



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

POROVNÁNÍ VÝPOČTU KUBATUR Z DAT RŮZNÝCH GEODETICKÝCH METOD

COMPARISON OF THE CALCULATION OF CUBATURES FROM THE DATA OF DIFFERENT GEODETIC METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Ulčák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav geodézie
Student: **Bc. Vojtěch Ulčík**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25
Studijní program: N0532A260001 Geodézie a kartografie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Porovnání výpočtu kubatur z dat různých geodetických metod

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podílejte se na geodetických činnostech na stavbě D1. Soustřeďte se na problematiku geodetických metod sběru dat pro výpočet kubatur. Porovnejte výsledky výpočtu kubatur z dat různých geodetických metod a software. Zhodnoťte dosažené výsledky a interpretujte je.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Porovnání výpočtu kubatur z dat různých geodetických metod

Seznam doporučené literatury a podklady:

BÖHM J., RADOUCH V., HAMPACHER M. – Teorie chyb a vyrovnávací počet, GKP Praha, 1990

KRCHO J. - Modelovanie georeliéfu a jeho geometrickej štruktúry pomocou DTM, polohová a numerická presnosť. Bratislava 2001. ISBN 80-85401-92-4

MICHALČÁK, O., VOSIKA, O., VESELÝ, M., NOVÁK, Z. – Inžinierska geodézia I, SNTL Praha 1985.

MICHALČÁK, O., VOSIKA, O., VESELÝ, M., NOVÁK, Z. – Inžinierska geodézia II, ALFA Bratislava 1990, ISBN 80-05-00678-0.

ŠVÁBENSKÝ O., VITULA A., BUREŠ J. - Inženýrská geodézie I, GE16 modul 03, Návod ke cvičením, studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia, VUT v Brně, Fakulta stavební.

ŠTRONER, M., HAMPACHER, M. - Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. České vysoké učení technické v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04900-6

ŠTRONER, M., POSPÍŠIL, J., KOSKA, B., KŘEMEN, T., URBAN, R., SMÍTKA, V., TŘASÁK, P - 3D skenovací systémy. Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha, 2013, ISBN 978-80-01-05371-3

Dokumentace software ATLAS DMT

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2024

L. S.

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá porovnáním výpočtu kubatur z dat zaměřených různými geodetickými metodami. Výpočet kubatur je řešen z vytvořených 3D modelů. K zaměření byly použity metody GNSS, statického laserového skenování, metoda SLAM a fotogrammetrická metoda. V práci jsou detailně popsány postupy měření a tvorby 3D modelů z jednotlivých metod. Práce popisuje postup výpočtu kubatur a následné vyhodnocení optimálního postupu a metody určení kubatur. Metody a 3D modely byly vzájemně srovnávány také na základě kritérií přesnosti a časové náročnosti a dalších kritérií.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výpočet kubatur, 3D modely, GNSS, Statické laserové skenování, SLAM skenování, Fotogrammetrie, Porovnání metod, Atlas DMT, Leica Cyclone 360, Leica Cyclone 3DR, Určení objemu, Přesnost,

ABSTRACT

This Master's Thesis investigates the comparison of volume calculations derived from data acquired using different geodetic surveying methods. The volume computations are based on 3D models generated from these datasets. The data were collected using GNSS measurements, static laser scanning, the SLAM method, and photogrammetry. The thesis provides a detailed description of the surveying procedures and the subsequent generation of 3D models for each method. Furthermore, it presents the methodology for calculating volumes and evaluates the most efficient approach and technique for determining earthwork quantities. The methods and corresponding 3D models are compared based on criteria such as accuracy, time efficiency, and other relevant performance indicators.

KEYWORDS

Volume calculation, 3D models, GNSS, Static laser scanning, SLAM scanning, Photogrammetry, Method comparison, Atlas DMT, Leica Cyclone 360, Leica Cyclone 3DR, Volume determination, Accuracy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ULČÍK, Vojtěch. *Porovnání výpočtu kubatur z dat různých geodetických metod*. Brno, 2025. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Porovnání výpočtu kubatur z dat různých geodetických metod* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29. 5. 2025

Bc. Vojtěch Ulčák
Autor

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům a celé své rodině za podporu a trpělivost během celého mého studia. Dále bych chtěl poděkovat firmě Geocentrum spol. s.r.o. za zprostředkování přístrojů a možnosti měřit tuto netradiční diplomovou práci. Jmenovitě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Varyšovi za zprostředkování komunikace mezi mnou a stavbou. Následně Ing. Milanu Večeřovi a celému oddělení GIS za pomoc při měření a za užitečné rady při zpracování laserového skenování. V poslední řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Jiřímu Burešovi, Ph.D., za trpělivost a ochotu při konzultacích.

