

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

URČENÍ PROSTOROVÉHO TVARU STAVEBNÍ
KONSTRUKCE POMOCÍ LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUCIE SIKOROVÁ

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

URČENÍ PROSTOROVÉHO TVARU STAVEBNÍ
KONSTRUKCE POMOCÍ LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ
DETERMINATION THE SPATIAL SHAPE STRUCTURES USING LASER SCANNING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUCIE SIKOROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTIMIL HANZL, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie a kartografie (N)
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Lucie Sikorová
Název	Určení prostorového tvaru stavební konstrukce pomocí laserového skenování
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.
Datum zadání diplomové práce	30. 11. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	27. 5. 2016
V Brně dne 30. 11. 2015	

.....
doc. RNDr. Miloslav Švec, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Manuály: FARO Focus 3D Manual, Scene 5.1 Manual.

Shan J., Toth Ch.K.: Topographic laser ranging and scanning. CRC Press, Taylor and Francis G. LLC.

Zásady pro vypracování

Naskenujte zadanou část stavební konstrukce stavební fakulty pomocí pozemního skeneru. Určete vřícovací a kontrolní body. Vytvořte 3D model zadané části objektu. Posuďte přesnost modelu na kontrolních bodech.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Cílem této práce je vytvoření 3D modelů stavebních konstrukcí z dat pořízených laserovým skenováním. Data z měření jsou zpracovány pomocí softwaru Scene a modely byly tvořeny v programech AutoCAD, Revit a SketchUP. Výstupem jsou tři 3D modely dvou stavebních konstrukcí.

Klíčová slova

3D model, laserové skenování, AutoCAD, Revit, ReCap 360, SketchUP

Abstract

The aim of this work is to create a 3D models of the structures of data acquired by laser scanning. The tracking data are elaborated by software Scene and models were created in AutoCAD, Revit and SketchUP. The main output of this work are three models of the two structures.

Keywords

3D model, laser scanning, AutoCAD, Revit, ReCap 360, SketchUP

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Lucie Sikorová *Určení prostorového tvaru stavební konstrukce pomocí laserového skenování*. Brno, 2016. 43 s., 8 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27.5.2016

.....
podpis autora
Bc. Lucie Síkorová

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vlastimilu Hanzlovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

V Brně dne 27.5.2016

.....
podpis autora
Bc. Lucie Sikorová

OBSAH

Úvod	10
1 Lokalita skenovaných objektů	11
2 Laserové skenování	12
2.1 Princip skenování	12
2.2 Vlíčovací - spojovací body	13
2.2.1 Koule (Sphere)	13
2.2.2 Kontrastní terč (Contrast mean point)	14
2.2.3 Šachovnicový terč (Checkerboard point)	15
2.2.4 Jednoznačný bod (Scan point)	15
2.3 Laserové skenery	15
2.3.1 Leica Geosystems	16
2.3.2 Riegl Laser Measurement Systems	17
2.3.3 Zoller + Fröhlich	18
2.3.4 Faro	19
3 Zpracovávání dat	20
3.1 Základní principy	20
3.1.1 Aproximace objektů matematickými primitivy	20
3.1.2 Drátový model	20
3.1.3 Model z trojúhelníkové sítě	20
3.2 Softwarové vybavení	21
3.2.1 SCENE	21
3.2.2 ReCap 360	21
3.2.3 AutoCAD	23
3.2.4 Revit	23
3.2.5 VirtuSurv	24
3.3 Hardwarové vybavení	24
4 Vlastní zpracování	26
4.1 Získávání dat	26
4.2 Zpracování surových dat	27
4.3 Tvorba modelu mostu A-D	28
4.4 Tvorba modelu mostu R-B	29
5 Shrnutí a srovnání metod tvorby modelů	33

6 Porovnání s terestrickými metodami	34
6.1 Výsledky porovnání na mostě A-D	34
6.2 Výsledky porovnání na mostě R-B	36
7 Závěr	39
Literatura	40
Seznam symbolů a zkratek	42
Seznam příloh	43
A Porovnání s terestrickými metodami	44
A.1 Protokoly z vyrovnání sítí	44
A.2 Protokoly z vyrovnání podrobných bodů	45
A.3 Testování přesnosti na mostu A-D	47
A.4 Testování přesnosti na mostu R-B	48
B Grafické znázornění výsledného modelu mostu A-D	49
B.1 Model vytvořený v programu AutoCAD	49
B.2 Model vytvořený v programu SketchUp, který navazuje na dříve vytvořený model budovy A	50
C Grafické znázornění výsledného modelu mostu R-B vytvořený v programu Revit	51

ÚVOD

Pozemní laserové skenování je relativně nová metoda sběru dat v geodézii, která si upevňuje své místo mezi zaběhlými a osvědčenými metodami měření. Je to technologie, která zprostředkovává nové možnosti v pořizování geodetických dat a výrazně rozšiřuje jejich využitelnost. Pozemní laserové skenování se uplatňuje především při pořizování přesných dat prostorově složitých a nepřístupných objektů, jako např. lomové stěny v povrchovém a hlubinném dobývání surovin, štoly a jiná podzemní díla, průmyslové objekty a konstrukce, historické objekty a budovy, zachycení stavu objektů před a po rekonstrukci a mnoho dalších.

Výstupem laserového skenování je mračno bodů, které se dá dále zpracovávat mnoha způsoby. Jeho informační hodnota je mnohem větší a má širší záběr využití, než výstup klasického terestrického zaměření. Z mračna bodů je možné vytvořit model, určovat rovinatost ploch, objemy těles, prostorové vzdálenosti, výškové rozdíly a mnoho dalších. Toto vše je možné určit a vytvořit na základě jednoho mračna bodů zkoumaného objektu.

Cílem této práce je tvorba 3D modelů konstrukce mostů v areálu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně z dat pořízených laserovým skenerem. V první kapitole je popsána lokalita skenovaných konstrukcí. Dále bude pojednáno o principu laserového skenování s ukázkami současných laserových skenerů. V následující kapitole jsou uvedeny možnosti zpracování naměřených dat. Tato kapitola obsahuje výčet softwaru, který podporuje práci s mračnem bodů nebo přímo umí zpracovat data ze skeneru. Také jsou zde popsány základní matematické principy zpracování. Čtvrtá kapitola se již zabývá samostatnou tvorbou modelů. Každý model mostu je vytvořen jiným softwarem, proto následující kapitola obsahuje srovnání metod tvorby těchto dvou modelů. Na závěr byla provedena kontrola přesnosti laserového skenování terestrickým zaměřením.

Tato práce má poukázat na laserové skenování jako na efektivní metodu sběru dat s nepřehlednými možnostmi zpracování. Podle současného trendu je možné předpokládat v následujících letech další nárůst v používání této metody.

1 LOKALITA SKENOVANÝCH OBJEKTŮ

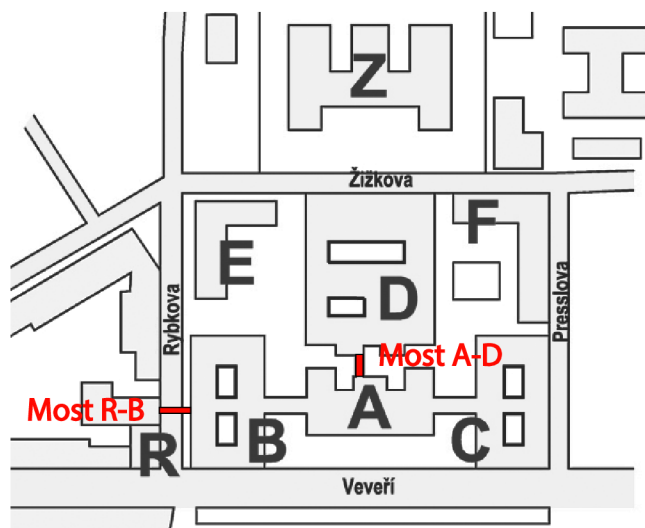
Skenované konstrukce mostů se nacházejí v areálu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Stavební fakulta je nejstarší fakultou Vysokého učení technického v Brně (dále jen VUT). Historie fakulty sahá do poloviny 19. století, kdy v roce 1849 bylo založeno technické učiliště v Brně. Vyučovalo se zde jak v českém tak německém jazyce. Roku 1873 bylo učiliště prohlášeno za Vysokou školu technickou. [1] [2]

19. září 1899 byla zřízena c.k. česká technická vysoká škola Františka Josefa v Brně na základě nejvyššího rozhodnutí Jeho Výsosti císaře a krále Františka Josefa I. Začátkem listopadu téhož roku byla zahájena výuka v oboru stavební inženýrství. Hned následující rok se výuka rozšířila o obor strojního inženýrství a kurz vzdělávání geometrů. [1] [2]

Vysoká škola bohužel neměla svoji budovu, kde by mohla probíhat výuka a tak se pronajímalo několik budov v Brně. Roku 1901 se však podařilo zakoupit pozemek na Veveří ulici (tehdy Veverské) a v říjnu roku 1907 začala stavba areálu pro Českou vysokou školu technickou v Brně. [1] [2]

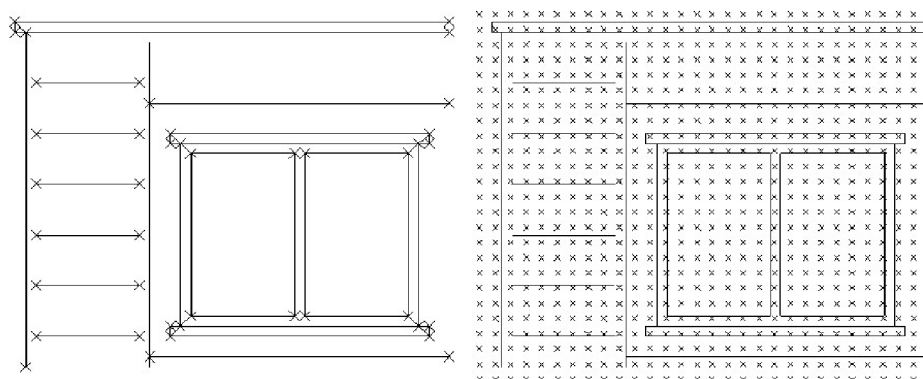
V současnosti se areál Fakulty stavební VUT skládá z 8 budov. Jejich konkrétní rozložení se záměrem dvou skenovaných mostů je na Obr. 1.1. Budovy na ulici Veveří (A, B, C, D, E, F) byly v letech 1994-2005 rekonstruovány. Do začátku akademického roku 2012-2013 byla dokončena i rekonstrukce budovy R na ulici Rybkova a byl zde vybudován spojovací most s budovou B. Budova na ulici Žižkově zakončila rekonstrukce v roce 2014.



Obr. 1.1: Areál Fakulty stavební VUT v Brně [2]

2 LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

Laserové skenování je moderní metoda sběru dat pro geodetické, dokumentární a jiné účely. Od geodetického měření se liší hlavně množstvím dat. To je způsobeno tím, že u laserového skenování se v daném rozsahu měří body s malým pravidelným úhlovým krokem. Takových bodů je poté nesčetné množství, řádově desítky až stovky miliónů. U klasické geodetické metody se měří pouze charakteristické body potřebné pro daný účel, viz. Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Porovnání sběru dat geodetickou metodou a laserovým skenováním

Výstupem laserového skenování je tzv. mračno bodů, které se musí dále zpracovávat. Pro zpracování takového množství dat je potřeba hardwarové vybavení na velmi vysoké úrovni. Bez kvalitního hardwarového vybavení se pak práce zbytečně prodlužují.

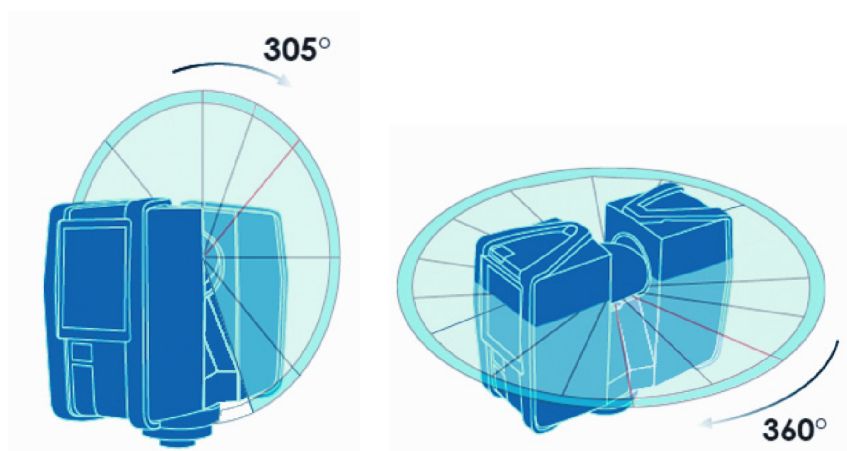
2.1 Princip skenování

Laserové skenování funguje na principu měření šikmé vzdálenosti, horizontálního a vertikálního úhlu daného bodu. Díky těmto třem informacím je možné vypočítat polární metodou prostorovou polohu bodu.

Šikmá vzdálenost se měří elektronicky, tzv. metodou měření fázového posunu. Ze skeneru jsou vysílány vlny infračerveného světla různé délky. Po odrazu od měřeného objektu se vrací na detektor elektromagnetického záření ve skeneru. Vzdálenost se tedy určí jako počet celých period použité vlnové délky a doměrku. Počet opakování měření jednoho bodu lze nastavit před začátkem měření na skeneru.

