření musí být konstantní v rozmezí 35 km/h – 90 km/h, vzorkování je voleno v intervalu minimálně 0,25 metru.

Měřený úsek je měřen více konstantními rychlostmi v_k (měření se opakuje většinou alespoň dvakrát).

- **Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení [2]:**

Podélná nerovnost je stanovena součtem přemístění nápravy a reakce pneumatiky na nerovnosti vyvolané odezvyvými silami neodpružené a odpružené hmoty podle vzorce [2]:

$$z_x = z_u + (M_s \cdot z_s + m_u \cdot z_u) / k_t \quad (6)$$

kde:

z_u ... vzdálenost měřicí nápravy od měřeného povrchu vozovky, $j = 1, 2, 3, 4$

M_s ... hmota karoserie (odpružená hmota)

z_s ... zrychlení karoserie (odpružená hmota)

z_u ... zrychlení měřicí nápravy (neodpružená hmota)

k_t ... tuhost pneumatiky

Po stanovení průběhu podélné nerovnosti měřeného úseku se buď pomocí algoritmu, nebo pomocí softwaru ProVAL (viz podrobněji v kapitole 6.2.2) stanoví index *IRI* pro úseky délky 20 metrů.

Poté podle tabulky 2 výše, se na základě vypočteného indexu *IRI* stanoví klasifikační stupeň. Ten je rozhodujícím kritériem pro vyhodnocení příslušného měřeného úseku dle typu PK, podle maximální dovolené rychlosti a provozní způsobilost měřeného úseku PK (tabulka 4).

Příkladem měřicího zařízení je multifunkční měřicí zařízení tatra Runway Tester (TRT), které měří podélné nerovnosti vozovek (pro stanovení *IRI*) a zároveň měří protismykové vlastnosti vozovek (součinitel smykového tření). Měření provádí přídatné páté kolo. Během měření

pořizuje videozáznam, detailní digitální snímky povrchu vozovky a jeho poloha je lokalizovaná GPS souřadnicemi. [33]



Obrázek 13: Multifunkční zařízení TRT (tatra Runway Tester) [33]

3.1.5 Měřící vozidlo se snímačem svislého zrychlení

Měření podélných nerovností vozovky měřícím vozidlem se snímačem svislého zrychlení stanovuje norma ČSN 73 6175 [2]. Podstatou zkoušky je měření zrychlení odpružené hmoty měřícího vozidla, kde je umístěn snímač zrychlení při několika rychlostech jízdy – měření. Globální dynamické vlastnosti měřícího vozu (osobního automobilu) reprezentuje globální přenosová charakteristika I stanovena kalibrací na pracovním referenčním povrchu. Měřící zařízení se kalibruje minimálně jednou ročně (při běžném používání se pak kalibruje minimálně jednou za dva roky). Z naměřených hodnot snímání můžeme stanovit parametry míry podélné nerovnosti C .

- **Měřící zařízení [2]:**

K samotnému měření slouží osobní automobil, na němž je upevněno měřící zařízení snímající svislé zrychlení, vozidlo však musí splňovat níže zmíněné parametry:

- zajištění dostatečné pasivní bezpečnosti posádky, vybavení výstražným zařízením (maják)
- dostatečný výkon, který zajistí maximální rychlost měření 110 km/h
- vybavení vozidla soustavou snímačů svislého zrychlení s přesností měření $\pm 0,01 \text{ m/s}^2$
- vybavení vozidla počítačem s algoritmem pro měření, záznam a vyhodnocení (stanovení IRI)
- zařízení pro měření rychlosti, délek a polohy, kalibrované snímače měření zrychlení a dráhy (času)

- **Postup měření [2]:**

Před vlastním měřením je nutné provedení kontroly funkčnosti měřicího zařízení a provozního stavu měřicího vozidla, před samotným měřením je dále nutno zadat veškeré vstupní parametry, jako provozní údaje (datum měření, čas, teplota vzduchu při měření a počasí, směr měření a jeho účel, měřicí rychlost) a identifikační údaje o měřeném úseku (číslo PK, staničení měřeného úseku, označení jízdního pruhu). V průběhu měření je vhodné poznamenat průjezd významnými body (uzly, měřené úseky projeté jinou rychlostí než byla zvolená měřicí rychlost) a doplňkové údaje (poznámky v průběhu měření)

Délka měřeného úseku je obvykle alespoň 500 metrů, příčném směru se volí jízdní stopa tak, že pravé kolo měřicího zařízení je vzdálené v rozmezí 0,8 – 1,2 metru od pravého okraje jízdního pruhu

Samotné měření se provádí předepsanými rychlostmi v závislosti na intenzitě dopravy, konstrukčních parametrech – směrové, výškové řešení trasy, kategorii komunikace (předepsané rychlosti jsou 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 90 km/h s 110 km/h)

Měřený úsek je měřen více konstantními rychlostmi v_k (měření se opakuje většinou alespoň dvakrát), při každé jízdě zvolenou konstantní rychlostí se zapisuje průběh hodnot svislého zrychlení $A_k(x)$ a stanoví se rozptyl zrychlení odezvy $D_{A_{kj}}$ ve zvoleném referenčním místě vozidla, v závislosti na vzdálenosti x ujeté trasy. Frekvence vzorkování je po maximálně 0,25 metrech. Měřená data se zaznamenávají na záznamové medium v diskrétních hodnotách postupně po blocích.

- **Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení [2]:**

Stanovení globální přenosové charakteristiky měřicího vozidla I:

Tato hodnota se získává kalibrací měřicího vozidla na pracovním referenčním povrchu (který je co možno nejideálnější – vodorovný, homogenní, bez lokálních překážek). Kalibraci je vhodné provádět na třech až čtyřech pracovních referenčních površích s parametry C (míra nerovnosti) a w (vlnitost), pokud možno širokého rozsahu. Orientačně - parametr $C = 2 \cdot 10^{-6}$ rad·m - $16 \cdot 10^{-6}$ rad·m, parametr $w = 2,25 (\pm 0,2)$.

Po každém kalibračním referenčním povrchu délky 500 m přejezdí měřicí vozidlo, postupně konstantními měřicími rychlostmi v_k (doporučené rychlosti 40km/h, 60km/h, 90 km/h a 110 km/h), při každé jízdě se měří hodnoty svislého zrychlení a stanoví se rozptyl zrychlení

odezvy D_{Akj} ve zvoleném referenčním místě vozidla, kde bude probíhat samotné měření. Veličina D_A se stanoví jako klouzavý průměr pro kalibrační měření z hodnot odpovídajících deseti metrům vozovky. Je též nutné ověření přímkové závislosti $D_A = (C, v_k)$.

Výpočet I [$\text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$] dle vztahu [2]:

$$I = \frac{1}{m \cdot n} \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m \frac{D_{Aij}}{v_j} \right) / C_i \right\} \quad (7)$$

kde:

n ... počty pracovních referenčních povrchů

m ... počty rychlostí jízdy na daných pracovních referenčních površích

D_{Aij} ... rozptyl zrychlení odezvy

v_j ... nastavená rychlost konkrétního čísla měření

C_i ... parametr míry nerovnosti pro konkrétní číslo měření

j ... číslo měření, $j = 1, 2, 3, 4$

Vyhodnocení podélných nerovností vozovky měřícím vozidlem se snímačem svislého zrychlení je provedeno stanovením míry nerovnosti C pro celé pásmo vlnových délek. Ze stanovených průběhů rozptylu zrychlení odezvy $D_{Ak}(x)$ podél měřeného úseku x při rychlostech v_k a počtu rychlostí měřených jízd m se odhad míry nerovnosti C v závislosti na staničení x vypočte dle vztahu [2]:

$$C(x) = \frac{1}{m \cdot I} \cdot \sum_{k=1}^m \left(\frac{D_{Ak}(x)}{v_k} \right) \quad (8)$$

kde:

C ... míra nerovnosti [$\text{rad} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]

D_{Ak} ... rozptyl zrychlení odezvy ve zvoleném referenčním místě vozidla [m^2/s^4]

I ... globální přenosová charakteristika měřícího vozidla [$\text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$]

v_k ... konstantní rychlost jízdy měřícího vozidla [m/s]

m ... počty rychlostí jízdy na daných pracovních referenčních površích

Stanovení průměrné nerovnosti C je následující [2]:

Pokud je závislost $C(x)$ na staničení x přibližně konstantní, pak: průměrná hodnota míry nerovnosti je $C = (1/p) \cdot \sum_{j=1,p} C_j$ (9)

kde C_j ... digitalizované hodnoty odpovídající poloze staničení x_j , $j = 1, \dots, p$.

Pokud závislost $C(x)$ na staničení x není přibližně konstantní, ponechá se průběh $C(x)$ závislý na staničení a úseky s výrazně navýšenými hodnotami $C(x)$ se vyznačí jako místa s výskytem větších lokálních překážek (impulsů).

Princip měření i užitá měřící zařízení jsou obdobné jako v čl. 3.2.7.

Poté podle tabulky 3 výše, se na základě vypočtené míry nerovnosti C měřeného úseku přiřadí klasifikační stupeň. Ten je rozhodujícím kritériem pro vyhodnocení stavu příslušného měřeného úseku.

3.1.6 Profilometr Dipstick

Měření podélných i příčných nerovností konstrukčních vrstev vozovky profilometrem Dipstick stanovuje norma ČSN 73 6175 [2]. Měřící zařízení je zobrazeno na obrázku 14 níže.

Profilometr Dipstick vyniká velmi přesným inklinometrem s přesností 0,1 % z měřené délky úseku (přesnost třídy 1), proto je jeho použití vhodné též pro kalibraci a stanovení globální přenosové charakteristiky dvoumotové měřící soustavy a ke kalibraci profilometrů.

Podstatou zkoušky je zjištění skutečného profilu povrchu vozovky PK a stanovení parametru nerovnosti, kdy při samotném měření se tzv. kráčí po zkoumaném profilu vozovky PK, který je k měření určen. Při každém kroku profilometru jsou zaznamenávána data jako rozdíl výšky od předchozího kroku. Tento způsob měření je vhodný pro zkoumané úseky do délek přibližně 1 000 metrů, avšak tato metoda měření je podstatně rychlejší než měření prováděné metodou přesné nivelace (viz čl. 3.1.3). Přesnost měření se ověřuje před každým měřením minimálně na dvou referenčních površích. Měřící zařízení se kalibruje minimálně jednou ročně (při běžném používání se pak kalibruje minimálně jednou za dva roky).

- **Měřící zařízení [2]:**

Přístroj se skládá z několika částí, hlavní část tvoří rám s rukojetí osazený dvěma kloubově uloženými dosedacími plochami o průměrech 50 milimetrů. Rozteč těchto dvou dosedacích

ploch definuje interval měření, obvykle se nastavuje na 250 milimetrů pro podélnou nerovnost (pro příčnou nerovnost je to 100 milimetrů).

Měřicí zařízení je osazeno inklinometrem a mikropočítačem, který řídí měření a zaznamenává naměřená data, která následně vyhodnocuje či uloží pro další zpracování v počítači. Na obrázku 14 je fotografie měřicího zařízení profilometru Dipstick.



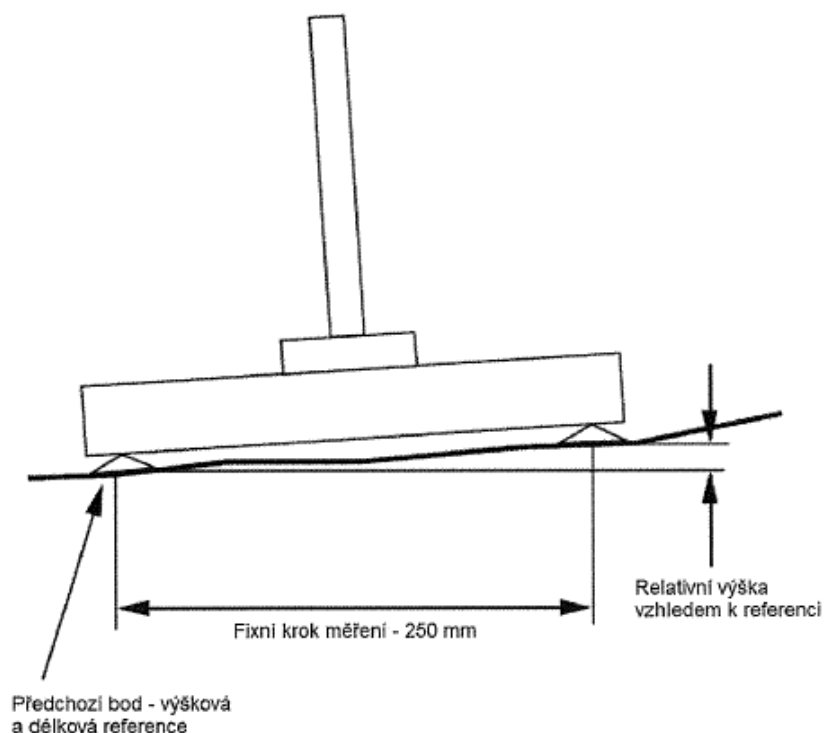
Obrázek 14: Měřicí zařízení Profilometr Dipstick [2]

- **Postup měření [2]:**

Před vlastním měřením je nutno prověřit funkčnost a správné nastavení měřicího zařízení podle předpisu výrobce, následně je nutné provedení kalibračního měření. Při kalibračním měření se celková délka měřeného úseku, počet měřených stop a jejich vzájemná vzdálenost, stanoví podobně jako při měření přesnou nivelací (článek 3.1.3).

Samotné měření provedeného povrchu vozovky se měří podél vytyčeného profilu, kdy obsluha s profilometrem „kráčí“ a postupným otáčením přístroje okolo dosedacích ploch ho posouvá o každý měřicí interval (250 milimetrů) dopředu. Při každém jeho dalším kroku (tj. každé další přiložení dosedací plochy přístroje na vozovku) počítač zaznamená data z inklinometru a získá tak změnu výšky vzhledem k předešlému kroku. Schéma měření je znázorněno na obrázku 15.

Výsledkem měření je výstup z počítače, který obsahuje stručný profil povrchu vozovky PK, který je určený relativními body (je tvořený posloupností diskrétních hodnot Y_i).



Obrázek 15: Profilometr Dipstick – schéma měření [2]

- **Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení [2]:**

Vyhodnocení měření podélné nerovnosti je obdobné jako u metody přesné nivelace (článek 2.1.3), nebo se ke stanovení *C* či *IRI* využije vhodný software. Dále následuje vyhodnocení nerovnosti vozovky podle normy – viz článek 2.3 této diplomové práce.

3.1.7 Laserový profilometr SDP (South Dakota Profiler)

Stanovení podélných nerovností povrchu vozovky PK laserovým profilometrem SDP stanovuje norma ČSN 73 6175. [2] Podstatou zkoušky je zjištění skutečných nerovností profilu povrchu vozovky PK a stanovení indexu *IRI*.

Součástí profilometru SDP je inklinometr s přesností 0,1 % z měřené délky úseku (odpovídá přesnosti třídy 1). Je vhodný ke kalibraci profilometrů a pro stanovení globální přenosové charakteristiky dvouhmotové měřící soustavy.

Samotné bezkontaktní měření podélného profilu povrchu vozovky PK je prováděno měřícím zařízením s inerciální referenční pohyblivou plošinou profilometru SDP s akcelerometrem, který snímá svislé zrychlení odpružené hmoty (karosérie vozidla). Na karoserii vozidla je upevněna laserová kamera, která měří svislou vzdálenost referenční plochy od povrchu vozovky zkoumaného úseku. Měřené údaje jsou zaznamenávány a následně vyhodnocovány.

Tento způsob měření je vhodný pro zkoumané úseky do délek úseků přibližně 1 000 metrů. Metoda měření profilometrem SDP je výrazně rychlejší, než je měření prováděné metodou přesné nivelace (viz čl. 3.1.3).

- **Měřící zařízení [2]:**

Profilometr se skládá z několika částí – z laserového senzoru (kamery umístěné na karoserii vozidla) pro měření svislé vzdálenosti mezi referenční inerciální rovinou vozidla a povrchem vozovky a z akcelometru, který je umístěn na horní straně senzoru a měří svislé zrychlení nezávisle na měřicí rychlosti. Z akcelometru (s přesností $\pm 0,01\text{m/s}^2$) je následně vypočten záznam, který slouží k odfiltrování nežádoucího zkreslení měření svislé vzdálenosti (např. akcelerace, brždění, sekundární impulzy z odpružené karoserie). Pak tedy platí, že:

Skutečný podélný profil = vzdálenost povrchu vozovky od referenční roviny měřícího vozidla (laser) – filtrovaný vertikální pohyb referenční roviny (akcelometr)

Profilometr je dále osazen přesným elektronickým měřením vzdálenosti pro určení okamžité rychlosti v průběhu provádění měření, s ní se dále pracuje při stanovování indexu IRI podle principu čtvrtinového vozidla o rychlosti 80km/h.

Krok měření (snímání laserovým senzorem) musí být minimálně 100 milimetrů (50 milimetrů), maximálně 250 milimetrů.

K samotnému měření slouží osobní automobil, na němž je upevněno měřící zařízení profilometru SDP, vozidlo však musí vyhovovat níže zmíněným parametrům, nimiž jsou:

- zajištění dostatečné pasivní bezpečnosti posádky, vybavení výstražným zařízením
- dostatečný výkon, který zajistí maximální rychlost měření 90 km/h
- vybavení vozidla soustavou snímačů - akcelometr, laserový senzor
- vybavení vozidla počítačem s algoritmem pro výpočet filtrovaného profilu povrchu vozovky a stanovení IRI, který umí zohlednit změny hmotnosti vozidla v rozmezí ± 500 kg, je nezávislý na rychlosti vozidla v rozmezí 35-90 km/h a umožňuje amplitudu podélných nerovností v rozsahu 0,6 – 100 metrů
- zařízení pro měření délek s přesností 0,1 %, přesná kalibrace snímačů

- **Postup měření [2]:**

Před vlastním měřením je nutné provedení kontroly funkčnosti měřícího zařízení a provoznímu stavu měřícího vozidla, před samotným měřením je dále nutno zadat veškeré

vstupní parametry jako provozní údaje (datum měření, počasí, směr měření a jeho účel, ...), a identifikační údaje o měřeném úseku (číslo PK, staničení měřeného úseku, označení jízdního pruhu), v průběhu měření je vhodné poznamenat průjezd významnými body PK (uzly).

Vhodnost použití profilometru SDP je pro délku měřeného úseku alespoň 500 metrů, v příčném směru se volí jízdní stopa tak, že pravé kolo měřicího zařízení je vzdálené v rozmezí 0,8 – 1,2 metru od pravého okraje jízdního pruhu a inercionální plošina se umístí do stopy pravého kola.

Pro samotné měření je vhodné volit rychlost měření v rozmezí 35 km/h – 90 km/h, rychlost jízdy profilometru nemusí být konstantní, frekvence vzorkování je maximálně po 0,25 metrech.

Měřením (jízdou) a zaznamenáváním dat do počítače lze, pomocí softwaru, který je součástí měřicího zařízení, získat podélný profil vozovky a stanovit index *IRI*, který je dále vyhodnocen.

- **Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení [2]:**

Výsledkem měření je výstup z počítače, který stanovuje podélné nerovnosti povrchu vozovky PK měřeného úseku na principu výpočtu *IRI* z filtrovaného profilu (ten se blíží skutečnému profilu). Algoritmus výpočtu indexu *IRI* v příslušném softwaru je totožný s algoritmem pro stanovení *IRI* přesnou nivelací či pomocí modelu „čtvrtinového vozidla“ znázorněného na obrázku 2 a popsaného výše.

Průběh podélné nerovnosti povrchu vozovky odpovídá stopě, nad níž byl umístěn akcelometr a inerciální plošina (většinou se jedná o levou stopu), avšak je možno použít více inercionálních plošin současně a tak lze současně měřit ve více (ve dvou) stopách.

Poznámka: Jako příklad laserového profilometru, který provádí měření podélného profilu v obou jízdních stopách současně, bych uvedla měřicí zařízení HawkEye. Zařízení HawkEye slouží zároveň k měření makrotextury povrchu a jedná se tedy o multifunkční zařízení. [12] Dalším multifunkčním bezkontaktním měřicím zařízením je speciální měřicí vozy ARAN (Kanada) a ARGUS (Německo). Tato zařízení je schopno měřit mimo podélných nerovností též nerovnosti příčné a makrotexturu měřeného povrchu vozovky PK. Příčný profil je měřen pomocí ultrazvukových senzorů. [13,14]



Obrázek 16: Speciální měřicí vůz ARAN [15]

Poté podle tabulky 2 se na základě vypočteného indexu *IRI* získá klasifikační stupeň nerovnosti. Ten je podstatným kritériem pro vyhodnocení nerovnosti příslušného měřeného úseku PK.

4. Alternativní technologie měření nerovností

Za alternativní technologie měření různých nerovností objektů a jejich povrchů lze považovat metody měření částečně či plně automatizované a prováděné kontinuálně na měřeném povrchu. Mezi současné bezkontaktní metody měření nerovností lze zařadit metody měření povrchů vozovek multifunkčními měřicími zařízeními (některé byly zmíněny v této práci výše – konkrétně tedy měřicí vůz ARAN, ARGUS a HawkEye).

Další bezkontaktní způsoby měření a měřicí zařízení jsou tedy například:

- Analyzátor podélné nerovnosti APL
- Multifunkční diagnostické vozidlo CleveRA Car
- Bezkontaktní 3D profilometr
- Měření pomocí ultrazvuku
- Měření georadarem
- Fotogrammetrie
- Laserové skenování

Laserovému skenování je v této diplomové práci plně věnovaná kapitola 5.

4.1 Frekvenční analyzátor nerovností APL

Norma ČSN 73 6175 neuvádí měření podélných nerovností zařízením APL (Analyseur de Profil en Long). Frekvenční analyzátor APL se využívá pro měření nerovností povrchů vozovek v podélném směru. Analyzátor je využíván především ve Francii.

Podstatou metody APL je vyhodnocování vlnových délek nerovností vozovky v závislosti na rychlosti jízdy. Výstupem je pak získání indexu nerovností IRI, ale i indexů CP (Belgie) a NBO (Francie) reprezentující parametry povrchu vozovky.

Přístroj se skládá ze dvou jednostopých přívěsů tažených osobním automobilem, ze snímače pohybu, ze snímače impulzů s registrací ujeté dráhy (pracující v rozsahu 0,5 si 20 Hz), z technického magnetofonu a registračního zařízení na děrnou pásku. Maximální rychlost jízdy při měření je 144 km/h. [16,17]



Obrázek 17: Frekvenční analyzátor APL [17]

4.2 Multifunkční diagnostické vozidlo CleveRA Car

Toto multifunkční zařízení využívané v České republice je konstruováno z vozidla Mercedes-Benz Sprinter a používá se k měření makrotextury vozovky a podélných profilů. Vozidlo je vybaveno GPS snímačem, odometrem a dvěma barevnými CCD (Charge-coupled device) kamerami pro záznam videa na vozovku. Subsystem RST snímá podélný profil ve dvou stopách a makrotexturu povrchu vozovky ve třech stopách. Systém LCMS (Laser Crack Measurement System) zaznamenává 3D zobrazení povrchu vozovky. Tento systém je vybaven vysokorychlostními kamerami, speciální optikou a laserovými řadovými projektory, díky nimž vytváří 4 metry široké kolmé snímky vozovky a vyhodnocuje příčné

profily, podélné profily, vyjeté koleje a dokáže automaticky detekovat poruchy na zkoumaném úseku. [46]



Obrázek 18: Multifunkční diagnostické vozidlo CleveRA Car [46]

4.3 Fotogrammetrie a laserové skenování

Další v současnosti úspěšně využívané a vyvíjené technologie měření objektů jsou nedestruktivní bezkontaktní plošné metody, kdy je v průběhu měření sbíráno a zaznamenáváno velké množství dat v podobě mračen bodů. Z mračen bodů, kdy každý jeden bod má zaznamenány všechny 3 souřadnice s vhodnou přesností, lze získat prostorový celek. Tyto metody, díky své rychlosti, celistvosti měření, přesnosti a postupné automatizaci, se postupně řadí mezi metody vhodně využívané i z hlediska ekonomické stránky.

Příklady metod měření nerovností povrchů využívaných v oboru dopravního stavitelství jsou fotogrammetrie a laserové skenování (velmi využívaný a výše zmíněný georadar slouží v této oblasti především k měření průběhu jednotlivých konstrukčních vrstev stávajících konstrukcích PK).

Fotogrammetrie je relativně rychlou metodou mapování, která zvládá poměrně přesně identifikovat hrany. Stává se přesnou v případě mapování na krátké vzdálenosti. S rostoucí vzdáleností se počet měřených bodů snižuje a přesnost a kvalita mapování rapidně klesá. Laserové skenování pracuje s mnohonásobně větším počtem bodů, proto je zpracování výstupu časově velmi náročné, avšak mnohem přesnější i s rostoucí vzdáleností. Je velmi přesné pro výškopisu. V porovnání s fotogrammetrií je u laserového skenování obtížná identifikace hran.

Fotogrammetrie je v této práci zmíněna pouze okrajově. Ve své diplomové práci se pak zaměřuji podrobněji právě na metodu laserové skenování. Laserovému skenování je věnována samostatná kapitola 5.

4.3.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie funguje na principu zpracování informací získaných o měřených objektech z obrazových záznamů fotografického snímkování, kdy na základě 1 snímku můžeme vytvořit méně přesný plošný (2D) podklad, nebo ze série snímků (stereofotogrammetrie) lze vyhodnotit prostorové souřadnice řešeného objektu nebo území.

Snímek je středovým průmětem předmětu. Fotogrammetrie převádí středové průměry objektu na pravoúhlé průměry každého bodu na snímku a tak se ze snímku stává mapa. Z fotografie dokážeme určit umístění, velikost a tvar předmětu měření v prostoru či určit vzájemnou polohu bodů. Měřený objekt je umístěn do souřadného systému v daném měřítku.

Fotogrammetrie se dá rozdělit podle několika hledisek, jimiž jsou dělení:

- Podle polohy stanoviska:
 - pozemní (terastická)
 - letecká
 - družicová

Pozemní fotogrammetrie se využívá do vzdáleností 30 metrů. Měření probíhá na pevném nepohyblivém stanovisku. Pomocí dalších geodetických zařízení (například pomocí totální stanice) dokážeme přesně určit polohu stanoviska a zároveň prostorovou orientaci snímku. Přesnost měření bývá zpravidla v rámci centimetrů (1 – 10 cm).

Letecká fotogrammetrie se využívá nejčastěji. Nosičem zařízení bývá pohybující se letadlo, vrtulník, nebo třeba létající balón či dron. Takto lze nasnímat velkou plochu zájmového území, avšak zpracování bývá podstatně složitější a určení polohy snímku (panoramatického snímku) v prostoru v daný okamžik nemusí být úplně přesné. Přesnost měření (zpravidla u výšek) bývá v rámci decimetrů až metrů.

U družicové fotogrammetrie jsou snímky pořizovány z kosmických nosičů (družic).

- Podle hlediska využití:
 - **topografická fotogrammetrie** – má nižší přesnost, slouží k vyhodnocování snímků ke geodetickým a topografickým účelům (zhotovování map a plánů, vojenských topografických map, obnova a pořizování map středních měřítek)
 - **netopografická fotogrammetrie** – je s vyšší přesností, bývá využívána k technickým a vědeckým účelům různých oborů.

Příklady využití netopografické fotogrammetrie jsou následující:

V zemědělství a v lesnictví pro projektování meliorací, úpravy hospodářských a lesnických pozemků, pro obnovu lesnických map, pro zmapování těžby dřeva, pro odhad dřevní hmoty a odhad škod. Své uplatnění fotogrammetrie nese taktéž ve strojírenství pro zjištění deformací výrobků, pro kontrolu správné polohy umístění obráběcích strojů. Fotogrammetrie je nepostradatelnou součástí meteorologie, kdy dále zpracováváme snímky z družic, při mapování povrchu Země, pro informační systémy GIS, pro tvorbu základních digitálních map a ortofotomap.

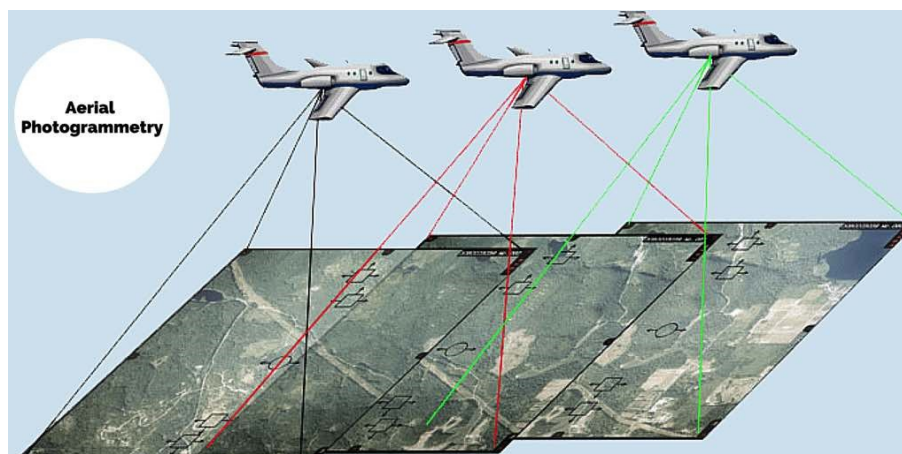
V architektuře se fotogrammetrie využívá k dokumentaci historických památek a soch, ve stavebnictví slouží fotogrammetrie k dokumentaci území jako podklad pro projekční fázi nových staveb, či rekonstrukcí, k dokumentaci posuvů a přetvoření (sedání), získaná data lze využít i k tvorbě DMT, který však bývá oproti laserovému skenování méně přesný. U dopravních staveb slouží fotogrammetrie ke sledování změn a poruch povrchů vozovek. Fotogrammetrické snímky mají své uplatnění i při vyšetřování dopravních nehod a v mnohém dalším.