Obsah

1	ÚVOD	11
2	METODY MĚŘENÍ, ZPRACOVÁNÍ A VYPOČTU KUBATUR	12
2.1	Metody měření a zpracování.....	12
2.1.1	GNSS	12
2.1.2	Laserové skenování.....	13
2.1.3	Fotogrammetrie.....	15
2.1.4	Tachymetrie	16
2.2	Metody výpočtu kubatur	17
3	LOKALIZACE STAVBY, POPIS STAVBY.....	19
3.1	D1, stavba 0136 Říkovice–Přerov	19
3.2	Zájmová lokalita	21
4	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A SOFTWARE	22
4.1	Použité přístroje a vybavení.....	22
4.1.1	Leica RTC360.....	22
4.1.2	Leica BLK2GO	23
4.1.3	Leica GS18T	23
4.1.4	Leica TS16.....	24
4.1.5	Leica CS20.....	24
4.1.6	DJI Phantom 4 RTK.....	25
4.1.7	Další pomůcky	25
4.2	Použité softwary	26

4.2.1	Leica Cyclone REGISTER 360	26
4.2.2	Leica Cyclone 3DR.....	27
4.2.3	Microstation V8i Select series	28
4.2.4	Groma	28
4.2.5	Atlas DMT	29
5	PŘÍPRAVNÉ PRÁCE	30
5.1	Rekognoskace	30
5.2	Budování měřické sítě.....	31
5.3	Testování skeneru	33
6	SBĚR DAT	34
6.1	Laserové skenování.....	35
6.1.1	Leica RTC 360.....	35
6.1.2	Leica BLK2GO.....	37
6.2	Měření metodou GNSS RTK	38
6.3	Fotogrammetrické snímkování	39
7	TVORBA 3D MODELŮ Z NAMĚŘENÝCH DAT	41
7.1	Zpracování mračen bodů z laserového skenování.....	41
7.1.1	Statické laserové skenování	41
7.1.2	Skenování pomocí SLAM skeneru	48
7.2	Zpracování mračen bodů z.....	49
	fotogrammetrického snímkování.....	49
7.3	Zpracování dat metody GNSS RTK.....	50

7.4	Tvorba 3D modelů v programu ATLAS DMT	51
7.4.1	Tvorba modelů z mračen bodů.....	51
7.4.2	Tvorba modelů z vektorové kresby.....	52
8	PRÁCE S MODELY A VÝPOČET KUBATUR	53
8.1	Oddělení odlehlých hodnot.....	53
8.2	Výškové porovnání modelů	54
8.3	Výpočty kubatur	56
9	VYHODNOCENÍ.....	57
9.1	Prezentace výsledků	57
9.2	Hodnocení časové náročnosti	60
9.3	Hodnocení efektivnosti.....	61
10	ZÁVĚR	62
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	63
12	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	65
13	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	67

1 ÚVOD

Předmětem této diplomové práce je posouzení geodetických metod skenování statickým skenerem, skenování SLAM skenerem, technologii GNSS a fotogrammetrické metody. Pomocí těchto metod byly zaměřeny kubatury. Následovala tvorba 3D modelů a výpočty samotných kubatur. Cílem práce je zjistit, která metoda je nejvhodnější pro měření kubatur, a následně posoudit jednotlivé metody z různých hledisek a určit jejich výhody a nevýhody. K tomu byly využity softwary GROMA, Atlas DMT, MicroStation V8i, Leica Cyclone 3DR a Leica Cyclone REGISTER 360.