Horizontální a vertikální úhel se určí z aktuální polohy hlavy skeneru, jehož rozsah je zajištěn automatickým otáčením hlavy skeneru ve směru horizontálním a rozmetáním paprsků pomocí zrcadla ve směru vertikálním. Skenery jsou schopné naskenovat 360° v horizontálním směru a ve směru vertikálním se tento údaj liší

v závislosti na fyzické konstrukci skeneru, viz. kapitola 2.3. Konkrétně skener Faro naskenuje ve vertikálním směru 305° viz. Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Horizontální a vertikální rotace skeneru [3]

2.2 Vlícovací - spojovací body

Vlícovací body slouží pro navázání měření do souřadnicového systému. Spojovací body jsou nepostradatelným prvkem pro spojování jednotlivých skenů do jednoho výsledného mračna bodů. Spojovací body mohou být zároveň vlícovací a naopak. Prakticky nikdy nevytvoříme 3D model z jednoho skenu. Vždy potřebujeme zájmový objekt naskenovat z více stran, tzn. z více stanovisek. Tyto skeny následně musíme spojit pomocí spojovacích bodů.

Spojovací body jsou objekty, které se vyskytují ve skenované oblasti, s nimiž se v průběhu skenování nehýbe. Vytváří tak pevné body o kterých můžeme prohlásit, že jsou neměnné, identické. Vždy je potřeba zajistit, aby na dvou sousedních skenech byly minimálně dva stejné spojovací body. A to z důvodu zajištění polohy ve třech souřadnicových osách. Třetí proměnná je směr tížnice, kterou si skener v průběhu měření určí sám. Samozřejmě, že čím víc společných spojovacích bodů budou mít dva skeny, tím bude spojení přesnější.

Existuje více druhů vlícovacích - spojovacích bodů. Jaký použijeme závisí na přístrojovém a softwarovém vybavení.

2.2.1 Koule (Sphere)

Koule je nejjednodušší na aplikaci a zároveň i nejpřesnější spojovací bod. Je to lehká, bílá, matná koule, viz. Obr. 2.3. Firma Faro ji dodává s magnetem na její spodní

straně. Dá se proto jednoduše umístit na kovovou plochu, nebo ji nasadit malé nožky a položit na zem. Také jsou dostupné speciální nástavce, pomocí kterých lze kouli uchytit do stativu.

Její výhoda spočívá v tom, že je ze všech směrů stejná. Software, který zpracovává tento typ vlíčovacích bodů, počítá jejich geometrický střed. Proto se u spojování skenů pomocí těchto koulí setkáváme s nejmenšími diferencemi.



Obr. 2.3: Spojovací bod - koule

2.2.2 Kontrastní terč (Contrast mean point)

Kontrastní terč může být jakákoliv jednoznačná kontrastní plocha na fasádě budov, či jiných přilehlých objektech, viz. Obr. 2.4.

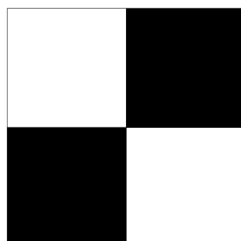


Obr. 2.4: Spojovací bod - kontrastní terč [3]

Můžeme si vytvořit vlastní terče a přilepit je na sousední objekty tak, aby byly vhodně umístěny vzhledem k očekávanému rozložení stanovišek pro skener.

2.2.3 Šachovnicový terč (Checkerboard point)

V podstatě je stejný jako plochý cíl, ale má na sebe natištěný vzor šachovnice viz. Obr. 2.5. Má lepší rozpoznávací hodnotu než pouze plochý cíl, díky jasnému středu.



Obr. 2.5: Spojovací bod - šachovnicový terč

2.2.4 Jednoznačný bod (Scan point)

Jednoznačný bod je jasně definovatelný bod, který je vidět na více skenech, například roh okna, dveří, komínu, vodorovného dopravního značení, či nějaký zatlučený hřeb, výklenek. Příklad takového bodu si můžete prohlédnout na Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Spojovací bod - jednoznačný bod [3]

2.3 Laserové skenery

V dnešní době je mnoho firem, které vyrábějí komerčně dostupné laserové skenery. Každý skener je určen pro jinou oblast využití. V následujících podkapitolách je uvedeno pár výrobců skenerů a u každého je blíže popsán jeden vybraný skener. Každý výrobce uvádí jiné parametry, klíčové vlastnosti a charakteristiky přesnosti, proto je téměř nemožné je mezi sebou porovnávat.

2.3.1 Leica Geosystems

Firma Leica Geosystem vyrábí 4 druhy pozemních laserových skenerů. Nabízejí základní model pro začínající uživatele s laserovým skenováním, dále jeden s dlouhým dosahem a jeden s krátkým dosahem. Poslední model je detailněji popsán níže. [4]

ScanStation P40 (viz. Obr. 2.7) poskytuje 3D data v nejvyšší kvalitě s HDR¹ zobrazením. Je to univerzální, velmi rychlý skener. Jeho specifikace najdete v Tab. 2.1. [4]

Tab. 2.1: Parametry Leica ScanStation P40 [4]

Přesnost měření délek	1,2 mm + 10 ppm v plném rozsahu
Přesnost úhlového měření	8" horizontálně i vertikálně
Přesnost prostorového určení	3 mm na 50 m; 6 mm na 100 m
Minimální dosah	0,4 m
Maximální dosah	270 m
Skenovaných bodů za sekundu	1 milion
Rozsah skenování v horizontálním směru	360°
Rozsah skenování ve vertikálním směru	290°
Velikost pořízených fotografií	4 megapixely na 17° × 17° snímek
Velikost pixelu	2,2 μm

Celková velikost pro panoramatický snímek je 700 megapixelů. Skener obsahuje interní pevný disk SSD² o kapacitě 256 GB, ale také podporuje připojení externího USB zařízení. Pro komunikaci s počítačem a stahování dat je zde k dispozici gigabitový ethernet, integrovaná wireless LAN nebo USB 2.0. [4]



Obr. 2.7: Leica ScanStation P40 [4]

¹HDR - High dynamic range

²SSD - Solid-state drive

2.3.2 Riegl Laser Measurement Systems

Firma Riegl Laser Measurement Systems vyrábí celkem 6 pozemních laserových skenerů. Liší se od sebe v dosahu měření. Nejsilnější skener dokáže skenovat objekty až 6000 m vzdálené, poté následuje model do vzdálenosti 4000 m, 2000 m a 1400 m. Poslední je základní model na blízké pozemní skenování, který se dá nyní pořídit i v inovované verzi s registrací a zpracováním v reálném čase, a ten je popsán dále. [5]

Riegl VZ-400 (viz. Obr. 2.8) je skener s širokým spektrem infračerveného záření. Podporuje echo digitalizaci a online zpracování příchozích vln. Jeho specifikace najdete v Tab. 2.2.[5]

Tab. 2.2: Parametry RIEGL VZ-400 [5]

Přesnost prostorového určení	5 mm, s opakováním 3 mm
Minimální dosah	1,5 m
Maximální dosah	600 m
Skenovaných bodů za sekundu	122 tisíc
Rozsah skenování v horizontálním směru	360°
Rozsah skenování ve vertikálním směru	100°

Skener má dva měřicí módy. První je pro dlouhé vzdálenosti, kdy vysílá laserové pulzy na frekvenci 100 kHz. Počet bodů za sekundu se pak sníží na 42 tisíc. Druhý měřicí mód je zaměřen na rychlost a vysílá laserové pulzy na frekvenci 300 kHz. Jeho dosah je pak ale snížen na 350 m. Skener obsahuje interní paměť typu flash o kapacitě 32 GB, ale také podporuje připojení externího USB zařízení. Pro komunikaci s počítačem a stahování dat je zde opět k dispozici gigabitový ethernet, integrovaná wireless LAN nebo USB 2.0. Dále má k dispozici konektor pro GPS anténu. [5]



Obr. 2.8: RIEGL VZ-400 [6]

2.3.3 Zoller + Fröhlich

Firma Zoller + Fröhlich nabízí širokou škálu laserových pozemních skenerů. Velmi zajímavý model je Z+F IMAGER® 5006EX, který dokáže pracovat ve výbušném prostředí. [7]

Blíže popsán bude nejnovější typ Z+F IMAGER® 5010X, viz. Obr. 2.9. Tento skener má navigační systém, který odhaduje aktuální pozici a orientaci skeneru pro snazší registraci. Sleduje pohyby při přenášení na další stanoviště a tím poskytuje odhad polohy. Tuto funkci zajišťuje GPS přijímač, kompas, barometr a jednotka IMU³. Jeho specifikace najdete v Tab. 2.3. [7]

Tab. 2.3: Parametry Z+F IMAGER® 5010X [7]

Minimální dosah	0,3 m
Maximální dosah	187,3 m
Skenovaných bodů za sekundu	1.016 milion
Rozsah skenování v horizontálním směru	360°
Rozsah skenování ve vertikálním směru	320°
Velikost panoramatické fotografie	80 megapixelu

Skener obsahuje 64 GB vnitřní paměti a má možnost připojit 2 x 32 GB externí flash disk. Pro přenos dat je k dispozici konektor ethernet a USB 2.0. Dále můžeme připojit GPS, tachometr, atd. Součástí skeneru je také wifi. [7]



Obr. 2.9: Z+F IMAGER® 5010X [7]

³IMU - inerciální měřicí jednotka, určuje nezávisle na prostorové poloze senzoru jeho úhlové prvky vnější orientace

2.3.4 Faro

Firma Faro produkuje 3 typy pozemních laserových skenerů. Dělí se také podle dosahu měření a to na vzdálenost do 330 m, 130 m a 30 m. [8]

Níže bude popsán starší model, který byl použit při získávání dat pro tvorbu modelů mostů. Jmenuje se FARO Laser Scanner Focus 3D, viz Obr. 2.10. Skener je velmi lehký pro snadnou manipulaci. Dotyková obrazovka slouží pro nastavení skeneru, které není nikterak složité. V Tab. 2.4 jsou uvedeny jeho základní specifikace. [8]

Tab. 2.4: Parametry FARO Laser Scanner Focus 3D [8]

Přesnost měření délek	$\pm 2\text{ mm}$
Přesnost prostorového určení	5 mm, s opakováním 3 mm
Minimální dosah	0,6 m
Maximální dosah	120 m
Skenovaných bodů za sekundu	122 tisíc až 976 tisíc
Rozsah skenování v horizontálním směru	360°
Rozsah skenování ve vertikálním směru	305°
Velikost pořízených fotografií	70 megapixelů
Úhlový krok mezi sousedními body	0,009°

Data ze skeneru je možné ukládat na SD kartu. Nově obsahuje i Wifi přijímač pro dálkové ovládání, vizualizaci skenů a stahování dat pomocí mobilního zařízení. Pro orientaci přístroje v prostoru slouží dvouosý kompenzátor s přesností 0,015°, výškový detektor (určí relativní převýšení vztažené k fixnímu bodu), elektronický kompas pro orientaci. [8]



Obr. 2.10: FARO Focus 3D [9]

3 ZPRACOVÁVÁNÍ DAT

Zpracování dat ze skeneru je nejpodstatnější část na procesu získávání výsledku pomocí laserového skenování. Zabírá více jak 90% času stráveného nad zakázkou.

Pro zpracování surových dat ze skeneru je potřeba velmi výkonného hardwarového vybavení, specifické softwarové vybavení a samozřejmě kvalifikovaný personál. Bližší specifikace těchto elementů a metody zpracování jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

3.1 Základní principy

Zpracování mračna bodů se odvíjí od požadavků objednatele. Samo mračno může být vhodný výstup. Body mohou mít přidělenou barvu dle reálných barev objektu, intenzity odrazu, nebo výškových rozdílů. Dále je možnost část mračna bodů aproximovat matematickými primitivy, vytvořit drátový model nebo model z trojúhelníkové sítě.

3.1.1 Aproximace objektů matematickými primitivy

Měřené objekty mohou mít tvar nějakého základního geometrického útvaru (lampa - válec, stěna - rovina). Poté je vhodné vyjádřit tuto skutečnost radši matematickou rovnicí než desítkami body. Vždy je kladen požadavek na co nejmenší velikost výsledného souboru. Problém s tímto typem zpracování nastává, když pro zpracování není k dispozici zrovna ideální vzorek dat, který by popisoval povrch geometrického útvaru. Ve většině případů ale stačí, aby výsledek dostatečně přesně popsal tu část objektu, která je body pokryta. [10]

3.1.2 Drátový model

Drátový model je jedna z jednodušších variant jak vytvořit vektorový 3D model. Hrany objektu jsou vyjádřeny pouze úsečkami v prostoru, v některých situacích lze využít i křivky jako kružnice nebo kružnicový oblouk. Pokud je ale objekt složitý a je tvořen mnoha hranami, nejde se v modelu jednoduše zorientovat a nevytváří na první pohled jednoznačný objekt. [10]

3.1.3 Model z trojúhelníkové sítě

Pokud modelovaný objekt není možné vyjádřit matematickými primitivy, je vhodné použít pro aproximaci povrchu trojúhelníkovou síť. Základem zpracování je využití

roviny vymezené třemi body. Využívají se různé algoritmy založené téměř bez výjimky na splnění podmínky tzv. Delaunayovy triangulace, aby trojúhelníky byly co nejbližší rovnostranným. „Její základním principem je podmínka: V kružnici opsané jakémukoli trojúhelníku nesmí být žádný další bod“. [10]

3.2 Softwarové vybavení

Software, ve kterém se zpracovávají surové data, se většinou dodává se skenerem. Každá firma vyvíjí svůj vlastní program, nebo spolupracuje s vývojáři softwaru pro spojování a případně další zpracování skenů. Mimo to jsou na trhu i jiné firmy, které se zabývají zpracováním mračna bodů z více různých skenerů.