Fotogrammetrie s sebou přináší výhody i nevýhody.

Výhody této metody jsou minimalizace prací v terénu, značná rychlost pracovního postupu při topografickém mapování (úspora času a financí u rozsáhlých celků), poměrná přesnost zachycení tvaru a zachycení stavu zkoumané oblasti v daném časovém období. Tato metoda zvládne pro následné vyhodnocení poměrně přesně identifikovat hrany. Pro menší vzdálenosti mapování získáme vyšší přesnost.

Nevýhodou může být nižší přesnost této metody měření - přesnost mapování výrazně klesá s rostoucí vzdáleností. Podle požadavků na kvalitu výstupu měřeného objektu či území se volí konkrétní způsob měření a vhodná technologie. Fotogrammetrie je vhodná především pro určování a 2D mapování rozsáhlých ploch. Pro přesné usazení snímků do terénu se využívá vlíčovacích bodů. Pro každou stereodvojici snímků je nutné určit minimálně 3 vlíčovací body (běžně se využívá 4 – 6 bodů pro zpřesnění). Náklady na signalizaci a zaměření vlíčovacích bodů v terénu nejsou zanedbatelné. [24]

Na další straně je obrázek č. 19, na němž je znázorněn princip letecké fotogrammetrie.



Obrázek 19: Letecká fotogrammetrie [25]

5. Laserové skenování

Laser se již v devadesátých letech minulého století využíval ke sběru geodetických dat. V současné době se laserové skenování řadí mezi moderní a již neodmyslitelné metody bezkontaktního určování prostorových souřadnic bodů, nejrůznějších povrchů a objektů, což se uplatňuje nejen v geodezii a ve stavebnictví, ale také ve strojírenství, v lékařství, ve výpočetní technice, v průmyslu a v mnohých dalších oborech.

Zmíněná odvětví využívají laseru pro zaměření technologických linek, výrobků nepravidelných tvarů, pro zaměření detailního zpracování a odchylek nejrůznějších výrobků a pro tvorbu animací.

V dnešní době hraje laserové skenování (dále LS) podstatnou roli v kriminalistice. Bývá součástí elektronických zabezpečovacích systémů, které jsou schopné rozeznat přítomnost nepovolaných osob a opticky či akusticky o této skutečnosti oprávněné osoby či složky informovat.

Technologie laserového skenování se hojně rozvíjí a využívá i ve stavebnictví. Ve své práci se zaměřuji na využití laseru s důrazem právě na dopravní stavitelství a dopravní infrastrukturu, protože v tomto odvětví má pro nás LS značný význam a velkou řadu uplatnění

Využití sběru dat LS ve stavebnictví je různorodé. Naměřená data se dále zpracovávají a využívají se pro různé studie a plánování již v přípravné fázi, během realizace i v průběhu užívání staveb.

LS slouží poměrně často jako podklad pro průběžný monitoring geografických těles a stavebních děl, pro jejich opravy, rekonstrukce a modernizace. V neposlední řadě je vhodná tvorba následné vizualizace pro prezentaci navržených projektů investorovi.

Naměřená data jsou vhodná pro tvorbu digitálních modelů reliéfů a terénů a podkladových map pro projekty (především liniových či plošných stavebních děl většího rozsahu), pro geografické informační systémy (GIS), pro zaměření a modelování skutečného stavu složitějších objektů podzemních staveb, architektonických staveb, pozemních staveb, liniových dopravních staveb a jejich součástí, pro dokumentaci vodních děl, taktéž k zaměření a zdokumentování archeologických nálezů, k zaměření stavu památných stromů a další.

V současné době jsou na trhu nabízeny laserové skenery od velkého množství výrobců, jako například Trimble, Topcon, Leica, Riegl, Surphaser, Faro, Topscan, GEoSLAM, Carlson, Gom, Teledyne Optech, Callidus, prodejce Gefos a mnohé další.

5.1 Rozdělení laserového skenování a skenerů

Laserové skenery využívají laserový paprsek k měření vzdálenosti pomocí fyzikálních veličin. Skenovací laserové paprsky jsou vysílány skenovacím systémem z nosiče (letadla, družice, automobilu či ze stativu) směrem ke zkoumanému objektu. Skenovací systémy se dělí podle různých kritérií. Nejzákladnější rozdělení je na statické a kinematické systémy. Dále se skenování dělí podle dalších kritérií, jako je například umístění skeneru při samotném sběru dat, měřicí princip, dosah měření, podle přesnosti skenování, podle rychlosti skenování, podle zorného pole apod. Způsoby skenování dělíme následovně [7,18]:

5.1.1 Podle metod sběru dat

Způsoby skenování se podle metod sběru dat dělí na:

- letecké skenování
- statické pozemní skenování
- skenování „STOP-AND-GO“
- mobilní pozemní skenování

Laserové skenovací systémy jsou dnes velmi rychle se rozvíjející technologií s různými způsoby sběru prostorových dat. Nejstarším způsobem sběru dat je letecké snímkování. Tyto systémy, tzn. LIDARy (Light Detection And Ranging, LLS), se vyvíjely koncem osmdesátých let 20. století ve vyspělých zemích v Evropě a v USA a slouží k 3D skenování povrchu země například pomocí umělých družic na oběžné dráze, pro vojenské i civilní účely. Laserové skenery jsou nesený letadly, vrtulníky nebo se jako nosič laserových skenovacích systémů využívají i drony. V závislosti na výšce a rychlosti letu nosiče je možné získat mračna bodů o hustotě měření v rámci jednotek až stovek bodů na metr čtvereční. Přesnost měření výšek je 1 – 10 centimetru.



Obrázek 20: Nosič (dron) pro letecké snímkování Leica Aibot AX20 [29]

Od roku 2000 byl rozvoj zaměřen na statické pozemní skenování (taktéž terestrické skenování) terestrickými 3D skenujícími systémy, především u skenování pozemních staveb. Měřicí zařízení je umístěno na stativu. Vhodnost využití je skenování menších objektů a dílčích částí. V opačném případě je nutné časté přestavování měřicího zařízení.

V případě statické metody skenování STOP & GO je celý skenovací systém umístěn na automobilu nebo vozíku, aby bylo možné rychle přesouvat statický skener (jeden nebo více skenerů současně) při každé změně pozice. Samotné skenování mračna bodů v dané pozici probíhá ve statickém režimu v okamžik, kdy vozidlo pro skenování z daného místa zastaví. Není tedy nutná demontáž měřicího systému a samotné měření s porovnáním běžného statického skenování se stativem je o poznání rychlejší. Nevýhodou však může být vyšší náchylnost na nestabilní ustavení vlivem nárazů větru a také nižší bezpečnost (samotné měření za provozu v odstavném pruhu).



Obrázek 21: Příklad pozemního laserového skenování [32]

Nejnovějšími technologiemi skenování jsou mobilní mapovací systémy, jejichž rozvoj nastal od roku 2006. Skener je umístěn na nosiči, nejčastěji na automobilech, ale také na lodích, drezínách apod. Skenovací laser skenuje nepřetržitě bez zastavení nosiče. Rychlost skenování se pohybuje v rychlostech kolem 100 km/h. Poloha každého zachycení je určována záznamem GPS (skenování v tunelech či v městských částech s vysokou zástavbou tímto způsobem je tedy nevhodné). Součástí vybavení zařízení bývá odometr na měření ujeté vzdálenosti a vybavení pro možnost pořizování fotografií a videí. Někdy je součástí zařízení i technologie georadaru pro další diagnostiku.

Mobilní skenování má uplatnění při skenování delších úseků liniových staveb, kde není možné či vhodné zastavení dopravy. [18,31,32]



Obrázek 22: Příklad pozemního laserového skenování [19]

5.1.2 Podle principu měření

Skenery se podle principu měření dělí na:

- polární skenery
- triangulační skenery

Polární skenery měří prostorovou vzdálenost přímo. To funguje buď na principu měření tranzitního času (polární skenery s pulzním dálkoměrem), nebo na principu měření přímo vzniklého fázového rozdílu (polární skenery s fázovým dálkoměrem). Zmíněné principy měření jsou zobrazeny na obrázcích níže.

- **Polární skenery s pulzním dálkoměrem** – laserový puls je vyslán směrem na měřený objekt a vzdálenost mezi vyslaným signálem a body měřeného objektu se vypočte z času

trvání mezi vysláním a příjmem signálu. Dosah měření je větší, avšak rychlost skenování i přesnost měření jsou nižší. [19]

$$D = (v \cdot t)/2 \quad (10)$$

kde:

D ... vzdálenost měřeného objektu a skeneru

v ... rychlost elektromagnetického záření v konkrétním měřeném prostředí

t ... doba od vyslání signálu, po jeho příjem (tzn. tranzitní čas)

- **Polární skenery s fázovým dálkoměrem** – vysílaný signál je modulován harmonickým vlněním a vzdálenost mezi měřicím zařízením a body měřeného objektu se vypočítá z fázových rozdílů mezi vysláním a příjmem signálu. Úhly jsou dopočteny z polohy zrcadel rozptylujících paprsek laseru v plošné 2D rovině. Prostorový třetí parametr je získán rotací části skeneru, nímž je rozmítán laserový svazek kolem osy rotace. Dosah měření je nižší, avšak rychlost a přesnost měření jsou vyšší. [19]

$$D = n \cdot \lambda + \varphi \cdot (\lambda/2\pi) \quad (11)$$

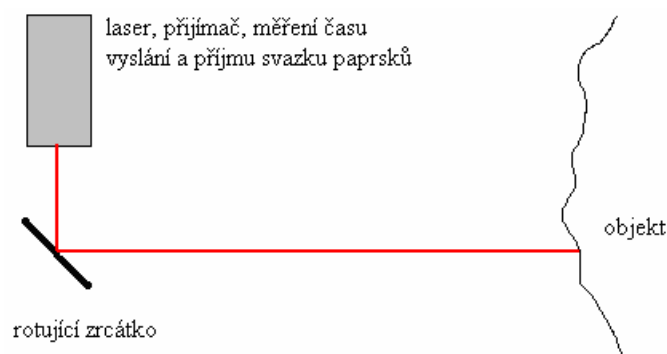
kde:

D ... vzdálenost měřeného objektu a skeneru

n ... počet opakování celého rozsahu 2π vlnové délky λ

φ ... fáze přijatého signálu

- **Kombinace**



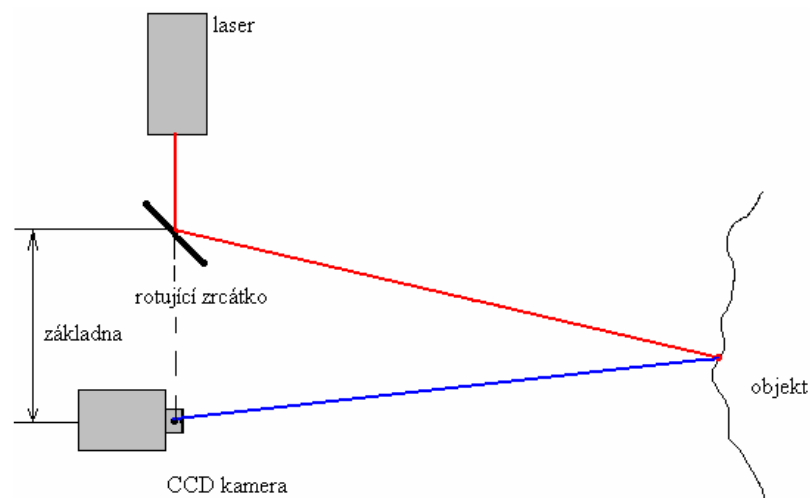
Obrázek 23: Polární skener – princip přímého měření vzdálenosti [7]

Skenery fungující na principu prostorové polární metody jsou velmi přesné, avšak s rostoucí vzdáleností jejich přesnost úměrně klesá lineárním průběhem. Proto jsou vhodná k měření i vzdálenějších objektů a rozsáhlejších staveb. [22]

Triangulační skenery, tzv. skenery se základnou fungují na principu protínání z úhlů nebo na průřezové fotogrammetrii. Jsou tvořeny jednou či více (dvěma) kamerami a poloha měřeného bodu je určována pomocí servomotoru a zrcadla.

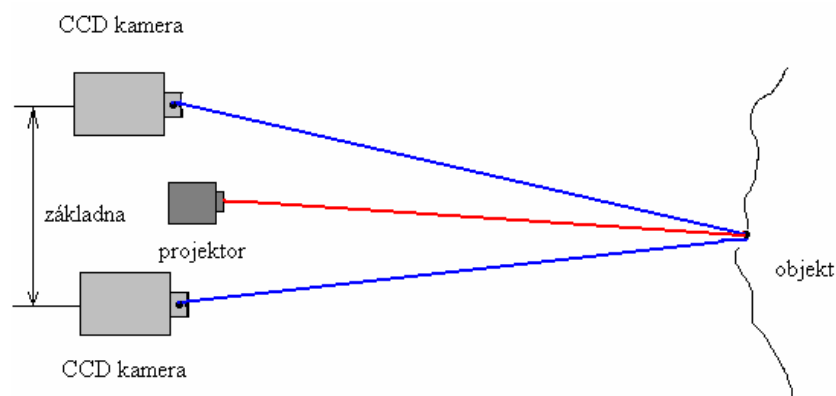
U jedno kamerového systému se základna skeneru skládá z CCD (Charge-coupled device) kamery a ze středem rotujícího zrcadla. Skener vyšle laserový svazek, který dopadá na rovinné zrcadlo a odráží se od zrcadla se základnou a dopadne na měřený objekt. Od objektu se odrazí a dopadne na CCD senzor. Známé úhly odrazu a délku základny d .

Je snímána stopa laserového paprsku na objektu a tak se dopočte neznámá třetí souřadnice cíleného bodu. [7,22]



Obrázek 24: Skener se základnou – jedno kamerový [7]

U dvou kamerového systému u je základna tvořena dvěma konvergentně zaměřenými CCD kamerami a projektor. Projektor vytváří světelný řez, nebo se využije opět laseru. Prostorové souřadnice bodu jsou vyhodnoceny na základě série snímků z obou CCD kamer. [7,22]



Obrázek 25: Skener se základnou – dvou kamerový [7]

Skenery se základnou jsou velmi přesné, avšak s rostoucí vzdáleností jejich přesnost rapidně klesá mocninným průběhem. Proto jsou vhodná k měření v interiérech a pro měření v dostatečné blízkosti měřených menších objektů a předmětů (do velikosti maximálně několika metrů). [22]

5.1.3 Podle tvaru zorného pole

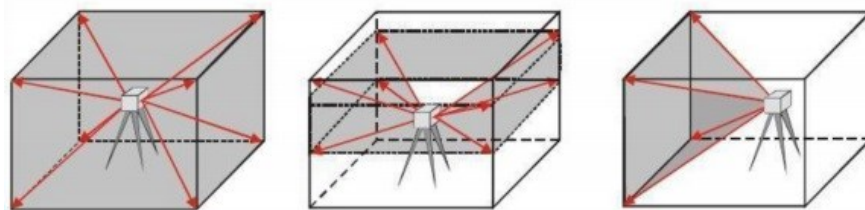
Skenery se podle tvaru zorného pole dělí na:

- kamerový skener
- panoramatický skener
- hybridní skener

Kamerové skenery fungují na principu snímání systémem dvou zrcadel nebo hranolů se vzájemně kolmými osami otáčení. Laserový paprsek dosahuje do menšího zorného pole (podobně jako fotoaparáty či kamery).

Panoramatické skenery a jejich dálkoměrné součásti jsou otáčeny o 360° servomotory a tak snímají v prostoru, v porovnání s kamerovými systémy, velké okolí.

U hybridních skenerů je jedna osa omezena v pohybu. [7,20]



Obrázek 26: Kamerový skener (vlevo) a panoramatický skener (vpravo) [20]

5.1.4 Podle dosahu vzdálenosti měření

Skenovací systémy se podle dosahu vzdálenosti měření dělí na:

- systémy s velmi krátkým dosahem D1 (0,1m až 2m)
- systémy s krátkým dosahem D2 (2m až 10 m)
- systémy se středním dosahem D3 (10 m až 100 m)
- systémy s dlouhým dosahem D4 (100 m až stovky m)

5.1.5 Podle přesnosti skenování v závislosti na jejich dosahu

Podle přesnosti skenování se skenovací systémy dělí na [7]:

- skenery s malou základnou určené pro menší vzdálenosti skenování D1 s vysokou přesností P1 (0,01 mm až 1 mm)
- skenery s velkou základnou a skenery přímo určující vzdálenost (polární skenery) s krátkým dosahem skenování D2 s přesností P2 (0,5 mm až 2 mm) systémy se středním dosahem D3 (10 m až 100 m)
- polární skenery se středním dosahem D3 s nepatrným poklesem přesnosti měření s narůstající vzdáleností P3 (2 mm až 6 mm)
- polární skenery s dlouhým dosahem skenování D4 s přesností P4 (10 mm až 100 mm).

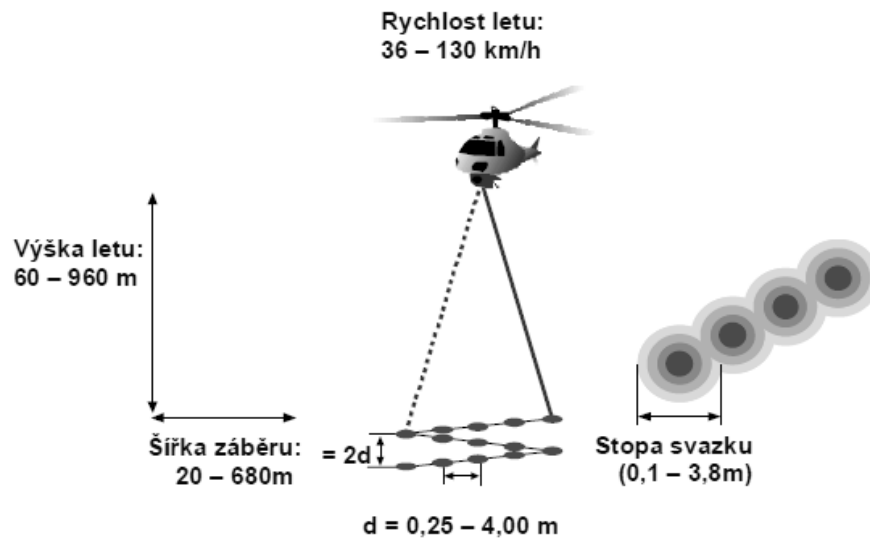
5.1.6 Podle rychlosti měření podrobných bodů (skenování)

Podle rychlosti měření podrobných bodů se skenovací systémy dělí na [7]:

- systémy s velmi vysokou rychlostí R1 ($>50\,000$ bodů/s)
- systémy s vysokou rychlostí R2 (1 000 - 50 000 bodů/s)
- systémy se střední rychlostí R3 (10 - 1 000 bodů/s)
- systémy s nízkou rychlostí R4 (≤ 10 bodů/s)

Základnové skenery a skenery s polární metodou používající fázové dálkoměry skenují s rychlostí R1. Polární skenery používající pro měření délek tranzitní čas měří rychlostí R2. Totální stanice se skenovacím modulem a další měřící zařízení, která nejsou vyrobena přímo na sběr velkého množství bodů, měří rychlostí R4.

Kinematické skenerové systémy se využívají nejčastěji pro tvorbu DMT. Pro měření rozsáhlých plošných území se využívá laserových systémů instalovaných v letadlech. Pro větší přesnost se využívá laserových systémů pro vrtulníky. Letecké skenování je velmi přesné. Na obrázku 27 jsou schematicky znázorněny poměry měření při leteckém skenování.



Obrázek 27: Letecké skenování – parametry vzdáleností [7]

5.1.7 Podle účelu, ke kterému slouží

Podle účelu použití se skenovací systémy dělí na [27]:

- víceúčelové polární skenovací systémy
- víceúčelové triangulační skenovací systémy
- totální stanice s možností skenování
- speciální skenovací systémy
- kinematické skenovací systémy

Víceúčelové polární skenery se díky své univerzálnosti, dostačující přesnosti, bezpečnosti, rychlosti měření oproti jiným metodám a relativně příznivé ceně v geodezii využívají nejčastěji. Výrobci udávají maximální dosah těchto skenerů 80 - 300 metrů, přesnost skenování podle vzdálenosti 5 – 50 milimetrů a vysokou rychlost skenování – více jak 1000 bodů/s.

Víceúčelové triangulační skenovací systémy, jak již bylo zmíněno dříve, se využívají pro skenování menších předmětů na krátké vzdálenosti. Jsou velmi přesné, proto se využívají především ve strojírenství a v archeologii. Dosah těchto skenerů bývá v rámci desetin metrů až do 10 metrů, přesnost těchto přístrojů bývá v řádu desetin až setin milimetrů a střední rychlost skenování kolem 100 bodů/s.

Multistanice s možností skenování se využívají v geodezii. Bývají vybavené servoustanovkami (pro velmi rychlé a přesné cílení), bezhranovým dálkoměrem a programem umožňujícím automatické měření v zadaném rozsahu (dle typu zařízení měří

v rozsahu až do 2 kilometrů), který může být v programovém vybavení přístroje nebo externího kontroloru. Přesnost měření s krátkým dosahem do 250 metrů bývá 5 milimetrů, v modu měření s dlouhým dosahem bývá přesnost do 10 milimetrů. Rychlost skenování těchto multistanic je přibližně 1000 bodů/s.

Je využívána tam, kde stačí k zaměření menší množství bodů, např. měření kubatur u skládek či pro zaměření menších dopravních ploch.

Speciální a kinematické systémy jsou většinou optické přístroje, které slouží jednomu účelu (například skenování dutin, kaveren, v lékařství, ve strojírenství, nebo v zabezpečení při skenování postav). Jsou to velmi přesné skenery. Součástí skenování ve strojírenství bývá robotické pohyblivé rameno.

Systém pro skenování dutin v podzemí (příkladem jsou nepřístupné části dolů) se skládá z infračervené kamery, magnetometru pro určování směru průchodu a malého laserového skeneru, který se vloží do vrtu vedoucího do dutiny.

Kinematické skenovací systémy se využívají i v dopravní infrastruktuře. Tyto speciální skenery jsou umístěny většinou na dopravních prostředcích, které se při měření pohybují běžnou rychlostí. Rychlost měření se pohybuje kolem 40 000 bodů/s s přesností do 50 milimetrů, v závislosti na kvalitě signálu GPS. [27]

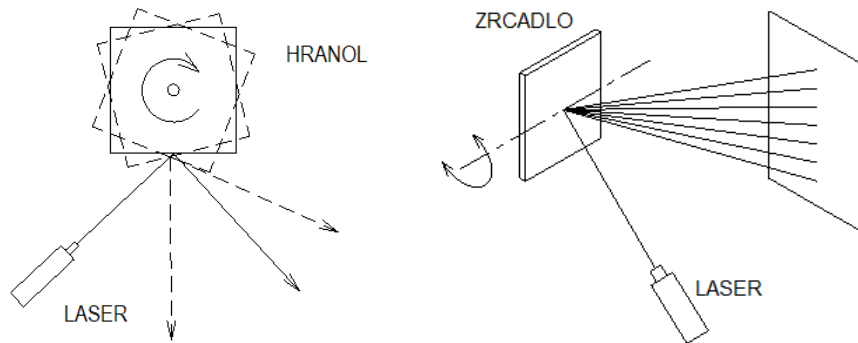


Obrázek 28: Přístroj CARLSON C-ALS pro průzkum podzemních dutin [28]

5.2 Princip laserového skenování

Současné laserové skenery využívané v geodezii, obdobně jako moderní totální stanice, fungují na principu prostorové polární metody, tedy na principu měření prostorové vzdálenosti k bodu prostřednictvím pulzní laserové technologie nebo kontinuálním měřením s fázovou modulací. Pro měření množiny bodů je svazek paprsků vyslán směrem na měřený objekt a je rozmítán pomocí kmitajícího zrcadla, nebo pomocí rotujícího odrazného hranolu (tvaru pravidelného n-úhelníku).

Spojení dvou zrcadel je možné svazek paprsků vychýlit ve dvou směrech. Odrazný hranol oproti zrcadlu neslepne a vyšším počtem hran hranolu lze urychlit pohyb svazku paprsků.

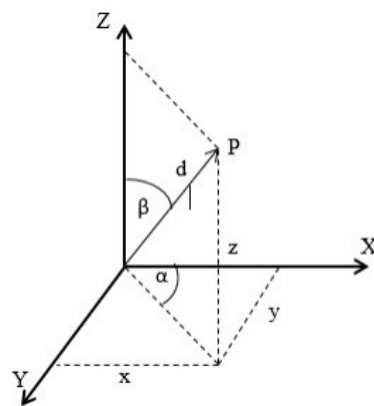


Obrázek 29: Polární skener – způsoby rozmítání dálkoměrného svazku paprsků [22]

Polární skenery využívají panoramatického systému skenování, kdy je možné skenovat celé okolí skeneru, dálkoměrné součásti jsou otáčeny o 360° servomotory.

Čas vyslání a zachycení zpětného signálu na přístroji je měřen s velmi velkou přesností. Výsledkem měření jsou 3D souřadnice bodů o zvolené hustotě (tzv. mračna bodů) měřeného objektu v souřadnicovém systému použitého typu skeneru.

Na obrázku níže je schematicky zobrazen princip prostorové polární metody pro výpočet 3D souřadnic x , y , z měřeného bodu P . [8] Je nutné znát horizontální úhel α , zenitový úhel β a délku průvodiče záměry d . Délka záměry se měří stejně jako u totálních stanic pomocí laserového svazku.



kde souřadnice:

$$\left. \begin{aligned} x &= d \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \\ y &= d \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \\ z &= d \cdot \cos(\beta) \end{aligned} \right\} (12)$$

Obrázek 30: Schematické znázornění prostorové polární metody [8]

Data z různých typů skenovacích zařízení mají různé charakteristiky a zpracovávají se dále různými programovými vybaveními. Souřadný systém skeneru je dále transformován do požadovaného souřadného systému.

Pomocí příslušného softwaru je vhodné odfiltrování mračen bodů v požadované hustotě - šumu z měření, nevhodných bodů a naskenovaných podřadných či nahodilých

objektů, jako například zachycené dopravní prostředky na komunikaci během skenování či vegetace.

Naměřená data se dále zpracovávají pomocí aproximace měřených bodů geometrickými entitami tj. křivkami, plochami nebo tělesy (koule, kvádr, kužel apod.). Zpracování dat je časově poměrně náročné. Výstupem je pak třeba velmi přesný DMT (digitální model terénu), 3D modely.

Takto vytvořený digitální model umožňuje další operace např. měření či různé úpravy. Pomocí příslušného softwaru je možné převedení dat na různé výstupy, například vizualizace objektů přiřazením materiálů, osvětlení a odstínů barev. Výstupem je pak například nový projekt komunikace či její rekonstrukce, zmapování sídel a městských částí, pobřežních oblastí a mnohé další. [18]

Princip leteckého snímkování je obdobný, s tím rozdílem, že letecký laserový skener vyšle v ten samý okamžik laserový svazek paprsků směrem k zemi a současně zaznamená polohu skeneru pomocí GPS souřadnic.

5.3 Výhody a nevýhody laserového skenování

Laserové skenování má obdobně, jako další technologie měření, své výhody i nevýhody.

Mezi nevýhody patří:

- finanční náklady
- časová náročnost zpracování dat
- vznik nepřesností v měření

Po ekonomické stránce je laserové skenování s ohledem na vstupní náklady poměrně náročné, avšak na zakázkách většího rozsahu a podle požadavků investora na přesnost, může být tato metoda velmi vhodná. Nevýhodou je samozřejmě fakt, že pokrok jde velmi rychle kupředu a tak pořízený hardware i software rychle stárne a ztrácí hodnotu.

Další nevýhodou laserového skenování je časová náročnost především při zpracovávání velkého objemu naměřených dat a jejich vyhodnocování. Množství dat vyžaduje vhodný hardware a výkonný software vhodný pro konkrétní druh vyhodnocování. Oproti selektivním metodám (kdy přístroj určuje přesnou polohu pouze jednoho bodu), výstupem laserového skenování bývá mračno bodů, s nímž se pak dále pracuje.

Zpracovávání množství dat je však postupem času automatizováno příslušnými algoritmy, které rozeznávají v mračnech bodů jednotlivé prvky měřených oblastí a tak se proces zpracovávání naměřených dat urychluje. [24,26]

Laserové skenování patří mezi přesnou metodou měření, avšak setkáváme se i u této metody s nepřesnostmi. Rozdělení nepřesností měření a jejich příčiny jsou podrobněji rozepsány v článku 5.4 níže.

