



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA SPECIÁLNÍ GEODÉZIE**

Testování vlastností 3D skenerů Leica ScanStation P40 a BLK360

**Testing of the properties of the Leica ScanStation P40
and BLK360 3D scanners**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Praha 2018

Bc. Jan Švejda



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Švejda Jméno: Jan Osobní číslo: 383759

Zadávací katedra: Speciální geodézie

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Testování vlastností 3D skenerů Leica ScanStation P40 a BLK360

Název diplomové práce anglicky: Testing of the properties of the Leica ScanStation P40 and BLK360 3D scanners

Pokyny pro vypracování:

Proveďte testování na principu metodiky použité v [1] pro oba uvedené přístroje se zaměřením na měření v interiéru, měření vyhodnoťte, určete charakteristiky přesnosti a další možné vlastnosti a výsledky vzájemně porovnejte.

Seznam doporučené literatury:

[1] Holíková, L.: Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Trimble TX8 a Faro Focus 3D X130. ČVUT, 2016 [Diplomová práce].

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 24.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem „Testování vlastností 3D skenerů Leica ScanStation P40 a BLK360“ vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce prof. Ing. Martina Štronera, Ph.D. Veškeré podklady, z kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Jan Švejda

Poděkování

V první řadě děkuji prof. Ing. Martinu Štronerovi, Ph.D. za vedení diplomové práce. Děkuji ostatním pracovníkům Katedry speciální geodézie za rady, pomoc či konzultace.

Dále firmě Gefos a.s. za zapůjčení laserových skenerů na testování, zejména pak Ing. Danielu Šantorovi.

Haně Rýglové a ostatním spolužákům za jejich rady, postřehy a připomínky.

Rodině za podporu a pomoc.

Abstrakt

Téma této práce je testování vlastností 3D laserových skenerů Leica ScanStation P40 a Leica BLK360 pomocí experimentálního měření. Experimentální měření se zaměřuje na testování přesnosti měření délek na délkové základně, testování úhlové přesnosti laserového skeneru, určení velikosti šumu na bodovém mračnu naměřeném laserovým skenerem a porovnání samotného mračna z obou skenerů a mračna získaného fotogrammetricky za použití UAV. Výsledné směrodatné odchylky byly porovnány mezi testovanými skenery a se směrodatnými odchylkami, které uvádí výrobce.

Klíčová slova

3D laserové skenování, testování vlastností, mračna bodů, šum, porovnání

Abstract

The topic of the thesis is testing of the properties of the Leica ScanStation P40 and Leica BLK360 3D laser scanners via experimental measurements. Experimental measurements are focused on testing the accuracy of distance measurement by laser scanner on length base, testing of the angular accuracy of the laser scanner, determining of the noise of the point clouds measured by the laser scanners and comparison of the whole point clouds from both scanners with photogrammetrically acquired ones (with use of UAV). Resulting the standard deviations were compared between tested 3D laser scanners and with standard deviations indicated by the manufacturer.

Key words

3D laser scanning, testing of properties, point clouds, noise, comparison

Obsah

Úvod	8
1 Laserové skenovací systémy	9
1.1 Princip laserového skenování	9
1.1.1 Prostorové polární metoda	10
1.1.2 Prostorové protínání vpřed	11
1.2 Dělení laserových skenerů	11
1.3 Faktory ovlivňující přesnost dat	12
2 Testované laserové skenery	13
2.1 Leica ScanStation P40	13
2.2 Leica BLK360	16
3 Použité programy	19
3.1 Leica Cyclone	19
3.2 CloudCompare	22
4 Principy testování skenovacích systémů	24
4.1 Testování měření délek	24
4.2 Testování úhlové přesnosti	25
4.3 Testování velikosti šumu	25
4.4 Testování naměřeného mračna bodů modelu	25
5 Měření a zpracování	26
5.1 Testování měření délek	26
5.2 Testování úhlové přesnosti	29
5.3 Testování velikosti šumu	30
5.4 Testování naměřeného mračna bodů modelu	32
6 Výsledky	35
6.1 Testování měření délek	35
6.1.1 Výsledky Leica ScanStation P40	35
6.1.2 Výsledky Leica BLK360	38
6.1.3 Porovnání výsledků	41

6.1.4 Vliv cílových znaků na přesnost měření délky	43
6.2 Testování úhlové přesnosti	45
6.2.1 Výsledky Leica ScanStation P40	45
6.2.2 Výsledky Leica BLK360	46
6.2.3 Porovnání výsledků	47
6.3 Testování velikosti šumu	48
6.3.1 Výsledky Leica ScanStation P40	48
6.3.2 Výsledky Leica BLK360	49
6.3.3 Porovnání výsledků	50
6.4 Testování naměřeného mračna bodů modelu	52
6.4.1 Výsledky Leica ScanStation P40	52
6.4.2 Výsledky Leica BLK360	52
6.4.3 Porovnání výsledků	53
6.4.4 Porovnání s technologií UAV	56
7 Vizuální porovnání	59
8 Rekapitulace výsledků	62
9 Osobní zkušenosti	64
Závěr	65
Seznam použité literatury a zdrojů	67
Seznam obrázků	69
Seznam tabulek	71
Seznam grafů	71
Seznam příloh	72

Úvod

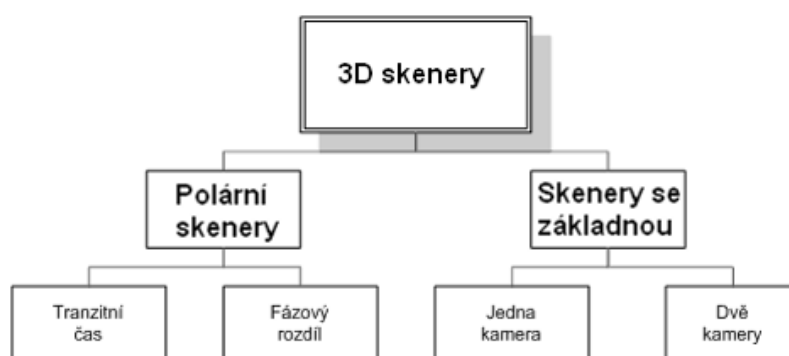
3D laserové skenování je technologie, která je na našem trhu známa již delší dobu a i v této oblasti dochází k vývoji, zejména pak v oblasti pozemních statických laserových skenerů, kterými se budeme zabývat. Od pomalých a relativně nepřesných skenerů jsme došli k přístrojům, které měří statisíce až miliony bodů za vteřinu a přesností je lze srovnat s totálními stanicemi. Avšak tyto skenery stále bývají povětšinou velké, těžké a robustní, a díky velké finanční nákladnosti také méně dostupné. Tento přístup se pokouší měnit výrobce Leica Geosystems, který vytvořil malý, lehký a poměrně rychlý skener Leica BLK360, jehož finanční nákladnost není tak vysoká. Tento přístroj porovnáme se zástupcem tradiční řady laserových skenerů, robustní a vysoce výkonnou Leica ScanStation P40.

Oba 3D laserové skenery budou podrobeny sérii několika testů, které otestují jednak jejich jednotlivé aspekty, tak komplexní vlastnosti. Výsledky testů budou konfrontovány nejen mezi přístroji samotnými, ale i s údaji o přesnosti skenerů, které udává výrobce. Oba přístroje pak porovnáme také s fotogrammetrií za použití UAV, jakožto další technologii pro získání hustého 3D mračka, která je oproti laserovému skenování méně finančně náročná. Čistě subjektivním hodnocením pak bude vizuální porovnání mračen z obou přístrojů a zhodnocení kladů a záporů zjištěných při práci s přístroji.

1 Laserové skenovací systémy

Existuje celá řada různých typů 3D laserových skenovacích systémů, potažmo 3D laserových skenerů. Pokud bychom je měli rozdělit podle umístění při skenování, jsou skenery kinematické a statické (terestrické). Statické skenery jsou takové, které jsou umístěny vůči Zemi v neměnné poloze. Skenery, které jsou umístěny na nějakém pohybuujícím se nosiči (letadle, autu, atd.) nazýváme kinematické. V této práci se budeme zabývat statickými terrestrickými (pozemními) skenery.

Většina terrestrických laserových skenovacích systémů využívá impulsní laserovou technologii pro měření délek a určuje prostorovou polohu bodů na základě prostorové polární metody. Tyto skenery nazýváme polární. Existují však také základnové skenery, kdy je prostorová poloha bodů určena pomocí jedné nebo dvou CCD kamer a známé délky (základny). Tyto metody budou podrobněji popsány níže.



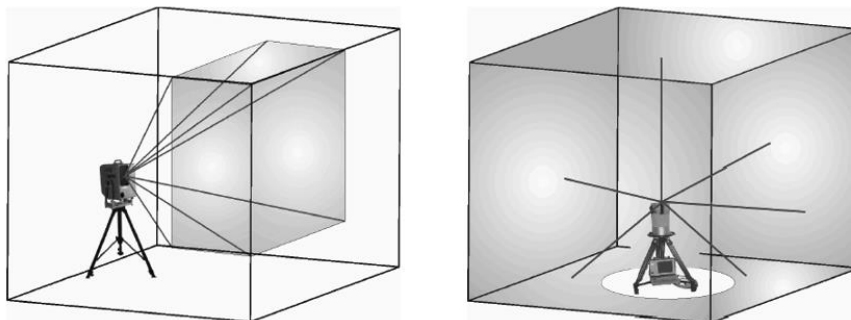
Obr. 1 Schéma rozdělení 3D laserových skenerů podle principu měření [1]

1.1 Princip laserového skenování

Laserové skenování je automatizovaná neselektivní metoda sběru dat. Výsledkem skenování je tzv. mračno bodů, což je soubor bodů, u kterých jsou určeny pravoúhlé prostorové souřadnice X, Y, Z. Lze u nich určit také hodnotu intenzity odrazu paprsku či barvu skenovaného předmětu, která může být určena integrovanou digitální kamerou.

3D laserové skenery obecně fungují tak, že zdroj záření vydává paprsek, který je rozmítán na body rastru v řádcích či sloupcích, u nichž je určován horizontální a vertikální úhel a šikmá vzdálenost. Paprsek je rozmítán soustavou zrcadel či hranolů se vzájemně kolmými osami otáčení, díky které ho můžeme navést do relativně úzkého zorného pole. Tyto skenery nazýváme kamerové.

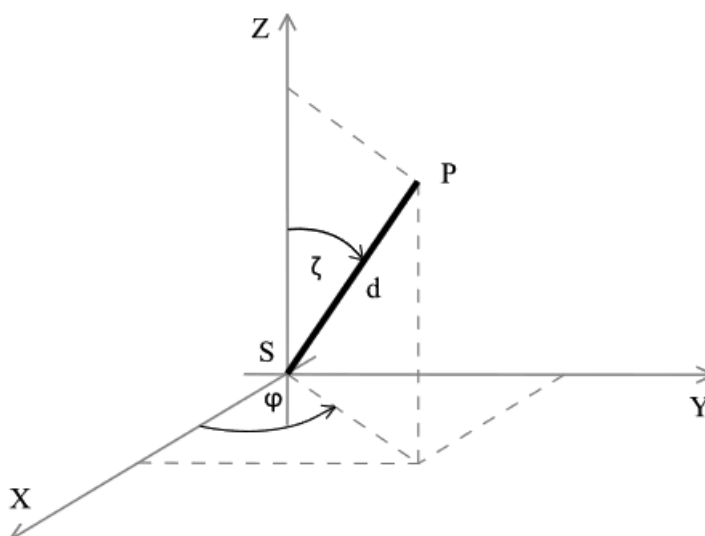
Lze ovšem paprsek rozmítat i do celého okolí pomocí servomotorů, kdy je otáčeno celým skenerem, pak se jedná o panoramatický skener. Dnes je možno u většiny 3D laserových skenerů zvolit jak skenování pouze zájmové výseče v okolí, tak celého panoramatu.



Obr. 2 Kamerový a panoramatický skener [1]

1.1.1 Prostorová polární metoda

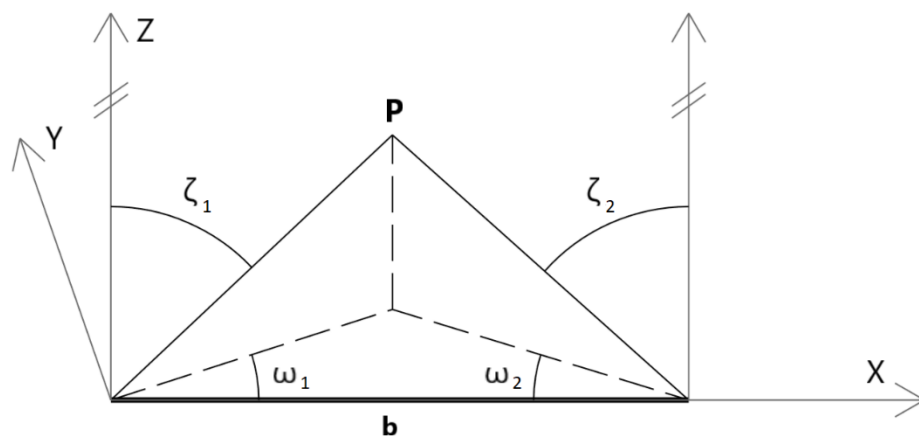
Většina skenerů dnes pracuje na bázi prostorové polární metody, nazýváme je tudíž skenery polární. K výpočtu pravoúhlých prostorových souřadnic se využívá prostorová délka d , vodorovný úhel φ a zenitový úhel ζ . Délka je pak získána z měření dálkoměrem, který je buď impulsní (měří se tranzitní čas, který uběhne mezi vysláním a přijetím signálu) nebo fázový (měří se fázový rozdíl mezi vyslanou a přijatou vlnou). Zároveň s délkou je zaznamenáno natočení zrcadel a servomotorů, z čehož jsou zjištěny úhly (φ , ζ).



Obr. 3 Princip prostorové polární metody

1.1.2 Prostorové protínání vpřed

Prostorové protínání vpřed z úhlů je princip, který využívají tzv. základnové skenery. Určení pravoúhlých souřadnic vychází z řešení trojúhelníku, kdy je známa délka základny b , a určeny jsou horizontální (ω_1, ω_2) a zenitové úhly (ζ_1, ζ_2), které jsou k ní přilehlé. Při použití této metody je snímána stopa laserového paprsku na objektu jednou nebo dvěma CCD kamerami. U jedno kamerového systému je základna tvořena CCD kamerou a středem rotace zrcátka, které rozmítá paprsek. Délka základny, pozorovací úhel a úhel osvětlení tedy určují trojúhelník. U dvou kamerových systémů jsou oba konce základny osazeny konvergentně zaměřenými CCD kamerami, které snímají paprsek. Základnové skenery jsou přesné na malé vzdálenosti, s rostoucí vzdáleností od objektu přesnost rychle klesá. Další nevýhoda je poměrně malé zorné pole.



Obr. 4 Schéma prostorového protínání z úhlů vpřed

1.2 Dělení laserových skenerů

Jak již bylo uvedeno v textu výše, 3D laserové skenery můžeme dělit podle umístění skeneru při skenování (statické, kinematické), podle velikosti zorného pole (kamerové, panoramatické) nebo podle principu měření (polární, základnové). Dále je lze dělit podle dosahu, přesnosti nebo rychlosti skenování.

Dělení terestrických skenerů podle rychlosti skenování [1]

- **s velmi vysokou rychlostí R1** (více než 100 000 bodů/s),
- **s vysokou rychlostí R2** (5 000 - 100 000 bodů/s),
- **se střední rychlostí R3** (100 - 5 000 bodů/s),
- **s nízkou rychlostí R4** (méně než 100 bodů/s).

Dělení terestrických skenerů podle dosahu [1]

- **s velmi krátkým dosahem D1** (0,1 m - 2,0 m),
- **s krátkým dosahem D2** (2 m - 10 m),
- **s středním dosahem D3** (10 m - 100 m),
- **s dlouhým dosahem D4** (100 m a více).

Dělení terestrických skenerů podle přesnosti [1]

- **s vysokou přesností P1** (0,01 mm - 1,0 mm) - základnové skenery s malou základnou a dosahem D1,
- **s přesností P2** (0,5 mm - 2,0 mm) - základnové skenery s velkou základnou a polární skenery s dosahem D2,
- **s přesností P3** (2 mm - 6 mm) - polární skenery s dosahem D3,
- **s přesností P4** (10 mm - 100 mm) - polární skenery s dosahem D4.

1.3 Faktory ovlivňující přesnost dat

Faktorů, které ovlivňují výslednou přesnost dat laserového skenování, je celá řada. Lze je rozdělit na vnitřní a vnější. Za vnitřní můžeme považovat chyby způsobené samotným skenerem, jako je přesnost měření vodorovných a zenitových úhlů a měření délek. Za další bychom mohli uvést konstrukční nedokonalost přístroje, tj. excentricity analogické osovým chybám teodolitu, či synchronizaci měření úhlů a délek. Tyto chyby nelze eliminovat měřickým postupem, pouze pomocí kalibrace systému. Za vnější faktory můžeme označit vliv prostředí, ve kterém je měřeno, např. atmosférické podmínky. Důležitá je i geometrie, tvar, povrch a materiál skenovaného objektu. Například při měření na okraj objektu může dojít k rozdělení paprsku na dvě části, z nichž každá dopadne na jinak vzdálenou část. Tato skutečnost má za následek chybu měření, kdy výsledná vzdálenost je určena v rozmezí vzdáleností od prvního k poslednímu odrazu. Podobnou chybu v určení vzdálenosti můžeme pozorovat i u skenování různě barevných povrchů. Všechny tyto faktory zanášejí do výsledných bodových mračen chyby, které se projevují nesprávným určením polohy jednotlivých bodů. Tomuto znehodnocení dat říkáme tzv. šum. [1] [12]

2 Testované laserové skenery

2.1 Leica ScanStation P40

Prvním z testovaných 3D laserových skenerů je skener ScanStation P40 od společnosti Leica (obr. 5). Jedná se o pozemní skener, pracující na bázi prostorové polární metody (viz kapitola 1.1.1). Je vybaven pulsním dálkoměrem s vlnovou délkou 1550 nm (neviditelné záření) / 658 nm (viditelné záření) a maximálním dosahem do 270 m, naopak minimální dosah je 0,6 m. Uvnitř přístroje se nachází geodetický dvouosý kompenzátor s rozlišením 1", rozsahem $\pm 5'$ a přesností 1,5", který lze také vypnout. Dále je v přístroji laserová olovnice, integrovaná kamera souosá s laserovou optikou, díky níž lze obarvit výsledné mračno, a například integrovaná WLAN, díky níž lze přístroj ovládat na dálku pomocí kontroleru či notebooku. Přístroj kontinuálně měří i v teplotě až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, lze ho zavěsit hlavou dolů a vrchní úchopné ucho je odnímatelné. Další technické parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce níže.



Obr. 5 Leica ScanStation P40 [3]

Tab. 1 Technické parametry Leica ScanStation P40

Technické parametry	
Délková přesnost	1,2 mm + 10 ppm
Úhlová přesnost	8" (0,0025 gon)
3D přesnost bodu	3mm/50m a 6mm/100m
Rychlost skenování	1 milion bodů za vteřinu
Zorné pole	360° (horizontální) x 270° (vertikální)

Laserový skener je uložen v kufru s vysouvacím madlem na kolečkách, umožňující pohodlnou přepravu. Velikost skeneru je 238 x 358 x 395 mm a jeho váha je 12,25 kg. Napájení je zajištěno vnitřními vyjímatelnými Li-ion bateriemi s celkovou výdrží až 7 hodin. Datové úložiště je obstaráno 256 GB SSD diskem.

Přístroj je ovládán pomocí dotykové barevné obrazovky, umístěné na straně skeneru. K dispozici je stylus pro pohodlnější ovládání. Ovládání je intuitivní, k dispozici je celá škála nastavení.



Obr. 6 Ukázka pracovního prostředí [4]



Obr. 7 Prohlídka skenu [3]

Pro zahájení skenování je nejprve potřeba založit zakázku. Po zadání názvu zakázky se dostáváme k zadání stanoviska, následuje nastavení parametrů skenování: rozlišení skenu, velikost zorného pole (oblast skenování), možnost pořízení HDR fotografií pro obarvení mračna a jejich nastavení, nastavení citlivosti a zvolení měřících režimů. Při výběru režimu „Speed“ přístroj skenuje do vzdálenosti 120 m při počtu 1 milionu bodů za vteřinu. Režim „Range“ znamená, že přístroj bude měřit do vzdálenosti 270 m při počtu 0,5 milionu bodů za vteřinu. Při zvolení konfigurace uživatelem přístroj vypočte předpokládanou dobu měření. Výsledné časy při různých konfiguracích měření panoramatických skenů jsou k nahlédnutí v tabulce 2. Po dokončení měření je možné prohlédnout si naskenovaná data v obrazovce přístroje (obr. 7), přibližovat, oddalovat, měnit různé režimy zobrazení. Laserový skener Leica ScanStation P40 umí pracovat s černobílými terči. Tyto terče, resp. jejich středy je možno identifikovat v prohlídce mračna po skenování a přiřadit jim číslo rovnou při práci v terénu.