3.2.1 SCENE

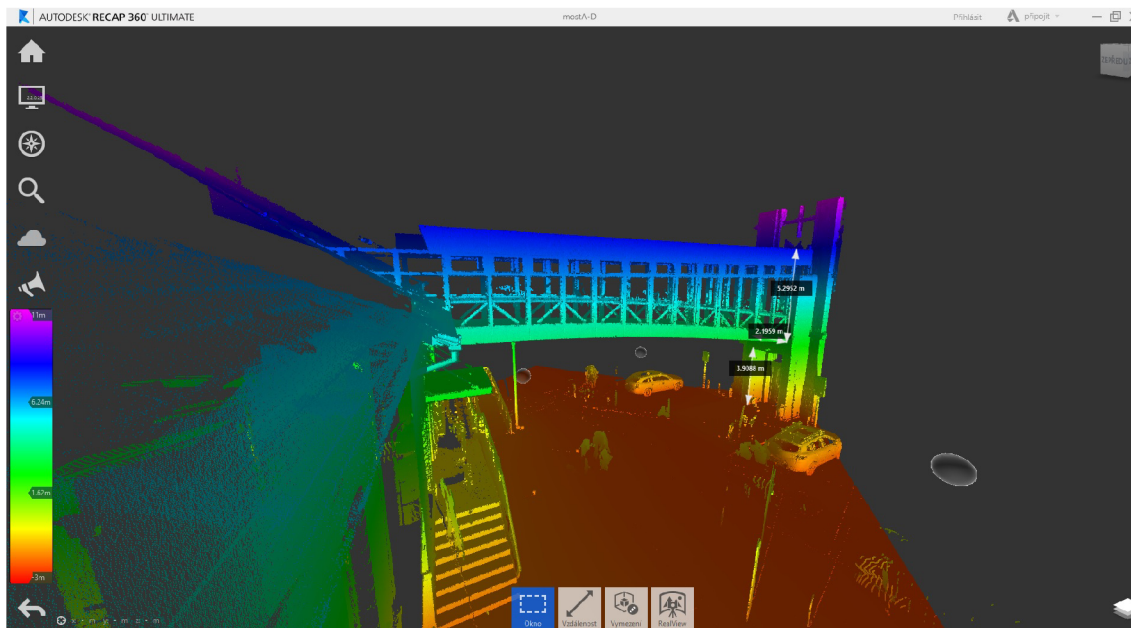
Firma FARO vyvíjí software SCENE. Do tohoto programu je možné importovat surové data ze skeneru ve formátu FLS a následně je spojit v jedno mračno bodů. Lze si vybrat mezi automatickou a ruční registrací skenů. Po registraci se zobrazí okno s odchylkami na vlíčovacích bodech mezi dvěma skeny viz. Obr. 4.2. Mračno může být v odstínech šedi podle intenzity odrazu nebo barevné. Je vhodné v tomto programu odstranit šum¹ z měřených dat. Takto upravené mračno je možné exportovat ve formátech pro Autodesk software (např. DXF, PTS, PTX, E57, WRL, XYZ), Bentley software (POD) a další.

3.2.2 ReCap 360

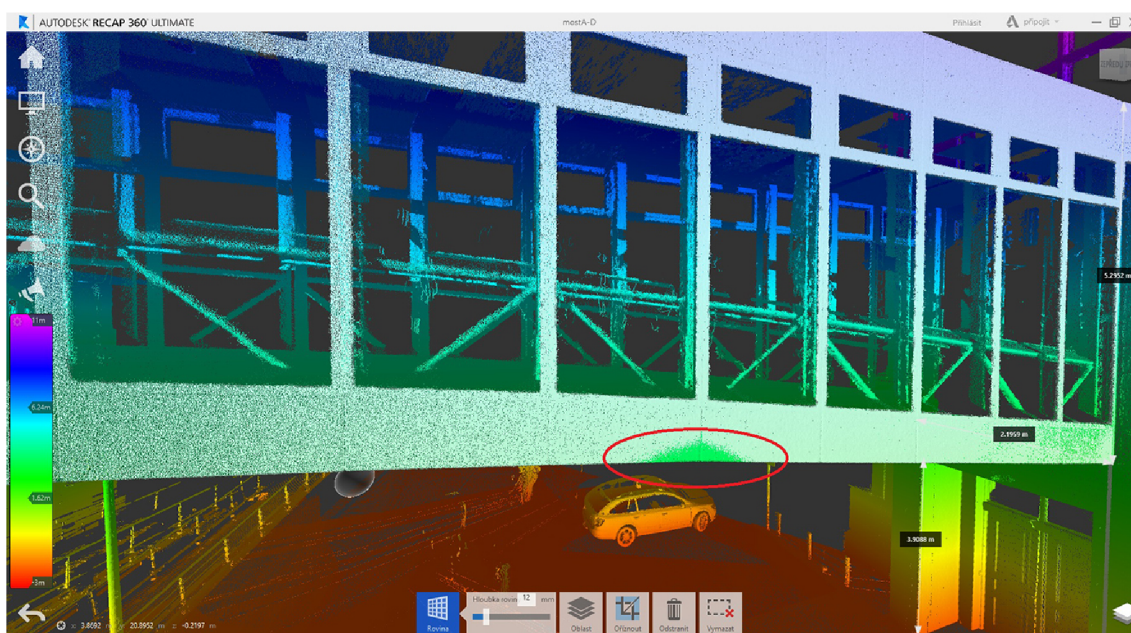
ReCap 360 od firmy Autodesk spolupracuje s firmou FARO. Je zde možnost nahrát přímo surové data ve formátu FLS a automaticky nebo ručně je spojit. ReCap 360 dále umožňuje import surových dat ze skenerů Leica, Zoller + Fröhlich, TopCon a Riegl. Podporuje také samozřejmě mnoho jiných formátů, které zde můžeme importovat, jako např. TXT, YXZ, PCG (Autodesk Point Cloud). Surové data ze skeneru spojí pomocí identických bodů či ploch do jednoho mračna bodů. Pokud sám nemůže skeny spojit, pak vyzývá uživatele o ruční registraci.

Tento software je vhodný hlavně pro převod dat ze skeneru, nebo jiných formátů na formát RCP či RCS. Tento formát je úspornější a přitom obsahuje celé mračno bodů s jejich barevnou informací. RCP je přímo podporováno dalšími programy od Autodesku. Dá se s ním pracovat v AutoCADu, Revitu, 3ds Max a dalších.

¹šum - Nežádoucí body, které byly změřeny a musí být odstraněny. Jedná se např. o vícenásobný odraz nebo procházející lidé.



Obr. 3.1: Zobrazení výškových rozdílů a kótování v ReCap [9]



Obr. 3.2: Zobrazení výběru bodů (bílé body) vzdálených $\pm 6\text{ mm}$ od určité roviny. V kroužku je zvýrazněna prohlubeň vnějšího opláštění mostu.

Ale i v ReCap 360 se dá s mračnem bodů dělat pár základních úprav. Můžeme měřit vzdálenosti - kótovat, například i vzdálenosti středů válcových těles. Body je možné zobrazovat v barvách RGB nebo dle intenzity odrazu či výšky viz. Obr 3.1. Zobrazení výškových úrovní může být užitečné pro záplavové území.

Velmi zajímavý a užitečný nástroj je výběr roviny. Označením tří bodů na ploše

se určí rovina. Poté je možné tuto rovinu rozšířit na desku o různé tloušťce. Tímto nástrojem může být určována rovinatost plochy viz. Obr.3.2, na kterém je vidět neočekávaná prohlubeň vnějšího opláštění mostu. Body lze také pouze vybrat a exportovat do jiného programu.

K dispozici je i nástroj vyčištění. Slouží pro odstranění falešných bodů. Tento nástroj se mi ovšem neosvědčil, efektivnější je odstranění nežádoucích bodů ručně a případně pak použít nástroj vyčištění.

3.2.3 AutoCAD

AutoCAD od firmy Autodesk umožňuje import mračna bodů ve formátu RCP nebo RCS, což přímo souvisí s již dříve zmíněným programem ReCap 360. V AutoCADu se dají dělat základní úpravy s mračnem bodů, jako řez rovinou, označení hrany nebo rohu. Tyto nástroje lépe fungovaly za situace, kdy jsem připojila mračno bodů spojené v ReCapu 360 ze surových dat. Pokud importované mračno bodů bylo spojeno v programu Scene a následně v ReCapu 360 pouze převedeno do formátu RCP, nástroje jako tvorba hran nefungovaly zrovna optimálně. Pouze tvorba hran a ploch je ale bohužel pro vytvoření věrného modelu trochu složitější konstrukce poněkud málo. Pokud by byly vytvořeny všechny potřebné hrany z mračna bodů, už by nebylo možné vytvořit mezi nimi plochu, neboť hrany by nebyly na sebe kolmé a rovnoběžné.

3.2.4 Revit

„BIM software Revit® je určen speciálně pro tvorbu informačního modelu budovy, včetně funkcí pro architektonický návrh, projekci TZB² a projektování konstrukcí.“
[12]

Revit od firmy Autodesk podporuje i práci s mračnem bodů. Import je možný ve formátu RCP, RCS, nebo v původních formátech E57, FLS, FWS, ASC a mnoho dalších. Po načtení mračna si program vytvoří na základě svých algoritmů půdorysné řezy objektem. Uživatel si může samozřejmě tyto řezy upravovat, posouvat a přidávat další. Mezi základní pohledy patří orientace na světové strany. Pomocí vhodně zvolených řezů skenovaným objektem lze tvořit stěny, sloupy a jiné matematicky definované tvary.

Revit pracuje s tzv. rodinami. To znamená, že každý typ konstrukce, či stavebního prvku patřící do jedné rodiny má stejné vlastnosti. Tyto vlastnosti se týkají zobrazování prvku, možnostmi úpravy či použití v souvislosti s jinými rodinami. Například nemůžeme model vytvořený v rodině oken vložit do podlahy nebo stropu,

²TZB - technické zařízení budov

jediná možná varianta použití takového modelu je ve stěně. V Revitu lze také vytvářet své vlastní komponenty na místě (přímo v projektu), které je nutné předem vždy umístit do správné rodiny.

3.2.5 VirtuSurv

VirtuSurv je software od firmy FARO. Je to samostatný software pro práci s velkým množstvím dat z laserového skenování. Umí ale velmi dobře spolupracovat s CAD programy a BIM balíčky, např. Autodesk Revit, Rhinoceros 3D, AutoCAD LT a další. Program VirtuSurv napomáhá zorientovat se v mnohdy nepřehledném mračnu bodů pomocí náhledů fotografií přímo ze skeneru. V oknu programu je zobrazena fotografie z jednoho stanoviska skenování, zatímco v druhém okně CAD programu, např. Revitu, se tvoří model z informací, které program přijímá od VirtuSurv. V programu lze jednoduše označovat body, tvořit křivky, zdi, vkládat okna nebo dveře, a to vše označováním bodů na fotografii. Tyto body a jiné komponenty se automaticky zobrazují v přidruženém CAD programu. [13]

Funkce programu závisí na CAD softwaru, který je s VirtuSurv propojen. Při propojení se ve VirtuSurv zobrazí základní nástroje, které přidružený program podporuje. Je zde možnost i spolupráce s tabulkovými editory a databázovými programy, kdy je možné vypisovat do tabulky např. souřadnice označovaných bodů.

3.3 Hardwarové vybavení

Zpracování tak obrovského množství dat, jako je mračno bodů, s sebou nese nemalé nároky na hardwarové vybavení.

Nejnáročnější z použitých softwarů byl program SCENE. Jeho požadavky na systémové vybavení naleznete v Tab. 3.1

Tab. 3.1: Systémové požadavky programu SCENE [11]

Operační systém	Microsoft Windows 7, 8 a 8.1, 64-bitový operační systém
RAM	16 GB
Grafická karta	min. 512 MB GDDR s podporou OpenGL 2.0 nebo vyšší
Processor	min. 2 GHz (doporučeno 2,5 GHz vícejádrový, platforma x64)
Pevný disk	SSD

Pro možnost pracovat se stereoskopickým 3D obrazem je doporučena grafická karta NVIDIA Quadro, 3D monitor nebo 3D projektor s vhodnými brýlemi.

Samozřejmostí je volné místo na disku pro uložení a zpracování dat. Můj projekt měl 4 skeny, a jako surová data měla velikost něco málo přes 1 GB. Pokud se data zpracují a spojí v jedno mračno bodů, pak následující export dat může mít velikost až kolem 6 GB. Záleží samozřejmě na formátu exportu. Můj projekt ovšem zahrnoval pouze jeden most, běžnější jsou rozsáhlejší území, či větší objekty.

4 VLASTNÍ ZPRACOVÁNÍ

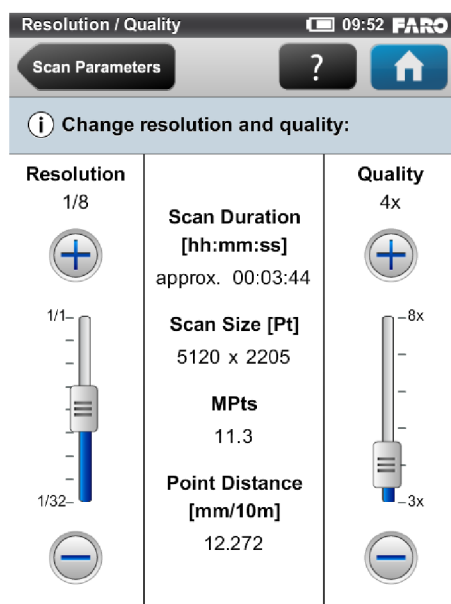
Úkolem bylo vytvořit 3D modely dvou mostů v areálu Fakulty stavební, VUT v Brně. První most bude označen A-D, protože vede z budovy A do budovy D. Druhý bude mít pracovní název R-B ze stejného důvodu.