Mezi výhody patří:

- rychlost a produktivita měření
- prostorový 3D model
- přesnost, detailnost
- bezpečnost při provádění
- finanční zhodnocení

Laserové skenování má přednost především ve vysoké rychlosti z hlediska získávání dat (z mračen bodů). Díky rozsahu měřené (skenované) oblasti, hustotě měření a tak komplexnosti lze za krátkou dobu trvale zdokumentovat velkou část řešeného úseku. Získaná data lze georeferencovat a opakovaně jakýkoliv bod vytyčit v terénu. Díky tomu můžeme sledovat vývoj nerovností, posuvů a změn bodů na konstrukci v závislosti na čase. Laserové skenování je velmi přesné, tuto technologii měření lze využít i ve stísněných prostorech.

Během provádění samotného skenování, tedy měření, není narušen běžný provoz (u měření planografem může být provoz narušen značně). Oproti kontaktním metodám měření nerovností vozovek, jako je například měření latí, se u bezkontaktních způsobů měření měřící osoba nedostává přímo do kontaktu s případným nebezpečím tak, jak by tomu bylo u měření kontaktních prováděných nezbytně za plného či za omezeného provozu. U statického skenování lze provést měření objektu z bezpečné vzdálenosti.

K samotnému rozsáhlému provádění měření není třeba velkého množství kvalifikovaných pracovníků. Obsluhu přístroje zvládne jeden proškolený pracovník v krátkém čase.

5.4 Chyby měření

Veškeré způsoby měření mají chyby. Mezi faktory ovlivňující přesnost měření lze uvažovat vnitřní vlivy (chyby skeneru), vnější vlivy a vlivy při zpracovávání dat [8,20,24,30,31]:

- vnější vlivy na přesnost měření:
- Měření při dopadu laserového svazku na rozhraní dvou ploch je zprůměrováno, setkáváme se s tím u rozhraní ostrých hran. Špatně se též zaměřují středy koulí a jejich

části. K eliminaci těchto chyb se využívá vřícovacích bodů nebo se daný objekt měří na malou vzdálenost.

- I u dat získaných mobilním skenováním u liniových staveb je vhodné přesnost měření zvýšit následnou výškovou kalibrací modelu vřícovacími body na vozovce. Vřícovací body (plochy) musí být pravidelně rozmístěny v intervalech po 3 – 5 kilometrech. U leteckého skenování se pak značně zpřesňuje výška zaměřených bodů. Čím je více zaměřených vřícovacích bodů, tím vyšší je spolehlivost výškového vyrovnání laserového mračna bodů.
- Pokud se úhel mezi laserovým svazkem a normálou plochy blíží pravému úhlu, laserový svazek může v daném okamžiku dopadat až na několik centimetrů měřené plochy a výsledná skutečná délka může být změřena chybně nebo vůbec.
- Nevhodnost měřeného průchozího povrchu, od něž se laserový paprsek odráží – odrazivost povrchu by měla být co nejvyšší (vysokou odrazivost mají předměty světlých barev (především barvy bílé), příkladem je zdivo. Naopak předměty s nízkou odrazivostí jsou tmavé předměty a objekty, jako je například asfalt.
- Nevhodnost a nehomogenita měřeného průchozího prostředí (nadmořská výška, různá hustota zemské atmosféry), díky těmto změnám se mění index lomu paprsku.
- Atmosférické a klimatické vlivy, například déšť (voda).
- vnitřní vlivy na přesnost měření (chyby skenovacího zařízení):
- Nepřesnost určení délky, u kinematického skenování může být nepřesnost způsobená vlivem zpoždění časoměrné jednotky či špatného signálu GPS.
- Nepřesnost určení vodorovného směru a svislého úhlu.
- chyby v přesnosti při zpracovávání dat:
- Z mračna bodů se odfiltrovává šum, buňky se průměrují, někdy se může stát, že se odfiltrují některé body, právě jejichž filtrace nebyla nutná/vhodná.
- Při samotném zpracovávání dat se výsledky aproximují. Objekty se aproximují plochami jako je rovina, koule, válec nebo plochami s proměnnou křivostí.
- Při nižší hustotě měření a tedy menšímu množství naměřených bodů na dané ploše je při modelování DMT s využitím např. trojúhelníkové sítě (TIN) výsledný povrch méně přesný.

5.5 Použití skenovacích systémů v inženýrské geodézii

V inženýrské geodézii se laserové skenování využívá k digitalizaci staveb a stavebních objektů, jako pasport staveb a přírodních kulturních památek, pro mapování průběhu elektrického vedení, složitých stožárů a pro vymezení ochranných pásem, pro dokumentaci a průběžný monitoring posuvů a přetvoření objektů a svahů, porušených skalních masivů, pro zaměření a monitoring dna a hrází přehrad a vodních nádrží, pro zaměření skutečného stavu mostních objektů a jejich poškození, zaměření stavu železničního svršku a zemního tělesa dopravních staveb a povrchů pozemních komunikací, určení parametrů pozemní komunikace, zaměření a monitoring složitějších vedení potrubních systémů, kanalizací, tunelů a dalších staveb. Dále LS slouží k topografickému mapování složitých terénních útvarů, tvorbě DMT a následně lze velmi přesně určit kubatury materiálu - například v lomech či na stavbách především většího rozsahu. Změřené objemy materiálů a výkupů poslouží jako velmi přesný podklad pro fakturace a jako kontrola množství odtěžených a nově zabudovaných materiálů (například objem odtěžených bloků skalních masivů a odtěžených či zabudovaných materiálů do staveb, zaměření primárního ostění ražených tunelů a určení nadvýlomů/podvýlomů podzemních děl a případný dopočet množství použití betonu pro ostění). LS je taktéž vhodným prostředkem pro kontrolu kvality nad prováděnou/provedenou prací a slouží pro tvorbu dokumentace skutečného provedení staveb. Velmi výhodné je zpracování podélných a příčných profilů ze skenovaných terénů krajin a reálných dopravních komunikací při samotném navrhování staveb.

U pozemních staveb se LS využívá pro zjišťování a vyhodnocování rovinnosti fasád u bytových komplexů, pro dokumentaci kulturních památek včetně významných sochařských děl, složitých a ozdobných fasád. Technologie LS je též nezbytnou součástí zabezpečovacích systémů (příkladem je detekce osvětlení tunelů). Zařízení pro LS mají zkrátka pestré využití nejen při projektové a síťové úrovni SHV. [5,21,22,23]

5.6 Laserové skenování v dopravním stavitelství

V dopravním stavitelství se nejčastěji využívá pozemní laserové skenování – buď statické, nebo mobilní, kdy nosičem bývá nejčastěji automobil.

TP 82 uvádí využití laserového skenování jako jednu z nejpřesnějších metod sběru poruch, využívaných především na vozovkách významných komunikací, či při speciálních měření.

Tato prostorová polární metoda sběru dat je díky své rychlosti a přesnosti a s ohledem na finanční hledisko volena jako vhodnou metodou.

Laserový zobrazovací systém povrchu vozovky je tvořen dvěma liniovými vysokorychlostními skenovacími kamerami vysokých rozlišení a výkonnými liniovými laserovými projektory. Vozovka se snímá v šířce 4 metry v rozlišení 0,5 – 1 mm až do rychlosti 100 km/h. Každá snímaná linie délky 4 metry má vysoké rozlišení (8 192 pixelů, je snímáno 28 000 linií/s). Rychlosti skenování lze přiřadit nejvyšší hodnotu R1.

Ke zvýšení kontrastu a viditelnosti i těch nejmenších poruch vozovky a tak zpřesnění měření je zapotřebí využití snímacích kamer a osvětlení (laserových liniových projektorů, které imitují infračervené záření) nad měřeným povrchem. Měření tak lze provádět i v případě zhoršených světelných podmínek či v noci, avšak nelze ho provádět na mokré vozovce. [4,19]

Z 3D modelu povrchu můžeme zjistit různé deformace povrchu jako například trhliny, makrotexturu, výtluky, vyjeté koleje, vysprávký a další poruchy, včetně taktéž lze zobrazit například vodorovné dopravní značení. [4]

V současnosti existuje několik technik pro poloautomatickou detekci prvků z pozemního laserového skenování. Tyto funkce dokáží identifikovat prvky, jako je silniční obrubník, určení parametrů pozemní komunikace – výšky obrub, sklonové parametry, šířkové uspořádání, hloubku příkopů či zjištění celistvosti dopravního značení.

Statické laserové skenování se v oboru dopravního stavitelství využívá k operativnímu přesnému zaměřování dílčích částí pozemních komunikací a kratších objektů, jako jsou mosty, tunely, opěrné a zárubní zdi či protihlukové stěny. Protože je měřicí zařízení (skener) umístěn vždy pevně na stativu – na jednom místě, před každou změnou pozice je třeba měřicí zařízení vypnout (demontovat) a na novém místě znovu provést jeho inicializaci a stabilizaci. [18] Mobilní laserové skenování se pak využívá k řešení liniových objektů a u objektů větších rozsahů.



Obrázek 31: Ukázka statického pozemního skenování skenerem značky Riegl [21]



Obrázek 32: Ukázka výstupu statického pozemního skenování skenerem značky Riegl [21]

Mezi příklady četně využívaných laserových skenovacích systémů při skenování pozemních komunikací lze zmínit mobilní systém Leica Pegasus Two Ultimate (Švýcarsko, 2018) společnosti Leica Geosystems AG. [34] Toto mapovací zařízení je zcela nezávislé na vozidle. Systém se skládá z jednoho či více laserových skenerů a z přijímačů GNSS (Global

Navigation Satellite System – Globální družicový polohový systém), IMU (Inertial Measurement Unit – inerciální měřicí jednotka) a DMI (Distance Measurement Instrument – nástroj měření vzdálenosti). Součástí zařízení jsou dvě „back-to.back“ kamery s rozlišením obrazu 24 MPix pro 360° bežešvý snímek kalibrovaný na LiDAR data (většina současných 360° snímačů obrazu používá šest různých kamer, které je velmi obtížné uspořádat tak, aby se dostatečně překrývaly a vytvářely bežešvé snímky). Maximální velikost pixelu na 10 metrů je 3 milimetry. Typická horizontální přesnost měření je 20 mm RMS (Root Mean Square, střední kvadratická hodnota) a vertikální přesnost je 15 mm RMS.

Multifunkční zařízení je schopné sběru dat ve formě mračen bodů a panoramatických snímků, v různých světelných podmínkách a nezávisle na rychlosti vozidla. Leica Pegasus Two Ultimate imponuje dalšími speciálními senzory pro detekci a vyhodnocování stavu chodníků, má senzory hluku, senzory kvality vzduchu nebo radar pro průzkum podzemních prostor. Frekvence skeneru je 1 000 000 bodů/s. [34]



Obrázek 33: Mobilní skenovací systém Leica Pegasus Two Ultimate [34]

Dalším zástupcem mobilních laserových skenovacích systémů využívaných pro skenování pozemních komunikací je systém Lynx HS600-D společnosti Teledyne Optech (Kanada, 2016). Toto zařízení v dvou senzorové verzi je nesené osobním vozidlem. Svým maximálním rozlišením a rychlostí skenování (2 skenovací senzory) je skener vhodný pro průzkum vysokorychlostních silnic a dálnic. Frekvence skenování je až 1200 řádků/s, lze provádět až čtyři měření na laserový puls současně, maximální dosah skenování je 130 metrů při 10 %

reflektivně, přesnost měření délek je 5 milimetrů, zorné pole skeneru je 360°, snímací kamera „FLIR Ladybug“ poskytuje vysoké rozlišení snímků až 30 MPix (5 MPix x 6 senzorů). [35]



Obrázek 34: Mobilní skenovací systém Lynx HS600-D [35]

Poslední zmíněný skenovací systém v této kapitole diplomové práce, který i mimo jiné využívá pardubická geodetická společnost GEOVAP, spol. s r. o. je mobilní skenovací zařízení Riegl VMX 2HA. [36,37] Jedná se o vysokorychlostní a vysoce výkonný systém se dvěma skenery, vhodný pro skenování při vyšších rychlostech (vhodný při mapování infrastruktury či měření povrchů vozovky dálnic). Frekvence skenování je až 500 řádků/s (2 000 000 bodů/s). Přesnost měření délek je 5 milimetrů, maximální dosah měření je 150 metrů při 10% efektivitě, při rychlosti měření 120 km/h. Zařízení disponuje neomezeným počtem záznamů odrazů z jednoho paprsku. Zorné pole skeneru je 360°. Kombinace až devíti různých jednotlivých kamer (včetně sférických kamer FLIR Ladybug® 5+ s rozlišením snímků až 30 MPix a 5 MPix/12 MPix kamery Riegl s minimálním zkreslením objektivu) umožňuje velkou přesnost měření. [36,37]



Obrázek 35: Mobilní skenovací systém Riegl VMX 2HA [36]



Obrázek 36: Mobilní skenovací systém Riegl VMX 2HA instalovaný na vozidle [37]

6. Popis vybavení použitého k provedení a vyhodnocení experimentu

Pro vlastní experiment byly zvoleny 4 způsoby měření nerovností, kterými jsou:

- měření latí
- měření planografem
- měření přesnou nivelací
- laserové skenování

K provedení všech experimentálních měření bylo použito vypůjčené zkušební zařízení Katedry dopravního stavitelství Dopravní fakulty Jana Pernera – konkrétně tedy měřicí lať s přiloženým měřícím klínem, Planograf 6.705, digitální nivelační přístroj Leica DNA03 a multifunkční totální stanice Leica MS60.

Některá z vypůjčených měřících přístrojů jsou elektronická zařízení pracující se speciálním softwarem. Software, na jehož principu tato zařízení pracují a software použitý při zpracovávání a vyhodnocování naměřených dat na počítači je popsán v kapitolách 6.2 níže.

6.1 Použitý hardware

V této kapitole se zabývám popisem konkrétních měřících přístrojů a pomůcek, které byly použity pro provedení experimentálního měření.

6.1.1 Měřicí lat' s měřícím klínkem

K prvnímu způsobu měření latí byla použita čtyřmetrová měřicí lat' typu 1070 – E s měřícím klínkem typu MK27. Duralový měřicí klínek s dřevěnou rukojetí pro měření nerovností v rozmezí 1 – 27 milimetrů má rozměry 300 x 11 x 35 milimetrů, váha klínku je 320 gramů. Výrobce měřicího klínku je německá firma Richter Messwerkzeuge.



Obrázek 37: Použitý měřicí klínek MK27 [vlastní fotografie]

Duralová měřicí lat' s horizontální i vertikální libelou a se dvěma otvory pro uchopení má rozměry 100 x 18 x 4000 milimetrů. Dovolená odchylka přímosti latě je 0,7 milimetru. Výrobce latě je německá firma Richter Messwerkzeuge.



Obrázek 38: Použitá duralová lat' 1070 – E [vlastní fotografie]

6.1.2 Planograf 6.705 s elektronickým vyhodnocováním

K provedení experimentu druhou zvolenou metodou měření byl použit planograf typu 6.705 s elektronickým vyhodnocením naměřených dat podle ČSN 73 6175. Celkový rozměr planografu je 4300 x 490 x 530 milimetrů. Dodavatel planografu je firma Test Servis, s. r. o.



Obrázek 39: Planograf 6.705 s elektronickým vyhodnocováním [vlastní fotografie]

Do celkem 40 bank lze zaznamenat až 202 kilometrů souvislého měření podélných nerovností povrchu pozemní komunikace. Hodnoty měření jsou s přesností měření 0,1 milimetru průběžně po 0,1 metru ujeté dráhy zaznamenávány do paměti přístroje. Maximální rozsah měření nerovností je 40 milimetrů. Základní rozsah měření je 0 – 18 milimetrů. Přístroj umožňuje měření podélné nerovnosti s možností barevného vyznačování přesahu nastavených hodnot tolerancí nerovností přímo na vozovce, barevné vyznačení přesahu tolerance je současně doprovázené akustickým signálem. Elektronicky zaznamenané hodnoty lze dále editovat.



Obrázek 40: Indikační zařízení pro elektronický záznam hodnot [vlastní fotografie]

Napájecí zdroj pro celé zařízení je součástí odnímatelné elektroniky, tu je možno v případě tažení planografu za automobilem propojit prodlužovacím kabelem a umístit přímo v automobilu. [39]

6.1.3 Nivelační přístroj Leica DNA03

K měření metodou přesná nivelace byl použit nivelační přístroj Leica DNA03 (výrobní číslo 331 455), hliníkový výsuvný stativ Leica a nivelační lať s nivelačním měřítkem. Digitální nivelační přístroj Leica DNA03 se používá pro technickou až velmi přesnou nivelaci. Interní paměť přístroje je schopna zaznamenat až 6000 měření nebo 1650 přestaveb. Výrobce zařízení je švýcarská společnost Leica Geosystems AG. [42]

Technické parametry použitého přístroje jsou [42]:

- Dosah měření: 1,8 m – 110 m
- Přesnost nivelace při elektronickém měření výšek na 1 km: 0,3 mm (invarová lať), 1,0 mm (běžná lať)
- Přesnost měření délek: 5 mm/10 m
- Krabicová libela – citlivost: 8' / 2 mm
- Zvětšení dalekohledu 24 x
- Minimální vzdálenost cíle: 0,6 m
- Minimální čtení: 0,01 mm



Obrázek 41: Digitální nivelační přístroj Leica DNA03 [vlastní fotografie]

Přesnost měření závisí na použitých typech nivelačních laťí. Pro velmi přesnou nivelaci bylo na nivelační lať pevně připevněno invarové nivelační měřítko Leica GWCL60 s pevnou délkou 600 milimetrů. Čárkový kód je kompatibilní s použitým geodetickým nivelačním přístrojem Leica DNA03.

6.1.4 Multistanice Leica MS60

Při poslední čtvrté metodě měření pro stanovení podélných nerovností byla v DP použita robotizovaná multistanice Leica MS60 (výrobní číslo 887438) a hliníkový výsuvný stativ Leica. Robotizovaná totální stanice Leica MS60 má všechny běžné funkce totální stanice, vysokou přesnost měření, je plně automatická s integrovaným 3D laserovým skenerem a také se „samo-učícím se“ systémem sledování hranolu ATRplus systému (umí udržet sledování odrazného hranolu), systémem DynamicLock (při ztrátě hranolu totální stanice zacílí do místa ztráty hranolu, zaktivuje svislou laserovou stěnu a jakmile se v ní objeví hranol, za pohybu ho zachytí a začne ho opět cílit), systémem AutoHeight (automatické měření výšky přístroje nad bodem pomocí laseru) a tichými rychlými piezo-motory. [43,44]

Multistanice je vybavena dvěma kamerami – přehledovou kamerou v horní části těla dalekohledu a dalekohledovou kamerou v optické ose dalekohledu. Toho lze využít jak při dokumentaci měření pomocí snímků, tak při kontinuálním laserovém skenování (pro obarvení mračen bodů reálnými barvami z přehledové kamery), nebo při průsekové fotogrammetrii. Tato totální stanice může být používána samostatně nebo jako součást „one-man“, příp. doplněného GNSS senzorem. Multistanice je v případě rychlosti laserového skenování oproti klasickým pozemním statickým skenerům pomalejší, ale díky softwaru a funkcím totální stanice dokáže s naměřenými mračny pracovat přímo v terénu.



Obrázek 42: Multistanice MS60 - Leica [vlastní fotografie]

Technické parametry použitého přístroje jsou [44]:

- Úhlová přesnost při použití standartní/invarové latě 1"/0,3 mgon
- Měření délek na hranol 1,5 m - 10 000 m, 1 mm + 1,5 ppm
- Měření délek bez hranolu 1,5 m - 2 000 m, 2 mm + 2 ppm
- 3D laserový skener - rychlost až 30 000 bodů/s (frekvence 30 000 Hz)
- Přehledová a dálková kamera - 5 MPx CMOS / až 20 fp
- 2x velký širokoúhlý WVGA 5" displej, podsvícená numerická klávesnice pro obě polohy dalekohledu
- Polní software Leica Captivate, provozuschopnost baterie až 9 hodin
- Kompatibilní s kontrolérem CS20 Captivate a polním tabletem CS35
- Čas měření jednoho bodu – přibližně 3 s

6.2 Použitý software

Po měření čtyřmetrovou latí jsem pro grafické znázornění formou grafů, přehledných tabulek a pro další zpracování dat použila tabulkový procesor *Microsoft Excel* ze sady Microsoft Office 2013.

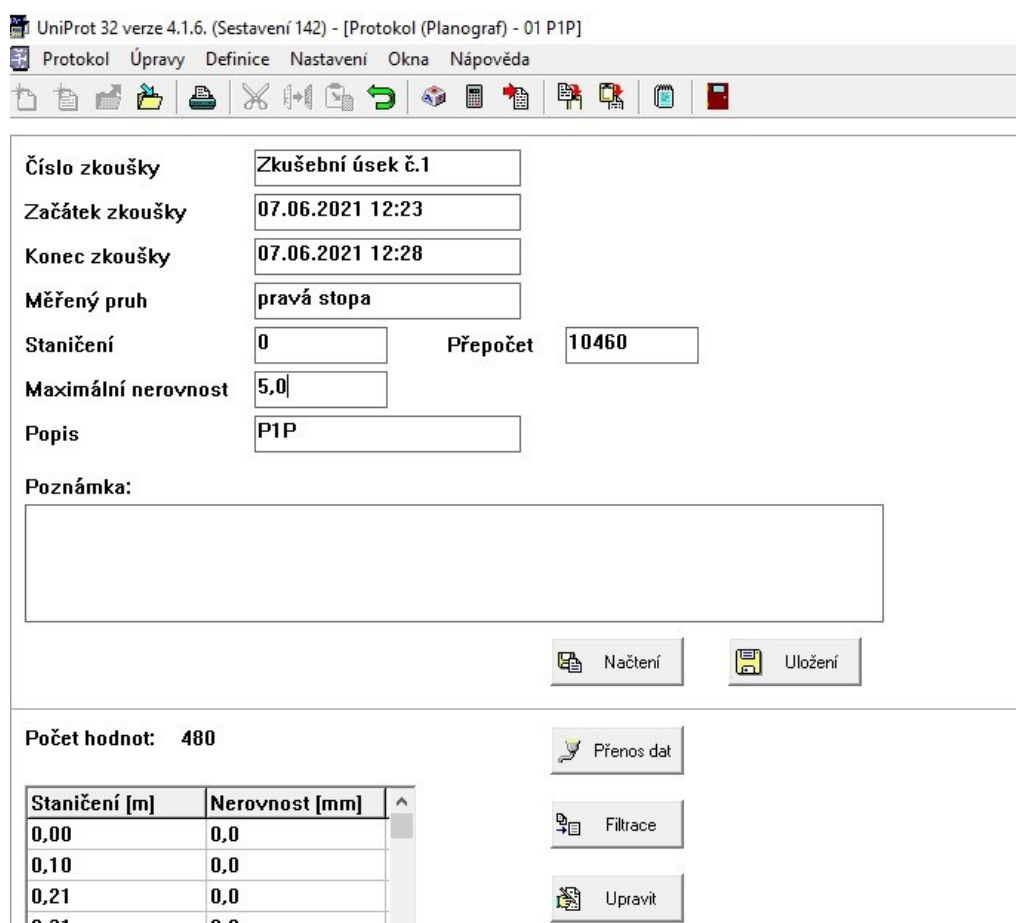
V případě provedení zkušebních měření planografem jsem pro převod dat a ke grafickému znázornění naměřených hodnot nerovností (skutečných podélných profilů povrchu vozovky) v jízdnicích stopách použila program *UniProt 32* od poskytovatele Test Servis, s.r.o., dále tabulkový editor *Microsoft Excel* a textový editor *Poznámkový blok* sady Microsoft Windows. Pro přenos a zpracování dat získaných metodou měření přesná nivelace posloužilo softwarové vybavení nivelačního přístroje Leica DNA03. Pro převod dat a jejich úpravu jsem využila programy *Microsoft Excel* a *Poznámkový blok*, pro zpracování dat mi posloužil specializovaný software *ProVAL (Profile Viewing and Analysis)* společnosti FHWA (The Federal Highway Administration US). [45]

Laserové skenování provedené multistanicí MS60 pracuje s prostorovými daty za pomoci programového vybavení *Leica Captivate*. Pro přenos dat, samotné zpracování a vyhodnocení naměřených dat byly použity programy *Microsoft Excel*, *Poznámkový blok*, dále speciální programy *Leica Infinity*, *ATLAS DMT – modul RoadLine*, program *ProVAL* a prostředí *Kreslení a poznámka* v programu *Autodesk AutoCAD Civil 3D 2018*.

Veškeré snímky obrazovky použitých programových prostředí, které jsou obsaženy v následujících kapitolách, byly vytvořeny v průběhu zpracovávání vlastních naměřených dat.

6.2.1 UniProt 32

Program UniProt je určen k univerzitním účelům zkušebnictví ve stavebnictví. Výrobce softwaru je firma BoneSoft, poskytovatelem univerzitě je společnost Test Servis, s.r.o. Software slouží k měření a zpracování dat ve formě vypočtených parametrů a grafických znázornění, jako například k měření a vyhodnocení statické zatěžovací zkoušky, k vyhodnocení tvrdosti litých asfaltů, k vyhodnocení zrnitosti zemin a další. [40] Program UniProt 32 byl v této diplomové práci použit ke zpracování a vyhodnocení dat získaných z měření planografem od dodavatele Test Servis, s.r.o..

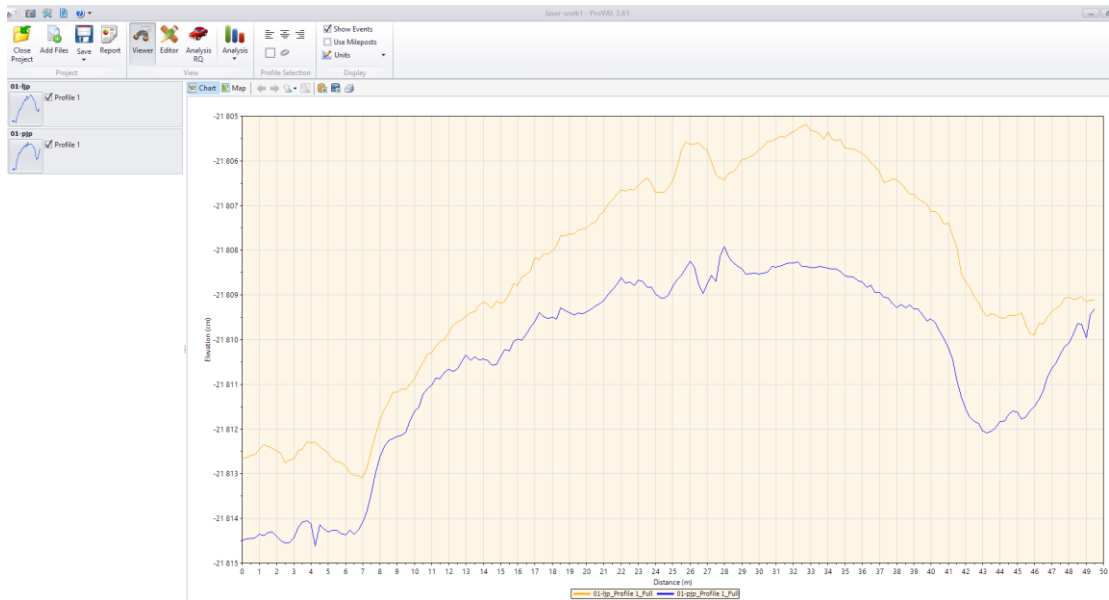


Obrázek 43: Prostředí programu UniProt 32 [40]

6.2.2 ProVAL

Program ProVAL je volně dostupný inženýrský software, na jeho vývoji se podílela Michiganská univerzita a je produktem FHWA (The Federal Highway Administration, Federální správa silnic v USA). [45] Software umožňuje analyzovat podélné profily vozovky mnoha různými způsoby a stanovovat různé měřené parametry podle norem.

ProVAL imponuje možností libovolného nastavení referenční rychlosti, filtrů vlnových délek v rozsahu od 0,5 metru a dalších proměnných parametrů. Na obrázku 44 je snímek obrazovky programového prostředí.