Tab. 2 Porovnání časů skenování u přístroje Leica ScanStation P40

Porovnání časů měření panoramatických skenů v různých režimech				
Hustota bodů [mm/10 m]	Normální citlivost		Vysoká citlivost	
	režim Speed	režim Range	režim Speed	režim Range
	Doba skenu [HH:MM:SS]	Doba skenu [HH:MM:SS]	Doba skenu [HH:MM:SS]	Doba skenu [HH:MM:SS]
50	0:00:20	0:00:20	0:00:20	0:00:28
25	0:00:33	0:00:33	0:00:33	0:00:53
12,5	0:00:58	0:00:58	0:00:58	0:01:44
6,3	0:01:49	0:01:49	0:03:25	0:06:47
3,1	0:03:30	0:06:47	0:13:30	0:26:59
1,6	0:13:33	0:27:04	0:54:06	1:48:12
0,8	0:54:06	1:48:12	3:36:21	3:36:21

Data jsou uložena uvnitř přístroje na 256 GB SSD disk. Pro přenos dat do PC je možno využít 2,5 m datový kabel s konektorem Lemo (8 pin) na jedné straně, a standartním ethernetovým jackem na straně druhé. Tímto způsobem je možno propojit skener rovnou s PC. Další možností je využít USB flash disk, zkopírovat na něj založené projekty z přístroje a importovat data do PC. Konektor USB je umístěn hned vedle barevné dotykové obrazovky vpravo.

Leica ScanStation P40 exportuje data jako projekt v adresářové struktuře, kde jsou umístěny složky s jednotlivými stanovisky a hlavička projektu (soubor *Project.prj*). V jednotlivých složkách se stanovisky je umístěn samotný sken ve formátu *.bin*. Projekt s vybranými stanovisky lze nahrát do softwaru Cyclone (obr. 9), který s nimi dále umí pracovat, např. provést export mračen v dalších formátech (viz kapitola 3.1). [2] [3] [4]



Obr. 8 Transportní kufr [3]



Obr. 9 Přenos dat pomocí USB flash disku [3]

2.2 Leica BLK360

Druhý z testovaných 3D laserových skenerů se jmenuje BLK360, a je také z dílny firmy Leica (obr. 10). BLK360 je pozemní panoramatický skener s rozsahem měření od 0,6 m do 60 m. Měření je založeno na principu 3D polární metody (viz kapitola 1.1.1). K měření vzdáleností je využíváno záření o vlnové délce 830 nm. Zorné pole skeneru je 360° x 300°, rychlost skenování je 360 000 bodů za vteřinu. V přístroji je zabudovaný třikamerový systém, sloužící k zachycení panoramatické fotografie a obarvení mračna, termální kamera a integrovaná inerciální měřicí jednotka IMU. Skener pracuje při teplotě +5 to +40 °C a má stupeň krytí IP54 proti prachu a vodě. Je také vybaven integrovanou WLAN pro (dálkové) ovládání a přenos dat. Přístroj měří 165 mm na výšku a 100 mm v průměru. Jeho váha je jen 1 kg. Další technické parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce níže.



Obr. 10 Leica BLK360 [6]

Tab. 3 Technické parametry Leica BLK360

Technické parametry	
Délková přesnost	4 mm/10 m a 7mm/20 m
Úhlová přesnost	40" (0,0123 gon)
3D přesnost bodu	6mm/10m a 8mm/20m
Rychlost skenování	360 000 bodů za vteřinu
Zorné pole	360° (horizontální) x 300° (vertikální)

Laserový skener je uložen v plastové objímce s madlem (obr. 11), umožňující pohodlné přenášení. Je dodáván s lehkým a lehce přenositelným stativem s netradičním závitem. Obě věci se vejdou do příruční brašny, která je dodávána s přístrojem, do které se vejde i všechno další příslušenství (náhradní baterie, tablet pro ovládání, nabíječka na baterie apod.). Napájení je zajištěno standartními Li-ion bateriemi vyráběné firmou Leica, přičemž výrobce udává výdrž jedné baterie na 40 skenů. Naskenovaná data jsou ukládána do vnitřního úložiště o kapacitě 64 GB.



Obr. 11 BLK360 v přenosném krytu [6]



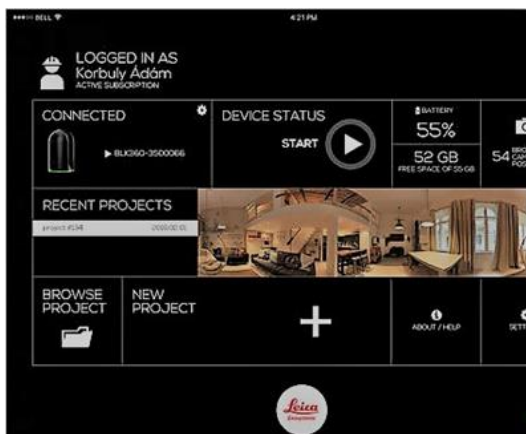
Obr. 12 Příslušenství [6]

Ovládání přístroje je možné dvěma způsoby. Jelikož se na přístroji kromě jediného tlačítka a notifikačního prstence nenachází displej, pokročilejší úkony je nutno provádět dálkově přes tablet, a to konkrétně přes iPad, který je vyžadován. Tablet je propojen s přístrojem pomocí WLAN, jejíž signál je vysílán z přístroje. Ovládat přístroj lze buďto přes aplikaci Leica, nebo Autodesk ReCap Pro. V obou aplikacích jsou velmi podobná nastavení, od založení zakázky, názvu stanoviště po režim skenování (viz tab. 4). Lze také nastavit hustotu skenování při ovládání přes hardwarové tlačítko na přístroji. Pokud použijeme tento druhý způsob, přístroj s námi bude komunikovat pomocí notifikačního prstence. Pokud přístroj nesvíí, je vypnutý nebo v režimu spánku. Pokud svítí zeleně, je vše v pořádku a přístroj je připraven (pokud svítí tmavě zeleně, kapacita baterie klesla pod 20%). Jestliže skener bliká zeleně, odpočítává se 10 vteřin do začátku skenování, pokud bliká žlutě, skenuje, startuje se či vypíná. Skenování se v tomto režimu ovládání zapíná krátkým stisknutím tlačítka, zapínání a vypínání pak stiskem dlouhým.

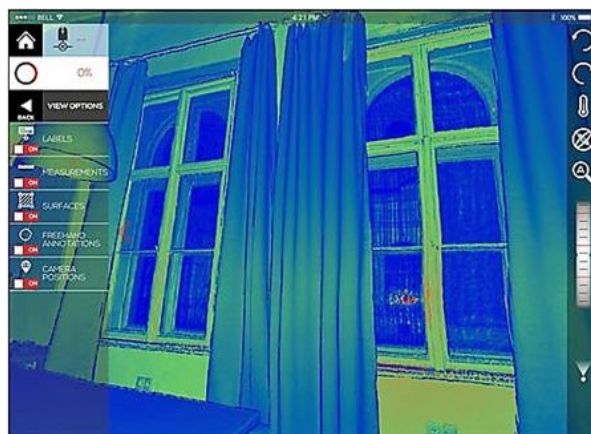
Tab. 4 Porovnání režimů skenování u přístroje Leica BLK360

Parametry režimů skenování			
Režim skenování	Hustota bodů [mm/10 m]	Doba skenu [MM:SS]	Počet bodů
Rychlý mód	20	0:40	3 000 000
Standard	10	1:50	18 000 000
Vysoká hustota	5	3:40	65 000 000

Přenos dat je také možný dvěma způsoby. Pokud ke skenování nepoužíváme tablet, data se ukládají do vnitřního úložiště, a poté se přes WLAN importují rovnou do softwaru Cyclone na PC (viz kapitola 3.1). Nevýhoda tohoto způsobu je, že prohlídku skenu poprvé uskutečníme až na PC. Data se naimportují do Cyclone, ze kterého je možné export v různých dalších formátech. Pokud tablet použijeme, naskenovaná data se po dokončení skenování odešlou přes WLAN do tabletu, kde je možné si je prohlédnout. Pokud ovládáme přístroj přes aplikaci Leica, je možné data importovat ve formátu .E57 do vnitřní paměti tabletu, a z něj po připojení kabelem k PC provést import dat do dalších programů (např. Cyclone, ale i další). Použijeme-li aplikaci Autodesk ReCap Pro, vytvoří se projekt ReCap, jehož import je možný stejným způsobem, který je popsán výše pouze do aplikace od vydavatele Autodesk na pracovním PC. Jedná se například o programy AutoCad, Revit nebo ReCap. Z těchto programů je možný pak další export. [5] [6] [7]



Obr. 13 Pracovní prostředí v aplikaci Leica [8]



Obr. 14 Prohlídka skenu [8]

3 Použité programy

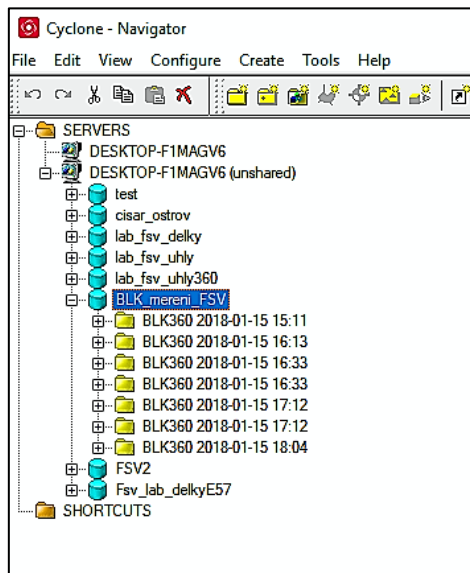
3.1 Leica Cyclone

Cyclone je software, který je vyvíjen společností Leica, a je určen k úpravám, zpracování a vyhodnocení 3D bodových mračen. Základem programu je propracovaná databázová struktura, která zajišťuje rychlou práci s velkými objemy dat. V programu je možné obstarat celý proces zpracování od registrace skenů, transformace do souřadnicové soustavy, přes čištění, odstranění šumu, modelování a prokládání geometrickými primitivy, tvorby nepravidelné trojúhelníkové sítě až po tvorbu výstupů a exportu dat.

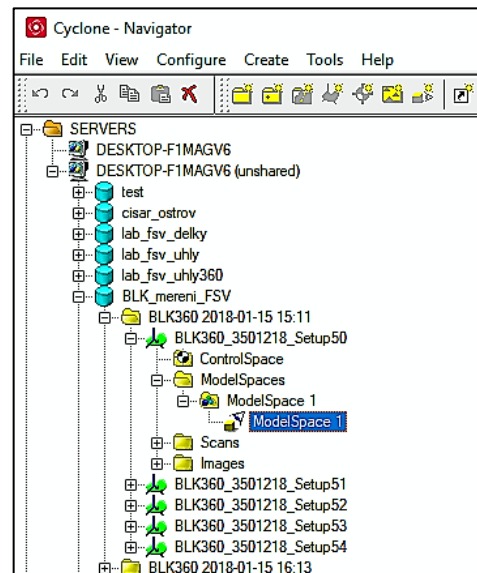
Cyclone je nabízen v různých verzích. Základní verzí je modul *Cyclone BASIC*, který obsahuje funkce, které jsou k dispozici ve všech dalších modulech programu, jako např. import/export dat, prohlížení mračna, měření mezi body a povrchy, zpracování dat z měření se skenerem geodetickými metodami (polygon, protínání zpět, známé souřadnice stanoviska). Modul *Cyclone REGISTER* umožňuje registraci mračen, přičemž je možno využít naskenované terče, překryty mračen, geodetické metody a vymodelované objekty. *Cyclone MODEL* slouží k vytváření 3D modelů přímo z mračna bodů a jejich další úpravu včetně obarvování fotografiemi. V této verzi je možno také využít funkci pro automatické modelování potrubí. Vytvořené 3D objekty se mohou poté vyexportovat do jiných programů pro další zpracování (např. do CADu). Dalšími verzemi programu jsou: *Cyclone PUBLISHER* (publikování dat na internetu), *Cyclone SERVER* (umožňuje práci na jednom projektu uloženém na serveru více uživatelům) a *Cyclone IMPORTER* (import raw dat ze skenerů dalších výrobců např. Faro, Riegl, Zoller+Fröhlich a další). Poslední a bezplatná verze je *Cyclone VIEWER*, kde je možné si prohlížet naskenovaná data a vymodelované objekty. [9]

Po spuštění programu se otevře okno s názvem *Navigator*, z nějž je dobře vidět adresářová struktura programu. Zde je možné si založit databázi a vybrat její umístění, do níž nahrajeme naše data. Databáze je ve formátu *.imp* a je kompatibilní se stejnou nebo vyšší verzí programu. Poté provedeme import souborů do databáze, je možno nahrát jak raw data ze skenerů (ať již pomocí kabelu / disku z Leica ScanStation P40, nebo přes WLAN z BLK360), tak mračna v obecných formátech

(.E57, .PTS, .PTX). Po nahrání dat se zobrazí složky se skeny (obr. 15). Každá složka obsahuje určitý počet skenů, podle toho, kolik jich bylo na provedeno. Každý sken (*Scanworld*) je dále rozdělen na několik podsložek, z nichž ta, která se jmenuje *ModelSpace*, obsahuje naskenované mračno a je určena k úpravám a modelování (obr. 16).



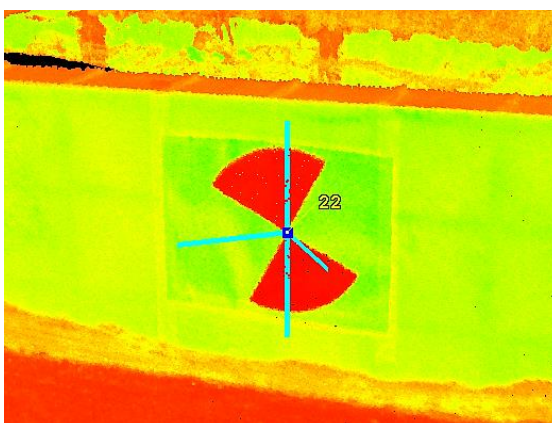
Obr. 15 Úvodní obrazovka



Obr. 16 Adresářová struktura

Máme-li nasnímaný objekt, který se skládá z více skenů, a chtěli bychom tyto skeny spojit do jednoho mračna, musím provést tzv. registraci mračen. Jedná se o transformaci mračna (nebo mračen) z jednoho souřadného systému do systému mračna druhého (cílového). Nejprve je potřeba na jednotlivých mračnech najít a vytvořit spojovací body (tzv. *Vertexy*), například z naskenovaných terčů. Je nutné najít tyto body v každém jednotlivém mračnu a přiřadit každému bodu číslo tak, aby stejnému bodu v různých skenech odpovídala stejná čísla. Cyclone umí najít v mračnu i předdefinované terče, jako jsou například kulový terč nebo černobílý terč (viz obr. 17). Po vybrání terče algoritmus najde a vytvoří střed terče a vybídne uživatele k přiřazení čísla. Toto se provede na všech bodech v mračnech, které chceme zaregistrovat. Následně se v programu vybere funkce na registraci a zvolí se ta mračna, která jsou určena k registraci, přičemž cílové mračno je vyznačeno tučně. Poté se vyhledají všechny vymodelované spojovací body ve skenech a zobrazí se do tabulky.

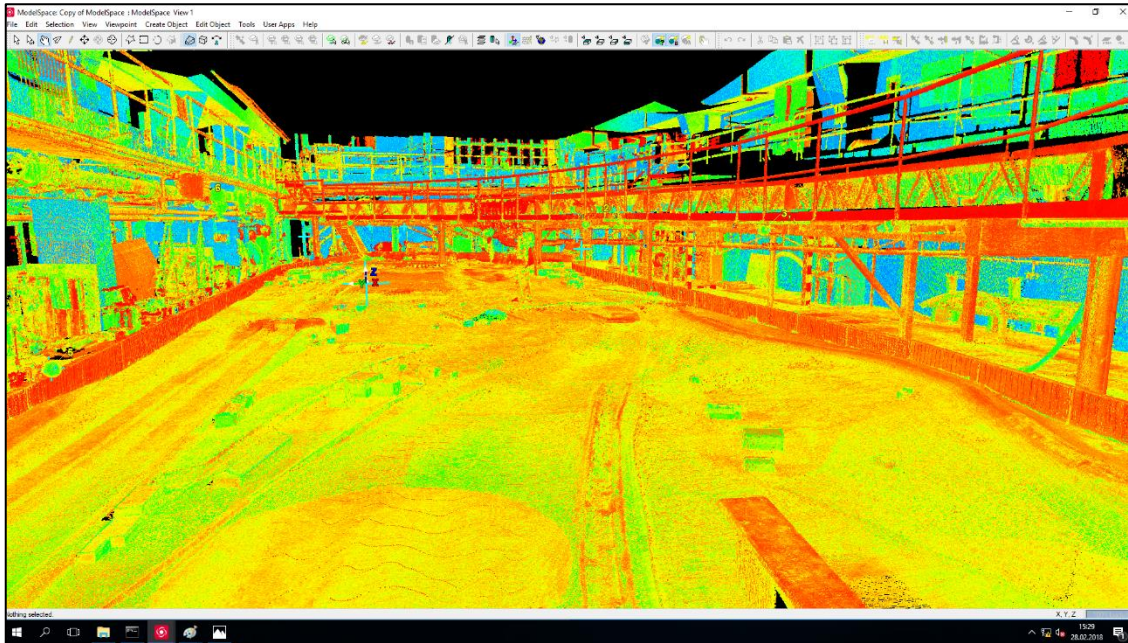
Provedením výpočtu registrace se všechny skeny spojí a zobrazí se odchylky na příslušných bodech. Body s velkou odchylkou lze vyřadit a provést výpočet znovu. Jsme-li spokojeni, zmrazíme registraci a vytvoříme nový *ModelSpace*, ve kterém budou mračna navzájem správně umístěna polohově i výškově. Zde je možné spojit jednotlivé skeny a získat tak finální bodové mračno. Pokud bychom vyžadovali transformaci do jiného souřadnicového systému, než v jakém je cílové mračno, stačí vytvořit nový *ScanWorld*, do něj nahrát souřadnice spojovacích bodů se správnými čísly a zvolit ho jako cílové mračno. Postup je poté stejný, jak je výše uvedeno.



Obr. 17 Vyhledání středu terče

Po otevření *ModelSpace* uvidíme naměřené mračno, se kterým lze pracovat. Můžeme si ho prohlédnout, potočit, přiblížit či oříznout nebo očistit. Výběr části mračna lze provést jak geometrickým výběrem (obdélník, kruh, apod.), tak polygonem, kdy výběr nemá jednoduchý geometrický tvar. Vybranou část mračna lze odstranit, lze odstranit zbylé mračno okolo, či překopírovat do nového *ModelSpace*, kde se s ním, zvláště ve velkém a nepřehledném mračnu, lépe pracuje. Po ukončení prací v novém okně *ModelSpace* se uživatel může rozhodnout, zdali chce překopírovat obsah nového okna do původního a nové smazat, či nic nekopírovat a nechat okno nové. Z mračna lze také modelovat 3D objekty. Po označení mračna je možné ho proložit plochou, válcem, koulí, liniovým segmentem a dalšími primitivy. Lze také zvolit, zda se bude prokládat v určité vzdálenosti od místa označení mračna, či označení provede uživatel sám obdélníkovou nebo polygonovou ohradou. Po proložení je možné si zobrazit počet bodů, které byly použity či odchylku proložení. Pokud jsme provedli sken nepravidelného povrchu, lze také na tomto mračně vytvořit nepravidelnou trojúhelníkovou síť. Možná je také tvorba vrstevnic.

V programu je také možno měřit vzdálenosti mezi body či objekty, redukovat počet bodů v mračnu nebo obarvovat mračna, např. podle skutečných barev (jsou-li k dispozici) či intenzity. Mračna můžeme také exportovat v různých formátech, jakou jsou *.E57*, *.PTS*, *.PTX* atd. Vytvořené 3D modely je možno exportovat do jiných programů pro další zpracování.



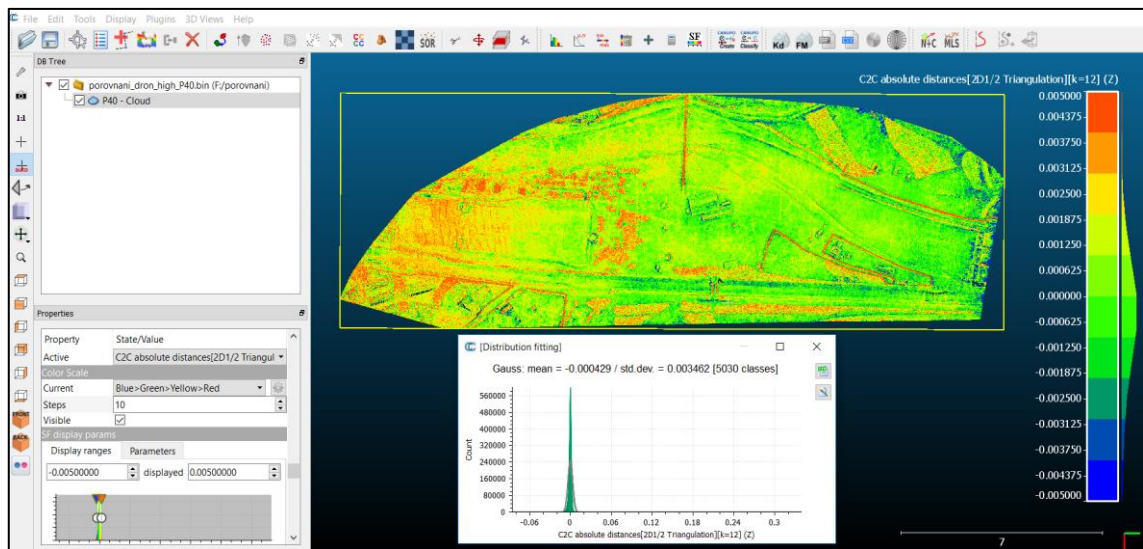
Obr. 18 Prohlídka mračna v programu Cyclone

3.2 CloudCompare

Program CloudCompare [15] je volně šiřitelný software, sloužící k práci s hustými bodovými mračny. Je založen na stromové struktuře dat (tzv. octree struktura). Je vhodný zejména na úpravu a porovnání, lze v něm provádět také redukci bodových mračen, registraci, statistické výpočty či tvorbu trojúhelníkové sítě.