U obou mostů byl zvolen stejný postup měření a zpracování surových dat v mračno bodů. Modely jednotlivých mostů byly vytvořeny různými způsoby. Most A-D byl dokonce vytvořen ve dvou softwarech. Cílem bylo vyzkoušet a porovnat více programů navzájem a nalézt nejefektivnější, nejpresnější a nejjednodušší program pro zpracování mračna bodů, pokud se jedná o model budovy.

4.1 Získávání dat

Pro získání dat byl použit FARO Laser Scanner Focus 3D. Jeho specifikace je uvedena v kapitole 2.3.4. Pro naskenování celého mostu byly pořízeny 4 skeny - z každé strany mostu dva stanoviška.

Na každém stanovišku se individuálně nastavil výřez skenované oblasti. Dále se nastavuje rozlišení skenování od 1/1 po 1/32. V plném rozlišení je možné pořídit 700 miliónů bodů. S úhlovým krokem $0,009^\circ$ na vzdálenost 10 m jsou dva sousední body od sebe vzdáleny 1,5 mm. U skenování mostů bylo rozlišení nastaveno na hodnotu 1/2, což při vzdálenosti 10 m představuje vzdálenost dvou sousedních bodů 3,1 mm. Při průměrné vzdálenosti skenování 16 m u mostu A-D jsou dva sousední body od sebe vzdáleny 5 mm. U mostu R-B byla průměrná vzdálenost skenování 20 m a



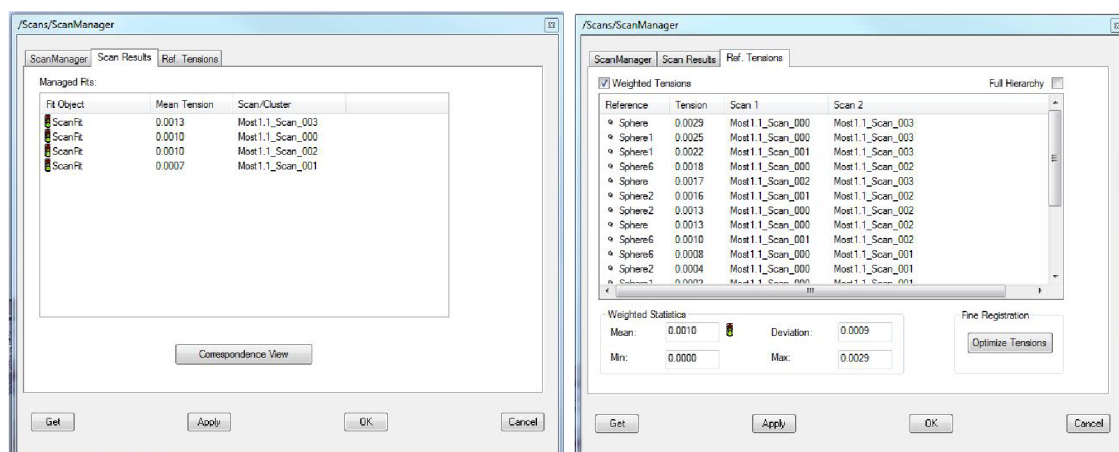
Obr. 4.1: Obrazovka skeneru při nastavování parametrů skenování [3]

sousední body jsou od sebe vzdáleny $6,5\text{ mm}$. Další parametr, který se nastavuje před začátkem skenování je kvalita. Pokud je nastavena větší kvalita (opakování měření jednoho bodu), skenování trvá delší dobu a naopak. Kvalita skenování byla nastavena na hodnotu 3x při rychlosti 244 tisíc bodů za sekundu. Vzor obrazovky skeneru při nastavování parametrů skenování je zobrazen na Obr. 4.1.

Pro navázání skenů na sebe byly použity spojovací body - koule. Ty byly v obou případech stabilizovány pomocí malých nožek na zemi.

4.2 Zpracování surových dat

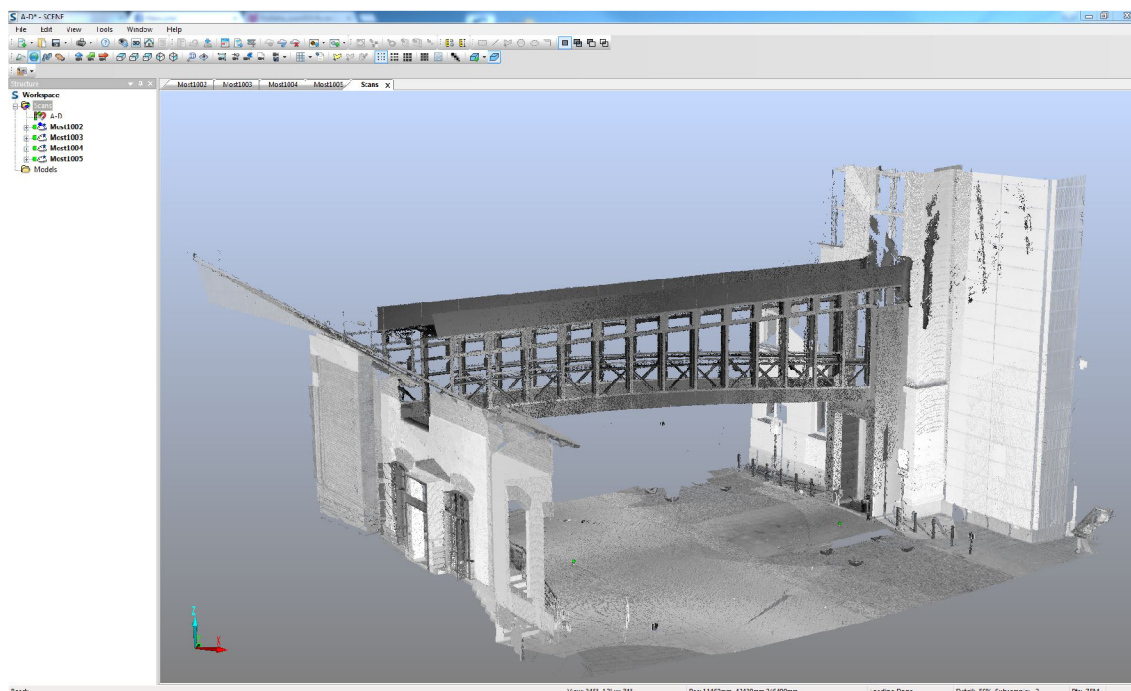
Další zpracování probíhalo v programu SCENE. Zde byly nahrány surové data ze skeneru ve formátu FLS. Na základě spojovacích bodů byly tyto skeny spojeny v jedno mračno bodů. Hledání spojovacích bodů lze provést automaticky, nebo ručně. Pokud software některý ze spojovacích bodů nenašel, byl označen dodatečně ručně. Po spojení skenů je možné zhodnotit přesnost navázání do jednoho mračna bodů viz. Obr. 4.2. Střední chyby navázání skenů byly $\sigma_{A-D} = 1,2\text{ mm}$, $\sigma_{R-B} = 1,0\text{ mm}$.



(a) Průměrná chyba navázání jednotlivých skenů (b) Chyba na spojovacím bodě mezi dvěma skeny

Obr. 4.2: Přesnost navázání skenů

Poté je potřeba odstranit nežádoucí body. Jsou to náhodné, nebo vícenásobné odrazy. Může to být např. projíždějící auto, chodec, nebo série odrazu od vícevrstvého skleněného povrchu. Těmito body se říká šum. Existují algoritmy na odstranění šumu. Pokud je šumu hodně, je vhodnější ho odstranit ručně. Zároveň se při této úpravě mračno ořeže pouze na zájmové území. Poté není potřeba pracovat se zbytečně velkým mračnem, které je náročné na výpočetní techniku. Ukázka prostředí



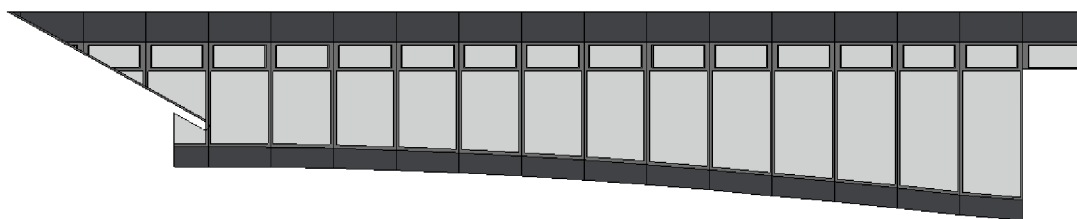
Obr. 4.3: Prostředí programu Scene s vyobrazeným mračnem bodů po odstranění šumu

programu Scene s mračnem bodů mostu A-D po odstranění šumu a ořezání na zájmové území je na Obr. 4.3.

Upravené mračno bodů bylo z programu Scene exportováno do formátu PTX. Při exportu dat je možné zvolit kvantitu exportovaných bodů. Může se tedy např. exportovat každý 10 bod - výrazně se zmenší velikost souboru. Takové mračno se následně velmi špatně zpracovává, proto byly oba dva mosty exportovány v plné kvantitě bodů. Soubor PTX u mostu A-D dosáhl velikosti 5,87 GB a u mostu R-B 4,76 GB. V této podobě se soubor importoval do programu ReCap 360. Zde se mračno převedlo na formát RCP, který už podporuje mnoho programů od firmy Autodesk.

4.3 Tvorba modelu mostu A-D

Most byl vytvořen v programu AutoCAD. Vznikal jako drátový model z odměřených vzdáleností na mračnu bodů. Vzdálenosti se odměřovaly v programu ReCap 360. V první fázi byl nakreslen boční pohled na most. Vše se kreslilo v jedné rovině, aby následně nevznikl problém s tvorbou ploch. Po dokreslení bočního pohledu se vytvořily plochy a ty byly pokryty materiálem, viz. Obr. 4.4. Most je z velké části tvořen okny. To ovšem nebyl problém, protože mezi základními materiály v AutoCADu je



Obr. 4.4: Výkres bočního pohledu na most A-D v programu AutoCAD

na výběr poměrně široká škála skel. Po všech úpravách byla tato strana mostu kopírována a odsazena ve stejné výšce o vzdálenost šířky mostu. Vytvořila se podlaha a strop vyplněním plochy. Zde byl opět zvolen vhodný materiál. Na obou stranách mostu byla velmi jednoduše nakreslena malá část přiléhající budovy, aby se měl most o co opírat, viz. příloha B.1.

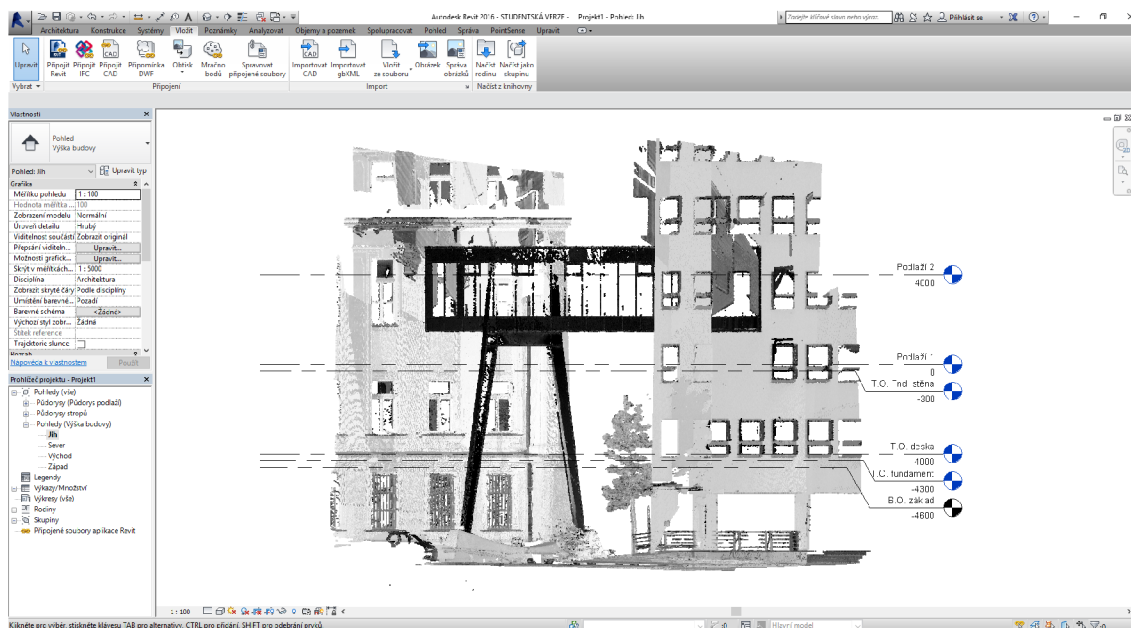
V interiéru mostu se nachází dřevěné zábradlí s kovovými podpěrami. Toto zábradlí nebylo modelováno, protože ho nešlo v mračnu bodů jednoznačně rozpoznat. Vznikly dva různé odrazy zábradlí, což bylo způsobeno průchodem paprsků přes sklo. Model tedy vyobrazuje pouze vnější podobu, i když je přes sklo vidět i doprostřed.