Obrázek 44: Prostředí programu ProVAL32 [45]

Na obrázku 45 je snímek obrazovky s ukázkou vyhodnocení indexu *IRI* po dvacetimetrových úsecích.

zkusebni usek 1* - ProVAL 3.61

Close Project Add Files Save Report Viewer Editor Analysis RQ Analysis Profile Selection Display

Show Events Use Mileposts Units Template

Ride Quality

Analyze

Analysis Type: Fixed Interval

Ride Quality Index: IRI

Threshold (m/km): 1,900

Segment Length (m): 20,00

File	Profile	Section	Apply 250mm Filter
01-ljp	<input checked="" type="checkbox"/> zkusebni usek c.1 - leva jizdni stopa	Full	<input checked="" type="checkbox"/>
01-pjp	<input type="checkbox"/> zkusebni usek c.1 - prava jizdni stopa		<input type="checkbox"/>

01-ljp

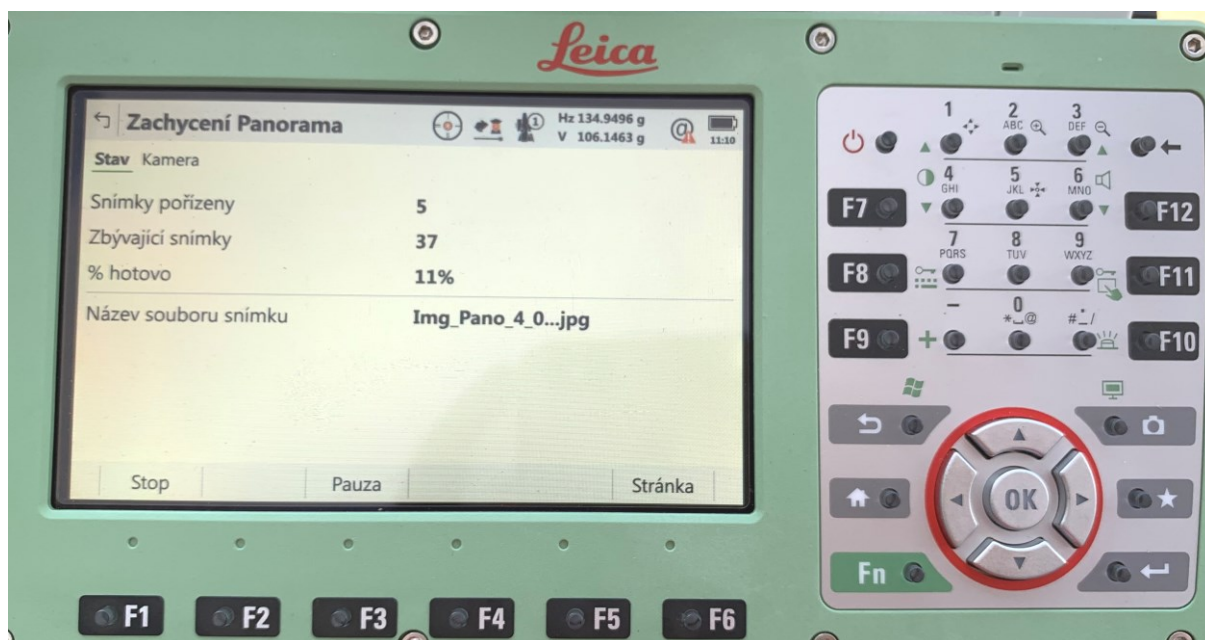
Chart Table Map

Start Distance (m)	Stop Distance (m)	Length (m)	zkusebni usek c.1 - leva jizdni stopa - IRI (m/km)
0,0000000	20,0000000	20,00	3,893
20,0000000	40,0000000	20,00	3,414
40,0000000	50,0000000	9,75	5,334

Obrázek 45: Ukázka vyhodnocení IRI v programu ProVAL - zkušební úsek č. 1 [45]

6.2.3 Leica Captivate

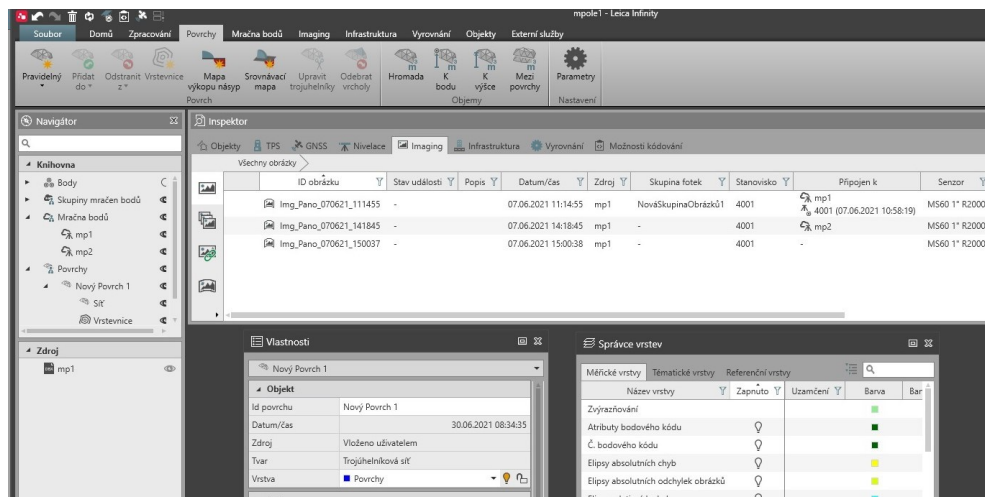
Operační systém Leica Captivate je 3D polní software, který převádí komplexní naměřená data do realistických 3D modelů, s nimiž pracuje přímo v terénu. Prostředí softwaru Leica Captivate je zobrazeno na fotografii obrazovky použité multistanice během provádění skenování zkušebního úseku č. 1. [41]



Obrázek 46: Prostředí programu Leica Captivate [vlastní fotografie]

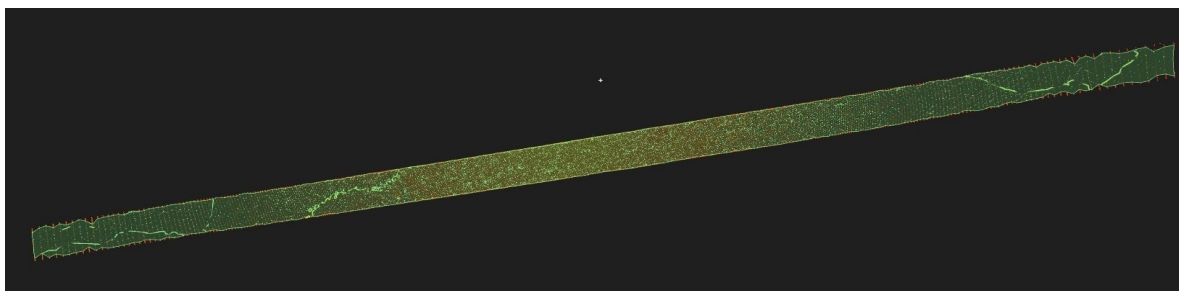
6.2.4 Leica Infinity

Program Infinity je multifunkční kancelářský software společnosti Leica Geosystems AG určený k řešení geodetických úloh. Ve své práci jsem program použila ke správě a exportu bodů (mračen bodů) pořízených multistanicí MS60. Pro účely zpracování diplomové práce byly k dispozici následující moduly programu Infinity (verze programu 3.3.2) – „*Základní funkce*“, „*TPS processing*“ a „*Skenování + povrchy a kubatury*“. [41] Zmíněný software byl použit ke zpracování mračen bodů ve formě digitálního povrchu terénu. V první řadě je nutné propojit mračno bodů s panoramatickým snímkem u každé skenované oblasti. Prostředí softwaru Infinity včetně postupu propojení panoramatického snímku s mračnem bodů pro následnou tvorbu modelu terénu, je zobrazeno na obrázku 47.



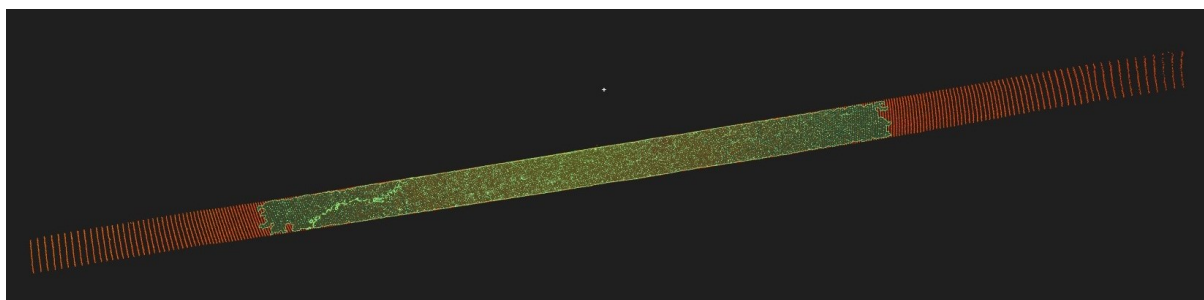
Obrázek 47: Prostředí programu Leica Infinity [41]

Následně je možné z propojených dat vytvořit povrch vystínovaný podle fotografického snímku. Program Infinity umožňuje vytvářet povrch vyhlazený, povrch pravidelný, interpolovaný nebo 2.5D povrch. Ve své práci volím povrch pravidelný. Na obrázku 48 je zobrazen vytvořený povrch zkušebního úseku č. 1 této diplomové práce, tvořený nepravidelnou trojúhelníkovou sítí. Důležité je vhodné nastavení minimální velikosti trojúhelníků v závislosti na hustotě mračna bodů naskenované oblasti.



Obrázek 48: Tvorba povrchu, vhodná volba velikosti trojúhelníků v TIN síti – úsek č. 1 [41]

V případě nevhodných limitních rozměrů trojúhelníku v síti, vytvořený povrch z trojúhelníkové sítě nemusí pokrýt rozsah zájmové oblasti a může tak vzniknout DMT o menší půdorysné ploše, než jaká byla určena pro měření.



Obrázek 49: Tvorba povrchu, nevhodná volba velikosti trojúhelníků v TIN síti – úsek č. 1 [41]

S vytvořeným povrchem lze dále pracovat, editovat ho, měnit styly zobrazení a další. Lze provést report vytvořeného povrchu s informacemi o povrchu a samotný povrch lze exportovat v podobě množství formátů včetně formátu souboru s příponou (*.ptx), který jsem v diplomové práci využila pro další zpracování.

6.2.5 Atlas DMT

Ke zpracování mračen bodů, konkrétně k získání dat v definovaných jízdnicích stopách obou zkušebních úseků (pro stanovení IRI a pro simulování měření podélných nerovností latí) byl dále použit softwarový systém Atlas DMT společnosti ATLAS, spol. s r.o. a to konkrétně specializovaný modul RoadLine. Tento software dokáže vytvářet digitální modely povrchu z dat o velikosti až 650 milionů bodů pro trojúhelníkový model a z dat o velikosti až 2,1 miliardy bodů pro bodový model.

6.2.6 AutoCAD Civil 3D 2018

Program AutoCAD Civil 3D je aplikace společnosti Autodesk využívaná v projektování a v geodetické činnosti při návrhu a zpracovávání inženýrských staveb. Pracuje jak v plošném zobrazení, tak v prostorovém zobrazení. Program AutoCAD Civil 3D jsem použila při zpracování mračen bodů, primárně jsem s ním pracovala ve 2D pracovním prostoru *Kreslení a poznámka* a to při simulaci měření podélných nerovností latí na podélných profilech.

7. Vlastní experiment

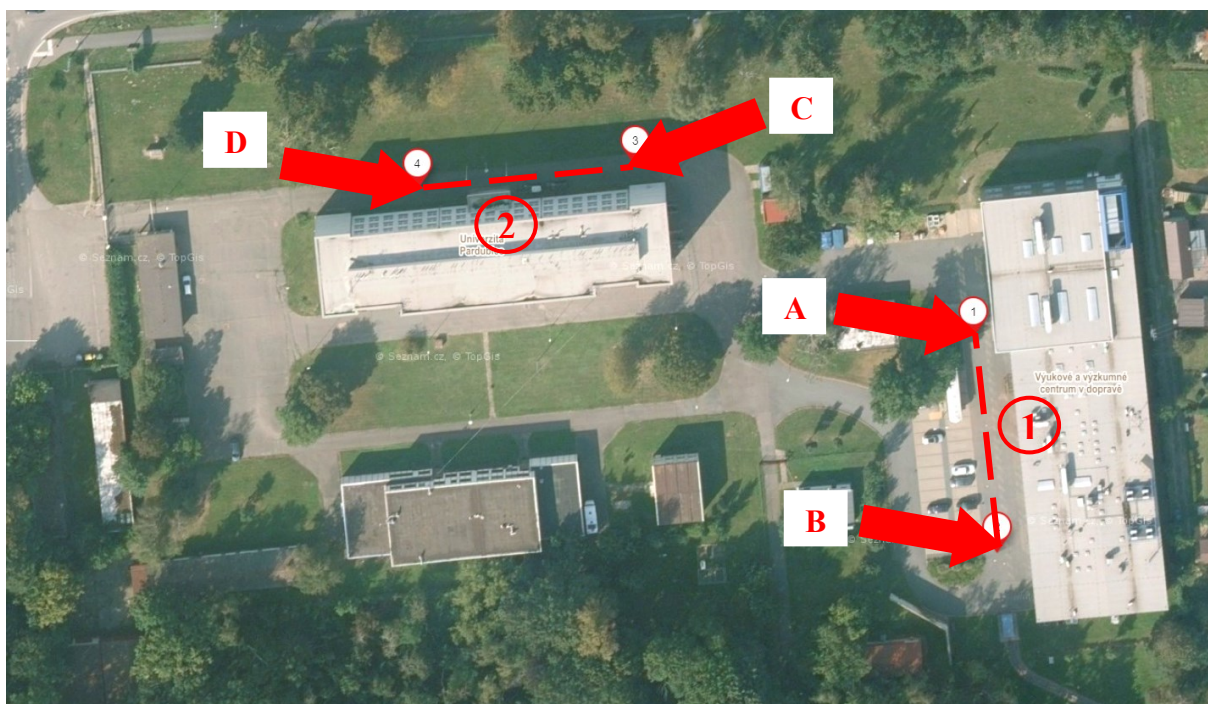
Pro vlastní experiment byly vybrány dva zkušební úseky na účelové pozemní komunikaci v Technologickém areálu Univerzity Pardubice v Pardubicích, v městské části Doubravice.

Přesná poloha měřeného úseku č. 1 byla zvolena a vyznačena na asfaltové zpevněné ploše v prostorách před budovou Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD). Zvolený zkušební úsek č. 1 pro provedení vlastního experimentu je na leteckém snímku (obrázek č. 50) označen body A – B. Druhý zkušební úsek č. 2 byl zvolen a vyznačen na asfaltovém povrchu vedle budovy Technologického pavilonu Ústavu energetických materiálů Fakulty chemicko-technologické Univerzity Pardubice. Zkušební úsek č. 2 je na obrázku označen body C – D. Během pozorování byl stanoven nejčastější směr jízdy automobilů pro oba zkušební úseky. Pro zkušební úsek č. 1 byl směr jízdy vozidel stanoven ve směru od bodu A do bodu B, směr jízdy vozidel na zkušebním úseku č. 2 byl stanoven ve směru z bodu C do bodu D. Stanovení jízdnicích směrů je důležité pro výpočet zkoumaných

parametrů (konkrétně pro stanovení IRI v této diplomové práci). Ve staničení 26,95 – 27,75 metru levé jízdní stopy zkušební úseku č. 1 se na komunikaci nachází poklop revizní šachty čtvercového tvaru v půdorysu.

Zkušební úseky jsou směrově přímé. Z dostupných zdrojů nebylo možné zjistit projektované parametry účelové komunikace, na níž byla provedena vlastní měření, proto je pro účely měření poloměr zaoblení nivelety předpokládán větší jak 2 000 metrů. Jediná zjištěná informace je konstrukční skladba vozovky v úseku před budovou VVCD (zkušební úsek č. 1), úsek byl rekonstruovaný v roce 2013. Skladba vozovky je následující:

- Asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+	tl. 40 mm	ČSN EN 13108-1
- Asfaltový beton pro podkladní vrstvy ACP 16 +	tl. 60 mm	ČSN EN 13108-1
- Směs stmelená hydraulickým pojivem SC C _{8/10}	tl. 130 mm	ČSN EN 13108-1
- Nestmelená směs z drceného kameniva ŠDB	tl. 200 mm	ČSN EN 73 6126
CELKEM	tl. min. 430 mm	



Obrázek 50: Situace zvolených zkušebních úseků v Technologickém areálu UPCE [38]

S ohledem na časovou náročnost měření a následné zpracování a vyhodnocování naměřených dat, byla délka zkušebních úseků zvolena 50 metrů pro každý zkušební úsek. Vzdálenost předpokládaných jízdních stop je zvolena 1,50 metrů u obou zkušebních úseků. Vzdálenost jízdních stop reprezentuje rozchod kol nápravy osobního automobilu.

Experiment byl, pro možnost porovnání vybraných geodetických metod měření, proveden na povrchu každého zkušební úseku vždy různými metodami měření (latí s klínkem, planografem, přesnou nivelací a laserovým skenováním).

Dne 7. 6. 2021 byl na asfaltového povrchu zvolen počátek zkušebních úseků a proběhlo vyznačení počátku a konce dvou jízdních stop reprezentujících silniční vozidlo u obou měřených úseků. K samotnému rozměření úseků bylo použito měřicí pásmo, měřicí kolečko a svinovací metr. Značkovací fluorescenční barvou ve spreji a barevnými chodníkovými kreslícími křídami bylo provedeno vyznačení předpokládaných jízdních stop formou bodů o vzorkovacím intervalu 0,25 metru ve všech čtyřech jízdních stopách padesátimetrových zkušebních úseků. Celkem bylo tedy vyznačeno na asfaltovém krytu 804 bodů (každou jízdní stopu jsem rozdělila na 201 bodů). Vzorkovací interval i vzdálenost jízdních stop byly voleny s ohledem na ČSN 73 6175 [2]. Hustota sítě bodů odpovídá měření metodou přesné nivelace, síť je znázorněna na obrázku 51.



Obrázek 51: Příprava zkušební úseku č. 1 [vlastní fotografie]

Vlastní experiment jsem provedla postupně ve třech dnech. Povrch vozovky byl během všech měření suchý, bez výrazného znečištění.

Dne 7. 6. 2021 v pondělí byla na obou stanovených zkušebních úsecích měřena podélná nerovnost latí s přiloženým klínkem, bylo provedeno laserové skenování obou úseků a proběhlo též měření planografem v obou jízdnicích stopách zkušebních úseků. Příprava zkušebního úseku a samotné měření bylo prováděno v čase 8:30 – 16:00. Počasí bylo po celou dobu měření slunečné s velmi dobrou viditelností o teplotě vzduchu 24 – 26 °C.

Dne 14. 6. 2021 v pondělí proběhlo měření metodou přesné nivelace na úseku č. 1 v obou jízdnicích stopách. Měření probíhalo v odpoledních hodinách v čase 13:00 – 16:20. V průběhu měření bylo polojasno, viditelnost byla velmi dobrá a teplota vzduchu dosahovala 21 °C.

Dne 16. 6. 2021 ve čtvrtek bylo provedeno poslední chybějící měření a to měření metodou přesné nivelace na zvoleném úseku č. 2. Příprava měřicího zařízení a samotné měření probíhalo v dopoledních hodinách v čase 8:30 - 12:00. Během měření bylo polojasno, viditelnost byla velmi dobrá a teplota vzduchu byla 23 – 26 °C.



Obrázek 52: Zkušební úsek č. 2 [vlastní fotografie]

7.1 Měření latí

Při měření podélných nerovností latí s přiloženým ve všech čtyřech jízdnicích jsem postupovala podle normy ČSN 73 6175 [2]. Měření každého zkušebního úseku mi zabralo přibližně 40 minut.

V obou případech měření zkušebních úseků jsem zkušební lať přikládala kolmo k povrchu vozovky, na vyznačené zvolené jízdnicí stopy, ve směru předpokládané jízdy silničních vozidel. Lať jsem v ose stopy přikládala na povrch co dva metry, tzn., že i staničení latě se posouvalo po dvou metrech na měřeném úseku. Zasunutím klínku jsem hledala a odečítala pod lať, mezi dvěma body dotyku spodní hrany latě a měřeného povrchu, maximální nerovnosti. Do záznamového archu jsem si tyto hodnoty průběžně značila. V každé jízdnicí stopě padesátimetrového zkušebního úseku jsem naměřila 25 hodnot dvojamplitud $2a$, celkem jsem tak naměřila 100 hodnot nerovností. Postup měření je zachycen na obrázku č. 53.

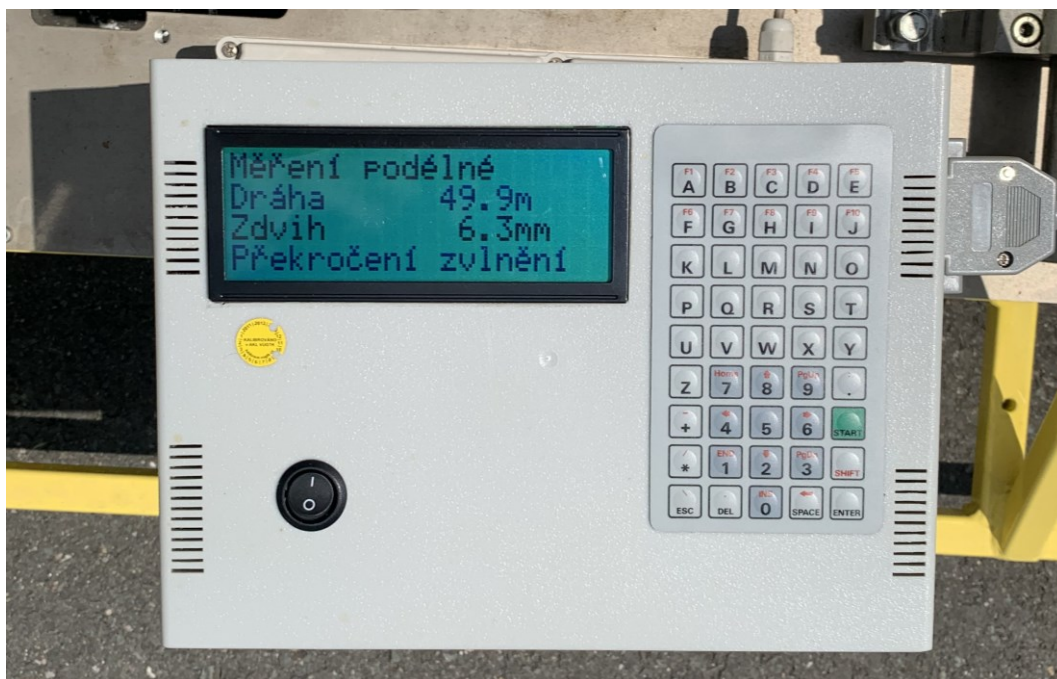


Obrázek 53: Průběh měření nerovností latí - zkušební úsek č. 2 [vlastní fotografie]

7.2 Měření planografem

Měření planografem jsem prováděla podle normy ČSN 73 6175 [2] v jízdnicích stopách obou zkušebních úseků. Měření na každém zkušebním úseku trvalo 5 minut. Příprava měřicího zařízení včetně měření samotného trvalo přibližně 20 minut.

Na planograf umístěný v počátku měřeného profilu jsem připojila indikační a registrační zařízení pro elektronické zaznamenávání naměřených hodnot. Po jeho zapnutí jsem pro každý měřený profil jízdních stop zkušebních úseků nastavila banku, do které se data z měřeného profilu mají nahrát, měřenou úlohu jsem pojmenovala. Po umístění planografu měřícím kolečkem do počátku úseku, jsem stiskla tlačítko *start* pro spuštění měření. Planograf jsem táhla vyznačenou osou jízdní stopy rychlostí pomalejší chůze (nepřesahující 4 km/h). Záznam měření jsem ukončila tlačítkem *esc*. Takto jsem postupovala ve všech měřených profilech. Hodnoty nerovností byly zaznamenávány průběžně po 0,1 metru ujeté dráhy, v každém profilu jízdní stopy bylo naměřeno 480 hodnot, celkem bylo naměřeno 1920 hodnot při měření planografem. Na obrázku 54 je znázorněna zaznamenávací jednotka, ta je připevněna na konstrukci planografu.

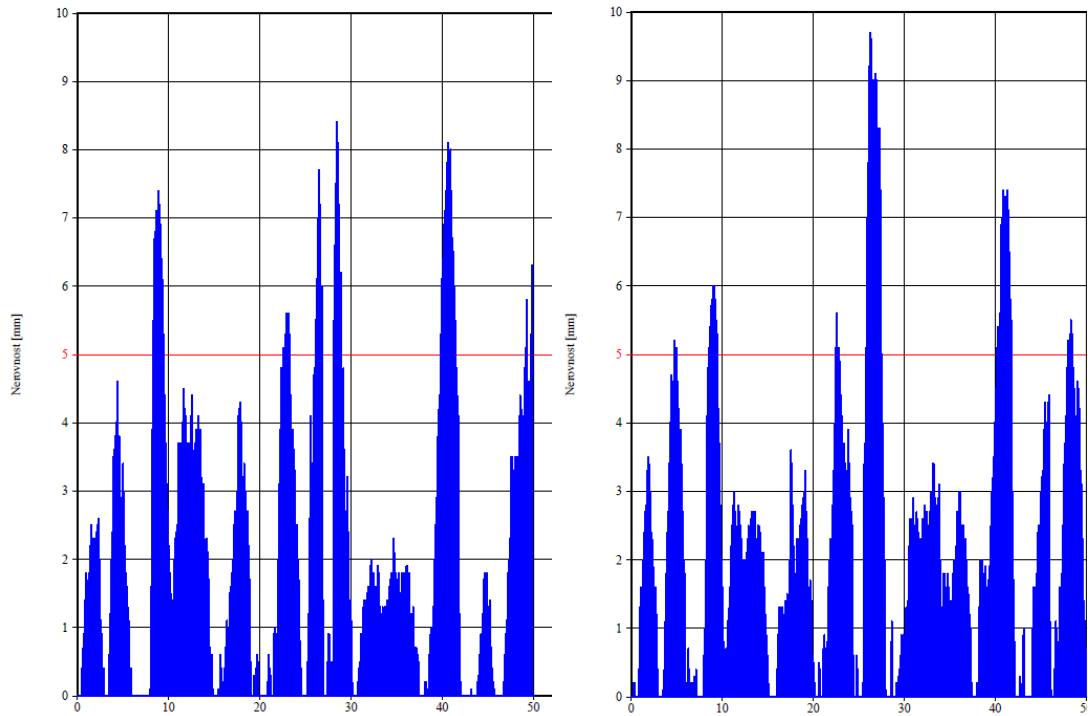


Obrázek 54: Průběh měření nerovností planografem - zkušební úsek č. 2 [vlastní fotografie]

Grafické znázornění podélných nerovností měřených v jízdních stopách obou zkušebních úseků jsem získala z programu *UniProt 32*. Tyto grafy 1 – 4 jsou zobrazeny níže. Vodorovná osa znázorňuje staničení měřeného úseku v metrech (tedy 50 metrů), svislá osa v grafech znázorňuje podélnou nerovnost v milimetrech. Vodorovná červená čára simuluje limitní hodnotu povolené nerovnosti, v našem případě je to 5 milimetrů.

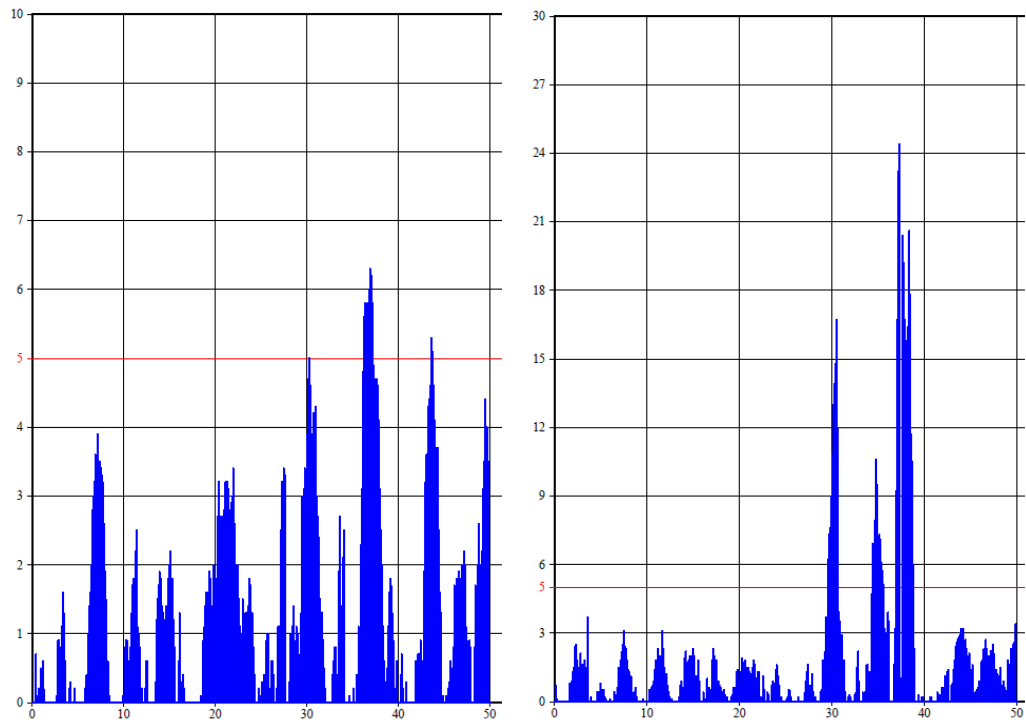
Graf 1: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 1, levý jízdní pás (graf vlevo) [40]

Graf 2: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 1, pravý jízdní pás (graf vpravo) [40]



Graf 3: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 2, levý jízdní pás (graf vlevo) [40]

Graf 4: Profil vozovky měřený planografem – zkušební úsek č. 2, pravý jízdní pás (graf vpravo) [40]



7.3 Měření přesnou nivelací

K měření přesnou nivelací jsem použila digitální nivelační přístroj Leica DNA03 s elektronickým měřením a záznamem. Při měření a vyhodnocování dat metodou přesná nivelace jsem postupovala podle normy ČSN 73 6175.[2] Samotné měření obou zkušebních úseků trvalo celkem asi 4 hodiny.

Na měřické stanovisko, které jsem volila cca s dvoumetrovým bočním odstupem přibližně v polovině délek obou měřících úseků, jsem postavila stativ tak, aby hlava stativu byla v co nejvodorovnější poloze. Na hlavu stativu jsem připevnila nivelační přístroj a podle krabicové libely jsem třemi stavěcími šrouby provedla horizontaci přístroje. Po dokončení ustavení stroje jsem nastavila program měření se zaznamenáváním prováděné měřické úlohy. Každé měření jízdních stop padesátimetrových úseků bylo rozděleno do datových bank (samostatných měřických úloh). Po nastavení měření se figurant s nivelační latí postavil na první měřený bod. Nivelační lať držel v co nejstálejší a nejsvislejší poloze podle příložné krabicové libely. Následně jsem zahájila měření spuštěním *Tlačítka měření*.