Do CloudCompare je možné importovat množství mračen v různých formátech (*.E57*, *.PTX*, *.PLY*, atd.), nicméně program umí porovnat pouze dvě mračna zároveň. Pro správné porovnání je důležité, aby tyto mračna byla ve stejné souřadnicové soustavě a byla ořezána stejným způsobem. Poté se zvolí mračno porovnávané a referenční, což je většinou to, které je více husté. V dalších záložkách se dají nastavit další parametry, např. maximální vzdálenost, do níž mají být data porovnáвана. Po výpočtu se výsledek zobrazí jako mračno v barevné hypsometrii, kdy každá barva značí danou vzdálenost mezi porovnávanými mračny. Můžeme

upravit jak typ barevné hypsometrie (modrá-zelená-žlutá-červená, odstíny šedé, červená-žlutá apod.), počet kroků barevného měřítka nebo zobrazení maximálních a minimálních hodnot na měřítku. Lze měnit také typ zobrazovaných dat, kdy můžeme zvolit absolutní vzdálenosti, vzdálenosti menší než určitá mez či vzdálenosti v osách X, Y nebo Z. Po dokončení vizualizace je možné si zobrazit také statistické údaje o porovnání, jako jsou průměrná vzdálenost mezi mračny, nebo směrodatná odchylka. Výsledek lze uložit v binárním souboru (.bin), se kterým CloudCompare pracuje, nebo exportovat do dalších tradičních formátů.



Obr. 19 Pracovní prostředí v programu CloudCompare

4 Principy testování skenovacích systémů

V současné době neexistuje žádný závazný předpis či norma, určující charakteristiku přesnosti parametrů 3D skenovacích systémů. Tato situace způsobuje to, že každý výrobce má svůj interní postup při určování charakteristik přesnosti měření. V některých případech to dokonce znamená, že výrobce ani neuvádí všechny charakteristiky přesnosti měření 3D laserového skeneru. Nicméně existuje celá řada publikací, zabývajících se jak návrhem metodiky testování, tak i samotným testováním. První testy skenovacích systémů byly provedeny již kolem roku 2000 a v současné době jsou navrhovány další. Z hlediska testovaných vlastností a parametrů můžeme zmínit testování přesnosti měření délek, měření úhlů, testy, zabývajících se schopností měření na různé druhy materiálu pod různými úhly dopadu, zkreslení zorného pole, určení geometrie skenovaného objektu, přístrojové chyby a další. Velké množství testů a metod je popsáno v publikaci *3D skenovací systémy [1]*. Pro tuto diplomovou práci byly vybrány testy na základě metodiky uvedené v práci *Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Trimble TX8 a FARO Focus 3D X 130 [11]*.

4.1 Testování měření délek

Prvním testem je ověření délkové přesnosti na délkové základně v laboratoři Bs 128 v budově B na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Testovaný laserový skener se umístí na první pilíř, z něhož bude měřeno na přední stranu polokulového terče, který je postupně umisťován na další pilíře délkové základny. Měření délky se bude pětkrát opakovat na každém pilíři. Naskenovaná mračna se nahrají do softwaru, kde budou zjištěny souřadnice středů kulových terčů. Z těchto souřadnic se vypočte vodorovná délka, která bude následně porovnána se známou délkou mezi danými pilíři délkové základny. Zároveň se na vybraném pilíři otestuje vliv cílových znaků na měřenou délku, kdy bude měřeno na větší množství různých cílů, např. na zadní stranu polokulových terčů, rovinné 6" černobílé terče atd. Z těchto měření bude zjištěna vodorovná vzdálenost stejným způsobem, jako je popsána výše, a porovnána.

4.2 Testování úhlové přesnosti

Testování úhlové přesnosti proběhne ve stejných místech jako testování měření délek. Přibližně do středu místnosti se postaví laserový skener, a kolem něj se v různých výškách a vzdálenostech rozmístí terče do co nejvíce různých směrů. Měření se provede dvakrát tak, aby v mračnu byly naskenovány všechny terče. Následně se laserový skener vymění za totální stanici, umístění terčů a přístroje musí zůstat totožné. Jako cílové znaky se v obou případech použijí rovinné 6" černobílé terče, a to z důvodu jednoduššího cílení totální stanicí do středu terčů, než u terčů kulových. Poté se zaměří totální stanicí osnova směrů. Z naskenovaných mračen se určí souřadnice středů terčů, z nichž se vypočtou vodorovné směry. Ty se poté porovnejí s hodnotami směrů z totální stanice.

4.3 Testování velikosti šumu

Velikost šumu bude testována pomocí desky, na které jsou umístěny barevné čtverce. Testována bude schopnost přístroje měřit na různé barvy a různé povrchy. Základ desky tvoří bílá plocha, na níž je nanášeno deset matných barevných polí. Měření proběhne tak, že se skener postaví do určité vzdálenosti od desky, která bude umístěna kolmo k přístroji, a deska se naskenuje. V softwaru se základ desky i barevné čtverce proloží plochou, určí se přesnost proložení a vzdálenost barevných ploch od základní.

4.4 Testování naskenovaného mračna bodů modelu

Poslední experiment bude komplexním testem vlastností laserového skeneru. Proveden bude ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v Podbabě v městské části Praha 6. Zde se nachází model reliéfu Císařského ostrova a okolí v měřítku 1:70. Velikost modelu je přibližně 30 x 10 m. Vzhledem k velikosti a zakrytým částem modelu bude nutno naskenovat více mračen, ty poté spojit a provést jejich transformaci do místní souřadnicové soustavy. Poté se na modelu zaměří totální stanicí charakteristické body modelu, se kterými se výsledné mračno porovná. Výsledkem porovnání budou vzdálenosti mračen a statistické parametry, jako jsou směrodatná odchylka či průměrná vzdálenost. Na závěr bude naskenované mračno z laserového skenování porovnáno s mračnem získaným fotogrammetricky za pomoci UAV.

5 Měření a zpracování

5.1 Testování měření délek

Experiment proběhl na délkové základně umístěné v laboratoři Bs 128 v budově B Fakulty stavební ČVUT v Praze. Základna je tvořena pilíři umístěnými v přímce. Na první pilíř byl umístěn a urovnán testovaný přístroj, jehož pozice se po celou dobu testu neměnila. Za cílový znak byl vybrán polokulový terč, který byl připevněn k pilíři pomocí přípravku, složeného z trojnožky a vložené části. Vložená část obsahuje libelu a šroub, sloužící k upevnění terče. Terč, přípravek ani jeho části v průběhu měření nebyly měněny. Na laserovém skeneru se vybrala oblast skenování (pokud to bylo možné), a nastavily se nejlepší parametry skenování. Na každý pilíř bylo měřeno 5 skenů, tj. daná vzdálenost byla změřena 5x. Poté byly kulové terče postupně umisťovány na další vybrané pilíře a tento postup byl opakován.



Obr. 20 Umístění trojnožky na pilíři délkové základny

V případě testování vlivu cílů na měřenou vzdálenost bylo postupováno podobným způsobem. Přípravek sloužící k uchycení cílů se umístil pouze na pilíř č. 4, na nějž byly našroubovány různé terče. Měřeno bylo na dva polokulové terče z přední strany, ze zadní strany, a devět rovinných 6" černobílých terčů. Na každý z těchto terčů bylo měření opakováno 3x.



Obr. 21 Zadní strana polokulového terče a rovinný 6" černobílý terč

Naměřená mračna byla naimportována do programu Cyclone. Zde se naskenované terče proložily a získaly se souřadnice středů terčů. Výsledné souřadnice středů terčů byly vloženy do programu Excel, kde se z nich vypočetla vodorovná vzdálenost. Vodorovná vzdálenost byla vypočtena pomocí vzorce (1).

$$d = \sqrt{(X_1 - X_i)^2 + (Y_1 - Y_i)^2} \quad (1)$$

Kde X_1 a Y_1 jsou souřadnice stanoviště, X_i a Y_i jsou souřadnice pilíře

Na každý pilíř či terč bylo měřeno 5, resp. 3 vzdálenosti. Z těchto vzdáleností byla vypočtena průměrná délka. Z rozptylu délek (resp. z odchylek od průměrné délky) byla vypočtena směrodatná odchylka výběrová dle vzorce (2). Výsledné průměrné délky poté byly porovnány s délkami zadanými, vypočten byl jejich rozdíl.

$$s = \sqrt{\frac{\sum v \cdot v}{n - 1}} \quad (2)$$

Kde v je rozdíl délky průměrné a délky měřené, n je počet měření na daný pilíř

Výsledné průměrné délky byly poté porovnány s délkami zadanými, vypočten byl jejich rozdíl. Zadané délky mezi pilíři považujeme za bezchybné, proto můžeme vypočítat základní směrodatnou odchylku z rozdílů průměrů porovnávaných a zadaných délek dle vzorce (3). Tyto rozdíly (dále značené jako V) někdy nazýváme také opravy (tj. oprava měřené délky od „správné“).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum V \cdot V}{n}} \quad (3)$$

Kde V je rozdíl průměrné měřené délky a délky zadané, n je počet měření

Z oprav V byla vypočítána průměrná oprava \hat{V} . Pomocí průměrné opravy byly vypočítány tzv. druhé opravy W podle vzorce (4). Z těchto druhých oprav byla vypočítána základní směrodatná odchylka (5).

$$W = V - \hat{V} \quad (4)$$

Kde V je rozdíl průměrné měřené délky a délky zadané (tzv. oprava), \hat{V} je průměrná oprava

$$\phi = \sqrt{\frac{\sum W \cdot W}{n}} \quad (5)$$

Kde W je tzv. druhá oprava, n je počet měření

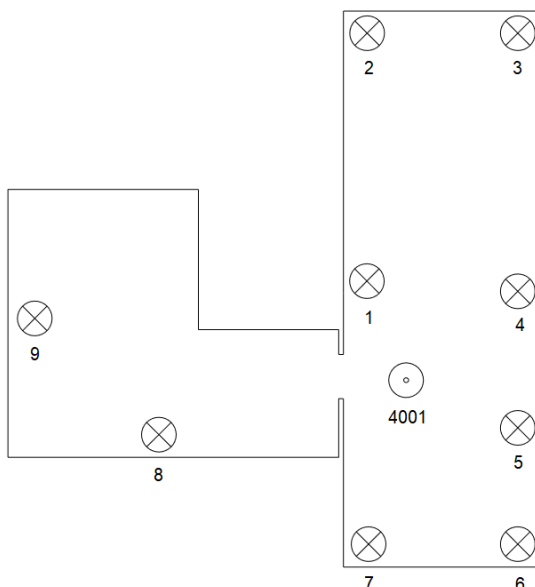
Jednotlivé rozdíly délek zadaných a naměřených testujeme tak, že je porovnáme s mezní odchylkou. Při jednorozměrné veličině, jako je délka, použijeme koeficient spolehlivosti 2, vyjadřující 5% riziko vyřazení správného měření. Výpočet mezní odchylky je proveden podle vzorce (6).

$$\Delta = Up \cdot \sigma \quad (6)$$

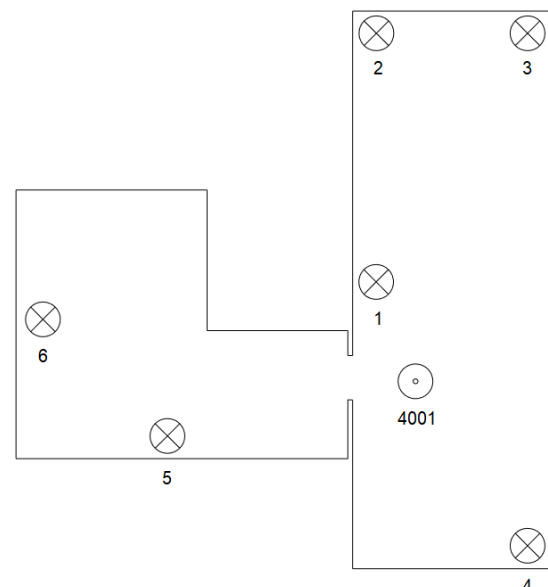
Kde σ je směrodatná odchylka udávaná výrobcem, Up je koeficient spolehlivosti

5.2 Testování úhlové přesnosti

Měření proběhlo na stejném místě jako předchozí test, tj. v laboratoři Bs 128 v budově B Fakulty stavební ČVUT s využitím přilehlého suterénu. Využití prostoru dvou místností proběhlo z důvodu zvýšení vzdálenosti k terčům a zlepšení jejich konfigurace. Přibližně do dveří, spojujících obě místnosti, se umístil stativ s přístrojem. Poté byly rozmístěny terče v různých výškách a směrech v obou místnostech tak, aby byla zajištěna viditelnost z místa měření na každý terč. Při testování přístroje Leica ScanStation P40 bylo využito devíti rovinných 6" černobílých terčů, u skeneru Leica BLK360 se jich použilo šest (obr. 22 a obr. 23). Měření bylo provedeno s každým přístrojem dvakrát, v případě Leica BLK360 se jedná o dva panoramatické skeny, u Leica ScanStation P40 byl v prvním případě pořízen panoramatický sken, v druhém byly jednotlivé terče skenovány samostatně (každý terč má vlastní mračno). Měření bylo provedeno s nastavením nejlepších parametrů skenování. Poté by skener sundán z trojnožky a vyměněn za totální stanici. Byla použita kalibrovaná totální stanice Trimble S8 s přesností měření uhlů (směrodatná odchylka podle DIN 18723) 1" (0,3 mgon) [13], pomocí které se určili nominální hodnoty vodorovných směrů. Vzhledem k použití rovinných černobílých terčů bylo cíleno přímo do jejich středů. Měření vodorovných směrů proběhlo ve 2 skupinách v případě porovnání s BLK360, ve 3 skupinách v případě porovnání s Leica ScanStation P40.



Obr. 22 Rozmístění terčů (Leica ScanStation P40)



Obr. 23 Rozmístění terčů (Leica BLK360)

Naměřená mračna byla naimportována do programu Cyclone. Zde se naskenované terče proložily a získaly se souřadnice středů terčů. Výsledné souřadnice terčů byly vloženy do programu Excel, kde z nich byl vypočten směrník pomocí vzorce (7). Pokud byl vypočtený směrník záporný, přičetla se k němu hodnota 400 gon.

$$\tan \sigma_{1,i} = \frac{(Y_i - Y_1)}{(X_i - X_1)} \quad (7)$$

Kde X_1 a Y_1 jsou souřadnice stanoviště, X_i a Y_i jsou souřadnice středu terče

Následně byl vypočten průměrný orientační posun vůči naměřeným směrům totální stanicí, o který byly opraveny směry získané laserovým skenerem. Jelikož nominální vodorovné směry z totální stanice jsou výrazně přesnější, než je předpokládaná přesnost vodorovných směrů ze skeneru, můžeme z rozdílů vodorovných směrů vypočítat základní směrodatnou odchylku dle vzorce (3).

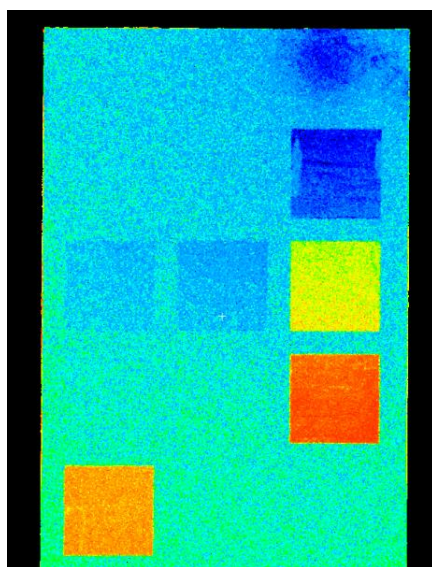
5.3 Testování velikosti šumu

Měření proběhlo také v laboratoři Bs 128 v budově B Fakulty stavební ČVUT. Testování bylo provedeno měřením na bílou desku s barevnými čtverci. Deska byla umístěna kolmo k přístroji do vzdálenosti přibližně 5 metrů. Na přístroji byly nastaveny nejlepší parametry skenování a provedlo se měření.



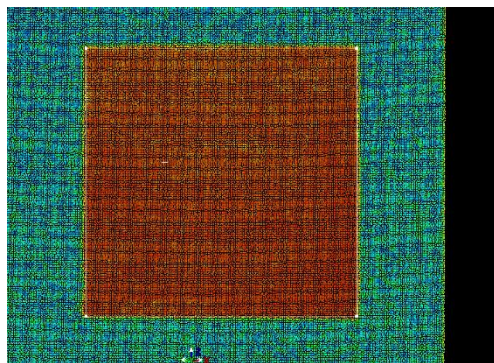
Obr. 24 Deska s barevnými čtverci

Naměřené skeny byly naimportovány do programu Cyclone. Z naměřených skenů bylo vyříznuto mračno, které obsahuje pouze samotnou desku. Z ní byly vyříznuty barevné čtvercové plochy (obr. 26), které byly proloženy plochou (obr. 27). Proložena plochou byla i samotná základová deska. Z informací o ploše v programu Cyclone byla získána směrodatná odchylka proložení jak u deseti barevných čtverců, tak u základové desky.

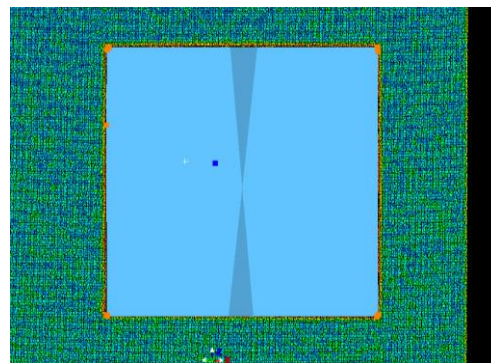


Obr. 25 Naskenovaná deska

U barevných čtverců, které byly proloženy plochou, byla postupně měřena vzdálenost od základové desky. Byla využita funkce v programu Cyclone, která měří vzdálenost od geometrického prvku k vybranému bodu. Jako geometrický prvek byla vybrána plocha základové desky, vybraným bodem potom byl přibližně střed barevného čtverce. Určená vzdálenost je kolmá délka od vybraného bodu na základovou desku.



Obr. 26 Vyříznutí barevného čtverce



Obr. 27 Proložení plochou

5.4 Testování naskenovaného mračna bodů modelu

Měření modelu reliéfu Císařského ostrova ve Výzkumném ústavu vodohospodářském proběhlo ve dvou etapách. Nejprve byl model zaměřen skenerem Leica ScanStation P40, v další etapě přístrojem Leica BLK360. Mimo testované skenery byla použita také totální stanice Trimble S8, sloužící k referenčnímu zaměření modelu a určení místního souřadnicového systému.

V místnosti s modelem byly instalovány 4 odrazné štítky ve vhodné konfiguraci jakožto cílové znaky bodů místního souřadnicového systému. Po zaměření a určení souřadnic těchto bodů totální stanicí byl zaměřen samotný model, a to přibližně 100 charakteristickými body na reliéfu modelu. V další fázi byl model zaměřen laserovým skenerem Leica ScanStation P40. V okolí modelu bylo rozmístěno 6 kulových terčů, sloužících jako identické/spojovací body. Poté proběhlo samotné skenování tak, aby byl zaměřen celý model včetně kulových terčů. V další etapě byl model zaměřen skenerem Leica BLK360. Po obvodu modelu bylo vylepeno 22 rovinných 6" černobílých terčů, jejichž středy byly určeny v místním souřadnicovém systému pomocí totální stanice. Následně byl celý model naskenován včetně terčů v okolí.

Naměřené skeny přístrojem Leica ScanStation P40 byly nahrány do programu Cyclone. Zde byla provedena registrace mračen pomocí kulových terčů dle postupu uvedeném v kapitole 3.1. Finální mračno skládající se ze všech skenů bylo očištěno a oříznuto tak, aby obsahovalo pouze samotný model. Dále byla provedena redukce mračna, kdy byl snížen počet bodů v mračnu a tím i jeho velikost. Vzhledem k vysoké hustotě mračna tímto krokem nedošlo k ovlivnění přesnosti zaměření modelu. Jelikož je mračno umístěno stále v souřadnicové soustavě skeneru, je nutné ho transformovat do místní souřadnicové soustavy, která bude shodná pro všechny porovnávaná mračna. Na modelu byly vybrány charakteristické body, nejčastěji hustě naskenované rohy, které byly zaměřeny totální stanicí, a mají proto určené souřadnice v místní soustavě. Vybráno bylo celkově 10 bodů a jejich souřadnice byly nahrány do programu Cyclone, kde byla provedena transformace modelu podle postupu, který je popsán v kapitole 3.1. Takto zpracované mračno bylo exportováno do formátu *.PTS*.