Jako alternativní software pro tvorbu modelu byl zvolen program SketchUp. Tento program nepracuje s mračnem bodů. Je zde ovšem možný import souborů ve formátu DWG a DXF. Tento program jsem použila z důvodu navázání na svou bakalářskou práci, kde byl vytvořen model budovy A v areálu Fakulty stavební z dat terestrického zaměření budovy. Model mostu A-D plynule navazuje na model budovy A. Po importu mostu do souboru s budovou A se musel most transformovat, aby správně přiléhal. Poté byl potažen texturami, respektive fotografiemi, vyjma již zmiňovaných výplní oken. Zde byl opět zvolen materiál povrchu sklo z výchozí knihovny programu. Finální podoba modelu mostu doplňuje model budovy A viz. příloha B.2

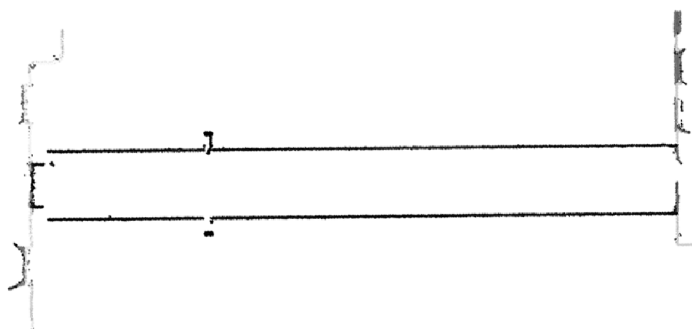
4.4 Tvorba modelu mostu R-B

Model mostu R-B byl vytvořen v programu Revit. V prvním kroku zde bylo importováno mračno bodů ve formátu RCP, kterým byly automaticky provedeny půdorysné řezy viz. Obr. 4.5. V řezu je např. jednoznačně vidět rovinu vnějšího opláštění mostu viz. Obr. 4.6.

Stěna bočního opláštění mostu byla vytvořena mezi dvěma půdorysnými řezy umístěnými na spodní a vrchní hraně mostu. Při tvorbě stěny je potřeba si zvolit z knihovny rodiny stěn předem definovaný model o dané tloušťce. Jelikož byl most, podobně jako v prvním případě, skenován pouze z venkovní strany, nejsou známy tloušťky stěn. Proto byla použita nejužší stěna určená do interiéru jako příčka o šířce



Obr. 4.5: Ukázka prostředí programu Autodesk Revit s importovaným mračnem bodů. Jedná se o jižní pohled na most se zobrazenými základními půdorysnými řezy.



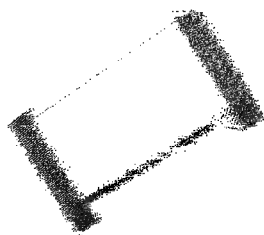
Obr. 4.6: Půdorysný řez mračnem bodů v úrovni spodního opláštění mostu

79 mm. Dále je při tvorbě stěny potřeba zvolit, zda vynášené body jsou osou, vnější nebo vnitřní hranou. Poté stačí pouze nastavit mezi kterými řezy (jak vysoká) bude stěna a označit začátek a konec stěny.

Podlahová konstrukce byla vytvořena pomocí nástroje *Podlaha*. Opět je potřeba vybrat si typ podlahy z rodiny podlah. V projektu byla zvolena obecná podlaha o tloušťce 150 mm. Pro kreslení je nutné mít zapnutý půdorysný pohled. Poté se nakreslí hranice podlahy, nebo se pouze označí stěny, mezi kterými se má podlaha nacházet.

Dalším prvkem mostu je nosná konstrukce. Zde bylo modelování poněkud komplikovanější hned z několika důvodů. Nosník se v nižších výškových úrovních naskenoval

ze tří, ve vyšších pouze dvou stran, ale i takhle se dal jeho rozměr z půdorysného řezu získat viz. Obr. 4.7. Ve vrchní části konstrukce se ovšem nenaskenoval vůbec



Obr. 4.7: Půdorysný řez mračnem bodů v místě nosníku

z důvodu velkého úhlu dopadu a malé intenzity odrazivosti. Jeho výška je určena z kontrolního podrobného zaměření. Kromě toho nosník není konstantního průměru. V dolní části je nejmohutnější a s výškou se jeho průřez zmenšuje. Geometrie se ovšem nemění. Byl vytvořen jako nová komponenta v rodině konstrukčních sloupů. Pro vytvoření modelu byly ve dvou výškových úrovních nakresleny průřezy nosníkem a tyto dva průřezy byly spojeny čarou. Poté při tvoření nové komponenty byl použit nástroj *Přechod tažením*, kdy byly postupně označeny oba dva nakreslené řezy a trajektorie tažení. Tímto postupem byl svislý nosník vymodelován postupně ze tří částí. Podobně byla vytvořena i horizontální část. Zde stačilo z důvodu konstantního průřezu vytvořit pouze jeden řez nosníkem a použít nástroj *Tažení*.

Ocelové nosníky jsou v dolní části uchyceny do betonové patky, která má poměrně složitý prostorový tvar. Tato patka byla vytvořena jako nová komponenta na místě pomocí příčného a podélného řezu a nástroje *Přechod tažením*. Skládá se ze dvou částí. Bohužel její spodní část přesně nekopíruje originál z důvodu vlastností použitého nástroje pro její tvorbu.

Okna byly vytvořeny jako nový typ prvku v rodině *Metrické okno*. Nové prvky se tvoří přímo v Revitu v nabídce *soubor - nové - rodina* ve formátu RFT. Poté ho lze jednoduše vkládat do různých projektů. Pro tento projekt byla poskytnuta krátká zkušební verze programu *VirtuSurv*, která byla využita při tvorbě modelu oken. Práci značně usnadnil návod pro tvorbu komponent viz. [15]. Celkem bylo v projektu použito 5 typů oken a každý typ byl jednotlivě vytvořen pomocí *VirtuSurv*. Obdobně byly vytvořeny dvojce dveře opět jako nová rodina *Metrické dveře*. Ty byly umístěny u východů na obou stranách mostu. Zde nebylo možné vycházet z naměřených údajů, ale pouze z odhadnuté velikosti otvoru.

Po obou stranách mostu byly samozřejmě vymodelovány i části přiléhajících budov. U budovy R šlo pouze o vytvoření stěny, která byla posléze osazena okny. Historická budova B má na fasádě mnoho výstupků, ornamentů a říms. Detailní model

fasády vytvořen nebyl, ale aspoň římsy a parapety vymodelovány byly. Na Obr. 4.8 je vidět svislý řez rovinou stěny budovy B v místě spodní římsy. Na základě tohoto řezu je možné vymodelovat poměrně detailní model, vzhledem ke složitosti tvarů ve spodní části. Opět byl použit nástroj *Tažení*. Stejnou metodou byla vymodelována i vrchní římsa a parapety.



Obr. 4.8: Svislý řez rovinou stěny budovy B v místě spodní římsy

Povrch terénu byl vytvořen také jako nová komponenta na místě. Opět byl proveden řez terénem a poté pomocí nástroje *Tažení* vytvořena zvláště vozovka, chodník a travnaté prostory.

Na závěr byl u všech komponent zvolen materiál. Převážná většina materiálů byla vytvořena, neboť výchozí knihovna jich obsahovala velmi málo. V Revitu má materiál širší význam než pouze pokrytí modelu texturami. Je zde možnost definovat vlastnosti materiálu pro budoucí simulace, např. úniku tepla. Nicméně v tomto případě šlo pouze o pokrytí modelu texturami z prezentačních důvodů. Pohledy na výsledný model jsou v příloze C.

5 SHRNU TÍ A SROVNÁNÍ METOD TVORBY MODELŮ

Každý most byl vytvořen v jiném softwaru a jinou metodou, aby bylo možné srovnat postupy a stanovit optimální řešení pro případný příští projekt.

Most A-D byl tvořen jako drátový model, který posléze vyplnily plochy. Z toho důvodu se muselo kreslit v jedné dané rovině. Všechny drobné výstupky či anomálie se tedy pohltily v této určené rovině. Druhá strana mostu byla rovnoběžně kopírována. Veškeré geometrické nedokonalosti skutečného stavu mostu byly zakryty v dokonale souměrném a pravoúhlém modelu. Vytvořit model nebylo náročné, v podstatě stačily velmi základní dovednosti s programem ReCap 360 a AutoCAD.

Následoval import souboru DXF s drátovým modelem mostu A-D do programu SketchUp se záměrem rozšířit, již dříve prezentovaný, model budovy A. Tento program je určen pro tvorbu 3D modelů pro prezentační účely. Základní tvorbu zvládne každý začátečník v modelování. Velmi působivá je jednoduchost potahování modelu vlastními texturami (fotografiemi). Díky tomuto nástroji vypadají výsledné modely velmi realisticky, i když nejsou až tak detailní.

Most R-B byl tvořen metodou aproximace objektů matematickými primitivy. Všechny prvky v modelu byly vytvořeny pomocí základních, matematicky definovatelných modelů, nebo jako vytažení uzavřeného obrazce po přímce či křivce. U této metody se také musí zanedbat drobné nedokonalosti v rovinatosti ploch. Tvorba tohoto modelu byla nejnáročnější z důvodu neznalosti používání programu Revit. Po zvládnutí základních operací a seznámení se s metodou používání pohledů a pracovních rovin se práce velmi zrychlila a zefektivnila.

Každý ze zmíněných programů je vhodný pro něco jiného. Ani jeden z nich není primárně určen pro zpracování mračna bodů. AutoCAD a Revit ovšem tuto možnost poskytují. Revit je, dle mého názoru, vhodnější než AutoCAD. Systém rovin, možnost tvořit vlastní komponenty a pak je vkládat do projektu značně urychluje práci. Program je primárně určen pro návrhy budov, proto v něm není problematické vytvořit již existující budovu. Jak v AutoCADu, tak v Revitu lze tvořit výkresy pohledů, povrchy lze pokrývat materiály a vytvořit realistickou prezentaci modelu. V tom se liší od programu SketchUp, který je určen čistě pro prezentační účely.

Pokud by se jednalo o tvorbu modelu matematicky nedefinovatelného tvaru, musel by se použít jiný program určený pro tvorbu sítě.

6 POROVNÁNÍ S TERESTRICKÝMI METODAMI

Pro kontrolu a ověření přesnosti laserového skenování byla kolem mostů vybudována čtvercová síť a z ní byly terestricky zaměřeny podrobné jednoznačné kontrolní body na konstrukci mostu a v blízkém okolí.

Měření probíhalo pomocí totální stanice Topcon GPT 3003N. Přesnost délkového měření na odrazný hranol je výrobcem stanovena na hodnotu $2 + 2ppm$, v bezhranolovém módu to je $\pm 10 mm$. Přesnost úhlového měření je udávána $1.0 mgon$.

Sítě byly stabilizovány pouze dočasně po dobu měření a to vždy čtyřmi stativy. Z každého stanoviště byla měřena vzdálenost na tři ostatní body sítě na odrazný hranol a poté osnova směrů ve dvou polohách dalekohledu na terč. Každá vzdálenost tedy byla měřena oboustranně. Poté probíhalo měření podrobných bodů polární metodou. Pár bodů vždy bylo měřeno opakovaně z dalšího stanoviště pro kontrolu. Tyto kontrolní body poté byly zprůměrovány.

Po měření proběhl výpočet souřadnic bodů sítě a následné vyrovnání v programu Groma v.8.0., viz. příloha A.1. Poté byly vypočteny souřadnice podrobných bodů a vyrovnány viz. příloha A.2.

Podle vzorce 6.1 byla stanovena výsledná střední souřadnicová chyba určení podrobných bodů. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6.1

$$m_{x,y(\text{podrobného bodu})} = \sqrt{m_{x,y(\text{bodu sítě})}^2 + m_{x,y(\text{metody měření})}^2} \quad (6.1)$$

Tab. 6.1: Charakteristiky přesnosti terestrického kontrolního měření mostů

	Most A-D	Most R-B
$m_{x,y(\text{bodu sítě})}$	0,65 mm	0,60 mm
$m_{x,y(\text{metody měření})}$	2,77 mm	5,81 mm
$m_{x,y(\text{podrobného bodu})}$	2,85 mm	5,84 mm

Přesnost podrobných bodů měřených na mostě R-B je horší než v prvním případě u mostu A-D. Toto je pravděpodobně způsobeno delšími záměry a menším zenitovým úhlem, pod kterým se podrobné body měřily.

6.1 Výsledky porovnání na mostě A-D

V programu Scene byly získány souřadnice kontrolních podrobných bodů z laserového skenování. Body byly ručně vybírány dle náčrtu. Podrobné body z kon-

trojního terestrického měření se následně transformovaly shodnostní transformací na body získané z programu Scene. Proběhl výpočet rozdílů souřadnic a následně směrodatných odchylek. Hodnoty jednotlivých souřadnicových rozdílů jsou uvedeny v Tab. 6.2. Směrodatná odchylka jednotlivých souřadnic pak byla spočítána podle vzorce 6.2. Výsledky jsou uvedeny na posledním řádku tabulky.