Nivelační přístroj má v sobě uložený obraz kódu latě (tzv. referenční signál), přístroj se tedy zacílil a zaostřil na lať a stiskem *tlačítka měření* na přístroji se spustilo měření. Přístroj při každém měření zaznamenal polohu zaostřovací čočky a zachytil část invarového nivelačního měřítka, které se zobrazuje v zorném poli. Vodorovná vzdálenost přístroje od nivelační latě (měřeného bodu) se digitálně stanovuje na základě provedení přesné korelace signálu - porovnání referenčního a měřeného signálu. Po provedení zaměření bodu se na displeji zobrazí číslo zaznamenaného měření, čtení na lati a délka záměry. Podobně postupovalo měření každého bodu jízdní stopy po kroku 0,25 metru. Bylo naměřeno 201 bodů (záměr) pro každou jednu jízdní stopu, celkem jsme naměřili 804 bodů.

Během měření na nivelační přístroj nesvítilo přímé slunce. V případě prvního odpoledního měření bylo polojasno s teplotou 21°C, v případě druhého dopoledního měření byl nivelační přístroj chráněný před přímým sluncem stínem budovy. Na obrázku 55 je zdokumentovaný průběh měření nivelačním přístrojem na zkušebním úseku č. 1.



Obrázek 55: Průběh měření – přesná nivelace [vlastní fotografie]

7.4 Statické laserové skenování

Cílem této metody bylo stanovení Mezinárodního indexu nerovnosti a maximálních hodnot dvojamplitudy nerovnosti na zkušebních úsecích, tedy ukazatelů získaných také při měření předchozími metodami. Měřičské stanoviště jsem volila přibližně v polovině délky zkušebního pole (u obou měřených úseků). V případě skenování úseku č. 1 byl stativ s multistanicí umístěn s třímetrovým bočním odstupem od skenovaného pole zkušebního úseku, při skenování druhého pole zkušebního úseku č. 2 bylo stanoviště multistanice od skenovaného pole bočně vzdálené 2 metry. Rozměry zkušebních polí jsou 50 metrů x 1,50 metru. V obou případech byla multistanice ustavena na stativu přibližně ve stejné výšce. Při skenování zkušebního úseku č. 1 bylo naskenováno celkem 408 658 bodů za 31 minut, v případě zkušebního úseku č. 2 to bylo celkem 682 462 bodů během 38 minut. Celkem bylo naměřeno 1 091 120 bodů během přibližně 90 minut a to včetně panoramatického snímkování.

Na měřické stanoviště jsem postavila stativ, ke stativu jsem připevnila multistanici a pomocí krabicové libely jsem provedla hrubou horizontaci. Zapnula jsem přístroj a v nastavení jsem zobrazila elektronickou libelu, stavěcími šrouby jsem podle elektronické libely provedla přesné urovňování přístroje. Centraci přístroje jsem neprováděla, protože pro účely této diplomové práce nebylo nutné lokalizovat body v globálním souřadném systému. V přístroji jsem nastavila novou zakázku měření, vybrala jsem skenování a z *Metody skenu* jsem volila metodu *Nepravidelná oblast*. Oblast skenování zkušebního úseku jsem definovala zacílením přístroje postupně do čtyř krajních bodů. Následně jsem spustila měření. Přístroj nejprve naskenoval panoramatický snímek oblasti definovaného zkušebního úseku. Panoramatické snímky obou zkušebních polí jsou na obrázcích 56 a 57.



Obrázek 56: Panoramatický snímek skenované oblasti č. 1, Leica MS60 [vlastní fotografie]



Obrázek 57: Panoramatický snímek skenované oblasti č. 2, Leica MS60 1 [vlastní fotografie]

Po vytvoření panoramatického snímku bylo nutné nastavit hustotu sítě skenování. Hustotu skenování jsem zvolila 0,01 x 0,01 metru definováním intervalu při vzdálenosti odpovídající cca 1/4 délky měřicího pole, rychlost skenování jsem zadala 30 000 bodů/s, ta je podle manuálu výrobce vhodná při skenování až do vzdálenosti 60 metrů. Ačkoliv nižší rychlost skenování vede k nižšímu šumu, v případě obou zkušebních úseků nezasahovaly do skenované oblasti žádné rušivé předměty. Rychlost skenování byla volena maximální z důvodu provozu na této komunikaci a nutnosti odklonu vozidel nebo zastavení skenování při průjezdu aut během měření. Potvrzením nastavených parametrů začalo skenování zkušebního úseku. Na obrázku 58 je zachycen průběh skenování multistanicí zkušebního úseku č. 1.



Obrázek 58: Průběh skenování multistanicí Leica MS60 – zk. úsek č. 1 [vlastní fotografie]

Po dokončení a uložení skenu zkušebního úseku č. 1 jsem se přesunula na místo zkušebního úseku č. 2, kde nastavení multistanice a skenování oblasti zkušebního úseku proběhlo obdobně (se stejně nadefinovanými parametry skenování).

8. Zpracování dat a vyhodnocení všech měření

Po změření zkušebních úseků všemi čtyřmi metodami měření následovalo vyhodnocení naměřených dat a jejich porovnání. Práce s daty byla časově podstatně náročnější, než čas strávený nad samotným měřením.

8.1 Měřící lat' s klínkem

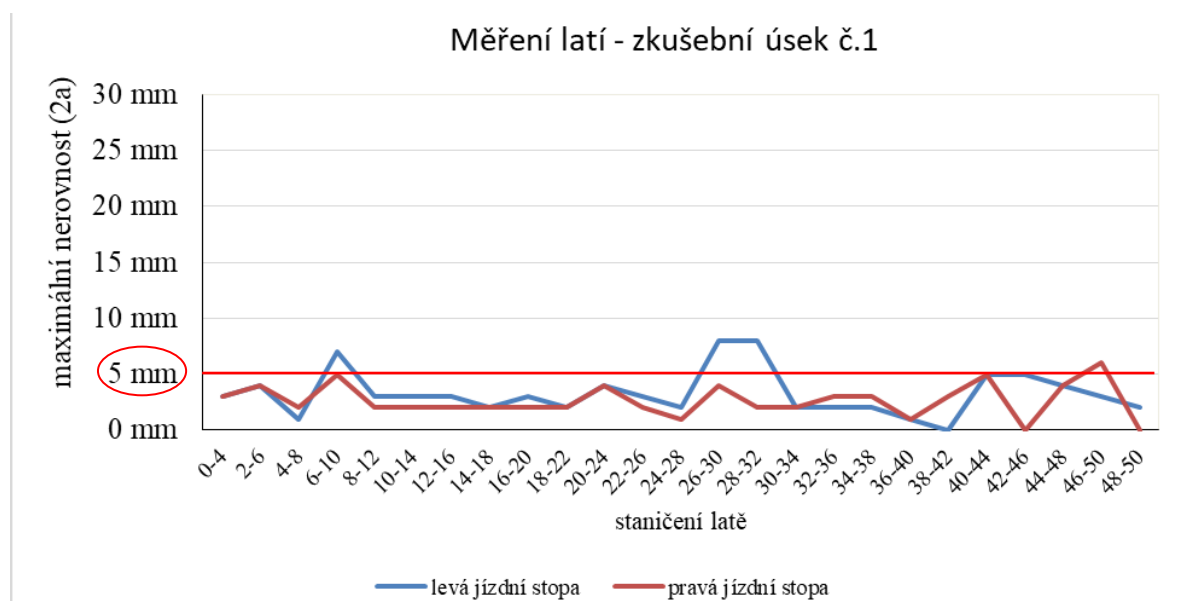
Podstatou zkoušky měření latí bylo stanovení dvojamplitud $2a$ maximálních nerovností pod měřící latí. Při vyhodnocování dovolených odchylek naměřených podélných nerovností jsem volila vyhodnocení podle tabulky č. 5 v této diplomové práci, která je součástí normy ČSN 73 6121 [1]. Maximální dovolená odchylka obrusné vrstvy pro účelové komunikace je 5 milimetrů.

Měření zkušebního úseku č. 1 nevykazovalo nadměrné (klínem neměřitelné) nerovnosti, avšak v případě měření pravé jízdní stopy zkušebního úseku č. 2 jsem se setkala s jedním případem vykazující větší hodnotu, než je svým rozsahem normalizovaný klínek schopen

změřit (hodnota byla vyšší než 27 milimetrů, dle svinovacího metru tato nerovnost nepřesáhla 35 milimetrů). Hodnota mimo rozsah měřící rozsah klínku je v příloze A diplomové práce v tabulce naměřených a zpracovaných hodnot obou měření (tabulka č. 14) označena pojmem „neměřitelné“. Hodnoty převyšující dovolenou odchylku 5 milimetrů jsou v této tabulce 14 zvýrazněny červeně. Na zkušebním úseku č. 1 nesplnily 4 z 50 naměřených hodnot povolenou odchylku, ve zkušebním úseku č. 2 to byly 2 hodnoty z 50. V grafech 5 a 6 je znázorněn průběh naměřených nerovností. Červená vodorovná úsečka ve výšce 5 milimetrů zdůrazňuje maximální povolenou hodnotu nerovnosti pro měřenou účelovou komunikaci s povrchem z asfaltových hutněných vrstev.

Na grafu č. 5 je vidět, že v levé jízdni stopě v místě staničení latě 26 – 32 metru je téměř vodorovná úsečka. Odchylku způsobil poklop revizní šachty kanalizace, který se ve znázorněném místě nachází. Přesné staničení poklopu je 26,95 – 27,75 metru. Fotografie tohoto místa je na obrázku 59 pod grafem. Grafické znázornění bylo provedeno v programu Microsoft Excel.

Graf 5: Podélné nerovnosti vozovky měřené latí – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]

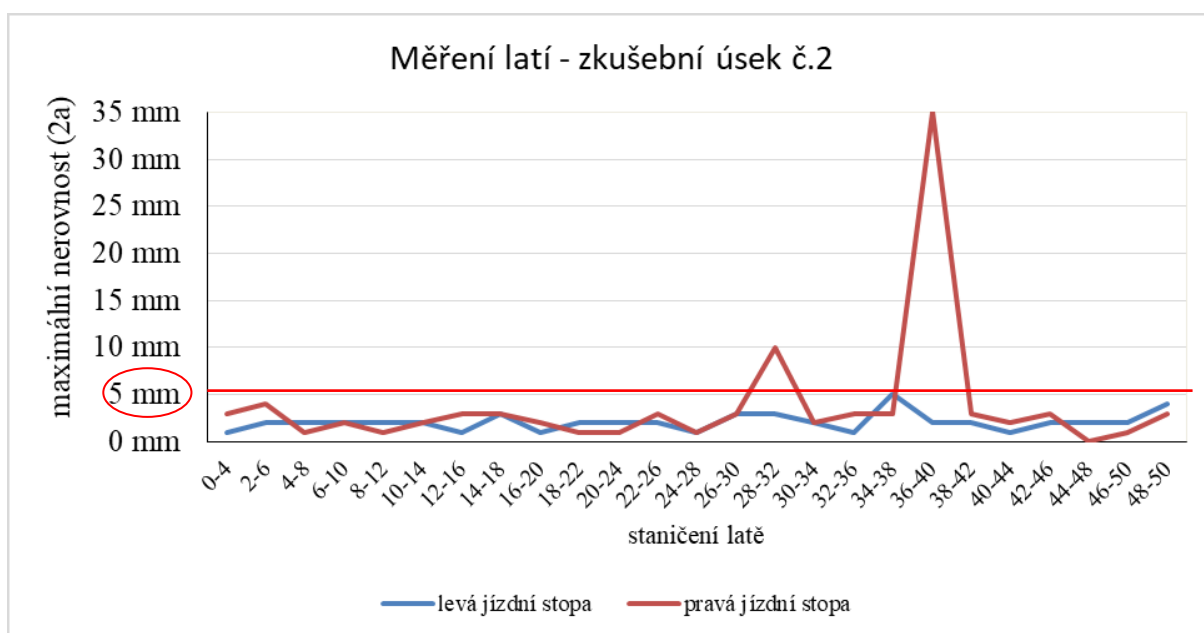




Obrázek 59: Detail poklopu šachty - měření v levé jízdni stopě, zk. úsek č. 1 [vlastní fotografie]

Z grafu č. 6 lze vyčíst, že na zkušebním úseku č. 2 v místě staničení latě 36 – 40 metrů pravé jízdni stopy je naměřena maximální nerovnost. Tuto nerovnost nebylo možné klínkem změřit. Poloha místa s extrémní neměřitelnou nerovností je zdokumentována na obrázku 60. Staničení nerovnosti v metru 37,55.

Graf 6: Podélné nerovnosti vozovky měřené latě – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]





Obrázek 60: Detail místa neměřitelné podélné nerovnosti latí, zk. úsek č. 2 [vlastní fotografie]

Procentuální vyjádření nevyhovujících úseků měřených latí je podle vzorce (13) následující:

$$p = (N_i/N_c) \cdot 100\% \quad (13)$$

kde:

N_i – počet hodnot s naměřenou podélnou nerovností > 5 mm

N_c – celkový počet měřených hodnot

Po dosazení do vzorce (13) je procentuální vyjádření nevyhovujících úseků následující:

Zkušební úsek č.1 – levá jízdní stopa: $p = (3/25) \cdot 100 = 12,0 \%$

Zkušební úsek č.1 – pravá jízdní stopa: $p = (1/25) \cdot 100 = 4,0 \%$

Zkušební úsek č.2 – levá jízdní stopa: $p = (0/25) \cdot 100 = 0 \%$

Zkušební úsek č.2 – pravá jízdní stopa: $p = (2/25) \cdot 100 = 8,0 \%$

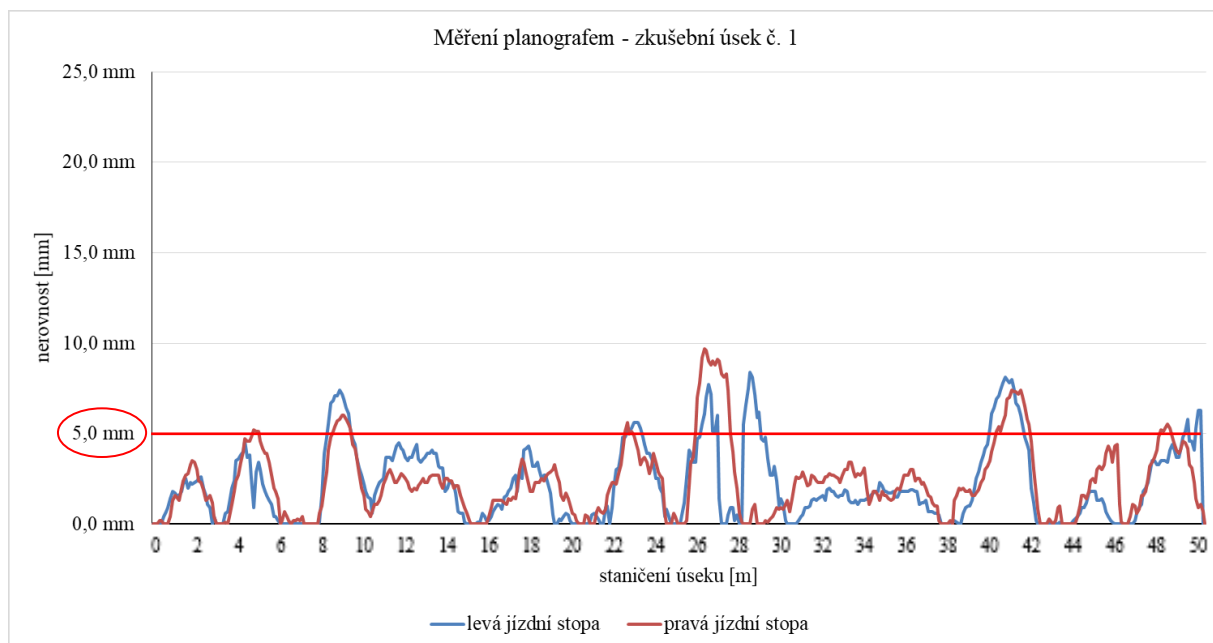
8.2 Planograf

Naměřená data byla exportována z měřicí jednotky do počítače v podobě souborů ve formátu (*.u32). Pomocí softwaru UniProt 32 jsem data zpracovala a dále upravila v tabulkovém editoru Microsoft Excel.

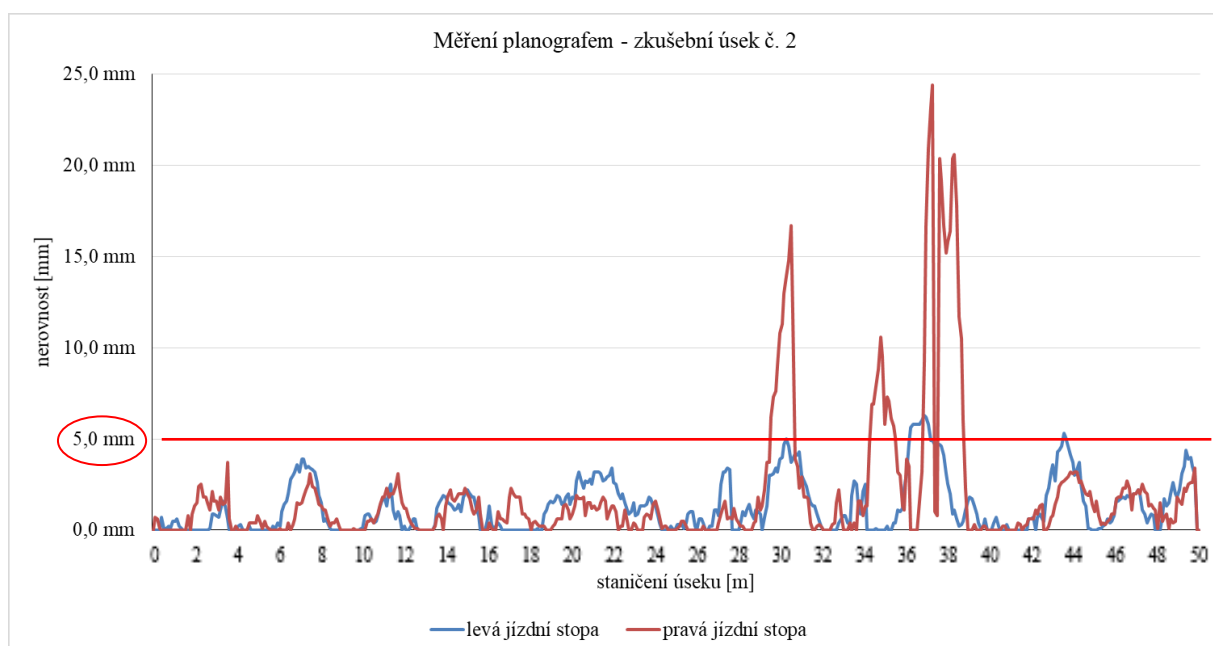
Na zkušebním úseku č. 1 bylo zaznamenáno 107 hodnot podélných nerovností překračující stanovenou limitní hranici nerovností 5 milimetrů, nejvyšší naměřená hodnota nerovnosti byla změřena 9,7 milimetrů. V případě zkušebního úseku č. 2 bylo zaznamenáno 51 hodnot překračujících stanovenou limitní odchylku 5 milimetrů, největší naměřená nerovnost byla dokonce 24,4 milimetrů. Tabulka 16 naměřených nerovností všech čtyř jízdních stop

zkušebních úseků je součástí přílohy C. V příloze D je tabulka 17 s výčtem hodnot převyšující limitní hodnotu nerovnosti 5 milimetrů. Grafy 7 a 8 vyobrazují průběhy naměřených podélných nerovností metodou měření planografem, červená vodorovná úsečka v grafu znázorňuje maximální limitní hodnotu podélné nerovnosti, která je dle normy [1] stanovena na 5 milimetrů pro tyto zkušební úseky. Grafické znázornění bylo provedeno v programu Microsoft Excel.

Graf 7: Podélná nerovnost vozovky měřená planografem – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]



Graf 8: Podélná nerovnost vozovky měřená planografem – zkušební úsek č. 2 [vlastní zpracování]



Procentuální vyjádření nevyhovujících úseků je podle vzorce (13) následující:

Zkušební úsek č.1 – levá jízdní stopa: $p = (55/480) \cdot 100 = 11,45 \%$

Zkušební úsek č.1 – pravá jízdní stopa: $p = (52/480) \cdot 100 = 10,83 \%$

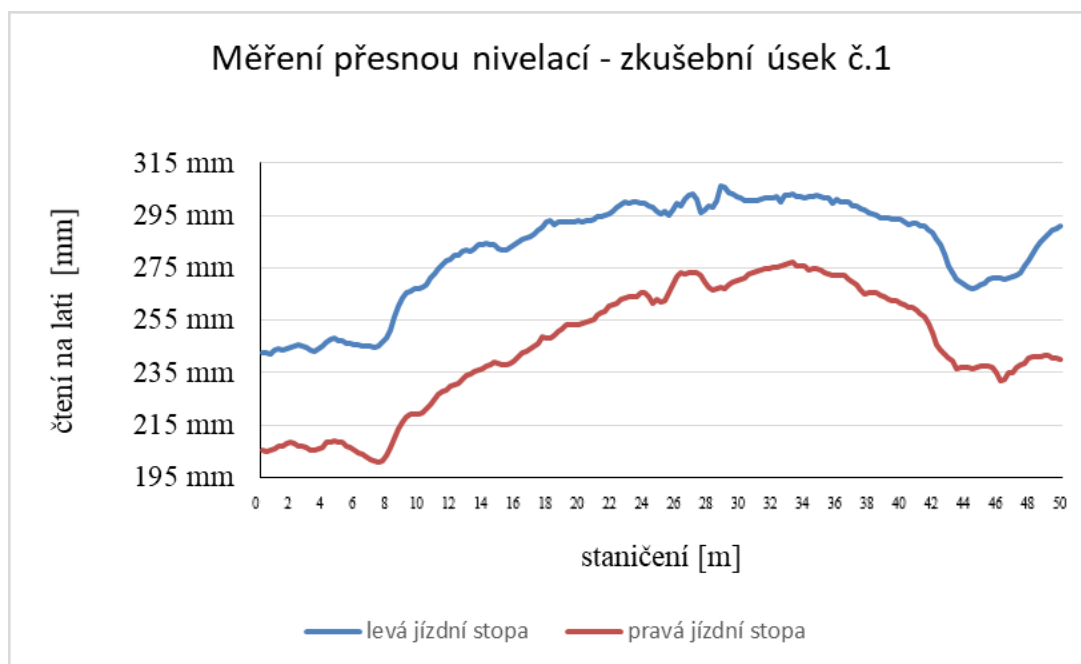
Zkušební úsek č.2 – levá jízdní stopa: $p = (11/480) \cdot 100 = 2,29 \%$

Zkušební úsek č.2 – pravá jízdní stopa: $p = (40/480) \cdot 100 = 8,33 \%$

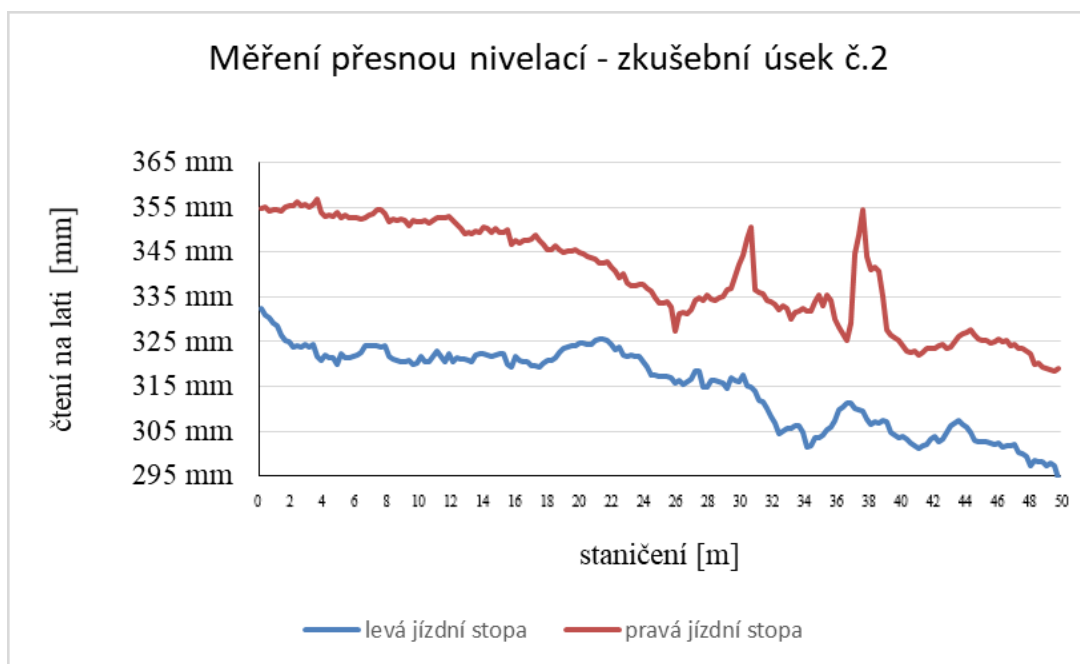
8.3 Přesná nivelace

Data jsem přenesla z přístroje pomocí datového kabelu sériového rozhraní S232 do počítače ve formátu *.gsi. Pomocí programu *Microsoft Excel* byla data z měřených profilů jízdních stop, pro kompatibilitu s vyhodnocujícím softwarem *ProVal*, uspořádána do dvou sloupců. První sloupec představuje výšku záměr bodů a druhý sloupec představuje staničení těchto bodů v jízdní stopě. Tabulka s hodnotami naměřenými přesnou nivelací obou zkušebních úseků je k dispozici v příloze E této diplomové práce. Upravená data byla exportována do Poznámkového bloku (s příponou *.txt) pro možnost dalšího zpracování v programu *ProVAL*. Grafy 9,10 podélných profilů obou zkušebních úseků znázorňují skutečné podélné profily v jízdních stopách zkušebních úseků. Profily byly získány měřením bodů v ose jízdních stop vzdálených od sebe 1,50 metru pro oba zkušební úseky. Vzdálenost bodů v profilu je po 0,25 metru. Grafické znázornění bylo provedeno v programu *Microsoft Excel*.

Graf 9: Podélná nerovnost vozovky měřená přesnou nivelací – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]



Graf 10: Podélná nerovnost vozovky měřená přesnou nivelací – zkušební úsek č. 2 [vlastní zpracování]



Časová náročnost se zpracováním dat a jejich vyhodnocením pro mne byla vyšší v porovnání s výše zmíněnými metodami. Velkou roli hrála práce ve speciálních programech, se kterými jsem neměla praktické ani teoretické zkušenosti.

Pro stanovení Mezinárodního indexu nerovnosti *IRI* jsem použila program *ProVAL*. Index nerovnosti *IRI* byl stanoven v obou profilech jízdních stop pro oba zkušební úseky. Norma ČSN 73 6175 [2] uvádí stanovení hodnot *IRI* z měřených úseků délky 20 metrů. Zkušební úseky byly voleny o délce 50 metrů, tzn., že podle ČSN 73 6175 [2], pro každou jízdní stopu lze stanovit dvě hodnoty *IRI* v každé jízdní stopě.

Pro výpočet *IRI* v každých jízdních stopách programem *ProVAL* byla nastavena analýza pevného intervalu po segmentech délky 20 metrů. Jako limitní hodnotu pro klasifikační stupeň 1 jsem nastavila podle normy [2] hodnotu 1,9. Při jejím překročení program v grafickém znázornění barevně označí právě ty vypočtené hodnoty *IRI*, které jsou nad povolenou tolerancí. V případě méj diplomové práce je zvolená délka zkušebního úseku krátká. Při získání pouze dvou hodnot *IRI*, grafické znázornění nemá smysl.

Tabulka 7 znázorňuje vypočtené hodnoty *IRI* v programu *ProVAL* pro dílčí úseky 20 metrů pro oba zkušební úseky. Hodnota *IRI* byla počítaná ve směru předpokládaného jízdního směru vozidel. Průměrná hodnota *IRI* je počítaná pro každý zkušební úsek jako aritmetický průměr hodnoty *IRI* celého úseku pravé jízdní stopy a z hodnoty *IRI* celého úseku levé jízdní stopy.

Tabulka 7: Hodnoty indexu IRI vypočtené z měření přesnou nivelací [vlastní zpracování]

hodnota IRI [m/km]				
staničení na zkušebním úseku [m]	zkušební úsek č. 1		zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní	pravá jízdní	levá jízdní	pravá jízdní
	stopa	stopa	stopa	stopa
0,00 - 20,00	3,893	3,623	2,036	1,749
20,00 - 40,00	3,414	3,105	3,286	7,167
průměrná hodnota IRI [m/km] na celém zkušebním úseku	3,848		3,382	

Hodnocení podélné nerovnosti parametrem *IRI* se dle uvedené tabulky č. 3 podle normy ČSN 73 6175 [2] provádí pro dílčí měřené úseky délky 20 metrů. Lze vidět, že průměrováním hodnot *IRI* vzniká velká nepřesnost ve stanovení klasifikačního stupně. Klasifikační stupeň v tabulce 8 byl podle tabulky č. 3 přidělen měřeným zkušebním úsekům délek 20 metrů podle normy [2]. Klasifikační stupeň hodnotí příslušnou nerovnost lokálně.