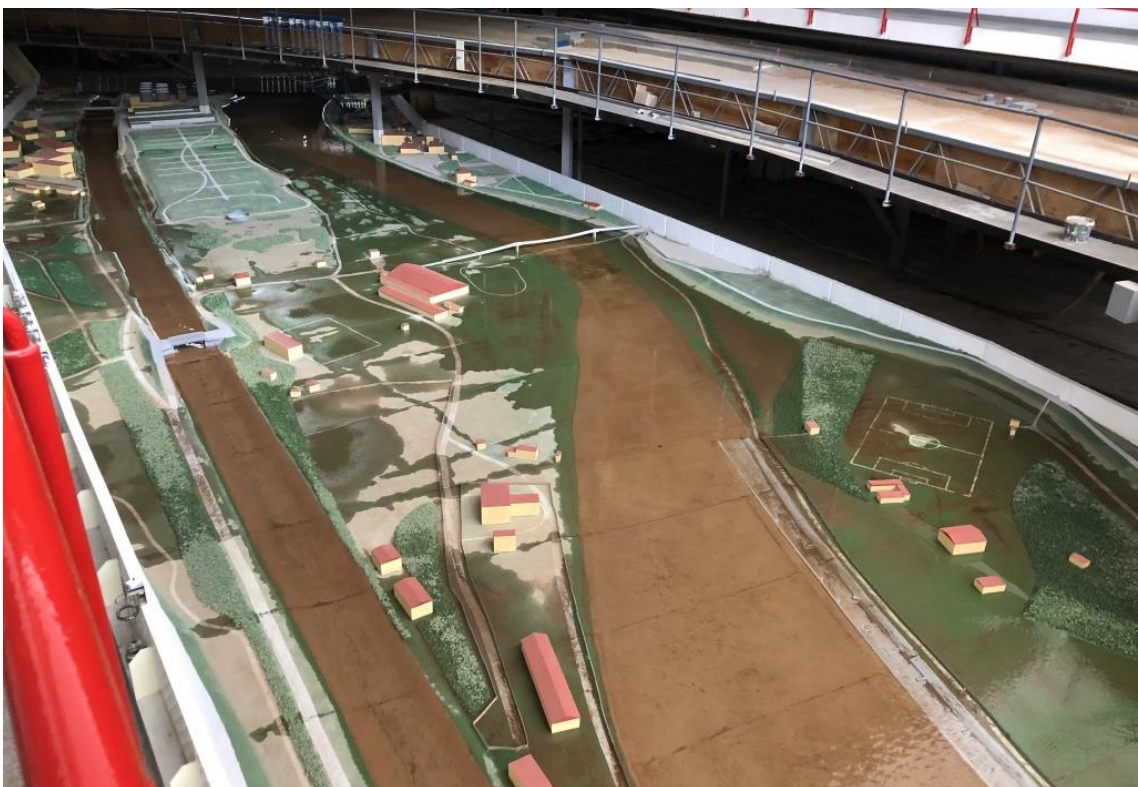
Mračna, naskenovaná přístrojem Leica BLK360, byla také nahrána do programu Cyclone. Na každém mračnu byly nalezeny středy terčů spojovacích bodů, a očíslovány. Jelikož souřadnice středů terčů v místní soustavě byly určeny totální stanicí, můžeme vzájemnou registraci mračen i transformaci do jiné soustavy provést v jednom kroku. Souřadnice středů terčů byly nahrány do programu Cyclone, kde byla registrace i transformace provedena dle postupu uvedeném výše. Takto získané mračno bylo očištěno, oříznuto a redukováno. Na závěr byl proveden export do formátu *.PTS*.

Poslední mračno modelu, určené k porovnání, bylo získané fotogrammetricky pomocí UAV metodou SfM (Structure from Motion). Měření provedla a v rámci své diplomové práce zpracovala Bc. Hana Rýglová. Tato metoda kombinuje stereofotogrammetrii s průsekovou fotogrammetrií, do výpočtu mohou tedy vstupovat snímky jak s rovnoběžnou osou záběru, tak i s osami konvergentními. Není nutné tedy přesně dodržovat zásady pořizování snímků, jako je tomu v případě stereofotogrammetrie. Ze sekvence navazujících snímků, pořízených pohybující se kamerou v čase, se určí prostorový pohyb kamery a 3D struktura scény. Sledováním množiny bodů napříč sekvencí snímků lze zjistit, kde se kamera nachází a jaké je prostorové rozmístění bodů, které byly zaznamenány. SfM hledá obrazovou korelaci mezi snímky, na jejímž základě je objekt rekonstruován v 3D prostoru. [14]

K pořizení snímků byl použit dron DJI Spark, který je vybaven 1/2.3" CMOS snímačem s rozlišením 12 MPIX. Snímkováno bylo v 2 řadách a ve výšce cca 5 m a 3,5 m se svislou osou záběru a ve výšce cca 2,5 m se šikmou osou záběru. Celkem bylo pořízeno 255 snímků. Na modelu bylo rozmístěno 47 vlíčovacích bodů přibližně ve čtvercové síti, jejichž souřadnice v místní síti byly určeny totální stanicí Trimble S8. Snímky a vlíčovací body byly nahrány do programu Agisoft PhotoScan, který je určený k tvorbě 3D dat metodou SfM. V programu došlo k vyrovnání snímků, přiřazení souřadnicového systému a vygenerování hustého mračna bodů. Výsledné mračno bodů je vypočteno na kvalitu High.

Porovnání proběhlo v programu CloudCompare. Po nahrání mračen byly vybrány ty dvě, které se budou porovnávat. Nejprve bylo zvoleno, jaké mračno je referenční a které je porovnávané. Jako referenční je vždy nastaveno to s vyšší hustotou. Dále byly nastaveny parametry porovnání. Nejprve byl rozdělen výpočet

vzdálenosti pro každou osu X, Y a Z. Vzdálenosti jsou vypočteny pomocí lokálního matematického modelu, kdy vzdálenost každého bodu porovnávaného mračna k nejbližšímu bodu mračna referenčního je nahrazena vzdáleností k lokálnímu modelu. Tento referenční model byl vypočten 2D $\frac{1}{2}$ Delaunayovou triangulací, počet trojúhelníků mezi kterými byl bod interpolován byl 12. Po výpočtu byla mračna porovnána na základě vypočtené vzdálenosti v souřadnici Z. Po výpočtu se nastavila modro-zeleno-žluto-červená hypsometrie s 10 kroky, vyjadřující vzdálenost mezi mračny. Poté byly vypočtena průměrná vzdálenost a směrodatná odchylka. Jako poslední byl proveden export snímku vypočtených porovnávaných mračen.



Obr. 28 Model Císařského ostrova ve Výzkumném ústavu vodohospodářském

6 Výsledky

6.1 Testování měření délek

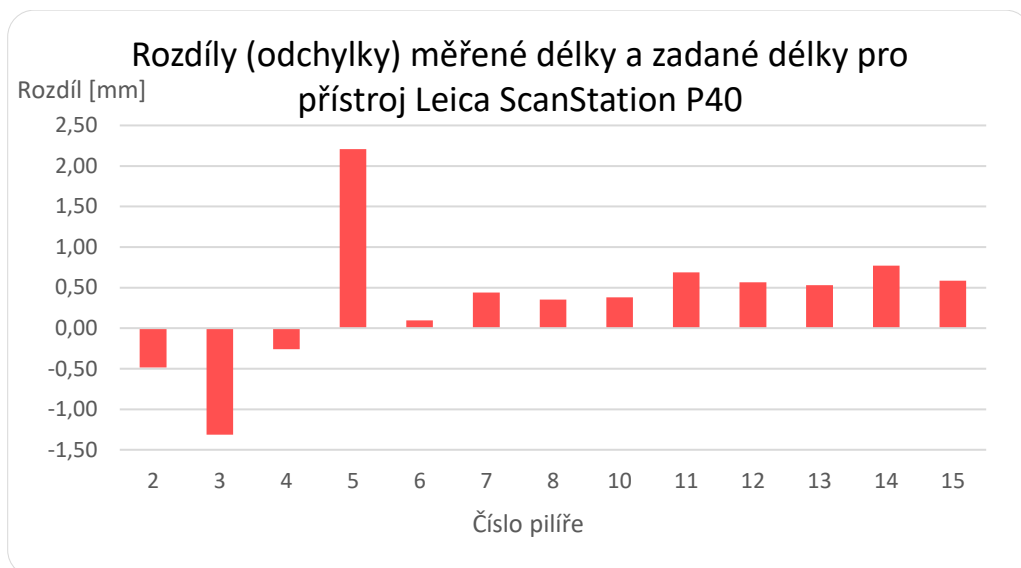
6.1.1 Výsledky Leica ScanStation P40

Naměřené délky mezi pilíři na délkové základně byly porovnány s délkami zadanými. Tabulky s jednotlivými naměřenými délkami, s průměrnými délkami, s odchylkami od průměru a s výběrovými směrodatnými odchylkami jsou vloženy v příloze A. Jednotlivé délky byly měřeny 5x, do porovnání pak vstupoval průměr těchto délek. V tabulce 5 jsou porovnání zadaných délek délkové základny s naměřenými průměrnými délkami a výběrové směrodatné odchylky naměřených průměrných délek.

Tab. 5 Výsledky testování měření délek Leica ScanStation P40

Číslo pilíře	Zadané délky [m]	Leica ScanStation P40		
		Průměr měřených délek [m]	Směrodatná odchylka [mm]	Rozdíly zadané a měřené délky [mm]
2	1,3642	1,3647	0,05	-0,48
3	3,8614	3,8627	0,02	-1,32
4	6,3779	6,3782	0,03	-0,26
5	8,8650	8,8628	0,03	2,21
6	11,3754	11,3754	0,02	0,10
7	13,8653	13,8649	0,02	0,44
8	16,3548	16,3545	0,02	0,35
10	19,7617	19,7613	0,03	0,38
11	21,3296	21,3289	0,03	0,69
12	23,8527	23,8522	0,03	0,56
13	26,3596	26,3591	0,02	0,53
14	28,8049	28,8041	0,04	0,77
15	33,8054	33,8048	0,02	0,58

Z výsledků uvedených v tabulce lze říci, že největší rozdíl délek je na pilíři č. 5, nejmenší na pilíři č. 6. Největší rozptyl naměřených délek vyjádřený směrodatnou odchylkou je na pilíři č. 2.



Graf 1 Rozdíly délek pro Leica ScanStation P40

Z rozdílu délek zobrazených v grafu 1 lze konstatovat, že do vzdálenosti cca 6 m, ve které se nachází pilíř č. 4, měří laserový skener délky nepatrně delší, přičemž do této vzdálenosti největší chyby dosahuje na pilíři č. 3, na kterém je rozdíl o velikosti -1,32 mm. Největší nalezená odchylka v celém souboru měření o velikosti 2,21 mm je na pilíři č. 5. Jelikož je tato odchylka nepoměrně větší než zbytek odchylek, můžeme říci, že se jedná o chybu, která mohla být způsobena např. nestabilitou pilíře č. 5, nebo chybou z dostatečného neurovnání cíle. Zbytek grafu má kladný průběh, kdy se rozdíly délek pohybují do přibližně 1 mm, největší hodnota odchylky v intervalu od pilíře č. 6 do pilíře č. 15 (tj. od přibližně 11 m do 33 m) byla 0,77 mm (pilíř č. 14).

Tab. 6 Porovnání charakteristik přesnosti u Leica ScanStation P40

Směrodatná odchylka	
Vypočtena z měření	Udávaná výrobcem
0,85 mm	1,20 mm + 10 ppm

Z rozdílů naměřených délek a zadaných délek neboli tzv. oprav byla vypočtena směrodatná odchylka, která byla porovnána se stejným údajem, který udává výrobce. Hodnota, získaná testováním délek na délkové základně, je menší než hodnota od výrobce. Zároveň je vhodné upozornit, že nejdelší testovaná délka je 33 m, a laserový skener má dosah 270 m, přičemž výrobce deklaruje přesnost jím udávanou v celém dosahu přístroje. V případě porovnání s mezní odchylkou, jejíž hodnota je 2,4 mm, nebyla překročena ani tato kontrola. Nejvíce se přiblížila odchylka na pilíři 5, která byla 2,21 mm.

Z rozdílů délek byl vypočten průměrný rozdíl (průměrná oprava) o velikosti 0,35 mm. Od této hodnoty byly odečteny rozdíly délek (opravy), získaly se tak tzv. druhé opravy. Díky tomuto kroku dokážeme odhadnout, zda může být dálkoměr zatížen systematickou chybou či nikoliv. Z druhých oprav byla vypočtena směrodatná odchylka, která byla porovnána ze směrodatnou odchylkou vypočtenou z rozdílů měřených a zadaných délek (tj. prvních oprav).

Tab. 7 Druhé opravy délek u Leica ScanStation P40

Číslo pilíře	Leica ScanStation P40
	Druhé opravy / Rozdíly délek opravené o průměrný rozdíl [mm]
2	0,83
3	1,67
4	0,61
5	-1,86
6	0,25
7	-0,09
8	0,00
10	-0,03
11	-0,34
12	-0,21
13	-0,18
14	-0,42
15	-0,23

Tab. 8 Porovnání vypočtených směrodatných odchylek u Leica ScanStation P40

Směrodatná odchylka	
Výpočet z I. oprav	Výpočet z II. oprav
0,85 mm	0,77 mm

Zavedení výpočtu druhých oprav způsobí případné vyloučení systematické složky společné pro všechna měření, zároveň díky výpočtu směrodatné odchylky může být získána lepší představa o rozptylu měření dálkoměru. Jelikož hodnota směrodatné odchylky, vypočtené z druhých oprav, je menší než z výpočtu prvních oprav, můžeme říci, že systematická složka je obsažena ve výsledcích měření, nicméně je velmi malá. Reprezentována je průměrnou opravou (tj. průměrný rozdíl délek měřených a zadaných) o velikosti 0,35 mm. Tento jev může být způsoben systematickou chybou dálkoměru, nebo přesností geodetických pomůcek. Přesnost geodetických pomůcek používaných pro centraci přístrojů a terčů se pohybuje okolo 0,10 mm. Nicméně vzhledem k velmi malé hodnotě průměrné opravy můžeme považovat systematický vliv za zanedbatelný.

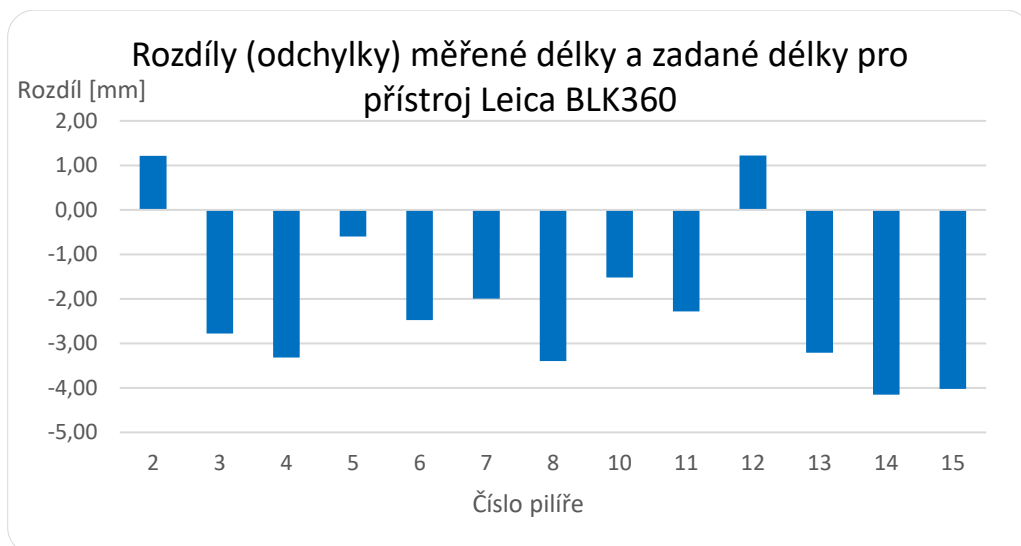
6.1.2 Výsledky Leica BLK360

Porovnání délek měřených a zadaných proběhlo způsobem stejným, jako je uvedeno v kapitole 6.1.1. Tabulky s jednotlivými naměřenými délkami, s průměrnými délkami, s odchylkami od průměru a s výběrovými směrodatnými odchylkami jsou vloženy v příloze A. V tabulce 9 jsou porovnání zadaných délek délkové základny s naměřenými průměrnými délkami a výběrové směrodatné odchylky naměřených průměrných délek.

Tab. 9 Výsledky testování měření délek Leica BLK360

Číslo pilíře	Zadané délky [m]	Leica BLK360		
		Průměr měřených délek [m]	Směrodatná odchylka [mm]	Rozdíly zadané a měřené délky [mm]
2	1,3642	1,3630	0,26	1,22
3	3,8614	3,8642	0,55	-2,78
4	6,3779	6,3812	0,73	-3,32
5	8,8650	8,8656	0,65	-0,60
6	11,3754	11,3779	0,44	-2,47
7	13,8653	13,8673	0,69	-2,00
8	16,3548	16,3582	1,36	-3,40
10	19,7617	19,7632	1,71	-1,52
11	21,3296	21,3319	0,65	-2,28
12	23,8527	23,8515	0,58	1,22
13	26,3596	26,3629	1,10	-3,21
14	28,8049	28,8090	1,04	-4,15
15	33,8054	33,8094	5,50	-4,02

Z dat, které jsou zobrazeny v tabulce vyplývá, že největší rozdíl délek je na pilíři č. 14, nejmenší na pilíři č. 5. Největší rozptyl naměřených délek vyjádřený směrodatnou odchylkou je na pilíři č. 15, který výrazně převyšuje ostatní. Je to především způsobeno jedním měřením délky na tento pilíř, u nějž je odchylka od průměrné délky přibližně 9 mm (viz příloha A). V ostatních případech se směrodatné odchylky průměrů měřených délek pohybují do cca 1,5 mm.



Graf 2 Rozdíly délek pro Leica BLK360

Z grafu vyplývá, že většina rozdílů měřených a zadaných délek je záporná, tudíž přístroj měří délky delší. Výjimku představují pouze délky na pilíře č. 2 a č. 12. V případě pilíře č. 2 se jedná o velmi malou vzdálenost (1,4 m), v případě pilíře č. 12 může jít o nahodilou chybu z dostatečného neurovnání cíle nebo nestability pilíře. To samé se dá říct o pilíři č. 5, který sice vykazuje zápornou odchylku, nicméně ve srovnání s ostatními je tato odchylka nepoměrně malá. Do vzdálenosti cca 20 m (pilíř č. 11) se rozdíly pohybují do hranice přibližně 3 mm, na větší vzdálenosti se zvětšují. Největší je na pilíři č. 14 (vzdálenost cca 30 m), kde dosahuje hodnoty - 4,15 mm. Vypočtené odchylky jsou v souladu s údaji, které udává výrobce.

Tab. 10 Porovnání charakteristik přesnosti u Leica BLK360

Směrodatná odchylka	
Vypočtena z měření	Udávaná výrobcem
2,70 mm	4mm/10m a 7mm/20m

Směrodatná odchylka, získaná z měření, byla vypočtena z rozdílů naměřených délek a zadaných délek (tzv. oprav). Při porovnání s hodnotou, kterou udává výrobce, je směrodatná odchylka z testování délek měřením na délkové základně menší. Vzhledem k velikosti délkové základny, která je 33 m, nebyl proveden test měření délek v celém dosahu přístroje, který je 60 m. Faktem ovšem zůstává, že přesnost měření délek, která je dána výrobcem na vzdálenosti, které bylo možno ověřit, nebyla překročena. Při porovnání s mezní odchylkou, jejíž hodnota je 8 mm, nebyla překročena mezní hodnota žádnou z naměřených hodnot. Nejbližší je odchylka na pilíři 14, která byla 4,15 mm.

Stejně jako v případě přístroje Leica ScanStation P40, i u Leica BLK360 byl vypočten průměrný rozdíl délek (průměrná oprava), o který byly jednotlivé rozdíly opraveny. Tato hodnota dosahuje velikosti -2,10 mm. Pomocí této hodnoty byly následně vypočteny druhé opravy (viz tab. 11). Z druhých oprav byla vypočtena směrodatná odchylka, která byla porovnána ze směrodatnou odchylkou vypočtenou z rozdílů měřených a zadaných délek (tj. prvních oprav).

Tab. 11 Druhé opravy délek u Leica BLK360

Číslo pilíře	Leica BLK360
	Druhé opravy / Rozdíly délek opravené o průměrný rozdíl [mm]
2	-3,32
3	0,68
4	1,22
5	-1,50
6	0,37
7	-0,10
8	1,30
10	-0,58
11	0,18
12	-3,32
13	1,11
14	2,05
15	1,92

Tab. 12 Porovnání vypočtených směrodatných odchylek u Leica BLK360

Směrodatná odchylka	
Výpočet z I. oprav	Výpočet z II. oprav
2,70 mm	1,70 mm

Výpočtem druhých oprav dojde k potlačení systematického vlivu. Druhé opravy představují reálný rozptyl měření dálkoměru, vyjádřený vypočtenou směrodatnou odchylkou. Jelikož tato směrodatná odchylka je o celý 1 mm menší než směrodatná odchylka vypočtena z prvních oprav, znamená to, že výsledky měření jsou zatíženy systematickou chybou. Ta je vyjádřena průměrnou opravou o velikosti -2,10 mm. To je možno vidět i z grafu 2, kde je patrný jistý systematický vliv. Část této chyby může být způsobena přesností geodetických pomůcek (cca 0,10 mm). Nicméně vzhledem k velikosti systematické chyby je pravděpodobné, že větší část této chyby nebo chyba celá je způsobena dálkoměrem. V tomto případě bychom mohli říct, že se jedná o systematickou chybu dálkoměru.