Tab. 6.2: Souřadnicové odchylky dvou stejných bodů měřených terestricky a laserovým skenováním na mostě A-D

Číslo bodu	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔZ [mm]
1	-7	-19	-1
2	16	0	2
3	9	-3	4
4	2	1	-12
6	0	-8	-1
7	4	2	7
8	9	-5	-11
9	3	2	-10
10	-3	-12	-4
11	12	-4	-6
12	-4	4	2
14	2	-4	0
15	8	-1	12
16	-10	-11	-9
17	-12	0	3
18	-10	-3	19
19	-7	2	1
20	-2	6	9
21	-8	7	4
22	-4	4	-1
23	7	12	5
24	-1	10	-2
25	-1	2	-2
26	-2	-3	-12
27	-1	7	5
29	1	18	1
σ	7,0	7,7	7,3

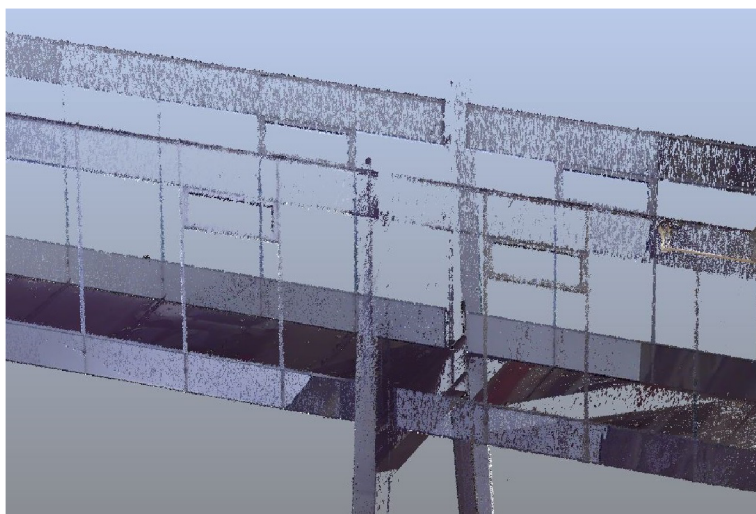
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$

Na závěr proběhlo statistické testování, zda rozdíly souřadnic mají normálního rozdělení. Výsledné grafy naleznete v příloze A.3. Všechny souřadnicové rozdíly jsou menší než trojnásobek směrodatné odchylky a pouze 4 body překračují dvojnásobek směrodatné odchylky.

6.2 Výsledky porovnání na mostě R-B

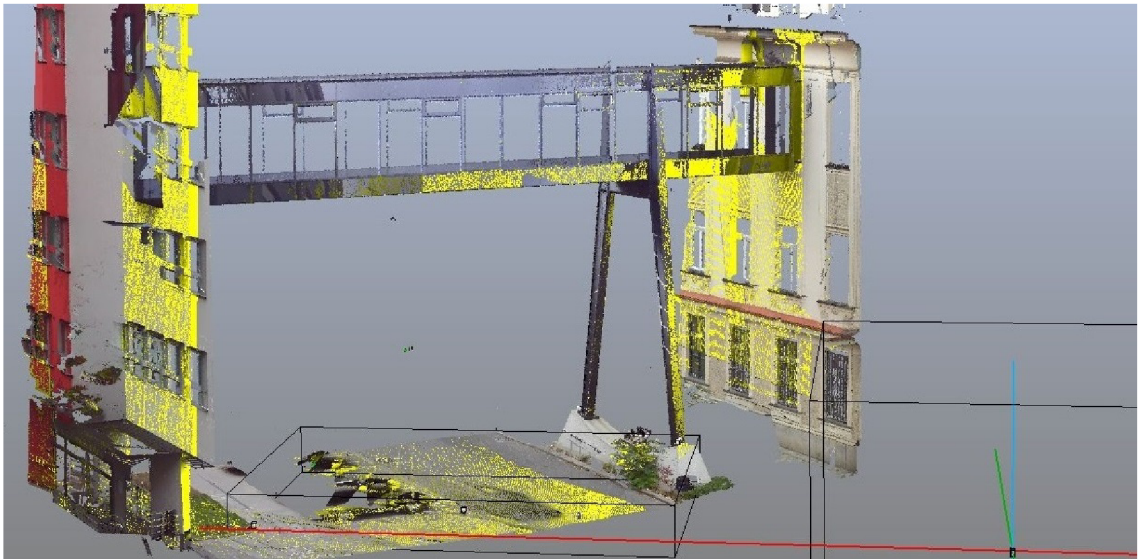
Souřadnice podrobných bodů z laserového skenování byly získány stejně jako v prvním případě. Mnoho bodů se ovšem nepodařilo označit a získat tak jejich souřadnice. Program Scene vybírá body v blízkém kruhu od místa označení. Pokud v daném okolí žádný bod nenajde, tuto skutečnost oznámí uživateli.

Při pohledu na mračno bodů v horní části mostu jsou vidět značné mezery viz. Obr. 6.1. Na obrázku je také vidět, že nosná konstrukce, která je vyšší než horní okraj



Obr. 6.1: Ukázka hustoty bodů v horní části mostu R-B

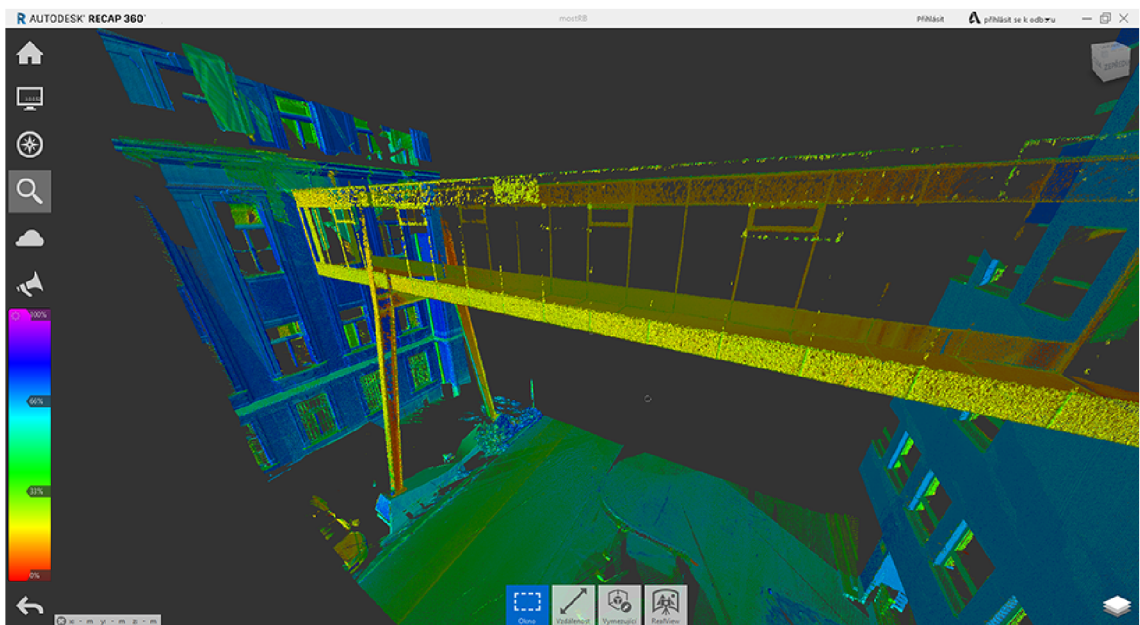
mostu, není body pokryta vůbec. Most je vysoký 14 m , toto ovšem není problém, protože skener je schopen skenovat do vzdálenosti 120 m . Důvod, proč vrchní část mostu není pokryta dostatečným počtem bodů, je v postavení skeneru a povrchu mostu. Skener byl postaven ve vzdálenosti maximálně 15 m vodorovně od mostu. Výškový úhel v takovém postavení dosáhl minimální hodnoty 45° . Most je pokryt vysoce odrazivým materiálem (působí téměř jako zrcadlo) a v kombinaci s velkým úhlem dopadu se značná část pulzů odrazila pryč. Na Obr. 6.2 jsou žlutě zobrazeny body získané z jednoho postavení skeneru. Je vidět, že se naskenovaly pouze body



Obr. 6.2: Mračno bodů se žlutě vyznačenými body naskenovanými z jednoho postavení skeneru

nejbližší s malým úhlem dopadu. Vzdálenější části mostu zůstaly nepokryty. Také je zřejmé, že odraz od fasády budovy R není nijak problémový, ikdyž je dál od skeneru než most.

V prostředí programu Autodesk ReCap 360 je možnost zobrazit intenzitu odrazu od různých materiálů viz. Obr. 6.3. Zde je vidět, že kovový nosník má nejmenší in-



Obr. 6.3: Ukázka intenzity odrazu od mostu R-B v prostředí programu Autodesk ReCap 360

tenzitu odrazu, místy téměř nulovou. Zatímco stěny mostu mají kolem 30%. Okenní výplně ze skla samozřejmě nejsou pokryty body vůbec.

Výsledky tohoto kontrolního porovnání terestrického zaměření a laserového skenování jsou ovlivněny kvantitou dostupných bodů. Terestricky bylo zaměřeno 37 podrobných bodů. V programu Scene se podařilo určit souřadnice 30-ti bodům. Po shodnostní transformaci na body terestrického zaměření a určení rozdílů bylo vyloučeno dalších 12 bodů pro velké odchylky aspoň v jedné souřadnici. Jednalo se o odchylky v řádech desítek centimetrů. Pro porovnání tedy zůstalo 18 bodů s jejich souřadnicovými rozdíly viz. Tab. 6.3. Na posledním řádku tabulky je opět uvedena směrodatná odchylka spočítaná podle vzorce 6.2. Vzhledem k malému souboru již nebylo provedeno statistické testování, zda rozdíly vykazují normální rozdělení, pouze byl vytvořen graf četnosti velikosti odchylek viz. příloha A.4.

Tab. 6.3: Souřadnicové odchylky dvou stejných bodů měřených terestricky a laserovým skenováním na mostě R-B

Číslo bodu	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔZ [mm]
1	13	2	-11
2	13	-9	17
5	9	2	-8
6	2	16	-31
7	0	4	-1
9	7	7	-18
10	-10	-9	3
11	0	4	15
13	-1	-3	-9
14	12	0	-6
19	4	-5	0
20	0	8	13
21	-1	-1	21
22	-1	8	-6
23	-14	2	-1
25	1	-24	-15
26	0	-19	-9
27	8	11	-8
σ	7,1	9,7	12,8

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit model stavební konstrukce na základě dat z laserového skenování. Konkrétně se jednalo o dvě mostní konstrukce v areálu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Obě mostní konstrukce byly naskenovány pozemním laserovým skenerem a data následně zpracována v programu SCENE, kde byly jednotlivé skeny spojeny pomocí spojovacích bodů do mračna bodů. Další zpracování probíhalo v programu ReCap 360, kde byla zkontrolována intenzita odrazu od různých materiálů. Pomíneli se intenzita odrazu skel, která je nulová, pak nejmenší hodnotu měl ocelový nosník u mostu R-B přes ulici Rybkovu. Nosník je pravděpodobně pokryt barvou s velkou odrazivostí. Větší intenzitu odrazu než ocelový nosník mělo opláštění téhož mostu, které je velmi lesklé a působí jako zrcadlo. I přesto dosáhlo 30% intenzity odrazu. Ve vrchní části mostu se ovšem od těchto dvou povrchů paprsky skeneru odrážely pryč, pravděpodobně z důvodu velkého úhlu dopadu. U druhého mostu A-D problém s intenzitou odrazu nebyl. Poté bylo mračno bodů importováno do programu AutoCad v případě mostu A-D a do programu Revit v případě mostu R-B. Most A-D byl vytvořen jako drátový model, který byl následně pokryt plochami a texturami. Jako drátový model byl také importován do programu SketchUp, ve kterém byl pokryt fotografiemi a transformován k navázání na již existující model budovy A. Model budovy A byl v programu SketchUp vytvořen v rámci mé bakalářské práce a takhle byl jednoduše rozšířen. U mostu R-B byla použita metoda aproximace objektů matematickými primitivy. Model byl opět potažen texturami na základě přiřazení materiálu.

Součástí této práce bylo také ověření přesnosti výstupu laserového skenování zaměřením několika kontrolních bodů. Pro ověření byla vybudována u každé konstrukce mostu síť, ze které byly zaměřeny kontrolní podrobné body. Následně se získaly souřadnice těchto kontrolních bodů ze zaměření laserovým skenerem. Souřadnice se na sebe transformovaly shodnostní transformací a vypočetly se rozdíly. U mostu A-D byla stanovena směrodatná odchylka kolem 7 mm u každé souřadnice a odchylky vykazovaly normální rozdělení. Výsledky u mostu R-B již tak uspokojivé nebyly z již zmíněného důvodu malé intenzity odrazu od materiálů mostu až nulové odrazivosti v jeho vrchní části. Mnoho změřených kontrolních bodů se nedalo v mračnu bodů identifikovat. Z malého výběru bodů, které odpovídaly vybraným bodům z laserového skenování byla opět spočítána směrodatná odchylka pro jednotlivé souřadnice $\sigma_x = 10\text{ mm}$, $\sigma_y = 7\text{ mm}$, $\sigma_z = 12\text{ mm}$. Z důvodu chybějících bodů je na mostě R-B menší přesnost identifikace bodu.