Tabulka 8: Hodnocení podélných nerovností přiřazením klasifikačního stupně [vlastní zpracování]

Klasifikační stupeň [-]				
staničení na zkušebním úseku [m]	zkušební úsek č. 1		zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní	pravá jízdní	levá jízdní	pravá jízdní
	stopa	stopa	stopa	stopa
0,00 - 20,00	3	3	2	2
20,00 - 40,00	3	3	3	5

Klasifikační stupeň 2 u vyhodnoceného zkušebního úseku č. 2 hodnotí tuto nerovnost v případě přejímky povrchu, jako nerovnost, která nebrání uvedení vozovky do provozu. Nejčteněji se vyskytující klasifikační stupeň je stupeň 3, je stanoven pro celý zkušební úsek č. 1 v úseku staničení 0,00 – 40,00 metru. Klasifikační stupeň 3 navrhuje správci komunikace, v případě novostavby a držení záruční doby zhotovitelem, provedení posouzení povrchu na konci záruční doby. Nerovnosti zkušebního úseku č. 2 v pravé jízdní stopě v úseku staničení 20,00 – 40,00 metru odpovídají klasifikačnímu stupni 5, ten je vhodným rozhodujícím kritériem pro provedení opatření pro zvýšení provozní způsobilosti vozovky.

8.4 Statické laserové skenování

Naskenovaná data v podobě mračen bodů a panoramatických snímků byla z Multistanice Leica MS60 exportována do počítače v souborech formátů (*.iprj), (*.txt) a (*.jpg). Prostřednictvím programu Infinity, bylo pro každý zkušební úsek propojeno mračno bodů s panoramatickým snímkem a následně jsem z dat vytvořila povrch zkušebního úseku. Model

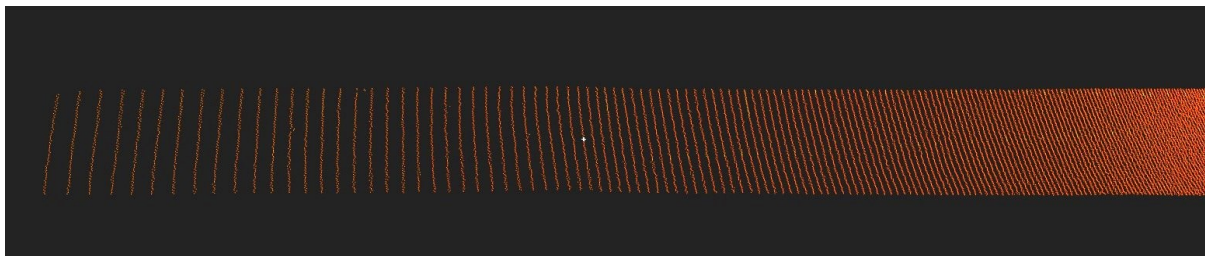
jsem pro oba povrchy dvou zkušebních úseků zvolila jako „*pravidelný povrch*“. Protože naměřená data mračen bodů mají v obou případech zkušebních úseků méně konstantní hustotu bodů, „*pravidelný povrch*“ se jevil jako nejvhodnější model. Po nalezení vhodné velikosti TIN sítě a po vizuální kontrole povrchu jsem vygenerovala report vytvořených povrchů (obrázek 61) a následně jsem oba povrchy dvou zkušebních úseků vyexportovala ve formátu (*.ptx). Tento formát je kompatibilní s produkty firmy Autodesk, Inc.

Č.povrchu: zkušební úsek č. 1			
Body:	0	Max.Výška:	218,1499 m
Body mračen:	408.658	Min.Výška:	218,0507 m
Uzly:	7.383	Max. velikost trojúhelníku:	0,5000 m
Hrany trojúhelníků:	21.489	Min. velikost trojúhelníku:	0,0800 m
Trojúhelníky:	14.107	3D výměra:	71,4212 m ²
Lomové čáry:	0	Plocha 2D:	71,3904 m ²
Vyloučené oblasti:	0	3D obvod:	104,0824 m
Hranice:	0	Obvod 2D:	104,0709 m
Metoda:	Pravidelný		
Č.povrchu: zkušební úsek č. 2			
Body:	0	Max.Výška:	218,0178 m
Body mračen:	682.462	Min.Výška:	217,9543 m
Uzly:	67.631	Max. velikost trojúhelníku:	1,0000 m
Hrany trojúhelníků:	201.501	Min. velikost trojúhelníku:	0,0100 m
Trojúhelníky:	133.846	3D výměra:	73,4471 m ²
Lomové čáry:	0	Plocha 2D:	73,2100 m ²
Vyloučené oblasti:	0	3D obvod:	106,1675 m
Hranice:	0	Obvod 2D:	106,0303 m
Metoda:	Pravidelný		

Obrázek 61: Prostředí programu Infinity – report povrchů [41]

Detail naskenovaného mračen bodů na konci skenovaného úseku č. 1 je zobrazen na obrázku 62. Lze si všimnout, že na okraji skenované oblasti má měření nižší hustotu. Řady bodů získané z vertikálního skenování jsou v těchto místech v případě zkušebního úseku č. 1 od sebe vzdáleny až 40 centimetrů na obou koncích. Na zkušebním úseku č. 2 jsou na začátku a na konci zkušebního pole řady bodů vzdáleny až 25 centimetrů. Body v úrovni polohy multistanice jsou od sebe vzdáleny 1 centimetr, což odpovídá zadané hustotě skenování. Pro účely vyhodnocení podélných nerovností v profilech jízdních stop (stanovení *IRI* z 0,25 metrových intervalů korektních výšek nerovností v profilu jízdní stopy pro 20 metrové úseky a stanovení maximálních dvojamplitud 2a simulací měření latí) je zaměření na začátku a na konci zkušebních úseku nedostatečné. Nedostatečnost získaných dat z laserového

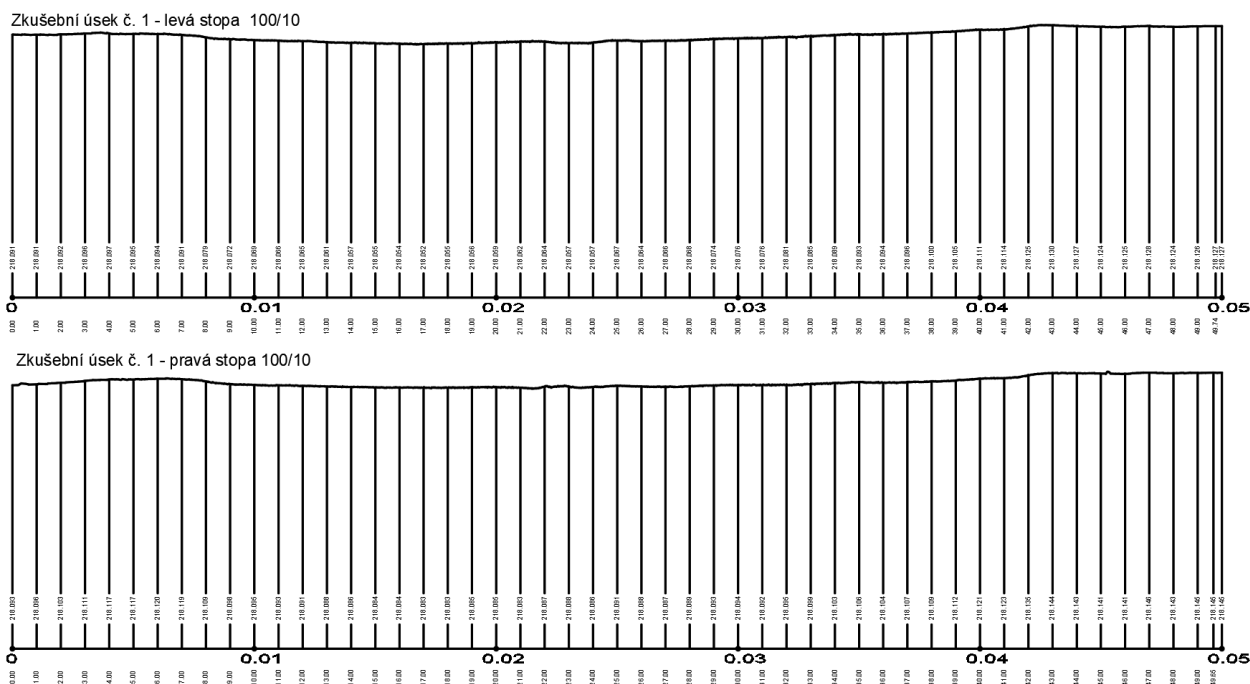
skenování (především mračno bodů na zkušebním úseku č. 1) zapříčinilo hned několik faktorů. Přesnost skenování závisí na relativní pozici stanoviště (stanoviště skeneru vůči skenované ploše), na vzdálenosti skenovaných bodů, na úhlu, pod kterým je paprsek laseru vyslán na měřený povrch a na úhlu dopadu.



Obrázek 62: Znárodnění poklesu hustoty bodů skenované oblasti - prostředí programu Leica Infinity [vlastní fotografie]

Dále, prostřednictvím specializovaného modulu *RoadLine* programu *Atlas DMT*, byly TIN modelem, který odpovídá povrchu zkušebních úseků, vedeny trasy reprezentující jízdní stopy vozidel. Poloha jízdních stop je umístěna 5 centimetrů od krajů skenované oblasti. Vzdálenost jízdních stop je v tomto případě 1,40 metru oproti předchozím metodám měření, avšak stále v toleranci s normou *ČSN 73 6121* [2]. Příčinou neschopnosti získání dat v profilech jízdních stop vzdálených 1,50 metru od sebe je zmenšení rozměrů oblasti skenování při tvorbě modelu TIN. Vymezení oblasti skenování s jistým přesahem (s ohledem na parametry modelů TIN) se jeví v těchto případech ploch zkušebních úseků jako vhodnější.

Z vytvořených tras vedených jízdními stopami byly v programu *Atlas DMT* vygenerovány podélné profily. Současně, pro kontrolu správnosti terénu jsem vytvořila v programu *AutoCAD Civil 3D 2018* i podélný profil z povrchu vytvořeného programem *Infinity*. Podélné profily se sobě velmi podobaly a lišily se minimálně. Na základě provedené kontroly jsem s profily jízdních stop vygenerované programem *Atlas DMT* dále pracovala. Tyto podélné profily jízdních stop jsou zobrazeny na obrázku 63. Multistanice si pamatuje polohu posledního stanoviště, tedy nadmořskou výšku přibližně 218 m n. m., která byla určena z jiného předešlého měření, jenž jsem já neprováděla. Takto náhodně převzatá nadmořská výška však neovlivňuje můj experiment.



Obrázek 63: Podélné profily jízdnic stop (zk. úsek č. 1) generované v programu Atlas DMT [vlastní fotografie]

Z profilů digitálních modelů jsem odečetla hodnoty výšek na trase stop v kroku po 0,25 metru pro následné stanovení *IRI*. Data v profilech o kroku 0,25 metru byla exportována do souborů ve formátu (*.txt). Na obrázku 65 je ukázka zápisu dat ve tvaru, který je nutný pro následný import dat do programu *ProVAL*. Levý sloupec udává staničení jízdnic stopy v metrech, data v pravém sloupci představují výšky v těchto bodech (též v metrech).

*zkušební úsek č. 1 - pravá jízdnic stopa .txt ...	
Soubor	Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
0,00	218,0932
0,25	218,0943
0,50	218,0996
0,75	218,0966
1,00	218,0964
1,25	218,0987

Obrázek 64: Tvar zápisu dat v Poznámkovém bloku [vlastní fotografie]

Při stanovení hodnot *IRI* jsem dále postupovala stejně jako při stanovení *IRI* přesnou nivelací. Pro stanovení *IRI* podle normy ČSN 73 6175 jsem použila program *ProVAL*. Programem vypočtené hodnoty *IRI* jsou znázorněny v tabulce 9.

Parametr *IRI* je využíván po celou dobu životnosti vozovky a klasifikuje se a hodnotí podle přílohy A v normě [2], (tabulka 2 v diplomové práci). V tabulce 10 je k vypočteným hodnotám *IRI* přiřazen příslušný klasifikační stupeň.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti povrchů vozovek [vlastní zpracování]

Hodnota IRI [m/km]				
Staničení na zkušební úseku [m]	Zkušební úsek č. 1		Zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa	pravá jízdní stopa	levá jízdní stopa	pravá jízdní stopa
0,00 - 20,00	3,506	4,086	1,838	1,948
20,00 - 40,00	3,251	3,194	3,220	7,282
průměrná hodnota IRI [m/km] na celém zkušební úseku	3,864		2,516	

Tabulka 10: Hodnocení podélných nerovností přiřazením klasifikačního stupně [vlastní zpracování]

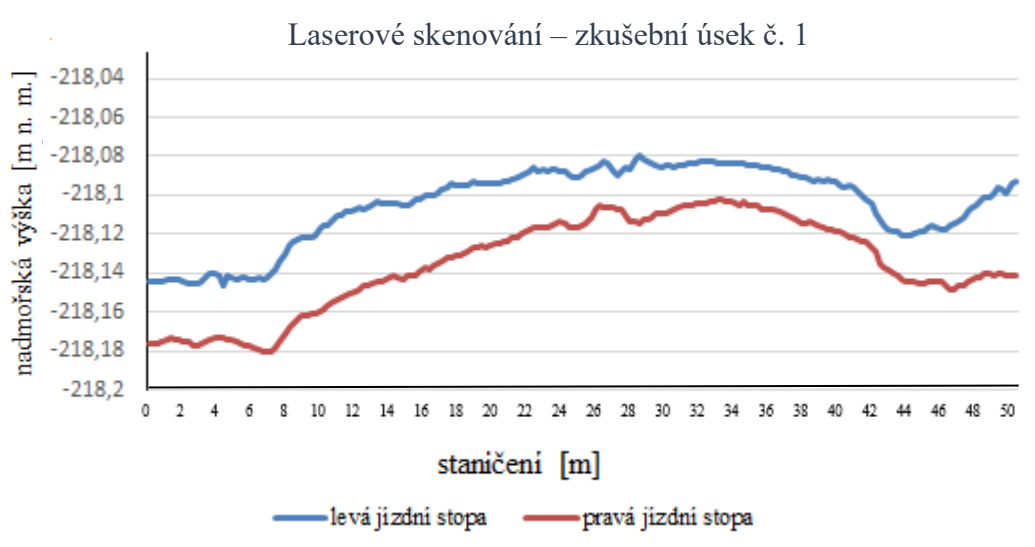
Klasifikační stupeň [-]				
Staničení na zkušební úseku [m]	Zkušební úsek č. 1		Zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa	pravá jízdní stopa	levá jízdní stopa	pravá jízdní stopa
0,00 - 20,00	3	3	1	2
20,00 - 40,00	3	3	3	5

Vyhodnocení nerovností a přiřazení klasifikačních stupňů slouží jako podklad pro správce příslušných komunikací a k jejich přistoupení na provedení dalších nezbytných opatření.

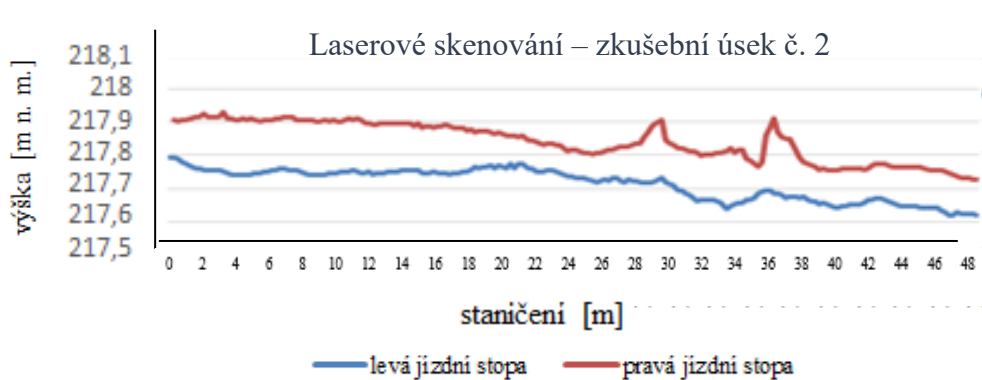
Z tabulek je zřejmé, že celý zkušební úsek č. 1 odpovídá klasifikačnímu stupni 3. Klasifikační stupeň 3 navrhuje správci komunikace, v případě novostavby a držení záruční doby zhotovitelem, provedení posouzení povrchu na konci záruční doby. Na zkušební úseku č. 2 se vyskytují úseky s klasifikačními stupni 1 - 5. Klasifikační stupeň 1 se jeví ideální, naopak klasifikační stupeň 5 doporučuje správci komunikace provedení opatření pro zvýšení provozní způsobilosti povrchu vozovky.

Grafy na další straně (graf 11 a graf 12) zobrazují podélné profily jízdních stop zkušebních úseků. Tyto podélné profily byly vytvořeny z dat sejmutých z profilů DMT pro stanovení IRI.

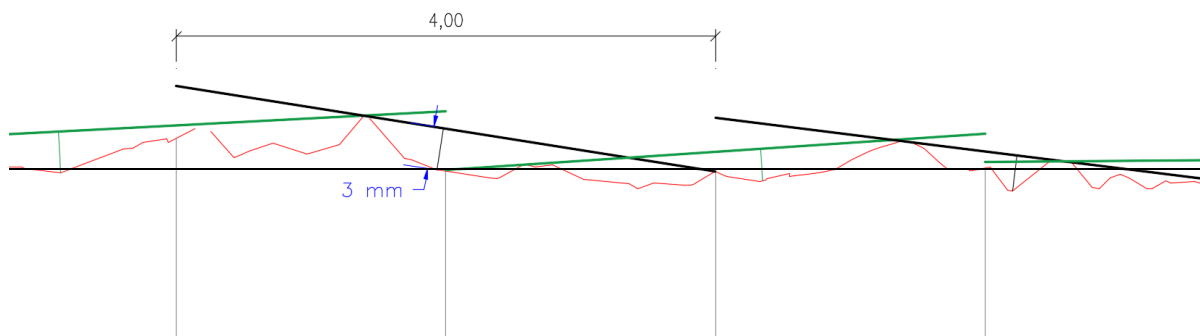
Graf 11: Podélný profil vozovky měřený laserovým skenováním – zkušební úsek č. 1 [vlastní zpracování]



Graf 12: Podélný profil vozovky měřený laserovým skenováním – zkušební úsek č. 2 [vlastní zpracování]



Při stanovení maximální dvojamplitudy $2a$ nerovnosti jsem postupovala obdobně jako u fyzického měření latí s klínem, podle normy ČSN 73 6175 [2]. Měření jsem simulovala v prostředí programu *AutoCAD Civil 3D 2018* na podélných profilech jízdních stop vytvořených v programu *Atlas DMT*. Virtuální lať v podobě úsečky délky 4 metry jsem přikládala, na nejvyšší body podélného profilu. Interval přikládání lati byl postupně po dvou metrech ve směru staničení jízdních stop zkušebních úseků. Maximální odchylky latě a nejnižšího bodu terénu pod latí jsem odečítala a postupně zaznamenávala. Na obrázku 65 je znázorněn postup při měření podélných nerovností virtuální lati.



Obrázek 65: Simulace měření podélných nerovností vozovky čtyřmetrovou latí na profilu vytvořeném z mračna bodů [vlastní fotografie]

Během odměřování nerovností pod virtuální latí a postupného zaznamenávání naměřených hodnot jsem naměřené výsledky kontrolovala s hodnotami z metody měření latí, kterou jsem prováděla fyzicky v terénu. Kompletní tabulka hodnot naměřených pod virtuální latí na profilu DMT je součástí *přílohy B* pod označením *Tabulka 15*. Červeně jsou zvýrazněny ty hodnoty podélné nerovnosti, které převyšují povolenou odchylku 5 milimetrů.

Na zkušební úseku č. 1 nesplnilo 27 z 50 naměřených hodnot povolenou odchylku, na úseku č. 2 to bylo 16 hodnot z 50.

Procentuální vyjádření nevyhovujících úseků měřených virtuální latí je podle vzorce (13) následující:

Zkušební úsek č. 1 – levá jízdní stopa: $p = (7/25) \cdot 100 = 28,0 \%$

Zkušební úsek č. 1 – pravá jízdní stopa: $p = (10/25) \cdot 100 = 40,0 \%$

Zkušební úsek č. 2 – levá jízdní stopa: $p = (1/25) \cdot 100 = 4,0 \%$

Zkušební úsek č. 2 – pravá jízdní stopa: $p = (3/25) \cdot 100 = 12,0 \%$

8.5 Porovnání měření laserovým skenováním s metodami dle ČSN 73 6175.

Vyhodnocením naměřených hodnot získaných čtyřmi metodami byly stanoveny dva parametry – Mezinárodní index nerovnosti *IRI* a dvojamplituda nerovnosti *2a*.

Maximální dovolená hodnota dvojamplitudy nerovnosti pro účelovou komunikaci, na níž byla měření provedena, je podle ČSN 73 6121 5 milimetrů. Dvojamplituda nerovnosti byla měřena latí s klínkem a planografem podle ČSN 73 6175. Třetí metodou zjišťování maximální dvojamplitudy bylo simulované měření virtuální čtyřmetrovou latí na virtuálních jízdních

stopách obou zkušebních úseků. Tabulka 11 zobrazuje procentuální vyjádření nevyhovujících hodnot dvojamplitudy nerovnosti 2a na obou měřených úsecích.

Tabulka 11: Procentuální vyjádření nevyhovujících úseků překračující výchytku 5 mm [vlastní zpracování]

Vyjádření nevyhovujících úseků ($2a > 5$ mm) [%]				
metoda měření	zkušební úsek č. 1		zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa	pravá jízdní stopa	levá jízdní stopa	pravá jízdní stopa
lať s klínkem (ČSN 73 6175)	12,00	4,00	0,00	8,00
planograf (ČSN 73 6175)	11,45	10,83	2,29	8,33
laserové skenování (virtuální lať)	28,00	40,00	4,00	12,00

Před měřením fyzickou láť byla provedena kontrola odchylek lati. Lať ani měřicí klín před samotným měřením ani v průběhu měření nebyly mechanicky poškozeny a nevykazovaly známky opotřebení (žádné oděrky, rýhy). Fyzická normalizovaná měřicí lať s klínem nemá větší chybu, než je přesnost čtení na měřičském klínku (1 mm). V tomto případě se fyzická lať jeví jako přesná s tím rozdílem, že četnost měření je poměrně nízká a nepřesnost se může zvyšovat. Nepřesnost měření latí může být v četnosti měření, kdy lať se posouvá po dvou metrech a klínkem se hledá pouze jedna jediná maximální výchytko. Planograf měří v ose po 0,10 metru, a díky četnosti měření lze zaznamenat více hodnot, které převyšují limitní hodnotu 5 milimetrů. Především díky četnosti měření se procentuální zastoupení nevyhovujících naměřených hodnot liší. Dalším nedostatkem v měření mohlo být vychýlení planografu od vyznačené jízdní stopy v průběhu měření. Jak měření latí, planografem, tak i přesná nivelace byly provedeny fyzicky na vyznačených osách jízdních stop vzdálených od sebe 1,50 metru. Postup měření jsem prováděla obdobně jako u fyzické latě. Měření virtuální čtyřmetrovou láť jsem provedla v profilech jízdních stop, ty byly vygenerované z povrchů modelovaných z dat. Data jsem získala statickým laserovým skenováním. Vzdálenost virtuálních jízdních stop musela být 1,40 metru a měření touto láť nemuselo probíhat v těch samých místech jako v předchozích dvou případech na reálném povrchu (vozovce). Vzdálenost skenovaných bodů byla v případě zkušebního úseku až 0,40 metru na obou koncích, z nich jsem vytvářela TIN povrch. Podle vizuální kontroly novějšího povrchu vozovky z roku 2013 nepředpokládám, že by 40% naměřených hodnot překročilo povolenou odchylku. Je pravděpodobné, že virtuální lať simulující měření nerovností na profilu vytvořeném z digitálního modelu terénu, s největší pravděpodobností nedosáhla optimálních výsledků.

Faktory ovlivňující přesnost virtuálního měření nerovností jsou následující:

- Tvar povrchu vozovky
- Rozměr skenované oblasti
- Vzdálenost skenované oblasti od stanoviště skeneru
- Poloha stanoviště skeneru nad měřeným terénem
- Úhel odrazu a dopadu měřícího paprsku
- Přesnost tvorby digitálního modelu terénu, resp. metoda tvorby TIN (velikost trojúhelníků)

Pro dosažení požadované hustoty bodů ve skenované oblasti je na délce 50 metrech zkušebního úseku žádoucí měřit ze dvou vhodně zvolených stanovisek. Měření z více stanovisek vyžaduje velmi přesné propojení horizontů (v desetinách milimetru). Dalším řešením je změna vertikálního úhlu dopadu a odrazu. Zvětšením horizontální vzdálenosti polohy multistanice od měřeného povrchu se zmenší úhel odrazu měřených bodů a rastr skenovaných bodů se více vyrovná - deformuje (zkosí) se méně a tak se síť skenovaných bodů zhustí a zpřesní. Přesnost skenování lze vylepšit taktéž užitím a přesným zaměřením vlíčovacích bodů. Dále by mohla zpřesnit skenování nižší rychlost skenování. Nižší rychlost eliminuje vznik šumu při měření. Obě oblasti zkušebních úseků byly skenovány s maximální možnou rychlostí skenování, tj. 30 000 bodů/s. V případě využití laserové skenování k měření podélných nerovností virtuální čtyřmetrovou latí, je nutné použití homogennějšího modelu (podélný řez se použitím vhodných algoritmů speciálně upravuje). Na to jsem v diplomové práci z časových důvodů neměla prostor.

Druhým vyhodnocujícím parametrem byl Mezinárodní index nerovnosti *IRI*, ten jsem vypočítala z hodnot získaných měření normovou metodou technická nivelace a ze statického laserového skenování. Měření nivelačním strojem jsem prováděla ve vyznačených osách jízdních stop, vzdálených od sebe 1,50 metru. Měření na virtuálních jízdních stopách jsem prováděla z vygenerovaného TIN povrchu na zvolených osách vzdálených 1,40 metru od sebe. Výpočet *IRI* jsem provedla v softwaru ProVAL, algoritmus pracuje na principu výpočtu podle ČSN 73 6175. Index *IRI* jsem stanovila po 20 metrech v jízdních stopách obou zkušebních úseků a poté jsem úseky vyhodnotila přiřazením klasifikačních stupňů. Z tabulky 12 je zřejmé, že po přiřazení klasifikačního stupně se hodnoty stanovené měření téměř neliší a zkušební úsek č. 1 odpovídá klasifikačnímu

stupni 3 v obou případech zkušebních metod měření. Jediné odchylky v přidělených klasifikačních stupních vykazuje zkušební úsek č. 2 v prvních 20 metrech levého jízdniho pásu. Pokud by se klasifikační stupeň přiřazoval hodnotám *IRI*, které by se stanovovaly třeba z pětimetrových úseků, výsledky by byly přesnější (nebyly by zprůměrované) a mohly by se lišit.

Tabulka 12: Zhodnocení použitých metod měření [vlastní zpracování]

Staničení na zkušebním úseku [m]	METODA MĚŘENÍ PŘESNOU NIVELACÍ							
	Klasifikační stupeň [-]				Hodnota IRI [m/km]			
	Zkušební úsek č. 1		Zkušební úsek č. 2		Zkušební úsek č. 1		Zkušební úsek č. 2	
	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa
0,00 - 20,00	3,893	3,623	2,036	1,749	3	3	2	2
20,00 - 40,00	3,414	3,105	3,286	7,167	3	3	3	5
Staničení na zkušebním úseku [m]	METODA MĚŘENÍ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ							
	Klasifikační stupeň [-]				Hodnota IRI [m/km]			
	Zkušební úsek č. 1		Zkušební úsek č. 2		Zkušební úsek č. 1		Zkušební úsek č. 2	
	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa	levá jízdni stopa	pravá jízdni stopa
0,00 - 20,00	3,506	4,086	1,838	1,948	3	3	1	2
20,00 - 40,00	3,251	3,194	3,220	7,282	3	3	3	5

Veškeré metody, které jsem použila pro vlastní měření, mají své výhody a nedostatky. V tabulce 13 jsem dle vlastního uvážení a odhadu uvedla parametry, které se jeví důležitými.