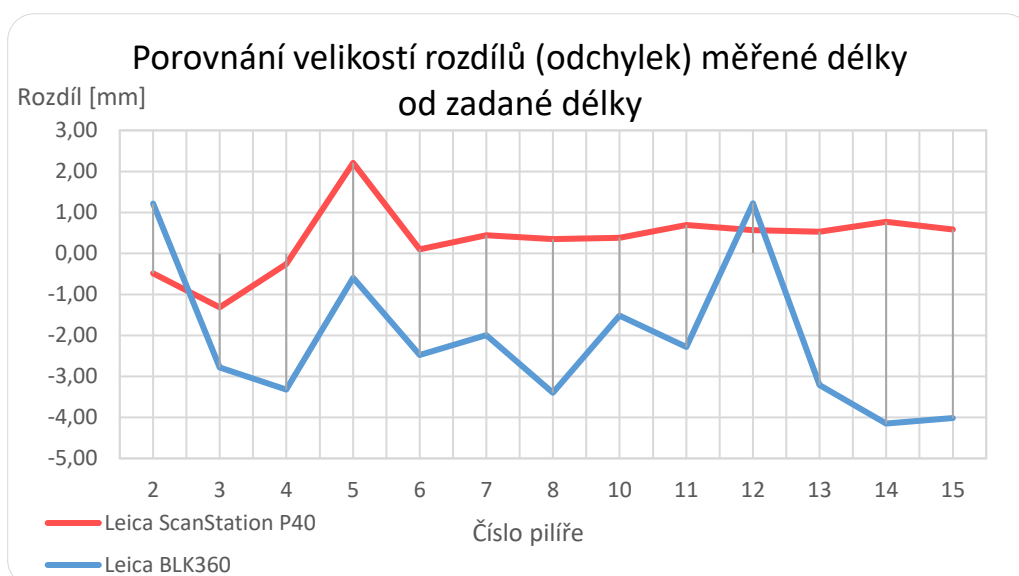
6.1.3 Porovnání výsledků

Výsledky testů obou přístrojů jsou v tabulce 13. Přístroj Leica BLK360 prokazuje větší chybovost v určení délky, přičemž největší chyba je -4,15 mm. U přístroje Leica ScanStation je největší chyba téměř dvakrát menší, a to 2,21 mm.

Tab. 13 Porovnání výsledků testování délek

Číslo pilíře	Zadané délky [m]	Leica ScanStation P40		Leica BLK360	
		Průměr měřených délek [m]	Rozdíly zadané a měřené délky [mm]	Průměr měřených délek [m]	Rozdíly zadané a měřené délky [mm]
2	1,3642	1,3647	-0,48	1,3630	1,22
3	3,8614	3,8627	-1,32	3,8642	-2,78
4	6,3779	6,3782	-0,26	6,3812	-3,32
5	8,8650	8,8628	2,21	8,8656	-0,60
6	11,3754	11,3754	0,10	11,3779	-2,47
7	13,8653	13,8649	0,44	13,8673	-2,00
8	16,3548	16,3545	0,35	16,3582	-3,40
10	19,7617	19,7613	0,38	19,7632	-1,52
11	21,3296	21,3289	0,69	21,3319	-2,28
12	23,8527	23,8522	0,56	23,8515	1,22
13	26,3596	26,3591	0,53	26,3629	-3,21
14	28,8049	28,8041	0,77	28,8090	-4,15
15	33,8054	33,8048	0,58	33,8094	-4,02

Pokud porovnáme délky naměřené přístroji navzájem, můžeme vidět, že Leica BLK360 měří délky obecně spíše delší, kdežto Leica ScanStation P40 naopak kratší. Největší rozdíl v naměřených délkách je u nejdelších vzdáleností.



Graf 3 Porovnání měření délek

U obou dálkoměrů lze pozorovat jistou nestabilitu na krátké vzdálenosti. U Leica ScanStation P40 chyby na prvních třech pilířích jsou záporné, tudíž přístroj změřil délky delší. Leica BLK360 naopak na prvním pilíři délku změřil kratší, chyby délek na dalších dvou poté jsou záporné, tudíž změřeny byly délky delší a odpovídají chybám délek, určených na větší vzdálenosti. Zajímavostí je pilíř č. 5, na němž u obou přístrojů došlo k podobnému výkyvu velikosti chyby délky (viz graf 3). Tuto skutečnost mohla způsobit nestabilita pilíře. Poté mají chyby celkem stabilní průběh, zejména u Leica ScanStation P40, kde se zvětšující se vzdáleností rostou jen minimálně. U přístroje Leica BLK 360 došlo k výkyvu ještě na pilíři č. 12, kde byla zjištěna kladná chyba délky (změřena kratší vzdálenost), což se vymyká celkové tendenci přístroje měřit spíše délky delší. Můžeme se proto domnívat, že zde došlo k hrubé chybě. Na větší vzdálenosti se chyba dálkoměru mírně zvětšuje. Celý průběh grafu je v tolerancích udávaných výrobcem.

6.1.4 Vliv cílových znaků na přesnost měření délky

Testování vlivu cílových znaků bylo provedeno ve vzdálenosti cca 6 m na pilíři č. 4. Celkem bylo otestováno 12 cílových znaků, z nichž 9 jich je rovinných černobílých, další jsou polokulové. Přední stranou polokulového terče je myšlena právě polokulová část, zadní strana je rovinná. Výsledkem testu není jen zjištěný rozptyl délky při použití různých terčů, ale i prokázaná schopnost skeneru rozpoznat a měřit na různé cílové znaky. Výsledky testu jsou v tabulce 14. Z naměřených vzdáleností byl vypočten průměr, se kterým byly porovnávány jednotlivé měřené délky. V tabulce je také zobrazena směrodatná odchylka, vyjadřující rozptyl trojice měření na cílový znak.

Tab. 14 Porovnání vzdáleností na různé terče měřené Leica ScanStation P40

Cíl	Měřená délka [m]	Průměrná délka [m]	Rozdíl délek [mm]	Sm. odchylka měřené délky [mm]
6" ČB terč 1	6,3786	6,3789	0,30	0,09
6" ČB terč 2	6,3784		0,51	0,02
6" ČB terč 3	6,3800		-1,13	0,01
6" ČB terč 4	6,3791		-0,23	0,04
6" ČB terč 5	6,3792		-0,27	0,03
6" ČB terč 6	6,3784		0,47	0,08
6" ČB terč 7	6,3791		-0,19	0,05
6" ČB terč 8	6,3794		-0,52	0,01
6" ČB terč 9	6,3791		-0,18	0,02
Přední strana PK2 ²	6,3785		0,46	0,00
Zadní strana PK1 [*]	6,3795		-0,61	0,27
Zadní strana PK2 [†]	6,3775		1,40	0,34

Největší rozptyl měřených délek se vyskytuje při měření u zadní strany polokulových terčů. Naopak při měření na jejich přední stranu je rozptyl nejmenší z celého souboru testovaných terčů. Při použití rovinných 6" černobílých terčů byla směrodatná odchylka velice podobná, největší hodnota dosáhla velikosti 0,09 mm.

Při porovnání měřených délek je největší rozdíl u zadní strany polokulového terče 2, velkou výchylku prokazuje také černobílý terč 3. Právě délky na tyto dva terče představují nejmenší a největší naměřenou vzdálenost. Rozdíl těchto hodnot je

* PK1 = Polokulový terč 1

† PK2 = Polokulový terč 2

2,5 mm. Při měření na stejný druh terčů, např. na černobílé rovinné terče byl největší rozdíl délek 1,6 mm. V případě zadních stran polokoulí se jedná o hodnotu 2 mm.

Celkově se dá říci, že přední strana polokulových terčů má nejmenší rozptyl měření a vykazuje podobné rozdíly délky od průměrné délky jako ostatní terče. Podobně na tom jsou rovinné 6" černobílé terče. Naopak největší rozptyl měření byl prokázán u zadních stran polokulových terčů, i rozdíly měřené délky jsou výraznější než u ostatních cílových znaků.

Tab. 15 Porovnání vzdáleností na různé terče měřené Leica BLK360

Cíl	Průměrná měřená délka [m]	Směrodatná odchylka [mm]	Rozdíl délek na různé cíle [mm]	Zadaná délka [m]	Odchylky od zadané délky [mm]
6" ČB terč 1	6,3789	1,06	2,35	6,3779	-0,97
Polokoule 1	6,3812	0,73			-3,32

V případě přístroje Leica BLK360 šlo o ověření schopnosti měřit délky na různé cíle, a porovnání takto měřených délek. V tabulce 15 najdeme nejen porovnání délek měřených na rozdílné terče a jejich směrodatné odchylky, ale i porovnání s délkou zadanou. Výsledné hodnoty říkají, že skener je schopen měřit na tento druh terčů. Výsledná délka na rovinný černobílý terč je dokonce bližší délce zadané než při měření na polokulový terč. Co se týče rozptylu jednotlivých měřených délek, ten je v případě polokulového terče menší.

6.2 Testování úhlové přesnosti

6.2.1 Výsledky Leica ScanStation P40

Celkově bylo provedeno testování úhlové přesnosti dvakrát, jednou při zaměření cílových terčů skenerem jednotlivě (každý terč byl změřen jako výseč zorného pole), podruhé jako panoramatický sken. Nominální hodnoty vodorovných směrů byly určeny totální stanicí Trimble S8 s přesností měření uhlů 0,3 mgon [13].

Vodorovné směry z laserového skeneru byly redukovány o průměrný orientační posun (příloha B). Výsledky porovnání redukováných směrů se směry z totální stanice jsou v tabulce 16.

Tab. 16 Výsledky testování úhlové přesnosti Leica ScanStation P40

Měření č.1 - každý terč skenován zvlášť				Měření č.2 - všechny terče v jednom skenu			
Číslo bodu	Trimble S8	Leica Scan-Station P40	Rozdíl [gon]	Číslo bodu	Trimble S8	Leica Scan-Station P40	Rozdíl [gon]
	Směr [gon]	Red. směr [gon]			Směr [gon]	Red. směr [gon]	
1	0,0000	0,0001	-0,0001	1	0,0000	0,0007	-0,0007
2	14,9656	14,9642	0,0014	2	14,9656	14,9651	0,0005
3	34,2646	34,2649	-0,0003	3	34,2646	34,2654	-0,0008
4	56,8698	56,8727	-0,0029	4	56,8698	56,8711	-0,0012
5	171,2458	171,2477	-0,0019	5	171,2458	171,2457	0,0001
6	202,7587	202,7599	-0,0012	6	202,7587	202,7570	0,0017
7	234,5767	234,5760	0,0006	7	234,5767	234,5763	0,0003
8	307,6788	307,6767	0,0021	8	307,6788	307,6786	0,0002
9	337,6497	337,6475	0,0022	9	337,6497	337,6499	-0,0002

Při porovnání těchto dvou měření můžeme říci, že mírně větší rozdíly vykazuje měření č. 1. Také maximální hodnota rozdílu je větší z prvního měření (-0,0029 gon) než v případě měření druhého (0,0017 gon). Z rozdílů směrů byly vypočteny směrodatné odchylky (tabulka 17). Tyto hodnoty potvrzují, že úhlové měření je přesnější v případě použití panoramatického skenu, než v případě skenování každého terče zvlášť. Nicméně při porovnání s hodnotami od výrobce je zřejmé, že při použití obou způsobů skenování je úhlová přesnost v souladu s přesností, kterou výrobce udává.

Tab. 17 Porovnání směrodatných odchylek vodorovných směrů Leica ScanStation P40

Směrodatná odchylka		
Výpočet z I. Měření	Výpočet z II. Měření	Udávaná výrobcem
0,0017 gon	0,0008 gon	0,0025 gon

6.2.2 Výsledky Leica BLK360

Testování úhlové přesnosti bylo provedeno dvakrát, a to v obou případech jako panoramatický sken. Nominální hodnoty vodorovných směrů byly určeny totální stanicí Trimble S8 s přesností měření uhlů 0,3 mgon [13].

Vodorovné směry naměřené laserovým skenerem byly redukovány o průměrný orientační posun (Příloha B). Výsledky porovnání redukováných směrů se směry z totální stanice jsou v tabulce 18.

Tab. 18 Výsledky testování úhlové přesnosti Leica BLK360

Měření č.1 - panoramatický sken				Měření č.2 - panoramatický sken			
Číslo bodu	Trimble S8	Leica BLK360	Rozdíl [gon]	Číslo bodu	Trimble S8	Leica BLK360	Rozdíl [gon]
	Směr [gon]	Red.směr [gon]			Směr [gon]	Red.směr [gon]	
1	0,0000	-0,0131	0,0131	1	0,0000	-0,0053	0,0053
2	14,2630	14,2730	-0,0100	2	14,2630	14,2599	0,0031
3	33,7219	33,7228	-0,0009	3	33,7219	33,7247	-0,0028
4	201,7469	201,7383	0,0086	4	201,7469	201,7508	-0,0039
5	306,1798	306,1963	-0,0165	5	306,1798	306,1699	0,0099
6	332,7923	332,7866	0,0057	6	332,7923	332,8039	-0,0116

Z výsledků je zřejmé, že mírně menších rozdílů dosahuje druhé měření, nicméně rozdíly si jsou přibližně podobné. Největší rozdíl z prvního měření je na bodě 5, a to -0,0165 gon, v případě druhého měření hodnota -0,0116 gon na bodě 6. Zjištěné rozdíly v obou měřeních oscilují kolem nuly se stejným poměrem kladných a záporných hodnot. Měřené terče byly rozmístěné v různé výšce a vzdálenosti od přístroje, z tohoto pohledu zde není zjevný žádný trend.

Tab. 19 Porovnání směrodatných odchylek vodorovných směrů Leica BLK360

Směrodatná odchylka		
Výpočet z I. Měření	Výpočet z II. Měření	Udávaná výrobcem
0,0104 gon	0,0070 gon	0,0123 gon

Z rozdílů směrů byly vypočteny směrodatné odchylky a porovnány jak mezi sebou, tak s hodnotou úhlové přesnosti, kterou udává výrobce (tabulka 19). Jak lze vidět, v případě prvního měření bylo dosaženo menší směrodatné odchylky, nicméně ani v jednom měření nebyla hodnota od výrobce překročena. Dá se tedy předpokládat, že úhlová přesnost přístroje prezentovaná výrobcem odpovídá skutečnosti.

6.2.3 Porovnání výsledků

Jak je uvedeno v předchozích kapitolách, oba přístroje splňují výrobcem udávané parametry. Co se týče charakteristik přesnosti přístrojů jako takových, jejich porovnání je uvedeno v tabulce 20.

Tab. 20 Porovnání charakteristik úhlového měření

Leica ScanStation P40	
Směrodatná odchylka	
Výpočet z I. Měření	Výpočet z II. Měření
0,0017 gon	0,0008 gon
Leica BLK360	
Směrodatná odchylka	
Výpočet z I. Měření	Výpočet z II. Měření
0,0104 gon	0,0070 gon

Na první pohled je zřejmé, že přístroj Leica BLK360 má horší přesnost úhlového měření než Leica ScanStation P40. Získané výsledné směrodatné odchylky, charakterizující přesnost úhlového měření, se průměrně liší mezi danými přístroji o 0,0075 gon. Zároveň u žádného z přístrojů nebyl zjištěn vliv vzdálenosti či výšky terče na přesnost určení směru.

V případě přístroje Leica BLK360 může mít vliv na přesnost měření úhlů i skenování na menší rozlišení skenu než je tomu u Leica ScanStation P40. Díky menšímu počtu bodů nemusí být přesně rekonstruován střed terče, zvláště v případě použití rovinných terčů, a tato chyba se může projevit právě při úhlovém měření.

6.3 Testování velikosti šumu

Velikost šumu byla testována na desce s barevnými čtverci, které byly proloženy rovinou a porovnány se základní deskou. Z těchto dat byly získány vzdálenosti mezi jednotlivými barevnými čtverci a základní rovinou desky a směrodatné odchyly proložení.

6.3.1 Výsledky Leica ScanStation P40

Přístroj naskenoval všechny barevné čtverce bez rozdílu, každý obsahuje přibližně stejný počet bodů. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 21.

Tab. 21 Výsledky testování velikosti šumu pro Leica ScanStation P40

Barva	Vzdálenost barev od základní desky [mm]*	Směrodatná odchylna proložení [mm]
Bílá	-0,15	0,39
Černá	-0,37	0,34
Fialová	-0,41	0,40
Hnědá	0,81	0,49
Modrá	-0,97	0,36
Oranžová	0,61	0,40
Růžová	-0,98	0,40
Šedá	-0,46	0,43
Zelená	0,02	0,42
Žlutá	-0,49	0,35

Podle údajů uvedených v tabulce můžeme vidět, že přístroj měří na různě barevné povrchy délky spíše delší, než je měří na základní béžovou desku. Výjimku představují barvy hnědá a oranžová, které byly určeny jako jediné před základní deskou. Ostatní barevné desky jsou za základní deskou, barvy modrá a růžová byly posunuty nejdále, a to ve vzdálenosti cca 1 mm. Naopak barvy zelená a bílá nejvíce korespondují se základní deskou, rozdíl vzdáleností na tyto barvy je prakticky neznamenný.

Směrodatné odchyly proložení se u všech barev pohybují v podobných hodnotách, průměrná odchylna je 0,40 mm. Největší odchylna je u barvy hnědé, nejmenší u černé, tyto hodnoty se však liší pouze o 0,15 mm. Celkově můžeme vliv různých barev na přesnost při prokládání mračna rovinou považovat za konstantní.

* Vzdálenosti od základní desky; - za deskou, + před deskou

6.3.2 Výsledky Leica BLK360

Barevná deska byla naskenována korektně, na žádném barevném čtverci nechybí data. Výsledky pro přístroj jsou uvedeny v tabulce 22.

Tab. 22 Výsledky testování velikosti šumu pro Leica BLK360

Barva	Vzdálenost barev od základní desky [mm]*	Směrodatná odchylka proložení [mm]
Bílá	0,25	1,19
Černá	-1,85	2,51
Fialová	-0,27	1,10
Hnědá	2,08	1,70
Modrá	-0,49	1,23
Oranžová	0,88	1,08
Růžová	-0,36	1,07
Šedá	-1,23	1,99
Zelená	0,27	1,76
Žlutá	-0,30	1,13

V případě vzdáleností barevných čtverců od základní desky není zde zjevný žádný trend, četnosti výskytu čtverců před deskou i za deskou jsou přibližně stejné. Nejvíce vzdálen je čtverec s hnědou barvou, který je umístěn 2,08 mm před deskou. Následuje barva černá, která je naopak za deskou ve vzdálenosti 1,85 mm. Barvy bílá, fialová, zelená, žlutá a růžová vykazují nejmenší vzdálenosti od základové béžové desky.

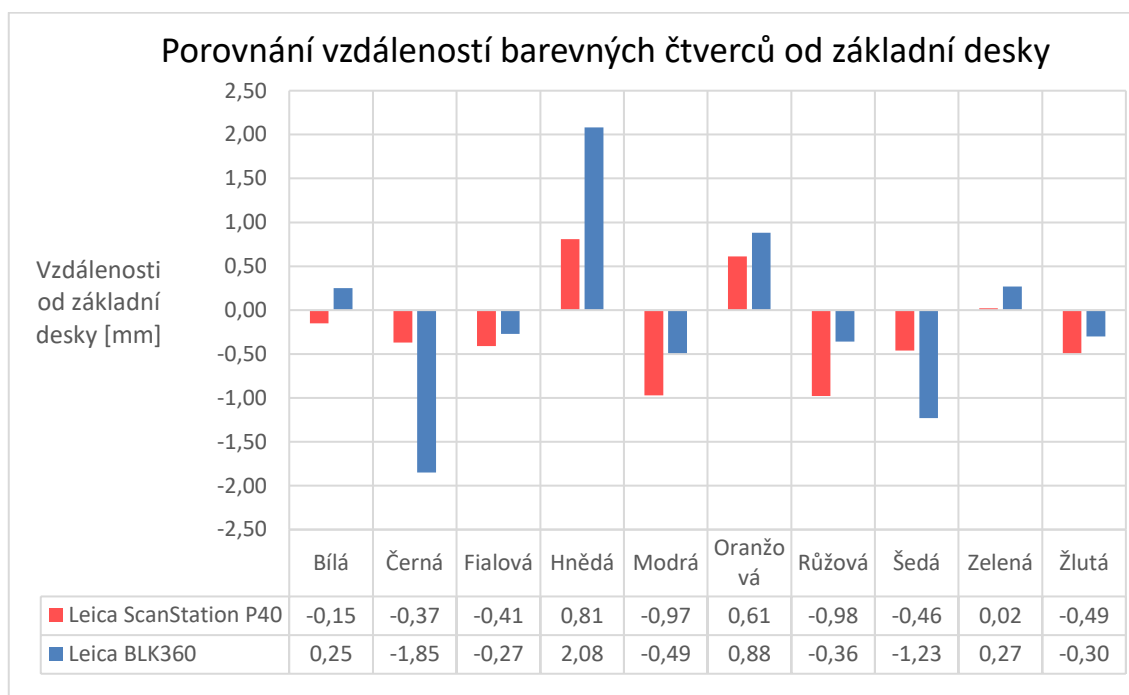
Největší směrodatná odchylka proložení byla zjištěna jednoznačně u barvy černé. Jako jediná překročila 2 mm, a to konkrétně na hodnotu 2,51 mm. Následují barvy šedá, zelená a hnědá. Nejmenší směrodatné odchylky pohybující se kolem 1 mm byly určeny u barvy bílé, fialové, oranžové, růžové a žluté.