LITERATURA

- [1] *Kronika FAST, úvod* [online]. c2009, [cit. 2016-02-25]. Dostupné z URL: <<http://www.fce.vutbr.cz/obecne/kronika/Kronika%20uvod.pdf>>.
- [2] FAST VUT v Brně. *Vznik a historický vývoj fakulty stavební VUT v Brně* [online]. c2004, [cit. 2016-02-25]. Dostupné z URL: <http://www.fce.vutbr.cz/obecne/historie/historie_fast.asp>.
- [3] FARO Product Publications. *FARO Laser Scanner Focus3D Users Manual* [online]. c2011, [cit. 2016-2-23]. Dostupné z URL: <ftp://12.166.64.163/Faro/e866_faro_laser_scanner_focus3d_manual_en%5B1%5D.pdf>.
- [4] Leica Geosystems. *Scanners* [online]. c2016, [cit. 26. 02. 2016]. Dostupné z URL: <<http://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners>>.
- [5] Riegl Laser Measurement Systems. *Terrestrial Laser Scanning* [online]. c2016, [cit. 27. 02. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>>.
- [6] Digital New Deal *Pozemní laserový skener* [online]. c2014, [cit. 27. 02. 2016]. Dostupné z URL: <<http://dndi.jp/cooperation/sankei/item0006.html>>.
- [7] Zoller + Fröhlich *Products* [online]. c2012-2015, [cit. 10. 03. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.zf-laser.com/Products.laserscanner.0.html?&L=1>>.
- [8] FARO Focus 3D. *Features, Benefits & Technical Specifications* [online]. c2013, [cit. 2016-3-18]. Dostupné z URL: <http://www.laserscanning-europe.com/de/system/files/redakteur_images/TechSheet_Laser%20Scanner_Focus3D.pdf>.
- [9] Technoimport. *Laser scanner Focus 3D Faro* [online]. c2016, [cit. 2016-3-18]. Dostupné z URL: <<http://tekhnoimport.com/en/products/faro/>>.
- [10] ŠTRONER, Martin. *3D skenovací systémy*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3. [cit. 2016-3-23].
- [11] SCENE. *FARO's 3D Documentation Software* [online]. c2016, [cit. 2016-4-3]. Dostupné z URL: <<http://www.faro.com/en-us/products/faro-software/scene/system-requirements#main>>.
- [12] AUTODESK. *REVIT* [online]. c2016, [cit. 2016-5-3]. Dostupné z URL: <<http://www.autodesk.cz/products/revit-family/overview>>.

- [13] FARO. *VirtuSurv* [online]. [cit. 2016-5-10]. Dostupné z URL: <<http://us.faro3dsoftware.com/CAD/Products/index.php>>.
- [14] Novotná, Helena. *Základy BIM – Revit Architecture seznámení s programem* [online]. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. [cit. 2016-5-10]. ISBN 978-80-214-5023-3. Dostupné z URL: <http://www.fce.vutbr.cz/studium/materialy/BIM/Revit_Novotna.pdf>.
- [15] Braunes, Jörg. *VirtuSurv Revit Tutorial: Creating a new Window Family* [online]. 26.8.2014. [cit. 2016-5-12]. Dostupné z URL: <http://download.faro-3d-software.com/VirtuSurv/Tutorials/data/VirtuSurv_Revit_window_family_tutorial_R%2015.pdf>.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	popis
CAD	Computer aided design
FAST	Fakulta stavební
BIM	Building information modeling
TZB	Technické zařízení budov
IMU	Inertial measuring unit
HDR	High dynamic range
SSD	Solid state drive
GDDR	Graphics double data rate

SEZNAM PŘÍLOH

A	Porovnání s terestrickými metodami	44
A.1	Protokoly z vyrovnání sítí	44
A.2	Protokoly z vyrovnání podrobných bodů	45
A.3	Testování přesnosti na mostu A-D	47
A.4	Testování přesnosti na mostu R-B	48
B	Grafické znázornění výsledného modelu mostu A-D	49
B.1	Model vytvořený v programu AutoCAD	49
B.2	Model vytvořený v programu SketchUp, který navazuje na dříve vytvořený model budovy A	50
C	Grafické znázornění výsledného modelu mostu R-B vytvořený v programu Revit	51

A POROVNÁNÍ S TERESTRICKÝMI METODAMI

A.1 Protokoly z vyrovnání sítí

VYROVNANÉ SOUŘADNICE:
=====

Bod	Y [m]	X [m]	dy [mm]	dx [mm]
4001	1027.9979	5013.9499	0.87	-0.12
4002	999.9993	5014.7497	-0.67	0.74
4003	999.9998	4999.9992	-0.16	-0.81
4004	1028.2210	5000.8012	-0.04	0.19

INFORMACE O STŘEDNÍCH CHYBÁCH:
=====

Bod	my [mm]	mx [mm]	mye [mm]	mxe [mm]	mxy [mm]	Stoč. [g]
4001	0.79	0.43	0.23	0.87	0.64	71.37
4002	0.80	0.47	0.22	0.90	0.65	131.34
4003	0.80	0.47	0.22	0.90	0.65	68.65
4004	0.80	0.43	0.22	0.88	0.64	128.33

Střední souřadnicová chyba mxy [mm]: 0.65

Obr. A.1: Protokol o vyrovnání sítě u mostu A-D z programu Groma v.8.0.

VYROVNANÉ SOUŘADNICE:
=====

Bod	Y [m]	X [m]	dy [mm]	dx [mm]
5001	2026.8199	1042.3632	-1.08	1.21
5002	2004.0706	1046.5266	1.64	-1.41
5003	1999.9986	1000.0000	-1.41	-0.01
5004	2018.3558	1000.0002	0.85	0.21

INFORMACE O STŘEDNÍCH CHYBÁCH:
=====

Bod	my [mm]	mx [mm]	mye [mm]	mxe [mm]	mxy [mm]	Stoč. [g]
5001	0.70	0.70	0.51	0.86	0.70	150.00
5002	0.90	0.51	0.43	0.93	0.73	120.82
5003	0.37	0.59	0.30	0.62	0.49	24.81
5004	0.40	0.44	0.35	0.48	0.42	161.32

Střední souřadnicová chyba mxy [mm]: 0.60

Obr. A.2: Protokol o vyrovnání sítě u mostu R-B z programu Groma v.8.0.

A.2 Protokoly z vyrovnání podrobných bodů

INFORMACE O STŘEDNÍCH CHYBÁCH:
 =====

Bod	my [mm]	mx [mm]	mye [mm]	mxe [mm]	mxy [mm]	Stoč. [g]
1	1.25	0.60	0.45	1.31	0.98	78.78
2	4.10	4.18	0.73	5.81	4.14	49.42
3	0.68	0.75	0.68	0.75	0.72	194.12
4	0.67	0.78	0.65	0.79	0.72	178.09
6	0.97	0.44	0.44	0.97	0.75	101.20
7	1.41	0.76	0.46	1.54	1.13	127.26
8	5.66	1.29	0.52	5.79	4.11	113.09
9	5.67	1.29	0.52	5.79	4.11	113.06
10	5.46	2.01	0.54	5.79	4.11	78.24
11	1.31	0.70	0.45	1.42	1.05	73.65
12	0.67	0.78	0.65	0.80	0.73	177.88
14	3.92	4.36	0.77	5.81	4.15	46.43
15	0.68	0.75	0.68	0.75	0.72	197.66
16	0.70	0.86	0.70	0.86	0.79	196.83
17	5.16	2.70	0.58	5.79	4.12	130.28
18	5.74	0.90	0.52	5.79	4.11	91.86
19	0.96	0.41	0.38	0.97	0.74	88.46
20	0.68	0.91	0.67	0.92	0.80	11.70
21	0.89	0.41	0.35	0.92	0.69	116.51
22	0.57	0.39	0.39	0.57	0.49	102.67
23	1.03	0.55	0.36	1.11	0.82	73.95
24	0.88	0.51	0.27	0.98	0.72	70.05
25	4.54	3.61	0.48	5.78	4.10	57.30
26	4.54	3.61	0.48	5.78	4.10	57.34
27	4.79	3.26	0.45	5.78	4.10	62.11
29	3.55	4.62	0.62	5.80	4.12	41.53
4001	Pevný bod					
4002	Pevný bod					
4003	Pevný bod					
4004	Pevný bod					

Střední souřadnicová chyba mxy [mm]: 2.77

Obr. A.3: Protokol o vyrovnání podrobných bodů u mostu A-D z programu Groma v.8.0.

INFORMACE O STŘEDNÍCH CHYBÁCH:

```

=====

```

Bod	my [mm]	mx [mm]	mye [mm]	mxe [mm]	mxy [mm]	Stoč. [g]
1	3.40	8.59	0.87	9.20	6.53	23.41
2	0.86	1.59	0.82	1.61	1.28	11.52
3	8.20	4.60	1.55	9.27	6.65	68.60
4	0.80	1.90	0.80	1.90	1.46	0.99
5	8.39	4.24	1.55	9.27	6.65	71.59
6	0.97	1.35	0.93	1.37	1.17	17.25
7	8.20	4.60	1.55	9.27	6.65	68.60
8	8.22	4.58	1.59	9.28	6.65	68.85
9	8.39	4.24	1.55	9.27	6.65	71.56
10	0.96	1.37	0.95	1.37	1.18	7.66
11	7.02	6.11	1.17	9.23	6.58	54.57
12	2.07	9.03	1.00	9.21	6.55	187.30
13	1.51	9.14	0.98	9.21	6.55	192.05
14	1.10	9.19	0.97	9.21	6.55	196.40
15	1.99	9.05	1.01	9.21	6.55	188.03
16	2.24	8.96	0.88	9.20	6.53	185.53
17	1.80	9.14	1.21	9.23	6.59	190.70
18	1.76	9.16	1.26	9.24	6.59	191.38
19	7.00	6.29	1.58	9.27	6.65	146.39
20	1.76	1.77	1.64	1.88	1.77	151.00
21	1.95	3.48	1.18	3.81	2.82	28.28
22	6.11	7.23	1.77	9.30	6.69	44.25
23	6.11	7.23	1.77	9.30	6.69	44.25
24	5.23	7.84	1.64	9.28	6.67	36.56
25	5.19	7.87	1.65	9.28	6.67	36.22
26	1.14	2.89	1.14	2.89	2.19	2.08
27	3.77	8.60	1.51	9.27	6.64	24.63
28	1.13	2.83	1.12	2.83	2.16	198.05
29	1.55	9.24	1.44	9.26	6.63	4.03
30	1.55	9.24	1.44	9.26	6.63	3.97
31	1.06	2.52	1.06	2.52	1.93	198.19
32	6.85	6.59	1.90	9.31	6.72	51.37
33	6.39	7.13	2.11	9.34	6.77	46.12
35	1.67	9.20	1.37	9.25	6.61	6.61
36	5.42	7.73	1.68	9.29	6.67	161.85
37	5.07	7.97	1.71	9.29	6.68	164.95
5001	Pevný bod					
5002	Pevný bod					
5003	Pevný bod					
5004	Pevný bod					

```

-----

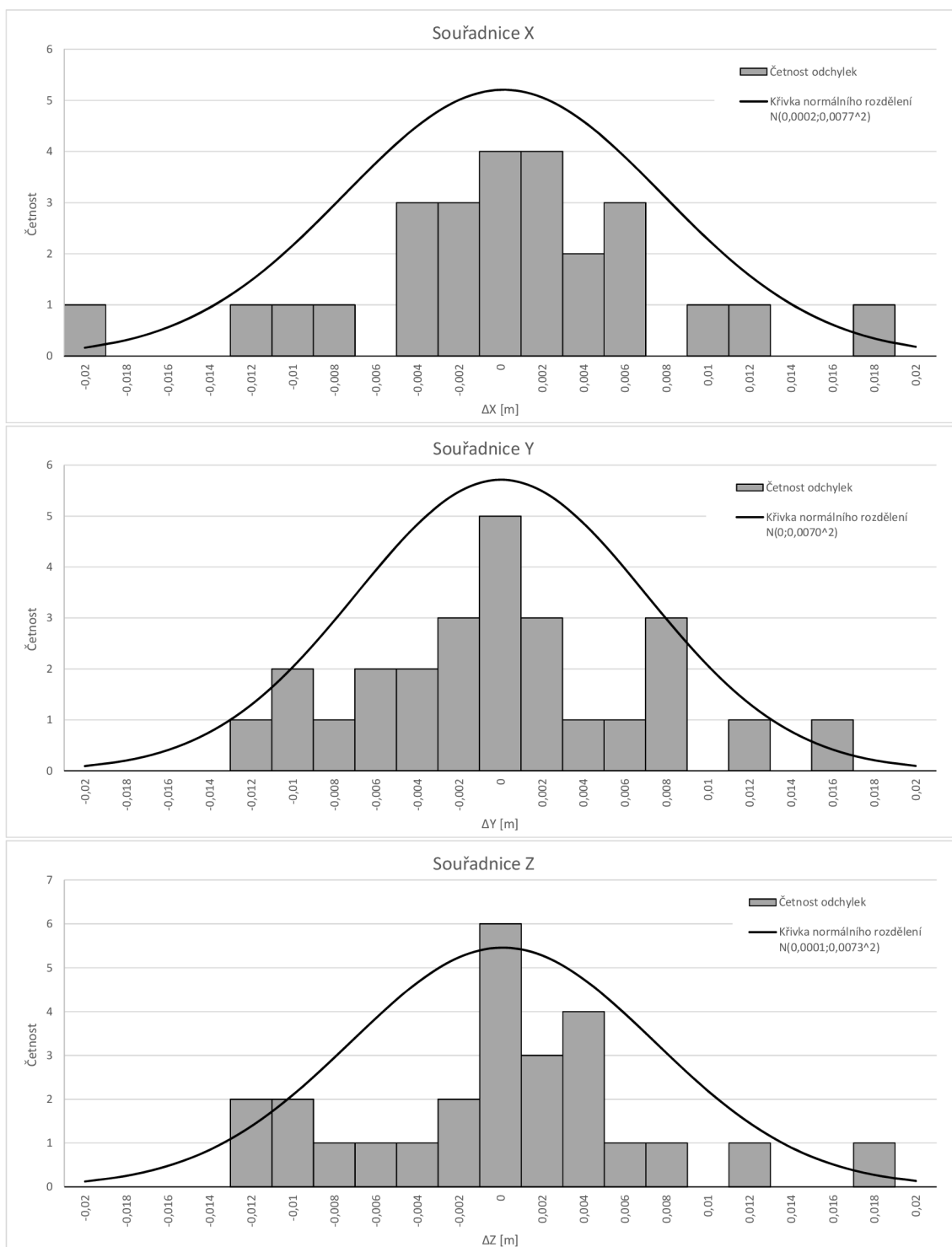
```