Tabulka 13: Zhodnocení použitých metod měření [vlastní zpracování]

hodnotící parametry	použité metody měření			
	lať	planograf	přesná nivelace	laserové skenování
celkový počet naměřených bodů	100	1 920	804	1 091 120
doba měření [min]	80	20	240	90
rychlost zpracování dat [-]	středně pomalá	rychlá	pomalá	velmi pomalá
náklady na měřicí vybavení [Kč]	orientačně 10 000 Kč	orientačně 50 000 Kč	orientačně 150 000 Kč	orientačně 1 250 000 Kč
míra bezpečnosti při měření [-]	nejméně bezpečné	velmi málo bezpečné	málo bezpečné	velmi bezpečné

Měření latí je v porovnání s laserovým skenováním méně přesné z hlediska určení četnosti měřených bodů na měřeném povrchu. Skener skenuje povrch kontinuálně, lať a další dva použité způsoby měření nerovností (planograf a přesná nivelace) řeší úlohu v jedné přímce (osově). Z laserového skenování dokážeme vyhodnotit nekonečně mnoho profilů, vhodné profily můžeme průměrovat a tak eliminovat lokální ojedinělé nerovnosti. Při měření latí musíme měřit každý profil zvlášť. Měřením latí dokážeme popsat pouze jednu maximální nerovnost (dvojamplitudu) na délce úseku 2 metry (čtyřmetrová lať se příkládá po dvou metrech v ose jízdni stopy). Nepřesnost měření může způsobit mechanické poškození latě nebo klínku. Měření s přesností 1 milimetr nemusí být dostačující. Navíc ruční odečítání hodnot, nepřesnost vlivem špatného přiložení klínku a zapisování naměřených hodnot při měření latí může být nepřesné a zdlouhavé. V případě laserového skenování tato chybovost

odpadá. Další nevýhodou měření latí je nízká bezpečnost při měření za provozu. Při laserovém skenování z vhodného stanoviska se nebezpečnost měření velmi snižuje a není nutné omezení dopravy. Maximální naměřitelná hodnota klínkem je limitovaná výškou klínku. Při laserovém skenování a odečítání maximálních nerovností na povrchu není maximální hodnota nerovnosti limitovaná. V závislosti na délce zkušebního úseku může být samotné měření latí poměrně pracné, avšak z hlediska finančního se jeví jako nejprůzračnější metoda měření. Pořizovací náklady zařízení jsou poměrně malé.

Měření planografem je oproti laserovému skenování opět liniové. Četnost měření je u planografu po 0,10 metrech, tudíž je to metoda měření z hlediska četnosti naměřených dat, v porovnání s měření latí, metoda přesnější. Rozsah měření nerovností je u planografu až 40 milimetrů, avšak v porovnání s laserovým skenováním je tato hodnota limitní, větší rozsah nerovností planograf nenaměří. Další nevýhodou měření planografem je nutnost omezení dopravy (rychlost měření nesmí překročit 4 km/h) a nebezpečí při měření za omezeného provozu. Měření planografem je podstatně rychlejší metoda v porovnání s měřením latí, avšak pro měření dlouhých úseků může být pomalou metodou a měřič ujeté vzdálenosti může být nepřesný. Velký vliv hraje taktéž opotřebení zařízení.

Měření přesnou nivelací je časově nejnáročnější metoda, avšak přesná - přesnost měření/čtení je na 0,1 milimetru. Jedná se o liniovou metodu měření podélných nerovností s četností měření po 0,25 metru. Chyby měření jsou nejčastěji způsobeny lidským faktorem, konkrétně figurantem, který nemusí držet měřící lať v ideálně svislé poloze, případně při absenci projektové dokumentace je nutné provedení výpočtu pro stanovení lomu nivelety potřebného pro další výpočet. Další chybou měření může být šířka latě. Lať v tomto případě nepostavíme přesně na měřený bod. Problémem může být i to, že bod měření může vyjít na lokální nerovnost či poruchu. Značnou nevýhodou může být pro investora finanční stránka. Niveláčnický přístroj je v porovnání s měřením latí nebo planografem cenově náročnější, avšak lze ho využít víceúčelově pro běžné úlohy v geodézii.

Statické laserové skenování je prostorová metoda měření. Z hlediska četnosti sběru dat, v porovnání se třemi použitými metodami, jedná se o velmi rychlou metodu měření. Výstup zpracovaných měření může mít podobu vizualizací.

Nevýhodou je, že povrch vytvořený z mračen bodů může být nepřesný. V případě menší hustoty naskenovaných bodů se vytvořený model povrchu TIN značně zkreslí a aproximuje,

důležitou roli v přesnosti skenování hraje mimo jiné odrazivost materiálu. V případě velmi vysoké hustoty sítě na krátkou vzdálenost stanoviště od měřeného povrchu a vlivem vysoké rychlosti skenování vzniká šum v měření. Z takového terénu nelze určit nerovnosti přesně a může být vhodnější volba měření metodami dle normy. Další nevýhodou jsou pořizovací náklady na měření a zpracování dat. Zpracování množství dat je časově náročné.

ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se v teoretické rovině zabývala metodami měření podélných nerovností, které stanovuje norma ČSN 73 6175 a alternativními metodami měření podélných nerovností. Z alternativních metod jsem se podrobněji zaměřila na statické laserové skenování. V praktické části jsem provedla vlastní experiment měření nerovností na dvou zvolených zkušebních úsecích v Technologickém areálu Univerzity Pardubice v městské části Pardubic Doubravice. K vlastnímu experimentu jsem použila jak měřící zařízení a přístroje, které uvádí norma ČSN 73 6175, tak zařízení pro měření nerovností alternativním způsobem měření.

Ze způsobů měření stanovených normou jsem pro vlastní měření použila měřící lať s měřičským klínkem, planograf a digitální nivelační přístroj Leica DNA03 pro přesnou nivelaci. Z alternativních způsobů zjišťování nejen podélných nerovností povrchu vozovky byla pro vlastní experiment použita multistanice Leica MS60 reprezentující statické laserové skenování.

Měřené parametry podélných nerovností vozovek, získané z metod měření stanovených normou a alternativně z multistanice metodou statického laserového skenování, byly dva - Mezinárodní index nerovnosti *IRI* a dvojamplituda nerovnosti *2a*. Ty jsem se snažila vzájemně porovnat. Dvojamplitudu nerovnosti bylo možné z laserového skenování stanovit, avšak s jistými omezeními.

Obecně se domnívám, že statické laserové skenování je nesrovnatelně přesnější než ostatní normové způsoby měření povrchových nerovností vozovek. To platí i pro moji diplomovou práci, až na některé nedostatky, které jsem popsala v kapitole 8.5. Kdybych měla k dispozici vhodnější software a především měla s touto problematikou větší zkušenosti, vyhodnotila bych výsledky statického laserového skenování určitě lépe.

Pokud bych měla možnost použít software na odstranění šumu, software kde půjde detailně vytvořit TIN povrch, měla bych k dispozici algoritmus na odečítání hodnot virtuální latě a v neposlední řadě bych měření prováděla pod vhodným úhlem a v kratších sekcích, byla by metoda statického laserového skenování v mé DP bezkonkurenčně nejvhodnější metodou měření nerovností vozovek z výše popsaných metod. Domnívám se, že tato metoda se jeví jako nejpresnější a nejvhodnější u měření kratších úseků (na kratší vzdálenosti). U úseků delších bych za nejvhodnější metodu považovala metodu, kterou jsem se ve své DP

nezabývala a tou je dynamické laserové skenování s kontinuální lokalizací stanoviště GPS a ověřováním identickými body. Tato metoda je samozřejmě nesrovnatelně finančně nákladnější než metody, kterými jsem se ve své DP zabývala.

POUŽITÁ LITERATURA

- **Seznam použitých norem a zákonů**

- [1] ČSN 73 6121. *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy*; Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019
- [2] ČSN 73 6175 *Měření nerovností povrchů vozovek*; Praha: Český normalizační institut, 2015
- [3] ČSN EN 13036-7 *Povrchové vlastnosti vozovek a letištních ploch – zkušební metody – Část 7: Měření jednotlivých nerovností povrchu vozovky – Zkouška latí*; Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009

- **Seznam použitých TP**

- [4] TP 82 *Katalog poruch netuhých vozovek*; Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2010
- [5] TP 87 *Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek*; Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2010
- [6] TP 170 *Navrhování vozovek pozemních komunikací*; Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2006, upravený dotisk

- **Seznam použité literatury a internetových zdrojů:**

- [7] POSPÍŠIL, J. *Současné trendy skenování ve stavebnictví a v příbuzných oborech*. Praha: ČVUT, 2007, 32s
- [8] KAŠPAR Milan, POSPÍŠIL Jiří, ŠTRONER Martin, KŘEMEN Tomáš a TEJKAL Miloš, *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*; Hradec Králové: Vega, 2003
- [9] RICHTER, Tomáš. *Metody měření podélné nerovnosti vozovek* [online]. Pardubice, 2014 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:
https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/57549/RichterT_MetodyMereni_PL_2014.pdf?sequence=3&isAllowed=n. Bakalářská práce. Digitální knihovna Univerzity Pardubice
- [10] TEST SERVIS, s.r.o. – článek „Měření nerovností vozovek“, digitální planograf, obrázek. [online]. [cit. 2021-04-27].
Dostupné z: <https://arrbsystems.com/products/hawkeye-1000-series/>

- [11] ASB-portal.cz. – článek „Nivelační přístroje pro stavebnictví“. [online]. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/stavebni-technika/nivelacni-pristroje-pro-stavebnictvi>
- [12] ARRB Systems – Pavement Management Intelligence, Digital laser profiler, Hawkeye. [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <http://www.testservis.cz/mereni-nerovnosti-vozovek>
- [13] KUDRNA, Jan. Diagnostika a management vozovek – provozní způsobilost povrchů vozovek. Brno, 2007 [cit. 2021-04-13].
- [14] VARS.cz - Tiskové prohlášení diagnostické vozidlo ARAN. [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <http://www.vars.cz/tiskove-prohlaseni-diagnosticke-vozidlo-aran>
- [15] AUTOREVUE.CZ – článek „Silnice zkontroluje speciální vůz. Vyhodnotí i nejlepší opravu.“ - obrázek měřicího vozu ARAN. [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: https://www.autorevue.cz/Client.Gallery/show.aspx?id_file=33449287&article=21559
- [16] STAVEBNÍ OBZOR, ročník 12 číslo 7/2003 [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.ckait.cz/>
- [17] Centre de recherches routières, – článek „APL – Mesure de l’uni longitudinal des chaussées“, obrázek. [online]. [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-apercu/apl-mesure-luni-longitudinal-chaussees>
- [18] Metody laserového skenování objektů dopravní infrastruktury a jejich blízkého okolí, certifikovaná metodika Ministerstva dopravy, Geovap, spol. s r.o., Centrum dopravního výzkumu, 2014. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Veda-a-vyzkum/Certifikovane-metodiky/Dopravni-stavitelstvi/Metody-laseroveho-skenovani-objektu-dopravni-infra/Metody-laseroveho-skenovani-objektu-dopravni-infrastruktury-a-jejich-blizkeho-okoli.pdf.aspx>
- [19] JANKŮ, Michal, STRYK Josef, BŘEZINA Ilja, Časopis Silnice Železnice – článek „Přehled metod používaných při hodnocení stavu pozemních komunikací.“ - obrázek měřicího vozu ARAN. [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/prehled-metod-pouzivanych-pri-hodnoceni-stavu-pozemnich-komunikaci/>

- [20] ŠARTNER, Jan. Analýza využití GOSLAM v praxi [online]. Praha, 2020.
[cit. 2021-05-15]. Dostupné z:
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/88571/F1-DP-2020-Sartner-Jan-Jan_Sartner_DP2020.pdf?sequence=-1&isAllowed=y, Digitální knihovna ČVUT
- [21] Exact Control System a.s. – článek „Laserové skenování“ [online].[cit. 2021-05-16].
Dostupné z: <https://www.teamexact.cz/cs/laserove-skenovani-wp000020.html>
- [22] KŘEMEN, Tomáš. Laserové skenování 1. přednáška [online]. ČVUT
[cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/~kremen/LSK_1.pdf
- [23] Geodézie Ledec nad Sázavou – článek „Laserové skenování“ [online].
[cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.geodezieledec.cz/cs/laserove-skenovani/>
- [24] CIBULKA, Miloš. Fotogrammetrie a laserové skenování – přednáška [online].
Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita [cit. 2021-05-20]. Dostupné z:
http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/geodezie/geodezie_2018/fotogrammetrie.pdf
- [25] TOP GÉO – Ingénierie Géomatique. „SERVICES EN PHOTOGRAMMÉTRIE“ –
obrázek [online]. [cit. 2021-05-23].
Dostupné z: <http://www.topgeo.net/service/photogrammetrie>
- [26] IBRAHIM, Sherif. Detection of Road Furniture from Mobile Terrestrial Laser
Scanning Point Clouds [online]. University of Calgary, Calgary, AB, 2013. [cit. 2021-
05-19]. Dostupné z: <https://prism.ucalgary.ca/handle/11023/567?show=full>
- [27] ŠTRONER, Martin. Přehled terestrických skenovacích systémů – přednáška [online].
Katedra speciální geodézie. FAST VUT [cit. 2021-05-20]. Dostupné z:
<https://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/ostatni/ylss.php>
- [28] CARLSON, Podzemní laserové skenery C-ALS [online].[cit. 2021-05-16]. Dostupné
z: <https://www.carlsonsw.com/product/carlson-c-als>
- [29] Leica Geosystems AG, Mobilní systémy a mapování, Informace k Aibot leteckému
systému – obrázek. [online][cit. 2021-05-21]. Dostupné z <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/mobilni-systemy-a-mapovani/aibot>
- [30] SLÁMA, Jiří. Časopis Silnice Železnice – článek „Analýza nerovností povrchu
vozovky z mračna bodů.“ [online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/analyza-nerovnosti-povrchu-vozovky-z-mracna-bodu/>
- [31] T&S ADWISE, Laserové skenování - Metodika pro využití technologie na projektech
[online]. [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <http://3dck.cz>

- [32] Geosphere4d Limited, 3D laser scanning [online]. [cit. 2021-05-22].
Dostupné z: <https://geosphere4d.com/>
- [33] MIKULEC, Roman. Systémové srovnání měření adheze vozovky. [online].
Brno, 2015 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103401
- [34] GEFOS a.s., Mobilní systémy, Informace k systému LLeica Pegasus Two Ultimate [online]. [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/mobilni-systemy-a-mapovani/mobilni-systemy>
- [35] Teledyne Optech, products – mobile survey, Lynx HS600. [online]. [cit. 2021-06-11].
Dostupné z: <http://www.teledyneoptech.com/en/products/mobile-survey/lynx-hs600/>
- [36] RIEGL Mobile Mapping Systems, products – mobile scanning, Riegl VMX-2HA. . [online]. [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: <http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/produktdetail/product/scanner/56/>
- [37] GEOVAP, s.r.o., Mobilní laserové systémy, mobilní mapovací systémy [online]. [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: <https://www.geovap.com/cs/mobilni-mapovani/vice-o-mobilnim-mapovani>
- [38] Mapy.cz – letecká mapa [online]. [cit. 2021-06-26]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [39] Planograf 6.705 4m – manuál poskytovatele (*.pdf)
- [40] Software UniProt 32 – software a manuál výrobce (*.pdf)
- [41] GEFOS a.s., Geodetický software Leica. [online]. [cit. 2021-07-03].
Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/software>
- [42] Nivelační přístroj Leica DNA 03 – manuál výrobce (tištěná forma)
- [43] Leica MS60 Multistanice – manuál výrobce (tištěná forma)
- [44] GEFOS a.s., článek „Multistanice Leica MS60“ [online]. [cit. 2021-05-24].
Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/geodeticke-pristroje/totalni-stanice/ms60-multistanice>
- [45] Software ProVAL – software a manuál výrobce [online]. [cit. 2021-07-02].
Dostupné z: <https://www.roadprofile.com/>
- [46] VARS BRNO a.s. – CleveRA Car – multifunkční diagnostické vozidlo [online]. [cit. 2021-06-27]. Dostupné z: [Clevvars.cz/clevera-car-zakladni-informace-o-multifunkcnim-vozidle](https://clevars.cz/clevera-car-zakladni-informace-o-multifunkcnim-vozidle)

- **Seznam použitého softwaru:**
 - Adobe Acrobat Reader DC
 - AutoCAD Civil 3D 2018, Autodesk
 - Atlas DMT
 - Infinity, Leica
 - Captivate, Leica
 - Microsoft Office 2013 – Word, Excel
 - Microsoft Windows – Poznámkový blok
 - ProVAL
 - UniProt 32

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A – Měření čtyřmetrovou latí – naměřené hodnoty

PŘÍLOHA B – Laserové skenování – simulace měření latí – naměřené hodnoty

PŘÍLOHA C – Měření planografem – naměřené hodnoty

PŘÍLOHA D – Měření planografem – hodnoty převyšující limitní hodnotu 5 mm

PŘÍLOHA E – Měření přesnou nivelací – naměřené hodnoty

PŘÍLOHA A – Měření čtyřmetrovou latí – naměřené hodnoty

Červeně označené hodnoty v tabulce 14 jsou hodnoty nerovností převyšující dovolenou odchylku 5 milimetrů.

Tabulka 14: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti povrchů vozovek [vlastní zpracování]

staničení latě [m]	naměřená maximální nerovnost - zkušební úsek č. 1		naměřená maximální nerovnost - zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]
0-4	3 mm	3 mm	1 mm	3 mm
2-6	4 mm	4 mm	2 mm	4 mm
4-8	1 mm	2 mm	2 mm	1 mm
6-10	7 mm	5 mm	2 mm	2 mm
8-12	3 mm	2 mm	2 mm	1 mm
10-14	3 mm	2 mm	2 mm	2 mm
12-16	3 mm	2 mm	1 mm	3 mm
14-18	2 mm	2 mm	3 mm	3 mm
16-20	3 mm	2 mm	1 mm	2 mm
18-22	2 mm	2 mm	2 mm	1 mm
20-24	4 mm	4 mm	2 mm	1 mm
22-26	3 mm	2 mm	2 mm	3 mm
24-28	2 mm	1 mm	1 mm	1 mm
26-30	8 mm	4 mm	3 mm	3 mm
28-32	8 mm	2 mm	3 mm	10 mm
30-34	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm
32-36	2 mm	3 mm	1 mm	3 mm
34-38	2 mm	3 mm	5 mm	3 mm
36-40	1 mm	1 mm	2 mm	neměřitelné
38-42	0 mm	3 mm	2 mm	3 mm
40-44	5 mm	5 mm	1 mm	2 mm
42-46	5 mm	0 mm	2 mm	3 mm
44-48	4 mm	4 mm	2 mm	0 mm
46-50	3 mm	6 mm	2 mm	1 mm
48-50	2 mm	0 mm	4 mm	3 mm

PŘÍLOHA B – Laserové skenování – simulace měření latí - naměřené hodnoty

V tabulce 15 jsou uvedeny hodnoty nerovností stanovené simulací měření podélných nerovností latí.

Tabulka 15: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti – laserové skenování [vlastní zpracování]

virtuální lat' staničení [m]	naměřená maximální nerovnost - zkušební úsek č. 1		naměřená maximální nerovnost - zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]
0-4	4 mm	1 mm	3 mm	5 mm
2-6	5 mm	7 mm	4 mm	5 mm
4-8	3 mm	7 mm	3 mm	2 mm
6-10	7 mm	8 mm	3 mm	2 mm
8-12	7 mm	7 mm	5 mm	2 mm
10-14	5 mm	5 mm	5 mm	6 mm
12-16	6 mm	6 mm	4 mm	4 mm
14-18	2 mm	4 mm	3 mm	4 mm
16-20	4 mm	6 mm	3 mm	4 mm
18-22	4 mm	4 mm	4 mm	2 mm
20-24	4 mm	3 mm	4 mm	4 mm
22-26	5 mm	4 mm	3 mm	4 mm
24-28	12 mm	7 mm	1 mm	1 mm
26-30	7 mm	6 mm	5 mm	2 mm
28-32	5 mm	10 mm	4 mm	20 mm
30-34	7 mm	4 mm	3 mm	3 mm
32-36	5 mm	4 mm	3 mm	2 mm
34-38	4 mm	3 mm	6 mm	2 mm
36-40	2 mm	3 mm	4 mm	29 mm
38-42	5 mm	4 mm	3 mm	2 mm
40-44	7 mm	4 mm	3 mm	4 mm
42-46	5 mm	3 mm	3 mm	2 mm
44-48	3 mm	3 mm	4 mm	4 mm
46-50	5 mm	7 mm	4 mm	4 mm
48-50	2 mm	2 mm	1 mm	1 mm

PŘÍLOHA C – Měření planografem – naměřené hodnoty

Tabulka 16 na stranách 121 - 131 zobrazuje hodnoty nerovností všech čtyř jízdních stop zkušebních úseků č. 1 a č. 2. Červeně označené hodnoty v tabulce jsou hodnoty nerovností převyšující dovolenou odchylku 5 milimetrů.

Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf [vlastní zpracování]

staničení nerovnosti v úseku [mm]	naměřená nerovnost zkušební úsek č. 1		naměřená nerovnost zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]
0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
0,10	0,0	0,0	0,0	0,7
0,21	0,0	0,0	0,0	0,6
0,31	0,0	0,2	0,0	0,1
0,42	0,0	0,2	0,7	0,0
0,52	0,4	0,0	0,1	0,0
0,63	0,7	0,0	0,1	0,0
0,73	0,9	0,0	0,2	0,0
0,84	1,4	0,4	0,1	0,0
0,94	1,8	1,3	0,5	0,0
1,05	1,7	1,6	0,5	0,0
1,15	1,6	1,5	0,6	0,0
1,26	1,6	1,3	0,2	0,0
1,36	1,8	2,0	0,1	0,0
1,46	2,2	2,4	0,0	0,0
1,57	2,5	2,7	0,0	0,0
1,67	2,0	2,8	0,0	0,8
1,78	2,3	3,3	0,0	0,0
1,88	2,2	3,5	0,0	0,9
1,99	2,3	3,4	0,0	1,3
2,09	2,4	3,0	0,0	1,5
2,20	2,5	2,4	0,0	2,4
2,30	2,6	2,3	0,0	2,5
2,41	2,0	1,9	0,0	1,8
2,51	1,6	1,3	0,0	1,8
2,62	1,1	1,4	0,0	1,5
2,72	0,9	1,6	0,1	1,1
2,82	0,0	1,2	0,9	2,1
2,93	0,4	0,4	0,9	1,6

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

3,03	0,0	0,0	0,8	1,6
3,14	0,0	0,0	0,7	1,1
3,24	0,0	0,0	1,1	1,8
3,35	0,0	0,0	1,6	1,4
3,45	0,6	0,1	1,3	1,5
3,56	0,7	0,0	0,6	3,7
3,66	1,2	0,4	0,0	0,6
3,77	2,0	1,1	0,0	0,0
3,87	2,4	1,8	0,0	0,0
3,97	3,5	2,4	0,0	0,2
4,08	3,6	2,7	0,2	0,0
4,18	3,8	3,4	0,3	0,0
4,29	4,0	4,0	0,0	0,0
4,39	4,6	4,7	0,0	0,0
4,50	3,7	4,6	0,0	0,0
4,60	3,8	4,6	0,2	0,4
4,71	2,5	4,8	0,0	0,4
4,81	0,9	5,2	0,0	0,4
4,92	2,9	5,1	0,0	0,4
5,02	3,4	5,1	0,0	0,8
5,13	3,0	4,6	0,0	0,5
5,23	2,2	4,2	0,0	0,1
5,33	1,8	3,9	0,0	0,5
5,44	1,6	3,9	0,0	0,2
5,54	1,3	3,4	0,0	0,1
5,65	1,1	2,7	0,0	0,0
5,75	0,4	2,0	0,2	0,0
5,86	0,4	1,8	0,1	0,0
5,96	0,2	1,4	0,4	0,0
6,07	0,0	0,0	0,2	0,1
6,17	0,0	0,2	1,0	0,0
6,28	0,0	0,7	1,4	0,0
6,38	0,0	0,4	1,6	0,0
6,49	0,0	0,2	2,0	0,4
6,59	0,0	0,0	2,8	0,0
6,69	0,0	0,2	3,0	0,3
6,80	0,0	0,2	3,2	0,6
6,90	0,0	0,3	3,6	1,5
7,01	0,0	0,2	3,2	1,4
7,11	0,0	0,4	3,9	1,5
7,22	0,0	0,0	3,9	1,8
7,32	0,0	0,0	3,4	2,2
7,43	0,0	0,0	3,5	2,5
7,53	0,0	0,0	3,4	3,1
7,64	0,0	0,0	3,3	2,4

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

7,74	0,0	0,0	3,2	2,3
7,85	0,0	0,0	2,6	1,8
7,95	0,1	0,6	1,9	1,4
8,05	1,6	1,0	1,5	1,3
8,16	3,9	2,0	0,5	1,1
8,26	4,8	2,9	0,6	1,1
8,37	5,5	4,1	0,4	0,6
8,47	6,7	4,8	0,1	0,2
8,58	6,8	5,1	0,0	0,4
8,68	7,1	5,4	0,0	0,4
8,79	7,1	5,7	0,0	0,6
8,89	7,4	5,8	0,0	0,2
9,00	7,2	6,0	0,0	0,0
9,10	6,9	6,0	0,0	0,0
9,20	6,4	5,8	0,0	0,0
9,31	6,1	5,5	0,0	0,0
9,41	5,3	5,3	0,0	0,0
9,52	4,7	4,4	0,0	0,0
9,62	4,4	4,2	0,0	0,1
9,73	3,7	3,7	0,0	0,0
9,83	3,1	2,8	0,0	0,0
9,94	2,7	2,0	0,1	0,0
10,04	2,2	1,6	0,1	0,0
10,15	1,8	0,8	0,8	0,0
10,25	1,5	0,7	0,9	0,5
10,36	1,4	0,4	0,9	0,5
10,46	0,6	0,7	0,6	0,6
10,56	1,6	1,1	0,4	0,4
10,67	2,0	1,1	0,5	0,7
10,77	2,3	1,3	0,8	0,9
10,88	2,4	1,6	1,3	1,4
10,98	2,5	2,2	1,7	1,8
11,09	3,7	2,5	1,8	1,8
11,19	3,7	2,8	1,3	2,3
11,30	3,7	3,0	2,2	1,8
11,40	3,5	2,7	2,5	2,0
11,51	4,0	2,3	1,1	2,0
11,61	4,3	2,3	0,6	2,4
11,72	4,5	2,5	1,0	3,1
11,82	4,2	2,8	0,8	2,3
11,92	4,1	2,7	0,0	1,5
12,03	3,7	2,5	0,2	1,2
12,13	3,5	2,3	0,0	1,2
12,24	3,7	2,0	0,0	0,7
12,34	3,7	1,8	0,2	0,4

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

12,45	4,1	2,0	0,6	0,2
12,55	4,4	1,9	0,6	0,1
12,66	3,6	2,1	0,0	0,1
12,76	3,4	2,3	0,0	0,0
12,87	3,6	2,5	0,0	0,0
12,97	3,7	2,3	0,0	0,0
13,08	3,9	2,3	0,0	0,0
13,18	3,9	2,6	0,0	0,0
13,28	4,1	2,7	0,0	0,0
13,39	3,9	2,7	0,0	0,0
13,49	3,9	2,7	0,3	0,2
13,60	3,2	2,7	1,2	0,7
13,70	3,1	2,3	1,5	0,9
13,81	3,1	2,0	1,7	0,6
13,91	1,8	2,5	1,9	0,0
14,02	2,0	2,5	1,8	1,3
14,12	2,3	2,4	1,5	1,9
14,23	2,3	2,4	1,4	2,2
14,33	2,1	2,0	1,3	1,7
14,43	1,7	2,1	1,1	1,6
14,54	0,7	2,1	1,2	1,8
14,64	0,6	1,6	1,4	2,0
14,75	0,6	1,2	1,0	2,0
14,85	0,1	0,9	1,8	2,0
14,96	0,0	0,6	2,0	2,3
15,06	0,0	0,2	2,2	2,0
15,17	0,0	0,0	2,0	1,7
15,27	0,0	0,0	1,8	1,1
15,38	0,0	0,0	1,8	0,9
15,48	0,1	0,0	1,2	1,1
15,59	0,1	0,0	0,8	1,8
15,69	0,6	0,0	0,0	0,9
15,79	0,4	0,0	0,0	0,0
15,90	0,2	0,0	0,0	0,0
16,00	0,2	0,4	0,6	0,0
16,11	0,4	0,9	1,3	0,4
16,21	0,7	1,3	0,3	0,1
16,32	0,9	1,3	0,0	0,0
16,42	1,1	1,3	0,2	0,0
16,53	1,0	1,3	0,4	1,0
16,63	0,8	1,3	0,2	0,6
16,74	1,5	1,2	0,0	0,6
16,84	1,6	1,1	0,0	0,5
16,95	1,8	1,4	0,0	0,4
17,05	2,0	1,3	0,0	1,8

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

17,15	2,5	1,5	0,0	2,3
17,26	2,7	1,4	0,0	2,0
17,36	1,8	2,0	0,0	1,8
17,47	3,0	3,0	0,0	1,8
17,57	2,5	3,6	0,0	1,8
17,68	4,1	3,4	0,0	0,9
17,78	4,2	2,8	0,0	0,9
17,89	4,3	2,2	0,0	0,7
17,99	4,0	1,8	0,0	0,6
18,10	3,2	1,8	0,0	0,0
18,20	3,2	2,3	0,0	0,4
18,31	3,4	2,3	0,0	0,5
18,41	3,0	2,3	0,1	0,3
18,51	2,5	2,5	0,0	0,2
18,62	2,7	2,4	0,0	0,2
18,72	2,7	2,6	0,9	0,2
18,83	2,2	2,8	1,1	0,0
18,93	1,7	2,9	1,4	0,0
19,04	0,5	3,0	1,6	0,0
19,14	0,0	3,3	1,5	0,2
19,25	0,0	2,7	1,6	0,3
19,35	0,3	2,3	1,9	0,6
19,46	0,2	1,6	1,8	0,6
19,56	0,4	1,3	1,4	0,6
19,66	0,6	1,7	1,4	1,3
19,77	0,5	1,4	1,8	1,4
19,87	0,2	1,1	2,0	1,1
19,98	0,0	0,6	1,4	0,6
20,08	0,0	0,5	1,8	0,9
20,19	0,0	0,2	1,7	1,3
20,29	0,0	0,0	2,7	1,9
20,40	0,0	0,0	3,2	1,7
20,50	0,0	0,0	2,7	1,7
20,61	0,0	0,5	2,3	1,8
20,71	0,0	0,4	2,7	0,8
20,82	0,2	0,0	2,6	1,5
20,92	0,5	0,0	2,8	1,5
21,02	0,6	0,0	2,5	1,2
21,13	0,4	0,7	3,2	1,3
21,23	0,3	0,9	3,2	1,1
21,34	0,0	0,7	3,2	1,2
21,44	0,0	0,6	3,1	1,5
21,55	0,9	0,8	2,7	1,8
21,65	1,0	1,6	2,8	1,6
21,76	0,0	2,0	2,9	0,6