Zjištěné výsledky u tmavších barev v obou případech dosahují extrémních hodnot, zejména u černé, hnědé a šedé. Z toho lze usoudit, že v případě měření tímto přístrojem na barvě skenovaného objektu záleží, a můžeme očekávat různé výsledky při skenování různých barev. Tento jev by se mohl projevit zejména pak při skenování tmavších objektů. Nicméně faktem zůstává, že přístroj je schopen zaměřit předměty jakékoliv barvy.

* Vzdálenosti od základní desky; - za deskou, + před deskou

6.3.3 Porovnání výsledků

V grafu 4 můžeme vidět porovnání výsledných vzdáleností barevných čtverců od základní béžové desky. Zajímavé je, že oba přístroje určily téměř všechny totožné barvy vzdálené stejným směrem od základní desky. Například barva hnědá je v obou případech barva s největší určenou vzdáleností od desky, ale také oba přístroje jí určili tak, že vystupuje před základní desku.

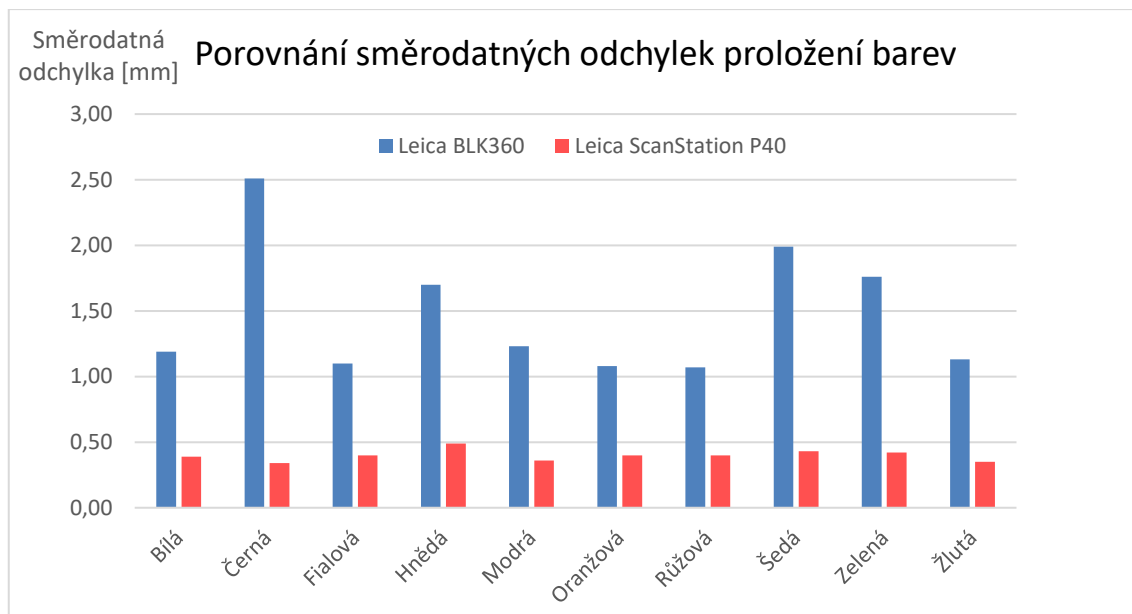


Graf 4 Porovnání vzdáleností barevných čtverců

Totéž se ovšem nedá říct o barvě bílé, která je jediným případem, kdy ji každý z přístrojů určil na opačnou stranu od desky, nicméně vzdálenosti jsou tak malé, že můžeme konstatovat, že oba přístroje s měřením na tuto barvu nemají problém. To lze říci i o barvě zelené nebo fialové. Velký rozdíl mezi vzdálenostmi totožných barev je u černé, hnědé a šedé, kde větší z porovnávaných hodnot byla vždy ta, která byla určena přístrojem Leica BLK360. Obráceně je to u barvy fialové, modré, růžové a žluté, kde větší vzdálenost naměřil skener Leica ScanStation P40, nicméně rozdíly v porovnávaných vzdálenostech nejsou tak velké, největší je u růžové, kde je rozdíl přibližně 0,6 mm.

Celkově větší chyby v určení vzdálenosti na různě barevné plochy prokazuje Leica BLK360. I když jsou určité barvy, kde vzdálenost od základní desky má menší než Leica ScanStation P40, zejména u tmavších barev jsou tyto rozdíly velké. Oproti

tomu Leica ScanStation P40 má mnohem menší rozptyl vzdáleností měřené na různě barevné předměty, a i s tmavými barvami si dokáže bez větších problémů poradit.



Graf 5 Porovnání směrodatných odchylek proložení barev

V grafu 5 je znázorněna velikost směrodatných odchylek při prokládání mračna rovinou na jednotlivých barevných polích. Příklad Leica ScanStation P40 vykazuje velikost směrodatných odchylek do 0,5 mm, přičemž rozptyl na jednotlivých barvách je minimální. Příklad Leica BLK360 na první pohled prokazuje odchylky větší, navíc jejich velikost se liší podle dané barvy. Největší hodnota je 2,5 mm u černé barvy, naopak nejmenších hodnot dosahují odchylky u bílé, fialové, oranžové, růžové a žluté, a to kolem 1 mm. Rozdíl minimální a maximální odchylky je přibližně 1,5 mm.

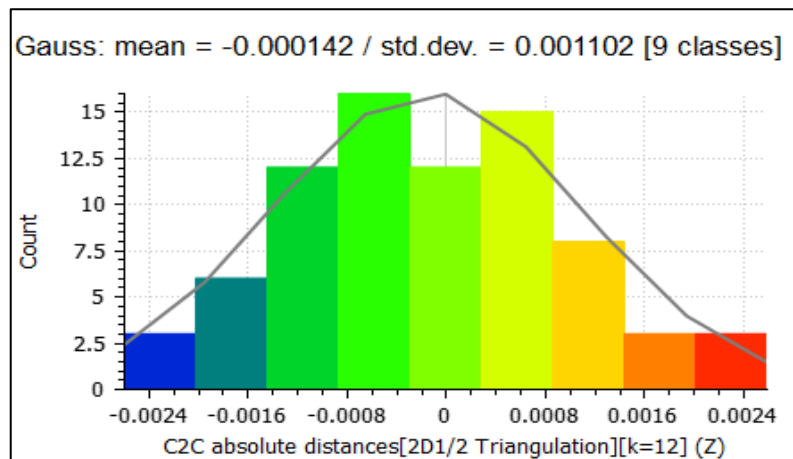
Obecně je velikost šumu, která je reprezentována směrodatnou odchylkou proložení, větší u přístroje Leica BLK360. Navíc tyto hodnoty se mění v závislosti na dané barvě, zejména u barev tmavších (černá, šedá, hnědá) dosahují maxima. U přístroje Leica ScanStation P40 je šum minimální, a u všech barev se projeví přibližně stejnou velikostí. U tohoto přístroje můžeme tedy očekávat velmi podobnou kvalitu měřených dat bez ohledu na barvy skenovaného objektu.

6.4 Testování naskenovaného mračna bodů modelu

Referenční mračno bylo zaměřeno totální stanicí Trimble S8. Jedná se o mračno o 87 bodech zaměřených v přibližném rastru na takových místech modelu, kde se nenachází žádné hrany útvarů a objektů. Byť se jedná o mračno výrazně menší než v případě hustých mračen z laserových skenerů, můžeme díky tomuto porovnání získat představu o přesnosti umístění těchto mračen v prostoru. Vzhledem k přesnosti totální stanice můžeme považovat toto mračno za nejpřesnější. Jelikož je charakter modelu rovinný, jedná se pouze o kontrolu ve výšce, tedy v souřadnici Z.

6.4.1 Výsledky Leica ScanStation P40

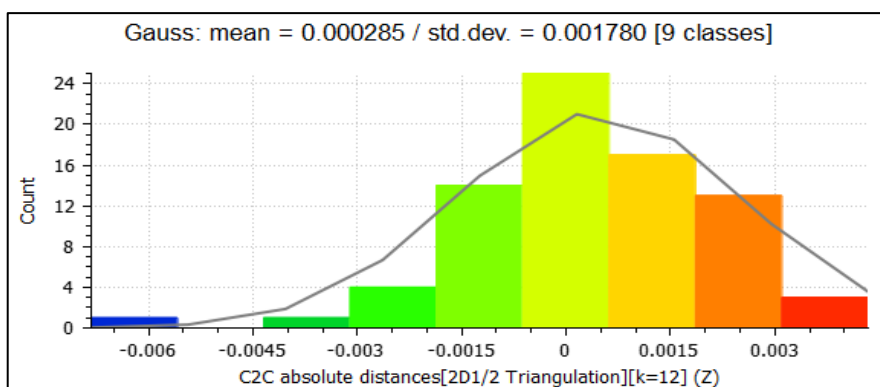
Výsledkem porovnání mračna získané přístrojem Leica ScanStation P40 jsou četnosti jednotlivých vzdáleností a statistické parametry (obr. 29). Vzdálenosti mezi těmito mračny se pohybují od -2,6 mm do 2,6 mm, přičemž průměrná vzdálenost je -0,1 mm. Směrodatná odchylka pak dosahuje hodnoty 1,1 mm.



Obr. 29 Výsledky porovnání mračna z přístroje Leica ScanStation P40 s totální stanicí

6.4.2 Výsledky Leica BLK360

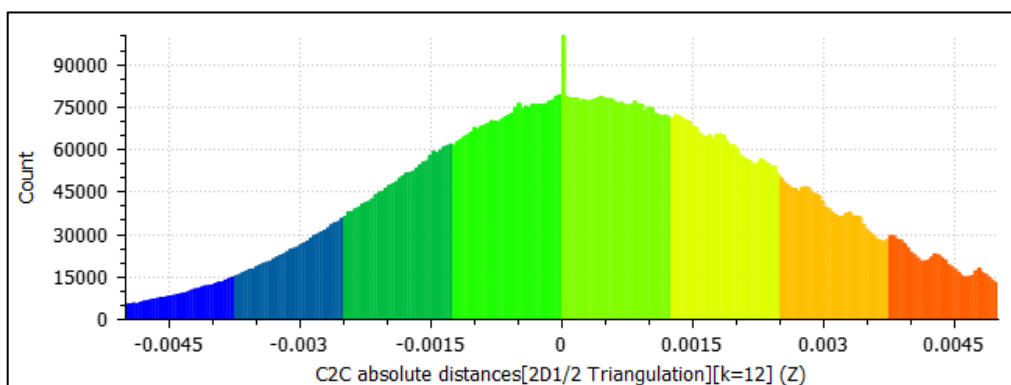
Při porovnání referenčního mračna z totální stanice a hustého mračna ze skeneru Leica BLK360 byla vypočtena celková charakteristika, jako je průměrná vzdálenost a směrodatná odchylka. Průměrná vzdálenost může být interpretována jako systematický posun, jeho hodnota je pak -0,3 mm. Výsledná přesnost je dána směrodatnou odchylkou 1,8 mm. Jednotlivé vzdálenosti se pohybují v intervalu od -8 mm do 4,5 mm.



Obr. 30 Výsledky porovnání mračna z přístroje Leica BLK360 s totální stanicí

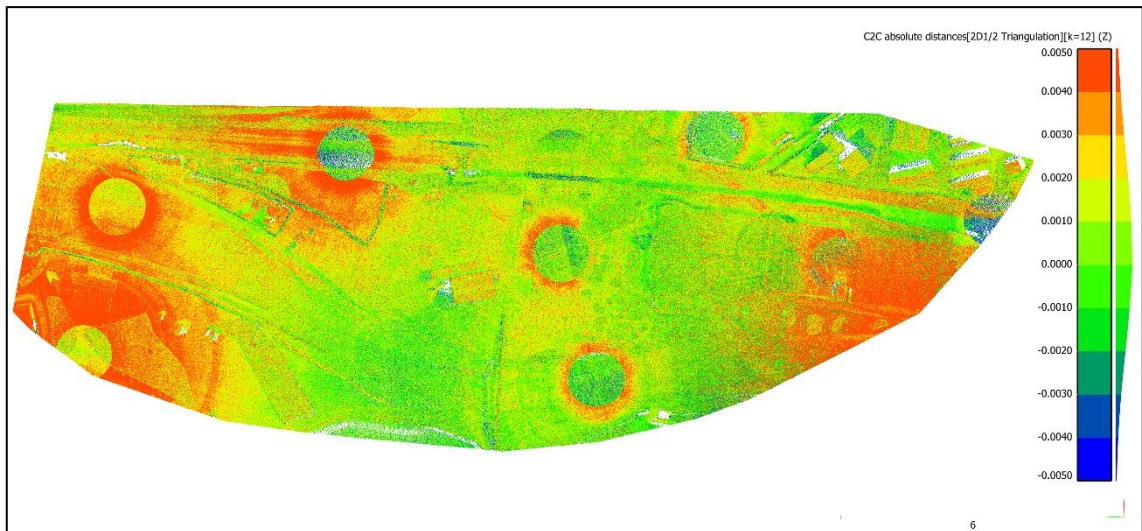
6.4.3 Porovnání výsledků

Jelikož obě mračna pořízená z laserových skenerů Leica ScanStation P40 a Leica BLK360 jsou hustá o počtu několika milionů bodů, došlo ke komplexnímu porovnání celistvého naskenovaného modelu, nikoliv pouze diskretních bodů jako v případě mračna z totální stanice. Průměrná vzdálenost mezi mračky z těchto přístrojů je 0,4 mm, směrodatná odchylka pak 2,5 mm. Celkem bylo vypočteno 11 843 983 vzdáleností.



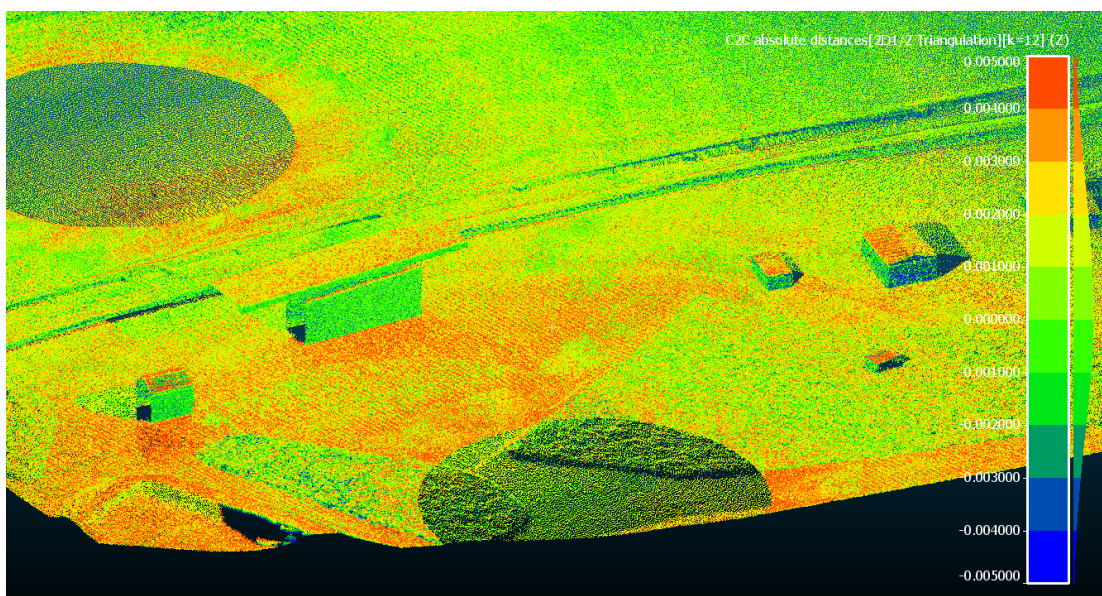
Obr. 31 Četnost jednotlivých vzdáleností při porovnání mračen z laserových skenerů

Na obrázku 32 můžeme vidět mračno v barevné hypsometrii, znázorňující velikosti vzdáleností mezi mračky. Vzhledem ke specifikacím přístroje Leica ScanStation P40 můžeme mračno z daného přístroje považovat za víceméně bezchybné. Zatímco stanoviště přístroje Leica ScanStation P40 jsou na mračnu téměř neznatelná, u stanoviště, kde bylo měřeno přístrojem Leica BLK360, se tvoří červené prstence, znázorňující větší odchylky mezi oběma mračky. Tento jev je způsoben tím, že chyba dálkoměru se projeví plnou velikostí v souřadnici Z při velkém zenitovém úhlu na krátké vzdálenosti. Na větší vzdálenosti dopadá paprsek pod menším zenitovým úhlem, a chyba měření délky má tedy menší vliv.



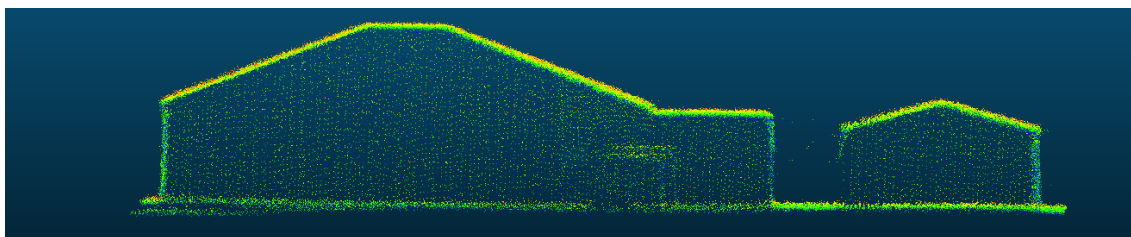
Obr. 32 Porovnání mračen z Leica ScanStation P40 a Leica BLK360

Zároveň v oblasti uvnitř prstence jsou oblasti s velmi malou odchylkou. Jedná se o mračna získaná skenováním z vzdálenějších stanovisek, což znamená, že v případě bodů ve větší vzdálenosti než je nejbližší okolí stroje dostáváme poměrně velkou přesnost. Dále na obrázku hypsometrického mračna jsou vidět dvě oblasti, ve kterých byly zaznamenány větší odchylky, zejména v dolním levém a pravém rohu. To mohlo být způsobeno částečně opět chybou dálkoměru, zároveň však mohlo dojít k nepřesné registraci jednotlivých mračen. Obrázek 33 nám ukazuje danou oblast přiblíženou, na něm je vidět, že odchylky na vodorovných plochách jsou velké, kdežto na vertikálních plochách jsou odchylky malé. Mohlo by to znamenat, že mračno z daného stanoviska je dobře umístěno polohově, nikoliv však vertikálně.

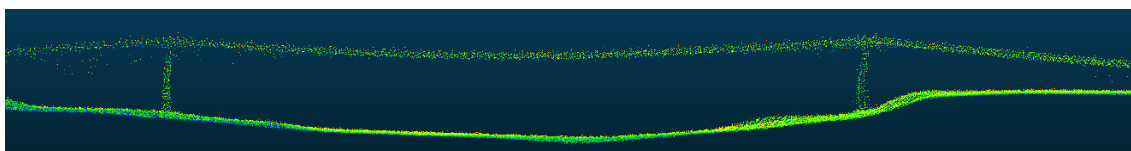


Obr. 33 Detail mračna při porovnání skenerů Leica ScanStation P40 a Leica BLK360

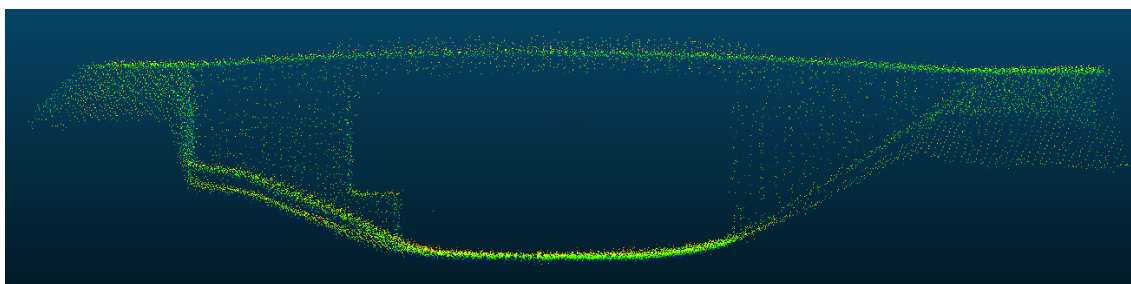
Zatímco vliv vzdálenosti od přístroje na měřená data je u Leica BLK360 zřejmý, vliv tvaru skenovaného objektu už tak jasný není. Na obrázcích 34, 35 a 36 je možno vidět různé skenované objekty, na nichž je vidět, že hrany jsou naskenovány korektně a jsou na nich malé odchylky. Nicméně na mostovkách lávky a mostu se občas objevuje šum, což může být dáno jiným materiálem těchto objektů.



Obr. 34 Porovnání naskenované budovy přístroji Leica ScanStation P40 a Leica BLK360



Obr. 35 Porovnání naskenované lávky přístroji Leica ScanStation P40 a Leica BLK360



Obr. 36 Porovnání naskenovaného mostu přístroji Leica ScanStation P40 a Leica BLK360

Největším problémem při tomto porovnání jsou velké odchylky bodů blízké stanovišti při měření s přístrojem Leica BLK360. Při měření bodů na větší vzdálenosti dochází k odstranění tohoto problému, tyto body mají velkou přesnost. Tento jev je způsoben tím, že chyba dálkoměru se projeví plnou velikostí při měření skoro svisle na krátké vzdálenosti v souřadnici Z. Na větší vzdálenosti dopadá paprsek pod menším zenitovým úhlem, a chyba měření délky má tedy menší vliv. Zdá se, že v tomto případě je příliš velká blízkost stanovišek spíše na škodu. To je výhodné pro jednoduchý a málo členitý povrch, kdy jsou stanoviška v přiměřené vzdálenosti od sebe. Nicméně při měření složitých objektů, kdy je nutné mít stanoviška blízko u sebe, může být tento jev problémem, jelikož do měření se mohou zanášet chyby z bodů, které jsou blízko stroje. Přístroj naopak dobře zvládá skenovat objekty různých tvarů, terénní hrany atd. Šumu v datech není mnoho, záleží na materiálu.