Střední souřadnicová chyba mxy

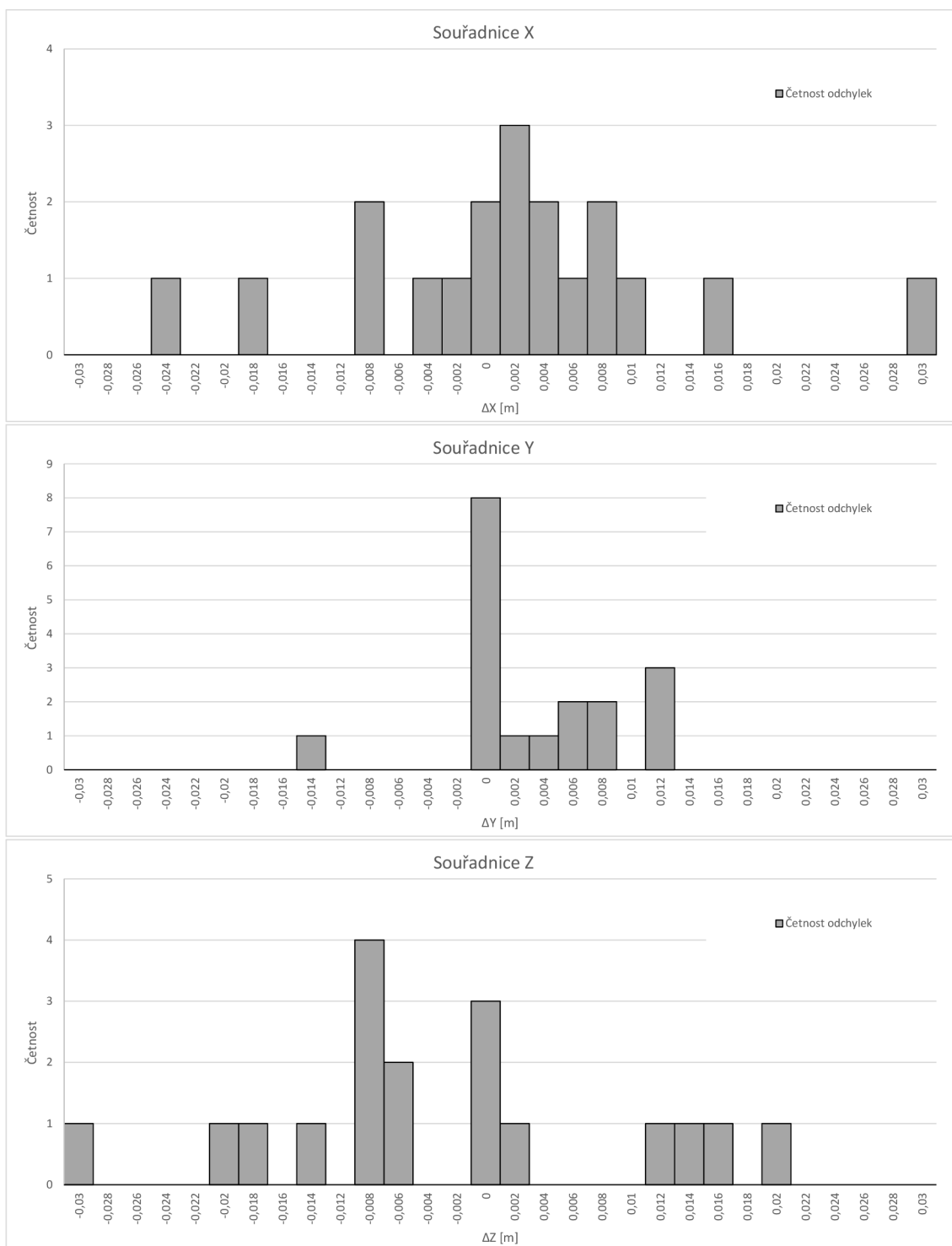
[mm]: 5.81

Obr. A.4: Protokol o vyrovnání podrobných bodů u mostu R-B z programu Groma v.8.0.

A.3 Testování přesnosti na mostu A-D

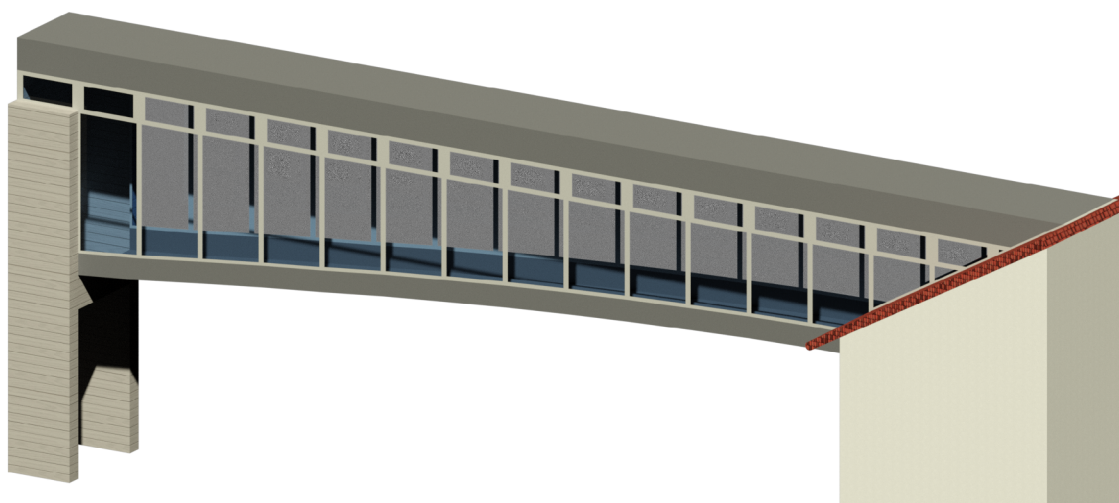
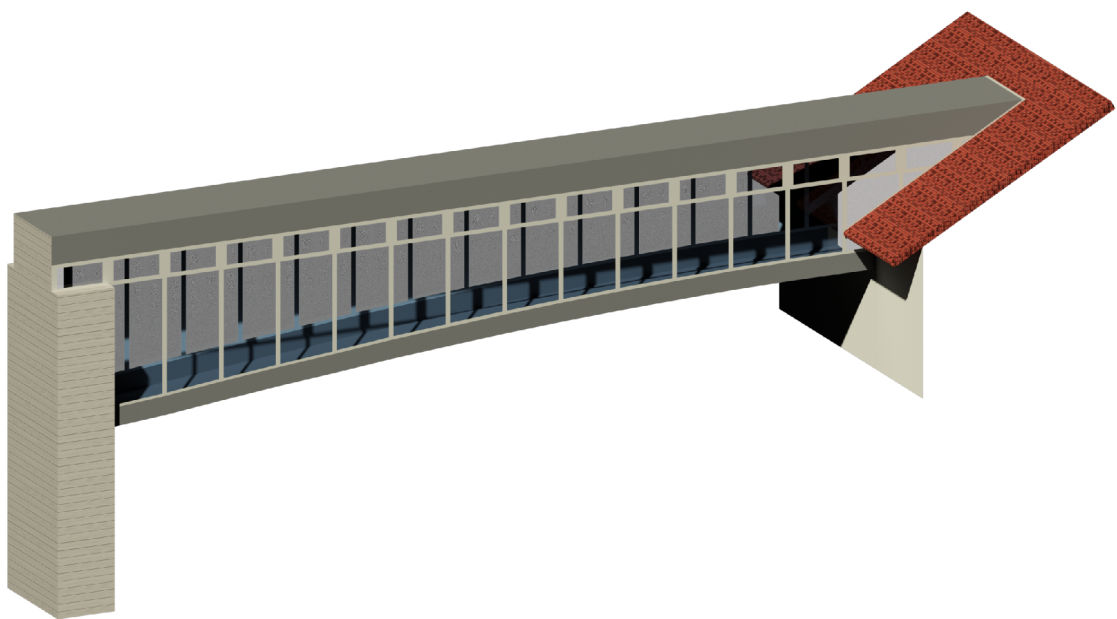


A.4 Testování přesnosti na mostu R-B

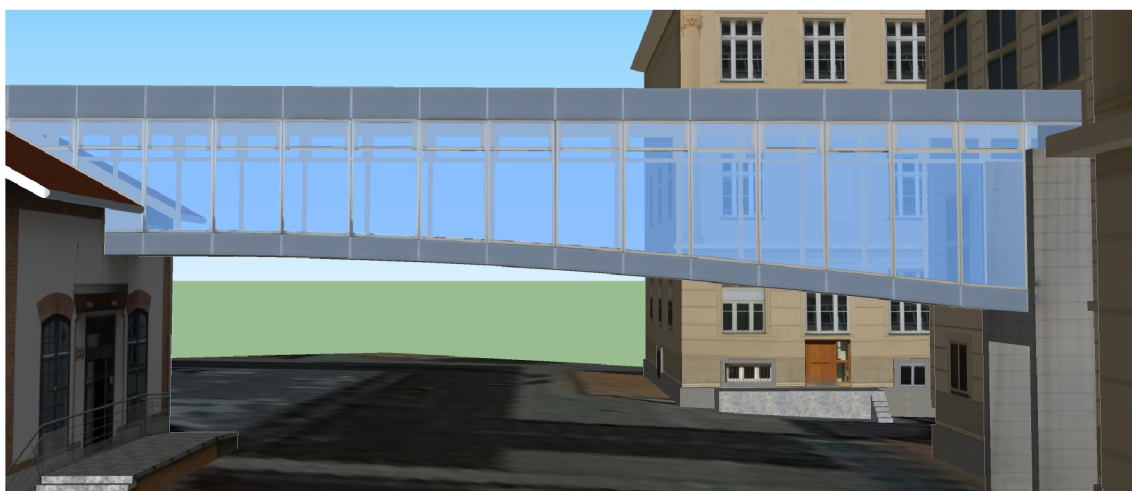
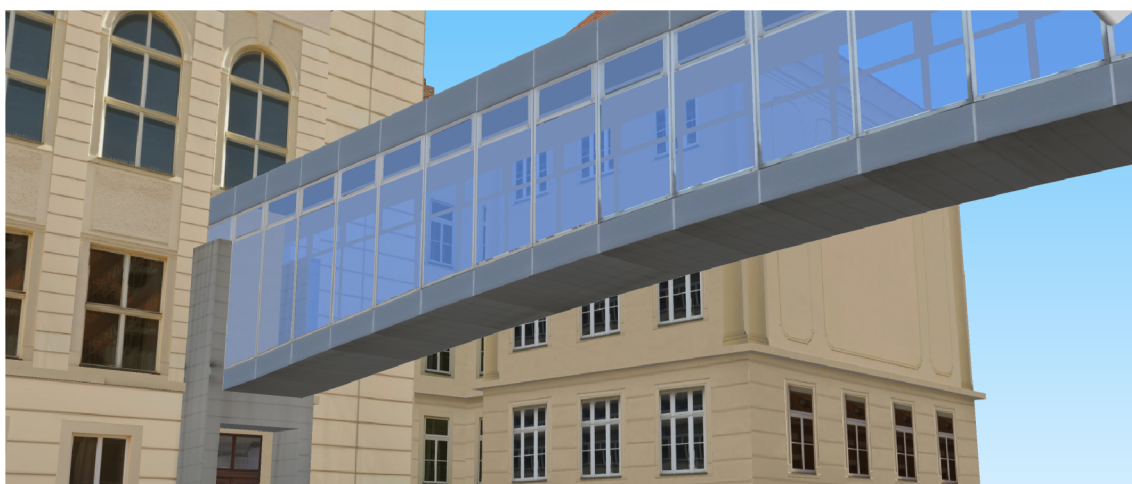
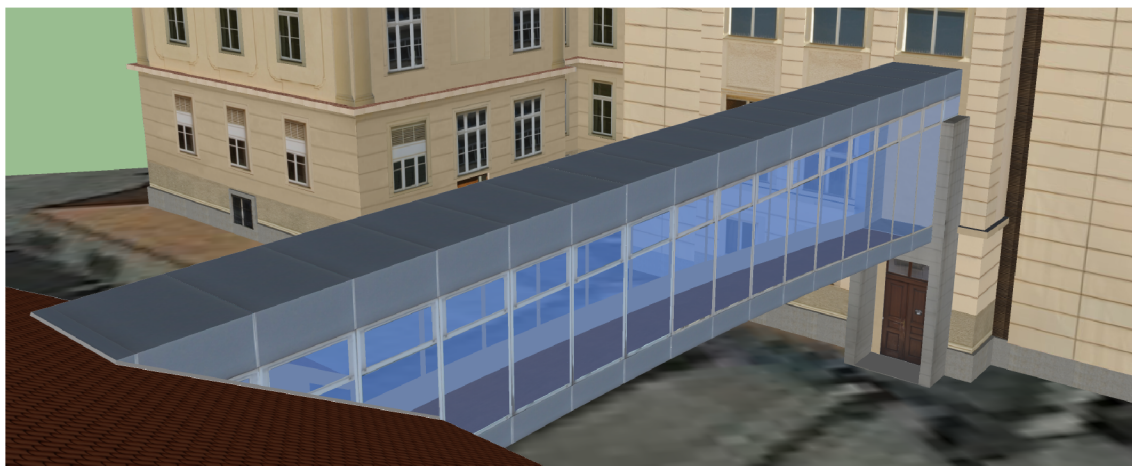


B GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDNÉHO MODELU MOSTU A-D

B.1 Model vytvořený v programu AutoCAD



B.2 Model vytvořený v programu SketchUp, který navazuje na dříve vytvořený model budovy A



C GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDNÉHO MODELU MOSTU R-B VYTVOŘENÝ V PRO- GRAMU REVIT