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

21,86	0,9	2,3	3,0	1,0
21,97	2,0	2,3	3,4	1,3
22,07	3,0	2,2	2,6	1,3
22,18	3,1	2,8	2,5	1,0
22,28	3,9	3,3	2,0	0,0
22,38	4,8	4,0	1,7	0,2
22,49	4,8	5,1	2,0	0,2
22,59	5,1	5,6	1,5	1,1
22,70	5,1	5,0	1,1	0,5
22,80	5,3	5,1	0,9	0,0
22,91	5,6	4,9	1,0	0,0
23,01	5,6	4,4	1,5	0,4
23,12	5,6	4,1	0,8	0,3
23,22	5,3	3,3	0,9	0,0
23,33	4,8	3,6	1,3	0,0
23,43	4,4	3,7	1,3	0,0
23,53	3,9	3,4	1,3	0,7
23,64	3,9	2,8	1,4	0,9
23,74	3,6	3,3	1,8	0,8
23,85	3,3	3,9	1,7	0,6
23,95	2,5	3,4	1,3	1,4
24,06	2,5	2,9	1,3	1,6
24,16	2,0	2,7	0,8	1,1
24,27	1,7	2,5	0,4	0,7
24,37	0,4	0,6	0,0	0,1
24,48	0,8	0,0	0,0	0,2
24,58	0,4	0,0	0,0	0,2
24,69	0,0	0,0	0,0	0,0
24,79	0,0	0,6	0,2	0,0
24,89	0,0	0,4	0,1	0,0
25,00	0,0	0,0	0,0	0,0
25,10	0,0	0,0	0,3	0,1
25,21	0,5	0,0	0,3	0,2
25,31	1,2	0,0	0,4	0,5
25,42	2,6	0,2	0,1	0,5
25,52	4,1	2,1	0,4	0,2
25,63	3,9	3,4	0,9	0,0
25,73	3,4	3,7	1,0	0,0
25,84	3,4	5,1	1,0	0,0
25,94	4,7	7,0	0,2	0,0
26,05	4,8	7,8	0,0	0,0
26,15	5,5	9,2	0,6	0,0
26,25	6,1	9,7	0,6	0,0
26,36	7,0	9,6	0,4	0,2
26,46	7,7	9,0	0,0	0,0

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

26,57	7,2	8,8	0,0	0,0
26,67	5,1	9,0	0,2	0,0
26,78	5,1	8,8	0,2	0,0
26,88	6,0	9,1	1,1	0,0
26,99	1,4	9,0	1,1	0,0
27,09	0,0	8,3	0,8	0,4
27,20	0,0	8,1	2,5	0,9
27,30	0,0	8,3	3,2	1,3
27,41	0,5	7,4	3,2	1,6
27,51	0,9	5,0	3,4	0,6
27,61	0,9	4,0	3,3	0,7
27,72	0,2	2,9	0,0	0,6
27,82	0,5	2,0	0,0	1,2
27,93	0,0	0,6	0,0	0,6
28,03	0,0	0,1	0,0	0,4
28,14	5,5	0,0	0,3	0,2
28,24	6,6	0,0	1,0	0,2
28,35	7,5	0,0	0,8	0,0
28,45	8,4	0,0	1,1	0,0
28,56	8,1	0,8	1,4	0,0
28,66	7,2	1,1	0,9	0,0
28,76	5,9	0,0	0,6	0,4
28,87	6,2	0,0	1,1	0,5
28,97	4,7	0,0	1,0	1,8
29,08	4,6	0,0	0,9	1,1
29,18	4,8	0,2	0,0	1,3
29,29	3,6	0,1	0,7	2,2
29,39	2,7	0,3	1,3	3,7
29,50	2,7	0,4	3,0	3,7
29,60	3,2	0,6	3,0	6,2
29,71	2,4	0,9	3,1	7,3
29,81	1,0	0,8	3,4	7,6
29,92	1,4	0,9	3,2	9,0
30,02	1,1	0,8	3,9	10,8
30,12	0,2	1,1	4,0	11,3
30,23	0,0	1,3	4,7	13,0
30,33	0,0	0,7	5,0	13,9
30,44	0,0	1,4	4,6	14,8
30,54	0,0	2,2	3,7	16,7
30,65	0,0	2,6	3,9	11,9
30,75	0,2	2,5	4,2	3,9
30,86	0,4	2,6	4,1	3,5
30,96	0,5	2,9	4,3	2,3
31,07	0,9	2,5	3,0	2,9
31,17	0,9	2,1	2,7	1,8

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

31,28	1,0	2,2	2,4	1,8
31,38	1,3	2,7	2,0	1,7
31,48	1,4	2,6	1,5	0,4
31,59	1,3	2,4	1,3	0,0
31,69	1,4	2,3	1,3	0,0
31,80	1,5	2,3	0,9	0,2
31,90	1,6	2,3	0,5	0,3
32,01	1,3	2,6	0,2	0,2
32,11	1,9	2,6	0,0	0,0
32,22	2,0	2,8	0,0	0,0
32,32	1,8	2,7	0,0	0,0
32,43	1,8	2,7	0,0	0,0
32,53	1,6	2,6	0,0	0,3
32,64	1,5	2,5	0,0	0,4
32,74	1,6	2,3	0,0	1,5
32,84	1,6	2,7	0,4	2,2
32,95	1,9	3,0	0,6	0,9
33,05	1,8	3,0	0,8	0,0
33,16	1,3	3,4	0,8	0,0
33,26	1,2	3,4	0,4	0,0
33,37	1,2	2,9	0,3	0,4
33,47	1,3	2,6	1,9	0,0
33,58	1,1	2,8	2,7	0,4
33,68	1,3	2,7	2,5	0,0
33,79	1,3	2,9	1,4	1,6
33,89	1,3	3,1	0,9	1,6
33,99	1,4	2,0	2,1	0,8
34,10	1,3	1,1	2,5	1,3
34,20	1,6	1,3	0,0	1,3
34,31	1,7	1,8	0,0	4,7
34,41	1,8	1,8	0,0	6,9
34,52	1,8	1,6	0,0	6,9
34,62	2,3	1,3	0,1	7,9
34,73	2,1	1,8	0,0	8,8
34,83	1,8	1,6	0,0	10,6
34,94	1,8	1,6	0,0	9,5
35,04	1,7	1,4	0,0	5,8
35,15	1,7	1,3	0,2	7,3
35,25	1,8	1,4	0,0	7,1
35,35	1,5	1,8	0,0	6,1
35,46	1,5	2,0	0,4	5,7
35,56	1,8	1,9	0,4	5,1
35,67	1,8	2,2	1,1	3,2
35,77	1,8	2,7	1,0	3,0
35,88	1,8	2,7	1,2	1,3

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

35,98	1,8	2,7	2,3	1,1
36,09	1,9	3,0	3,1	3,9
36,19	1,9	3,0	4,8	3,5
36,30	1,8	2,4	5,6	0,0
36,40	1,8	2,5	5,8	0,0
36,51	1,1	2,5	5,8	0,0
36,61	1,2	2,2	5,8	0,0
36,71	1,2	2,3	5,8	1,6
36,82	1,3	2,0	6,0	3,2
36,92	0,7	1,6	6,3	9,2
37,03	0,7	1,5	6,2	16,7
37,13	0,7	1,2	5,8	20,9
37,24	0,6	1,0	4,9	23,2
37,34	0,6	1,0	4,9	24,4
37,45	0,5	0,2	4,7	1,0
37,55	0,0	0,0	4,7	0,8
37,66	0,0	0,0	4,7	20,4
37,76	0,0	0,0	4,6	19,2
37,87	0,0	0,0	4,1	16,7
37,97	0,0	0,2	3,1	15,2
38,07	0,2	0,0	2,5	15,8
38,18	0,2	1,3	2,0	16,4
38,28	0,1	1,6	0,9	20,4
38,39	0,0	2,0	1,1	20,6
38,49	0,0	1,9	0,6	17,8
38,60	0,6	2,0	0,2	11,7
38,70	0,9	1,8	0,3	10,5
38,81	1,0	1,8	0,5	6,0
38,91	1,0	1,9	1,1	2,3
39,02	1,3	1,6	1,6	0,0
39,12	2,0	1,6	1,8	0,0
39,22	2,5	1,7	1,7	0,0
39,33	2,9	1,9	1,3	0,3
39,43	3,4	2,3	0,9	0,0
39,54	3,8	2,5	0,4	0,0
39,64	4,2	3,0	0,1	0,0
39,75	4,4	3,2	0,2	0,2
39,85	5,3	3,5	0,6	0,2
39,96	6,1	4,0	0,0	0,0
40,06	6,4	4,5	0,0	0,0
40,17	6,9	5,1	0,0	0,0
40,27	7,1	5,4	0,4	0,0
40,38	7,4	5,1	0,7	0,0
40,48	7,8	5,6	0,2	0,0
40,58	8,1	6,0	0,0	0,0

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

40,69	8,0	6,9	0,0	0,2
40,79	7,8	7,0	0,0	0,2
40,90	8,0	7,4	0,3	0,0
41,00	7,4	7,3	0,0	0,0
41,11	6,7	7,3	0,0	0,0
41,21	6,5	7,2	0,0	0,0
41,32	6,0	7,4	0,0	0,0
41,42	5,5	7,1	0,0	0,4
41,53	4,8	6,5	0,0	0,3
41,63	4,4	5,8	0,0	0,0
41,74	4,1	5,5	0,0	0,2
41,84	2,0	4,6	0,0	0,3
41,94	1,2	3,0	0,6	0,6
42,05	0,2	1,7	0,6	0,6
42,15	0,0	0,8	0,7	0,6
42,26	0,0	0,0	0,0	1,1
42,36	0,0	0,0	0,7	0,9
42,47	0,0	0,0	0,9	1,3
42,57	0,0	0,0	0,6	1,4
42,68	0,0	0,3	0,5	0,0
42,78	0,0	0,1	1,9	0,0
42,89	0,0	0,0	2,3	0,2
42,99	0,0	0,2	3,2	0,7
43,10	0,0	0,9	3,6	0,8
43,20	0,1	1,0	2,7	1,4
43,30	0,0	0,0	4,3	1,8
43,41	0,0	0,0	4,4	2,4
43,51	0,0	0,0	4,6	2,6
43,62	0,0	0,0	5,3	2,7
43,72	0,0	0,0	5,1	2,8
43,83	0,2	0,0	4,6	2,9
43,93	0,3	0,0	4,1	3,2
44,04	0,4	0,4	3,7	3,1
44,14	0,6	1,0	3,0	3,2
44,25	0,9	1,6	3,3	3,2
44,35	0,9	1,6	3,7	2,6
44,46	1,2	1,4	2,5	2,7
44,56	1,7	1,8	1,6	2,3
44,66	1,8	2,4	1,3	2,0
44,77	1,8	2,5	0,1	1,9
44,87	1,8	2,3	0,1	2,1
44,98	1,3	3,0	0,0	1,4
45,08	1,3	3,2	0,0	1,0
45,19	1,4	3,0	0,0	1,6
45,29	1,1	3,3	0,1	0,8

PŘÍLOHA C, Tabulka 16: Naměřené hodnoty podélné nerovnosti - planograf

45,40	0,7	3,9	0,1	0,3
45,50	0,4	4,3	0,2	0,4
45,61	0,2	4,0	0,3	0,3
45,71	0,1	3,4	0,6	0,5
45,81	0,0	4,3	0,4	0,6
45,92	0,0	4,4	0,5	0,9
46,02	0,0	1,1	0,8	0,9
46,13	0,0	0,1	1,7	1,7
46,23	0,0	0,0	1,6	1,8
46,34	0,0	0,0	1,7	1,8
46,44	0,0	0,0	1,8	2,3
46,55	0,0	0,4	1,7	2,3
46,65	0,0	1,1	1,9	2,7
46,76	0,2	1,0	1,8	2,3
46,86	0,6	0,6	1,8	1,1
46,97	0,9	0,8	2,0	2,0
47,07	1,1	1,6	2,0	2,0
47,17	1,8	1,6	2,2	2,2
47,28	2,0	1,8	2,0	2,0
47,38	2,3	2,5	1,1	2,5
47,49	2,8	3,2	0,9	2,1
47,59	3,5	3,4	0,4	2,0
47,70	3,5	3,7	0,6	1,3
47,80	3,3	4,1	0,9	1,4
47,91	3,3	4,8	0,8	1,2
48,01	3,5	5,2	0,0	1,1
48,12	3,5	5,1	0,0	0,1
48,22	3,5	5,3	0,0	1,5
48,33	3,4	5,5	0,8	0,5
48,43	4,1	5,3	1,7	0,7
48,53	4,4	4,8	1,3	0,9
48,64	4,2	4,5	1,5	0,1
48,74	3,7	4,1	2,0	0,6
48,85	3,7	3,9	2,6	0,4
48,95	4,1	4,1	2,0	0,5
49,06	4,8	4,6	1,8	1,8
49,16	5,1	4,5	2,2	1,6
49,27	5,8	4,2	3,1	1,4
49,37	4,6	3,3	3,5	2,3
49,48	4,6	3,1	4,4	2,1
49,58	4,1	2,3	3,9	2,5
49,68	5,3	1,4	4,0	2,6
49,79	6,3	0,9	3,5	2,6
49,89	6,3	1,1	3,0	3,4
50,00	0,0	0,7	0,0	0,0

PŘÍLOHA D – Měření planografem – hodnoty převyšující limitní hodnotu 5 mm

V tabulce 17 jsou uvedeny hodnoty nerovností převyšující dovolenou odchylku 5 milimetrů.

Tabulka 17: Podélné nerovnosti převyšující 5 mm - planograf [vlastní zpracování]

pořadové číslo	zkušební úsek č. 1		zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]	levá jízdní stopa [mm]	pravá jízdní stopa [mm]
Σ počet hodnot	55	52	11	40
1	5,5	5,2	5,6	6,2
2	6,7	5,1	5,8	7,3
3	6,8	5,1	5,8	7,6
4	7,1	5,1	5,8	9,0
5	7,1	5,4	5,8	10,8
6	7,4	5,7	6,0	11,3
7	7,2	5,8	6,3	13,0
8	6,9	6,0	6,2	13,9
9	6,4	6,0	5,8	14,8
10	6,1	5,8	5,3	16,7
11	5,3	5,5	5,1	11,9
12	5,1	5,3	-	6,9
13	5,1	5,1	-	6,9
14	5,3	5,6	-	7,9
15	5,6	5,1	-	8,8
16	5,6	5,1	-	10,6
17	5,6	7,0	-	9,5
18	5,3	7,8	-	5,8
19	5,5	9,2	-	7,3
20	6,1	9,7	-	7,1
21	7,0	9,6	-	6,1
22	7,7	9,0	-	5,7
23	7,2	8,8	-	5,1
24	5,1	9,0	-	9,2
25	5,1	8,8	-	16,7
26	6,0	9,1	-	20,9
27	5,5	9,0	-	23,2
28	6,6	8,3	-	24,4
29	7,5	8,1	-	20,4
30	8,4	8,3	-	19,2
31	8,1	7,4	-	16,7
32	7,2	5,1	-	15,2
33	5,9	5,4	-	15,8
34	6,2	5,1	-	16,4
35	5,3	5,6	-	20,4
36	6,1	6,0	-	20,6
37	6,4	6,9	-	17,8
38	6,9	7,0	-	11,7
39	7,1	7,4	-	10,5
40	7,4	7,3	-	6,0
41	7,8	7,3	-	-
42	8,1	7,2	-	-
43	8,0	7,4	-	-
44	7,8	7,1	-	-
45	8,0	6,5	-	-
46	7,4	5,8	-	-
47	6,7	5,5	-	-
48	6,5	5,2	-	-
49	6,0	5,1	-	-
50	5,5	5,3	-	-
51	5,1	5,5	-	-
52	5,8	5,3	-	-
53	5,3	-	-	-
54	6,3	-	-	-
55	6,3	-	-	-

PŘÍLOHA E – Měření přesnou nivelací – naměřené hodnoty

V tabulce 18 jsou uvedeny hodnoty záměr na lati z měření přesnou nivelací. Data byla použita ke stanovení indexu IRI.

Tabulka 18: Naměřená data – přesná nivelace [vlastní zpracování]

staničení profilu [m]	čtení na lati zkušební úsek č. 1		čtení na lati zkušební úsek č. 2	
	levá jízdní stopa [m]	pravá jízdní stopa [m]	levá jízdní stopa [m]	pravá jízdní stopa [m]
0,00	0,24238	0,20511	0,33229	0,35486
0,25	0,24239	0,20480	0,33092	0,35508
0,50	0,24228	0,20531	0,33019	0,35425
0,75	0,24356	0,20585	0,32919	0,35431
1,00	0,24427	0,20710	0,32847	0,35441
1,25	0,24377	0,20681	0,32653	0,35419
1,50	0,24432	0,20805	0,32536	0,35492
1,75	0,24473	0,20842	0,32494	0,35528
2,00	0,24525	0,20813	0,32364	0,35545
2,25	0,24574	0,20711	0,32393	0,35631
2,50	0,24501	0,20668	0,32384	0,35535
2,75	0,24474	0,20652	0,32439	0,35552
3,00	0,24354	0,20513	0,32371	0,35508
3,25	0,24309	0,20513	0,32444	0,35554
3,50	0,24404	0,20560	0,32181	0,35675
3,75	0,24522	0,20624	0,32092	0,35387
4,00	0,24682	0,20823	0,32207	0,35295
4,25	0,24781	0,20861	0,32139	0,35341
4,50	0,24801	0,20914	0,32140	0,35290
4,75	0,24723	0,20844	0,31978	0,35394
5,00	0,24731	0,20855	0,32230	0,35274
5,25	0,24628	0,20697	0,32133	0,35326
5,50	0,24590	0,20632	0,32130	0,35271
5,75	0,24575	0,20540	0,32168	0,35258
6,00	0,24538	0,20422	0,32205	0,35256
6,25	0,24499	0,20377	0,32260	0,35230
6,50	0,24499	0,20297	0,32414	0,35264
6,75	0,24492	0,20183	0,32419	0,35317
7,00	0,24459	0,20122	0,32400	0,35367
7,25	0,24521	0,20089	0,32406	0,35435

PŘÍLOHA E, Tabulka 18: Naměřená data – přesná nivelace

7,50	0,24678	0,20148	0,32364	0,35441
7,75	0,24806	0,20332	0,32397	0,35371
8,00	0,25142	0,20642	0,32177	0,35171
8,25	0,25645	0,21005	0,32119	0,35224
8,50	0,26044	0,21343	0,32075	0,35221
8,75	0,26335	0,21592	0,32062	0,35224
9,00	0,26523	0,21824	0,32047	0,35202
9,25	0,26606	0,21894	0,32081	0,35099
9,50	0,26687	0,21898	0,31995	0,35216
9,75	0,26705	0,21902	0,32012	0,35171
10,00	0,26728	0,21955	0,32162	0,35174
10,25	0,26875	0,22097	0,32043	0,35193
10,50	0,27121	0,22290	0,32053	0,35142
10,75	0,27271	0,22469	0,32163	0,35201
11,00	0,27489	0,22652	0,32300	0,35281
11,25	0,27641	0,22799	0,32178	0,35273
11,50	0,27769	0,22805	0,32038	0,35263
11,75	0,27835	0,22956	0,32224	0,35297
12,00	0,27964	0,23044	0,32040	0,35201
12,25	0,27964	0,23102	0,32126	0,35118
12,50	0,28143	0,23231	0,32114	0,35040
12,75	0,28162	0,23382	0,32097	0,34920
13,00	0,28130	0,23445	0,32086	0,34931
13,25	0,28250	0,23526	0,32058	0,34905
13,50	0,28361	0,23615	0,32196	0,34975
13,75	0,28398	0,23649	0,32221	0,34925
14,00	0,28412	0,23744	0,32229	0,35044
14,25	0,28369	0,23813	0,32186	0,35040
14,50	0,28389	0,23875	0,32171	0,34945
14,75	0,28228	0,23833	0,32202	0,35031
15,00	0,28187	0,23777	0,32222	0,34938
15,25	0,28183	0,23804	0,32243	0,34948
15,50	0,28291	0,23862	0,32000	0,34998
15,75	0,28389	0,23929	0,31922	0,34674
16,00	0,28475	0,24081	0,32182	0,34763
16,25	0,28601	0,24262	0,32071	0,34699
16,50	0,28650	0,24286	0,32064	0,34753
16,75	0,28698	0,24418	0,32051	0,34767
17,00	0,28809	0,24516	0,31959	0,34791
17,25	0,28924	0,24595	0,31966	0,34869
17,50	0,29038	0,24877	0,31928	0,34766
17,75	0,29232	0,24828	0,32029	0,34674
18,00	0,29275	0,24827	0,32093	0,34563

PŘÍLOHA E, Tabulka 18: Naměřená data – přesná nivelace

18,25	0,29133	0,24932	0,32089	0,34544
18,50	0,29250	0,25056	0,32136	0,34631
18,75	0,29253	0,25189	0,32267	0,34543
19,00	0,29256	0,25343	0,32346	0,34494
19,25	0,29266	0,25344	0,32373	0,34528
19,50	0,29233	0,25328	0,32393	0,34530
19,75	0,29282	0,25322	0,32419	0,34563
20,00	0,29234	0,25380	0,32453	0,34505
20,25	0,29290	0,25425	0,32472	0,34467
20,50	0,29284	0,25481	0,32439	0,34395
20,75	0,29356	0,25529	0,32447	0,34365
21,00	0,29427	0,25705	0,32530	0,34342
21,25	0,29464	0,25762	0,32544	0,34248
21,50	0,29489	0,25826	0,32558	0,34245
21,75	0,29540	0,26042	0,32536	0,34270
22,00	0,29678	0,26113	0,32431	0,34176
22,25	0,29812	0,26162	0,32330	0,34066
22,50	0,29926	0,26273	0,32390	0,33913
22,75	0,29991	0,26353	0,32206	0,34005
23,00	0,29964	0,26385	0,32162	0,33814
23,25	0,30009	0,26393	0,32204	0,33749
23,50	0,30012	0,26414	0,32172	0,33752
23,75	0,29976	0,26526	0,32161	0,33776
24,00	0,29966	0,26536	0,32048	0,33778
24,25	0,29860	0,26386	0,31930	0,33692
24,50	0,29787	0,26129	0,31740	0,33619
24,75	0,29676	0,26283	0,31764	0,33492
25,00	0,29565	0,26192	0,31732	0,33364
25,25	0,29656	0,26233	0,31719	0,33353
25,50	0,29487	0,26554	0,31724	0,33394
25,75	0,29698	0,26845	0,31690	0,33279
26,00	0,29968	0,27158	0,31571	0,32738
26,25	0,29877	0,27333	0,31624	0,33109
26,50	0,30111	0,27264	0,31556	0,33165
26,75	0,30261	0,27322	0,31600	0,33124
27,00	0,30344	0,27335	0,31664	0,33203
27,25	0,30099	0,27333	0,31846	0,33420
27,50	0,29583	0,27191	0,31847	0,33470
27,75	0,29688	0,26949	0,31478	0,33422
28,00	0,29857	0,26747	0,31484	0,33526
28,25	0,29808	0,26662	0,31629	0,33462
28,50	0,30075	0,26678	0,31633	0,33422
28,75	0,30611	0,26755	0,31614	0,33490

PŘÍLOHA E, Tabulka 18: Naměřená data – přesná

PŘÍLOHA E, Tabulka 18: Naměřená data – přesná nivelace

29,00	0,30588	0,26725	0,31569	0,33524
29,25	0,30383	0,26850	0,31451	0,33667
29,50	0,30325	0,26930	0,31699	0,33691
29,75	0,30234	0,27009	0,31627	0,33963
30,00	0,30182	0,27080	0,31608	0,34226
30,25	0,30077	0,27113	0,31752	0,34431
30,50	0,30066	0,27242	0,31520	0,34794
30,75	0,30047	0,27330	0,31479	0,35047
31,00	0,30062	0,27380	0,31386	0,33656
31,25	0,30105	0,27424	0,31193	0,33609
31,50	0,30144	0,27453	0,31154	0,33577
31,75	0,30186	0,27475	0,30992	0,33431
32,00	0,30186	0,27530	0,30833	0,33383
32,25	0,30203	0,27507	0,30679	0,33333
32,50	0,30028	0,27563	0,30430	0,33212
32,75	0,30271	0,27618	0,30511	0,33302
33,00	0,30257	0,27675	0,30568	0,33236
33,25	0,30294	0,27723	0,30560	0,32988
33,50	0,30223	0,27557	0,30610	0,33154
33,75	0,30200	0,27571	0,30605	0,33170
34,00	0,30191	0,27561	0,30477	0,33254
34,25	0,30225	0,27411	0,30152	0,33176
34,50	0,30235	0,27480	0,30184	0,33167
34,75	0,30261	0,27469	0,30340	0,33394
35,00	0,30230	0,27430	0,30355	0,33549
35,25	0,30187	0,27316	0,30410	0,33288
35,50	0,30149	0,27268	0,30540	0,33527
35,75	0,29952	0,27234	0,30587	0,33429
36,00	0,30099	0,27197	0,30735	0,33002
36,25	0,30019	0,27220	0,30969	0,32823
36,50	0,30038	0,27211	0,31043	0,32684
36,75	0,30002	0,27082	0,31125	0,32525
37,00	0,29876	0,26953	0,31133	0,32913
37,25	0,29839	0,26838	0,31007	0,34455
37,50	0,29782	0,26629	0,30972	0,34865
37,75	0,29719	0,26506	0,30945	0,35435
38,00	0,29613	0,26530	0,30768	0,34398
38,25	0,29544	0,26564	0,30644	0,34116
38,50	0,29524	0,26533	0,30705	0,34167
38,75	0,29400	0,26456	0,30693	0,34083
39,00	0,29386	0,26396	0,30743	0,33503
39,25	0,29400	0,26312	0,30698	0,32769
39,50	0,29366	0,26265	0,30475	0,32650

PŘÍLOHA E, Tabulka 18: Naměřená data – přesná nivelace

39,75	0,29367	0,26231	0,30409	0,32579
40,00	0,29341	0,26156	0,30344	0,32512
40,25	0,29270	0,26079	0,30375	0,32406
40,50	0,29172	0,25983	0,30315	0,32283
40,75	0,29173	0,25971	0,30240	0,32247
41,00	0,29174	0,25878	0,30186	0,32292
41,25	0,29114	0,25747	0,30126	0,32200
41,50	0,29095	0,25627	0,30180	0,32261
41,75	0,28952	0,25392	0,30209	0,32336
42,00	0,28831	0,25006	0,30317	0,32342
42,25	0,28594	0,24551	0,30387	0,32359
42,50	0,28363	0,24366	0,30274	0,32400
42,75	0,28037	0,24190	0,30332	0,32444
43,00	0,27549	0,24065	0,30481	0,32337
43,25	0,27292	0,23958	0,30612	0,32386
43,50	0,27066	0,23662	0,30674	0,32493
43,75	0,26937	0,23689	0,30746	0,32616
44,00	0,26828	0,23694	0,30643	0,32682
44,25	0,26768	0,23707	0,30577	0,32701
44,50	0,26709	0,23650	0,30457	0,32751
44,75	0,26735	0,23687	0,30306	0,32644
45,00	0,26854	0,23756	0,30264	0,32560
45,25	0,26922	0,23757	0,30274	0,32517
45,50	0,27045	0,23727	0,30261	0,32532
45,75	0,27097	0,23709	0,30219	0,32466
46,00	0,27121	0,23512	0,30193	0,32509
46,25	0,27125	0,23170	0,30229	0,32545
46,50	0,27062	0,23256	0,30155	0,32500
46,75	0,27098	0,23477	0,30177	0,32512
47,00	0,27183	0,23499	0,30158	0,32415
47,25	0,27227	0,23690	0,30198	0,32428
47,50	0,27319	0,23789	0,30021	0,32344
47,75	0,27573	0,23858	0,29989	0,32354
48,00	0,27786	0,24050	0,29930	0,32291
48,25	0,28031	0,24106	0,29725	0,32242
48,50	0,28289	0,24125	0,29833	0,32002
48,75	0,28486	0,24116	0,29821	0,32009
49,00	0,28613	0,24135	0,29809	0,31921
49,25	0,28766	0,24167	0,29726	0,31893
49,50	0,28951	0,24072	0,29785	0,31867
49,75	0,28995	0,24055	0,29739	0,31832
50,00	0,29089	0,24023	0,29425	0,31914