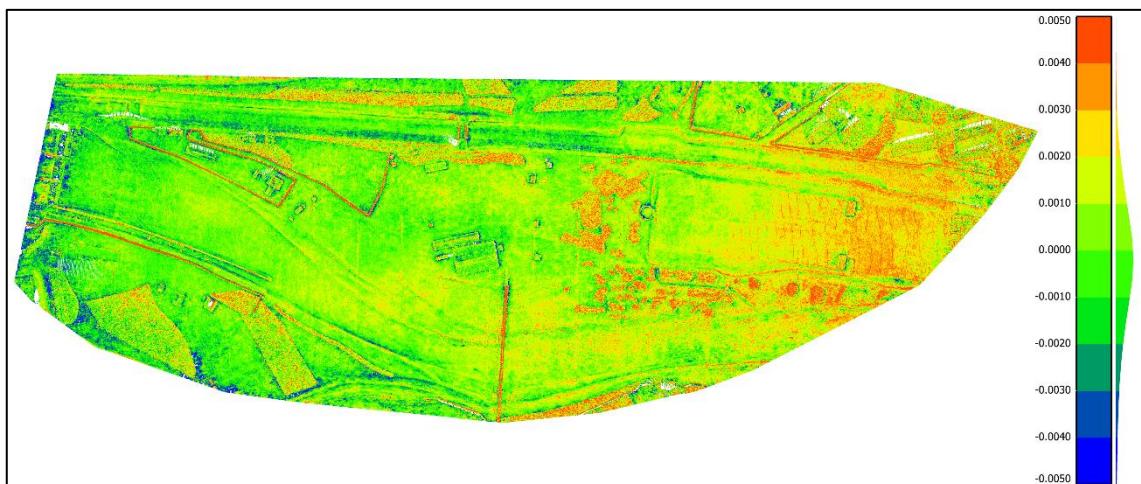
6.4.4 Porovnání s technologií UAV

Jelikož byl daný model zaměřen také fotogrammetricky, došlo k porovnání těchto dvou technologií, tedy fotogrammetrie za použití UAV a laserového skenování. U každého z porovnání došlo k výpočtu statistických parametrů, zobrazeny jsou v tabulce 23.

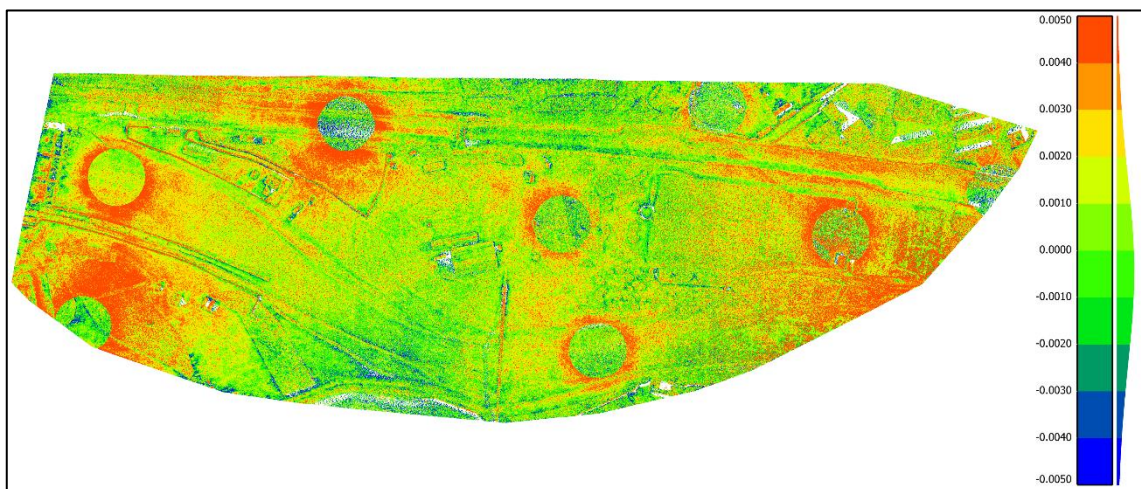
Tab. 23 Statistické parametry výpočtu porovnání technologií UAV a laserového skenování

Porovnaná mračna	Průměrná vzdálenost	Směrodatná odchylka
UAV – Leica ScanStation P40	-0,5 mm	2,2 mm
UAV – Leica BLK360	-0,3 mm	2,8 mm

Na obrázcích 37 a 38 je vidět porovnání mračna z UAV s mračny z laserových skenerů. U přístroje Leica BLK360 si můžeme opět všimnout červených prstenců, vyjadřujících velké odchylky kolem stanovisek měření. Tento problém byl popsán v předchozí kapitole.



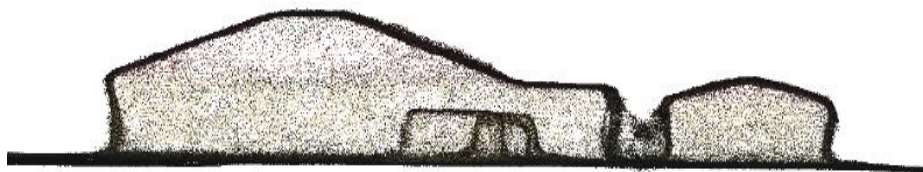
Obr. 37 Porovnání mračen z UAV a Leica ScanStation P40



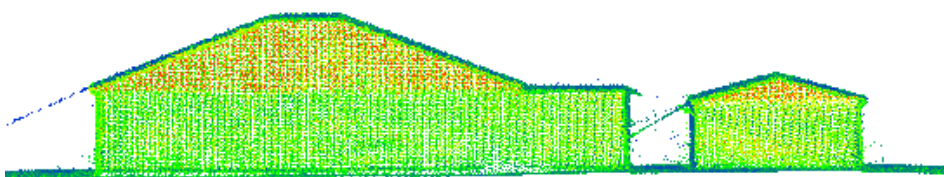
Obr. 38 Porovnání mračen z UAV a Leica BLK360

Na mračnecích si můžeme všimnout několika oblastí, kde dochází k větším odchylkám. Jednou z nich je umělá tráva, která je vytvořena z papíru. V tomto místě se nachází jak záporné, tak kladné odchylky, což může být dáno v případě laserových skenerů nejednoznačným odrazem paprsku dálkoměru od tohoto nepravidelného útvaru. V případě UAV snímky zaznamenávají povrch, proto se dá předpokládat, že takto získané mračno znázorňuje právě povrch umělé trávy.

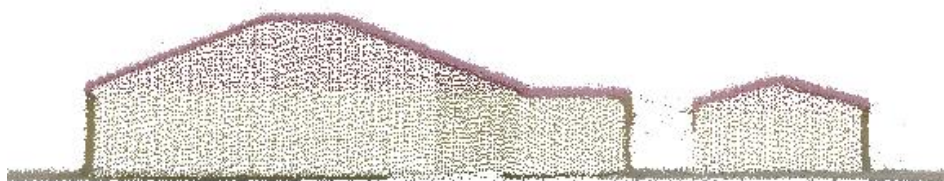
Dále jsou červeně zvýrazněny hrany a různé ostré rysy objektů či terénu. Velice dobře je to vidět na obrázcích 39, 40 a 41, na niž je zobrazena budova z bočního pohledu. V případě UAV jsou hrany neostré, stěny nejsou svislé a na bočních stěnách je menší množství bodů. Velké množství bodů se nachází na střechách z důvodu snímání ze shora. Mezi objekty je vidět jakýsi neidentifikovatelný shluk bodů. U objektů získaných laserovým skenováním je jsou vidět jasné ostré hrany, pravidelné rozmístění bodů, zejména na mračnu z Leica ScanStation P40 je vidět pravidelná rastr bodů na stěnách. Můžeme si všimnout i malého šumu, získaného nejspíše vícenásobným odrazem paprsku, například v prostoru mezi budovami, nicméně tento prostor je jednoznačně identifikovatelný. Na mračnu z přístroje Leica BLK360 je zřejmý malý šum na střechách objektů.



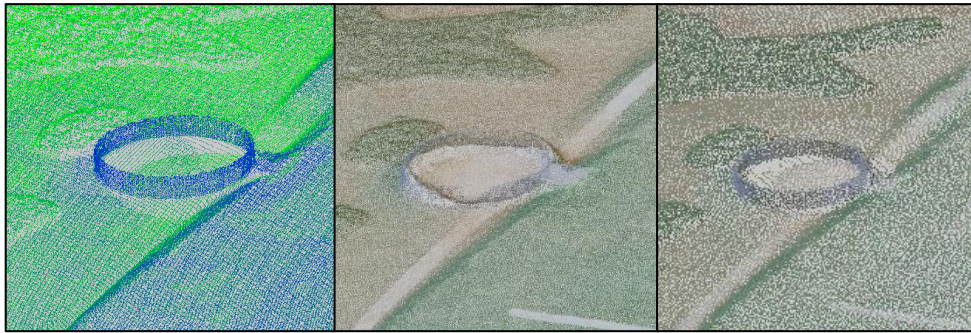
Obr. 39 Budova zaměřená pomocí UAV



Obr. 40 Budova zaměřená pomocí Leica ScanStation P40



Obr. 41 Budova zaměřená pomocí Leica BLK360



Obr. 42 Kruhový objekt (Leica ScanStation P40 - Vlevo, UAV - střed, Leica BLK360 - vpravo)

Podobný případ můžeme pozorovat na obrázku 42, na němž je kruhový objekt zaměřený pomocí všech třech přístrojů. Zatímco v případě zaměření laserovým skenováním je objekt ostrý, identifikovatelný, dolní i horní hrany jsou rozeznatelné, v případě UAV je objekt rozbořený, identifikovatelná je jen horní hrana a stěny nejsou svislé, v jedné části stěna není zobrazena vůbec.

Jiný případ je ohrada. S tímto malým, děravým objektem si neporadila ani jedna technologie, zatímco u skenerů je vidět přibližný svislý směr ohrady s velkým množstvím šumu, způsobeném vícenásobnými odrazy paprsku v dírách plotu, v případě UAV je vytvořen malý val v místě, kde by měl být vršek ohrady (obr. 44).



Obr. 43 Zobrazení ohrady



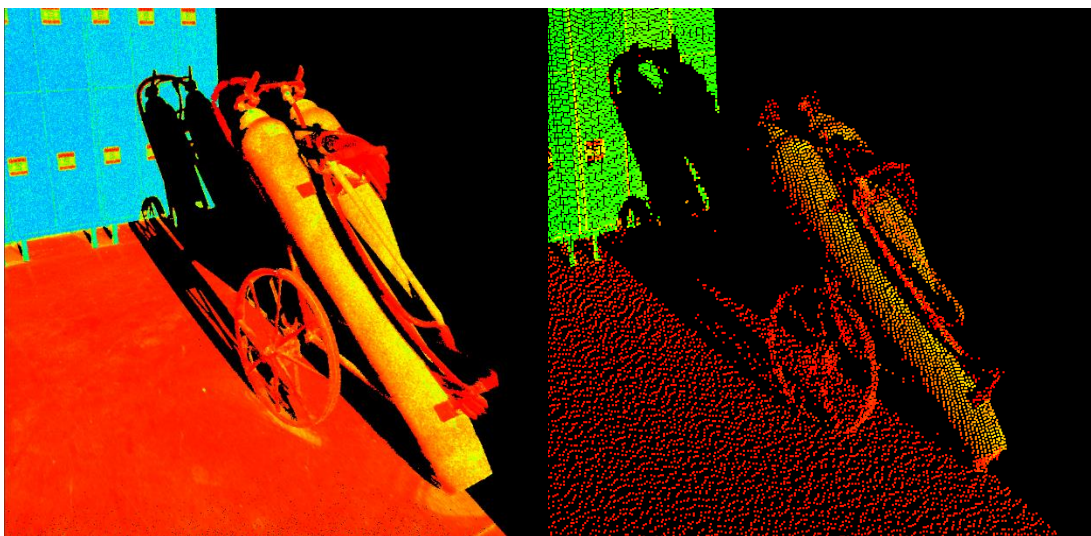
Obr. 44 Průřez ohrady (Leica ScanStation P40 - Vlevo, UAV - střed, Leica BLK360 - vpravo)

V místech, kde je pravidelný terén bez velkého množství hran, se mračna přimykají velice těsně, přibližně do 1 mm. Co se týče ostrých objektů a hran, technologie UAV je nedokáže přesně vystihnout a v těchto místech vytváří zaoblené rohy, odchylky jsou zde vyšší. Vzhledem k snímání z výšky generuje menší množství bodů na bočních stěnách objektů. V případě jednoduté textury povrchu metoda obrazové korelace selhává a body zde nejsou vypočteny. Nevýhodou laserového skenování oproti této metodě může být vliv odrazivosti materiálu objektu. Pokud objekt špatně odráží paprsek dálkoměru, body jsou zaměřeny chybně nebo vůbec.

7. Vizuální porovnání

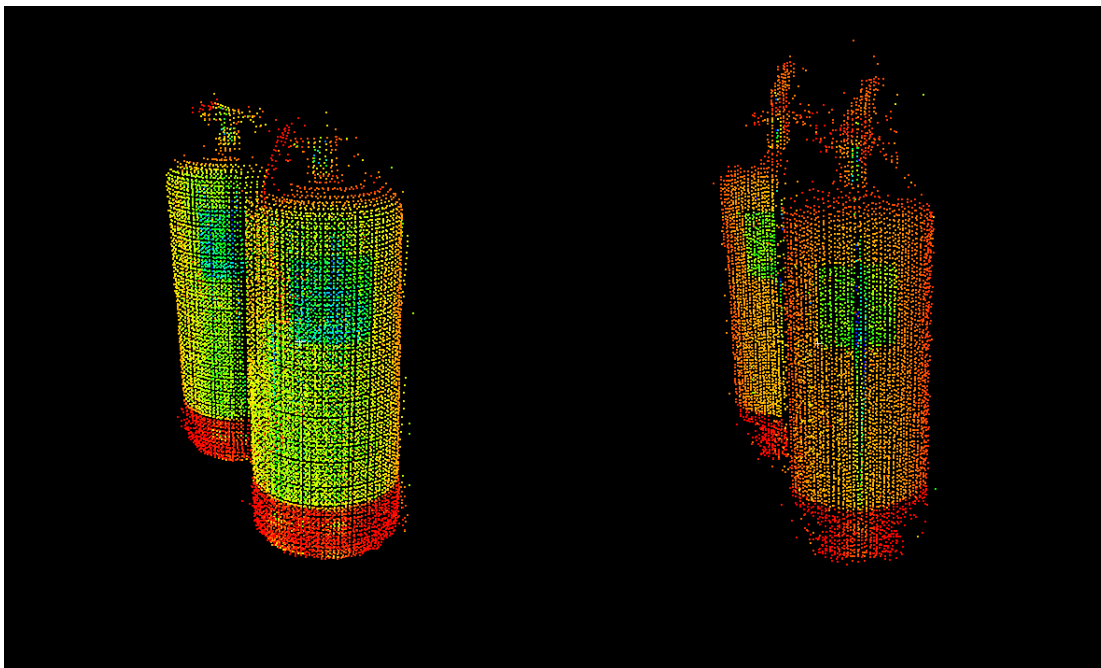
V této kapitole dojde k porovnání testovaných laserových skenerů na základě obrazového porovnání naskenovaných mračen. Jedná se o záležitost čistě subjektivní, kdy kvalita zaměření objektů, velikost šumu atd. je pocitově vyhodnocena. I v tomto případě jsou všechny mračna skenována na nejvyšší možnou kvalitu. Většina předmětů je umístěna v laboratoři Bs 128 na Fakultě stavební ČVUT v Praze nebo v jejím okolí, ojediněle pak v okolí modelu Císařského ostrova ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka.

První porovnání je mračno vozíku s hasičskými přístroji. Umístění předmětu bylo přibližně 5 m od stanoviště. Na obrázku 45 můžeme vidět, že mračno získané přístrojem Leica ScanStation P40 má větší hustotu, rozeznatelné jsou všechny jeho části včetně hadic nebo prvků kola. U přístroje Leica BLK360 rozeznáme hlavní trubice hasičských přístrojů, silnější hadice a obrys kola, celkově je mračno méně husté.



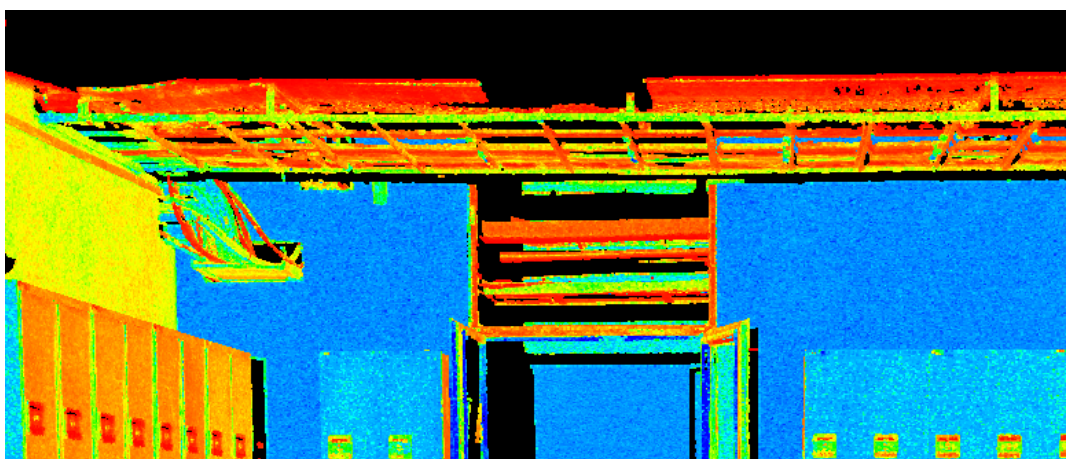
Obr. 45 Sken vozíku s hasičskými přístroji (Leica ScanStation P40 - vlevo, Leica BLK360 - vpravo)

Dalším objektem jsou samostatné hasičské přístroje umístěné na zdi u modelu. Skenování bylo provedeno přibližně ve vzdálenosti 10 m od objektu. U přístroje Leica ScanStation P40 můžeme vidět opět větší hustotu a velmi pravidelný rastr bodů, rozeznat jde i popisová tabulka a rozhraní barev v dolní části trubice hasičského přístroje. V případě Leica BLK360 rozeznáme všechny zmíněné prvky, nicméně rastr není tak pravidelný a hustý, v dolní a horní části vidíme menší šum, nicméně ventil v horní části byl naskenován celý. Větší detaily nerozeznáme ani u jednoho přístroje.

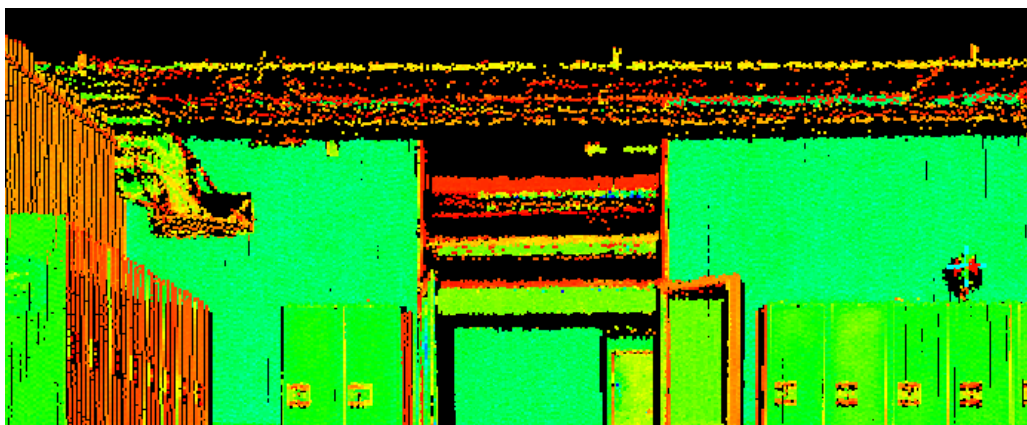


Obr. 46 Porovnání skenů hasicích přístrojů (Leica ScanStation P40 - vlevo, Leica BLK360 - vpravo)

Následující mračna byla naskenována v místnosti s množstvím trubek a kabeláží. Přístroj Leica ScanStation P40 naskenoval trubky a kabeláž korektně, jdou rozeznat jednotlivé kabely od sebe, s minimálním množstvím šumu, díky vysoké hustotě skenování je možné odhadnout tvar či průměr trubky rovnou ze snímku. V mračnu naskenovaném přístrojem Leica BLK360 dokážeme rozeznat jednotlivé trubky či kabely, ovšem o jejich poloměru si nemůžeme udělat žádnou představu. Mračno v těchto místech není pravidelné a nachází se zde větší množství šumu. Na datech je znát menší hustota naskenovaného mračna.



Obr. 47 Trubky a kabeláž zaměřená přístrojem Leica ScanStation P40



Obr. 48 Trubky a kabeláž zaměřená přístrojem Leica ScanStation P40

Mračno z přístroje Leica ScanStation P40 vypadá čistější a s více detaily, zejména díky vysoké hustotě skenování. Na většině objektů je vidět pravidelný rastr bodů a šumu je v datech velice málo. Pokud je skenovaný objekt v malé vzdálenosti od skeneru, bodu na něm téměř splývají. U přístroje Leica BLK360 je také možno pozorovat rastr bodů na objektech, nicméně není tak pravidelný a na datech je znát o něco více šumu. Zejména při skenování trubek je znát menší hustota skenování, díky níž mračno v těchto místech není pravidelné.

Na posledním snímku je možné vidět detailní sken rozebrané totální stanice Leica TCA 2003 přístrojem Leica ScanStation P40.



Obr. 49 Leica TCA 2003 přístrojem Leica ScanStation P40

8. Rekapitulace výsledků

V případě testování měření délek můžeme konstatovat, že oba přístroje dosahují přesnosti, kterou udává jejich výrobce. Získaná směrodatné odchylka je v případě Leica ScanStation P40 0,85 mm, u Leica BLK360 je tato hodnota 2,70 mm. U obou přístrojů je patrná systematická složka chyb dálkoměru, avšak u Leica ScanStation P40 je zanedbatelná. Tento přístroj také vykazuje menší rozptyl jednotlivých měřených délek, rozdíl mezi délkami měřenými a zadanými je také menší, v porovnání se zadanými délkami měří přístroj délky spíše kratší. U přístroje Leica BLK360 se můžeme setkat jak s větším rozptylem jednotlivých měření, tak s většími rozdíly oproti zadaným délkám. Oba přístroje dokáží měřit na kulové i rovinné černobílé terče. Co se týče vlivu cílových znaků na měřenou délku, největší rozdíl při stejné měřené vzdálenosti byl 2,5 mm. Při použití rovinných 6" černobílých terčů byl rozdíl 1,6 mm.

Při testování úhlové přesnosti laserových skenerů jsme došli k závěru, že oba přístroje splňují přesnost udávanou výrobcem. Toto testování bylo provedeno dvakrát, výsledkem jsou tudíž dvě směrodatné odchylky. V případě Leica ScanStation P40 bylo jednou skenováno celé panorama, podruhé byly terče nasnímány každý zvlášť. Výsledné směrodatné odchylky dosahují hodnot 0,0017 gon (každý terč samostatně) a 0,0008 gon (panoramatický sken). U Leica BLK360 byly směrodatné odchylky vypočteny ze dvou panoramatických skenů, výsledné hodnoty jsou 0,0104 gon a 0,0070 gon. Leica ScanStation P40 tedy dosahuje výrazně větší přesnosti v úhlovém měření.

Oba přístroje při testování velikosti šumu byly schopné naskenovat všechny druhy barev, žádná data nechyběla. V případě porovnání výsledných vzdáleností barevných čtverců od základní desky je zajímavé, že oba přístroje určily téměř všechny totožné barvy vzdálené stejným směrem od základní desky. Celkově ale větší chyby v určení vzdálenosti na různě barevné plochy prokazuje Leica BLK360, zejména u tmavších barev jsou tyto rozdíly velké. Stejně tak směrodatná odchylka proložení je u tohoto přístroje největší právě u tmavších barev (černá, šedá, hnědá). Leica ScanStation P40 má menší rozptyl vzdáleností na různé barevné předměty, dokáže si poradit i s tmavými barvami. Šum je zde minimální, směrodatné odchylky proložení jednotlivých barev jsou velice podobné. U tohoto přístroje můžeme tedy očekávat podobnou kvalitu měřených dat bez ohledu na barvy skenovaného objektu.

Testování naskenovaného mračna bodů modelu byl komplexní test vlastností laserových skenerů, kdy došlo k porovnání celých mračen, a to nejen mezi skenery, ale i dalšími technologiemi. K porovnání vzdáleností mračen došlo v souřadnici Z.

Při porovnání mračen získaných laserovými skenery s totální stanicí vyšlo mírně lépe mračno z Leica ScanStation P40, kdy průměrná vzdálenost byla -0,1 mm, směrodatná odchylka pak 1,1 mm. Leica BLK360 dosahuje průměrné vzdálenosti -0,3 mm, směrodatná odchylka je 1,8 mm. Vzhledem k menšímu počtu bodů zaměřených totální stanicí se jedná o porovnání diskrétních bodů na povrchu modelu než celistvého mračna modelu.

V případě porovnání mračen z laserových skenerů se předpokládalo, že mračno získané přístroje Leica ScanStation P40 bude vzhledem ke specifikacím stroje přesnější. Vypočtené statistické parametry tedy charakterizují spíše přesnost mračna z Leica BLK360. Průměrná vzdálenost mezi mračny z těchto přístrojů je 0,4 mm, směrodatná odchylka pak 2,5 mm. Vizuelní porovnání těchto mračen ukazuje, že body s velkými odchylkami se nachází v blízkosti stanovisek měření přístrojem Leica BLK360, kde se při velkém zenitovém úhlu a malé délce projeví nejvíce chyba dálkoměru v souřadnici Z. Ostatní prvky a objekty na modelu, zejména hrany, prostory mezi budovami či pod mosty jsou již naskenovány korektně a dosahují malých odchylek.

Při porovnání s technologií UAV došlo také k výpočtu statistických parametrů. Směrodatná odchylka je 2,2 mm a průměrná vzdálenost -0,5 mm v porovnání s Leica ScanStation P40, s Leica BLK360 je směrodatná odchylka je 2,8 mm a průměrná vzdálenost -0,3 mm. Na porovnávaných mračnech je možné si všimnout několika jevů. Jedním z nich je poměrně dobrá přesnost mračna z UAV na volných plochách, kde je pravidelný terén, kde se odchylky pohybují do cca 1 mm. Technologie UAV však nedokáže přesně vystihnout ostré hrany objektů a v těchto místech vytváří zaoblené rohy, odchylky jsou zde vyšší. Při snímání z výšky také generuje malé množství bodů na stěnách objektů, stěny nebývají úplně svislé. V případě jednoduté textury povrchu metoda obrazové korelace selhává a nedochází k vyhodnocení bodů v těchto místech. Nevýhoda laserového skenování může projevit při měření objektu se špatnou odrazivostí a nepravidelným tvarem, kdy nelze určit, v kterých místech se odrazí paprsek dálkoměru, kdežto u fotogrammetrie dochází ke korelaci na povrchu a tudíž také k vyhodnocení bodů na povrchu.

9. Osobní zkušenosti

S přístrojem Leica ScanStation P40 probíhalo měření velice dobře, ovládání a nastavení je víceméně intuitivní, měření probíhá rychle a prohlídka dat je uspokojivá. Naměřená data jsou na vysoké úrovni, přístroj nabízí velký počet různých nastavení, např. lze nastavit velmi širokou škálu hustoty skenování, výběr zorného pole pro skenování nebo vzdálenost do jaké má být měřeno. Transfer dat přes USB flash disk je bezproblémový a pohodlný. Jediným problémem je velikost a váha přístroje, která není malá a díky níž se s přístrojem obtížněji manipuluje. Přístroj je umístěn v kufru na kolečkách, s nímž je transport jednodušší. Výdrž baterií je více než dostačující, pohybuje se okolo 7 hodin.

Laserový skener Leica BLK360 zaujme na první pohled svým vzhledem. Jedná se o přístroj, který je malý a lehký, skenuje poměrně rychle. Skenování probíhá buďto stiskem jediného tlačítka na stroji, nebo se dá zapnout z tabletu, na kterém se dá skener ovládat. Data se vždy ukládají do skeneru, pokud se skenuje přes tablet, probíhá přenos přes WLAN do tabletu, kde je možná jejich prohlídka. Přenos probíhá občas déle než samotné skenování, prohlídka dat funguje tak, že v tabletu je zobrazen pouze obrázek mračna. Nastavení jsou poměrně omezená, jdou nastavit pouze 3 úrovně skenování, skenování výseče nejde nastavit vůbec, vždy se měří panoramatický sken. Co se týče skenovaných dat, potěšila by možnost nastavení větší hustoty. Přístroj díky třem kamerám fotí poměrně hezké panoramatické snímky i v HDR, pomocí nichž se dá hned obarvit mračno. Transfer dat je možný rovnou ze skeneru do PC pomocí WLAN, což je praktické při menším počtu skenů, nebo po přenesení do tabletu kabelem do PC, který je rychlejší. Jedna baterie vydrží přibližně na 25 skenů, baterie jsou k dispozici celkem 3. Na přístroji bohužel není klasický závit, sloužící k upevnění stroje.

Laserový skener Leica BLK360 je opravdu malý, lehký a lehce přenositelný, data z něj jsou poměrně uspokojivá. Určitě by mu slušela větší hustota skenování a skenování výseče, i za cenu zvětšení přístroje a přidání váhy. Zajímavá může být i automatická registrace mračen, kterou jsme v našich testech nevyužili.

Závěr

V této práci byly otestovány vlastnosti laserových skenerů Leica ScanStation P40 a Leica BLK360. Předmětem testování byla přesnost měření délek, úhlová přesnost, velikost šumu a porovnání mračen získaných zaměřením objektu. Subjektivně byla vyhodnocena vizuální stránka naskenovaných dat a práce s oběma přístroji. Došlo také k porovnání s metodou fotogrammetrie za použití UAV.

Při ověřování přesnosti měření délek jsme došli k závěru, že délky přesněji měří přístroj Leica ScanStation P40. Rozptyl jednotlivých vzdáleností byl také menší u tohoto přístroje. Oba laserové skenery splňují přesnost, kterou udává výrobce.

V případě úhlové přesnosti je na tom opět lépe skener Leica ScanStation P40. Ani u jednoho přístroje nedošlo k překročení přesnosti udávané výrobcem. Zajímavostí je, že Leica ScanStation P40 měří úhly lépe, pokud okolí zachyceno panoramatickým skenem, než v případě měření výseče zorného pole.

U přístroje Leica ScanStation P40 je šum minimální, a u všech barev se projeví přibližně stejnou velikostí. Leica BLK360 vykazuje šum větší, navíc jeho hodnoty se mění v závislosti na dané barvě, nejvyšší jsou zejména u tmavších barev.

V případě porovnání mračen zaměřeného modelu vykazuje mírně menší odchylky mračno získané Leica ScanStation P40. Většina porovnávaného území dosahuje malých odchylek, včetně zaměření ostrých hran a objektů. Největším problémem se ukázala nepřesnost měření délek s Leica BLK360, kdy v kombinaci s velkým zenitovým úhlem dochází k velkým odchylkám na bodech v blízkosti stanovisek měření tohoto přístroje.

Mračno získané technologií UAV v porovnání s mračny z laserových skenerů dosahuje malých odchylek v místech, kde je jednoduchý a pravidelný terén. V místech, kde jsou ostré hrany, rohy budov, zakryté prostory nebo jednodušší textura povrchu dochází k odchylkám vyšším.

Leica ScanStation P40 dokáže skenovat velice hustě, a zachytit tak i malé detaily. Prakticky ze samotného pohledového zhodnocení mračna lze říci, jaký objekt či předmět byl skenován a jaké detaily byly zachyceny. Leica BLK360 nenabízí tak velkou hustotu skenování, což zejména u více vzdálených předmětů může být problémem. U zaměřených předmětů jsou většinou dobře rozeznatelné hlavní prvky, detaily jsou spíše jen naznačené.

Leica ScanStation P40 je ve všech aspektech velice přesný stroj, který dává spolehlivá a kvalitní data. Možnosti jeho využití jsou skutečně široké, od přesných průmyslových měření až k zaměřování památkově chráněných objektů. Jeho nevýhodou je váha a velikost, hůře se s ním manipuluje. Z testovaných přístrojů je jeho cena nejvyšší.

Leica BLK360 co do přesnosti a kvality dat zaostává za svým konkurentem. Jeho největší předností je minimální váha i velikost, jednoduché přenášení a rychlost skenování. Hodí se zejména pro aplikace obecně vyžadující menší přesnost, např. do interiérů, zaměřování zemních prací, nebo měření pro památkovou péči. Co se týče ceny, tak se tento přístroj pohybuje ve střední hladině.

Fotogrammetrie za použití UAV je finančně nejméně náročná technologie. Vhodná je pro měření vyžadující menší přesnost na nepřilíš členitých území různého rozsahu jako jsou např. zaměřování kubatur, tvorba DMT či zaměřování jednoduchých objektů s malým požadavkem na přesnost. Díky sběru dat ze vzduchu je možné zaměřit i těžko dostupná místa. Celkově se zdá, že by metody 3D laserové skenování a UAV fotogrammetrie mohly být navzájem dobré doplňkové metody.

Seznam použité literatury a zdrojů

[1] ŠTRONER M., POSPÍŠIL J., KOSKA B., KŘEMEN T., URBAN R., SMÍTKA V., TŘASÁK P., 3D skenovací systémy. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2013.

[2] Leica ScanStation P40 User Manual [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z:
<http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/457/>

[3] Gefos ČR Leica ScanStation P40 [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z:
<http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produkty/202/scanstation-p30-p40-p50>

[4] Geotech SK Leica ScanStation P40 [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z:
<http://www.geotech.sk/Produkty/Laserove-skenery-HDS/Leica-ScanStation-P30-40-50.html>

[5] C.R.Kennedy survey solutions Leica BLK360 [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z:
<http://survey.crkennedy.com.au/products/3d-laser-scanning/leica-hds-3d-laser-scanners/leica-blk360-3d-laser-scanner>

[6] Geotech SK Leica BLK360 [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z:
<http://www.geotech.sk/Produkty/Laserove-skenery-HDS/Leica-BLK360.html>

[7] Gefos ČR Leica BLK360 User Manual [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z:
http://www.gefos-leica.cz/public/img/produkty_leica/cyrax/blk360/853811_leica_blk360_um_v1.0.0_en.pdf

[8] Apple Inc. Leica BLK360 App preview [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z:
<https://itunes.apple.com/us/app/leica-blk360/id1230467632?mt=8>

[9] Gefos ČR Leica Cyclone [online]. [cit: 4.3.2018]. Dostupné z:
<http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produkty/84/cyclone>

[10] ŠTRONER, Martin. Laserové skenování: Informace k přednáškám [online]. [cit: 4.3.2018]. Dostupné z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/LSK/>

[11] HOLÍKOVÁ, Lucie. Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Trimble TX8 a FARO Focus 3D X130. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Křemen, Ph.D.

[12] BARTŮNĚK, Jan. Testování odšumění a rozlišovací schopnosti dat 3D skenování. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Jašek

[13] Trimble S8 – Datasheet [Online]. [Cit: 14.3.2018.] Dostupné z:
http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390412/022543-410H_TrimbleS8_DS_0115_LR_sec.pdf

[14] ŠIMÍČEK, Martin. Implementace metody Structure from Motion do UAV Fotogrammetrie. Olomouc, 2014. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.

[15] CloudCompare - 3D point cloud and mesh processing software [Online]. [Cit: 20.3.2018.] Dostupné z: <http://cloudcompare.org/>

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma rozdělení 3D laserových skenerů podle principu měření [1].....	9
Obr. 2 Kamerový a panoramatický skener [1].....	10
Obr. 3 Princip prostorové polární metody.....	10
Obr. 4 Schéma prostorového protínání z úhlů vpřed.....	11
Obr. 5 Leica ScanStation P40 [3].....	13
Obr. 6 Ukázka pracovního prostředí [4]	14
Obr. 7 Prohlídka skenu [3].....	14
Obr. 8 Transportní kufr [3].....	15
Obr. 9 Přenos dat pomocí USB flash disku [3]	15
Obr. 10 Leica BLK360 [6].....	16
Obr. 11 BLK360 v přenosném krytu [6].....	17
Obr. 12 Příslušenství [6].....	17
Obr. 13 Pracovní prostředí v aplikaci Leica [8]	18
Obr. 14 Prohlídka skenu [8].....	18
Obr. 15 Úvodní obrazovka	20
Obr. 16 Adresářová struktura	20
Obr. 17 Vyhledání středu terče	21
Obr. 18 Prohlídka mračna v programu Cyclone	22
Obr. 19 Pracovní prostředí v programu CloudCompare	23
Obr. 20 Umístění trojnožky na pilíři délkové základny.....	26
Obr. 21 Zadní strana polokulového terče a rovinný 6" černobílý terč.....	27
Obr. 22 Rozmístění terčů (Leica ScanStation P40).....	29
Obr. 23 Rozmístění terčů (Leica BLK360)	29
Obr. 24 Deska s barevnými čtverci.....	30
Obr. 25 Naskenovaná deska	31
Obr. 26 Proložení plochou.....	31
Obr. 27 Vyříznutí barevného čtverce.....	31
Obr. 28 Model Císařského ostrova ve Výzkumném ústavu vodohospodářském.....	34
Obr. 29 Výsledky porovnání mračna z přístroje Leica ScanStation P40 s totální stanicí.....	52
Obr. 30 Výsledky porovnání mračna z přístroje Leica BLK360 s totální stanicí	53
Obr. 31 Četnost jednotlivých vzdáleností při porovnání mračen z laserových skenerů	53
Obr. 32 Porovnání mračen z Leica ScanStation P40 a Leica BLK360	54
Obr. 33 Detail mračna při porovnání skenerů Leica ScanStation P40 a Leica BLK360	54
Obr. 34 Porovnání naskenované budovy přístroji Leica ScanStation P40 a Leica BLK360.....	55
Obr. 35 Porovnání naskenované lávky přístroji Leica ScanStation P40 a Leica BLK360.....	55
Obr. 36 Porovnání naskenovaného mostu přístroji Leica ScanStation P40 a Leica BLK360	55
Obr. 37 Porovnání mračen z UAV a Leica ScanStation P40.....	56
Obr. 38 Porovnání mračen z UAV a Leica BLK360	56
Obr. 39 Budova zaměřená pomocí UAV.....	57

Obr. 40 Budova zaměřená pomocí Leica ScanStation P40	57
Obr. 41 Budova zaměřená pomocí Leica BLK360.....	57
Obr. 42 Kruhový objekt (Leica ScanStation P40 - Vlevo, UAV - střed, Leica BLK360 - vpravo).....	58
Obr. 43 Zobrazení ohrady	58
Obr. 44 Průřez ohrady (Leica ScanStation P40 - Vlevo, UAV - střed, Leica BLK360 - vpravo).....	58
Obr. 45 Sken vozíku s hasicími přístroji (Leica ScanStation P40 – vlevo, Leica BLK360 – vpravo)...	59
Obr. 46 Porovnání skenů hasicích přístrojů (Leica ScanStation P40 - vlevo, Leica BLK360 - vpravo)	60
Obr. 47 Trubky a kabeláž zaměřená přístrojem Leica ScanStation P40	60
Obr. 48 Trubky a kabeláž zaměřená přístrojem Leica ScanStation P40	61
Obr. 49 Leica TCA 2003 přístrojem Leica ScanStation P40.....	61

Seznam tabulek

Tab. 1 Technické parametry Leica ScanStation P40	13
Tab. 2 Porovnání časů skenování u přístroje Leica ScanStation P40	15
Tab. 3 Technické parametry Leica BLK360	16
Tab. 4 Porovnání režimů skenování u přístroje Leica BLK360	18
Tab. 5 Výsledky testování měření délek Leica ScanStation P40	35
Tab. 6 Porovnání charakteristik přesnosti u Leica ScanStation P40	36
Tab. 7 Druhé opravy délek u Leica ScanStation P40	37
Tab. 8 Porovnání vypočtených směrodatných odchylek u Leica ScanStation P40	37
Tab. 9 Výsledky testování měření délek Leica BLK360	38
Tab. 10 Porovnání charakteristik přesnosti u Leica BLK360	39
Tab. 11 Druhé opravy délek u Leica BLK360	40
Tab. 12 Porovnání vypočtených směrodatných odchylek u Leica BLK360	40
Tab. 13 Porovnání výsledků testování délek	41
Tab. 14 Porovnání vzdáleností na různé terče měřené Leica ScanStation P40	43
Tab. 15 Porovnání vzdáleností na různé terče měřené Leica BLK360	44
Tab. 16 Výsledky testování úhlové přesnosti Leica ScanStation P40	45
Tab. 17 Porovnání směrodatných odchylek vodorovných směrů Leica ScanStation P40	45
Tab. 18 Výsledky testování úhlové přesnosti Leica BLK360	46
Tab. 19 Porovnání směrodatných odchylek vodorovných směrů Leica BLK360	46
Tab. 20 Porovnání charakteristik úhlového měření	47
Tab. 21 Výsledky testování velikosti šumu pro Leica ScanStation P40	48
Tab. 22 Výsledky testování velikosti šumu pro Leica BLK360	49
Tab. 23 Statistické parametry výpočtu porovnání technologií UAV a laserového skenování	56

Seznam grafů

Graf 1 Rozdíly délek pro Leica ScanStation P40	36
Graf 2 Rozdíly délek pro Leica BLK360	39
Graf 3 Porovnání měření délek	41
Graf 4 Porovnání vzdáleností barevných čtverců	50
Graf 5 Porovnání směrodatných odchylek proložení barev	51

Seznam příloh

A – Výpočet průměrných délek

B – Výpočet orientačních posunů a redukovaných směrů

C – Měření směrů totální stanicí

D – Seznam souřadnic zaměřených bodů totální stanicí na modelu

Disk DVD

- A - Výpočet průměrných délek
- B - Výpočet orientačních posunů a redukovaných směrů
- C - Měření směrů totální stanicí
- D - Seznam souřadnic zaměřených bodů totální stanicí na modelu
- E - Text