Sledovaný objekt se nachází na nově budovaném úseku dálnice D1. Konkrétně se jedná o část mezi mosty 208 a 209 na úseku dálnice D1 0136 Říkovice – Přerov. Úsek je aktuálně ve výstavbě, a tudíž zde mohlo být prováděno měření kubatur. Výstavbu úseku realizuje sdružení firem Strabag, Doprastav a IDS Olomouc.

V práci jsou dále popsány postupy a problémy, které se vyskytly při tvorbě 3D modelů jednotlivými metodami.

2 METODY MĚŘENÍ, ZPRACOVÁNÍ A VÝPOČTU KUBATUR

2.1 METODY MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ

2.1.1 GNSS

GNSS (Globální navigační satelitní systémy) je technologie, která využívá satelitní síť pro získání přesné polohy na Zemi. Lze použít například satelitní systémy GPS, GLONASS, Galileo nebo BeiDou. Nejčastěji se však využívá systém GPS, který je obvykle používán při měření liniových staveb a zemních prací. Převážně je využíván režim RTK (Real Time Kinematic). Tento režim umožňuje získat přesnější údaje ze satelitů pomocí korekcí z permanentních referenčních stanic. V Česku se například používá síť CZEPOS. Tato metoda dosahuje přesnosti v poloze až 2 cm a ve výšce přibližně 5 cm. [1,2]

Při měření kubatur pomocí technologie GNSS se používají zpravidla dva způsoby, z nichž první spočívá v měření pomocí čtvercové sítě. Znamená to, že se měří v pravidelné čtvercové síti s předem určenými rozměry, s ohledem na požadovanou přesnost – zpravidla po 20 metrech. Síť je dále zhuštěna v obloucích a v lomových bodech objektu, aby bylo možné dosáhnout co nejlepšího výsledku v porovnání s realitou. Druhý způsob měření je pomocí řezů, kdy jsou zaměřeny body v řezech objektu a z těchto řezů se následně vytvoří model. [2,3]

Měřené hodnoty se dále importují do softwaru pro tvorbu kresby, například MicroStation V8i Select Series. V softwaru se vytvoří kresba s body a hranami. Po dostatečně přesném zakreslení všech hran následuje vytvoření 3D modelů terénu, které lze generovat například v programu Atlas DMT. Je možné vytvořit různé typy 3D modelů, jako například rastrový, výškový nebo Mesh model. Nejčastěji se však pro výpočty kubatur používá model TINový. Jedná se o trojúhelníkový model, přičemž každý vrchol trojúhelníku je bod kresby. Tento typ modelu je velmi vhodný pro zobrazení členitosti terénu při nízkém počtu bodů. Nejčastěji je TINový model využíván k výpočtu kubatur na dálnicích nebo cestách. [2,8]

2.1.2 Laserové skenování

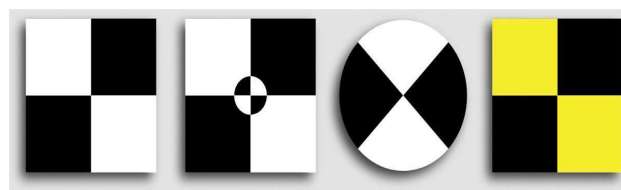
Laserové skenování je moderní geodetická metoda pro sběr dat. Přístroj používá laserový paprsek, který je pomocí otočného zrcadla rozmetán do všech směrů. Vše funguje na principu měření délek elektronickým dálkoměrem. Paprsek je vyslán z přístroje, odrazí se od předmětu a následně putuje zpět do přístroje, kde je na základě rozdílu času, rychlosti světla a dalších veličin možné spočítat vzdálenost. Přístroj je tímto způsobem schopen změřit miliony bodů během krátkého časového úseku. Vzhledem k vysoké hustotě bodů je tato metoda vhodná zejména pro tvorbu modelů, ať už budov nebo 3D modelů terénu. Výstupem skeneru jsou mračna bodů. [4,5]

Skenování se dělí na statické skenování, kdy přístroj stojí pevně na stativu a nehýbe se, a na SLAM skenování, kdy je přístroj v pohybu a kombinuje skenování s určováním polohy pomocí GNSS, při kterém se nepřetržitě měří jeho poloha. [4,5]

U statického skeneru je třeba určit polohu tzv. vlíčovacích bodů, aby bylo možné při zpracování zasadit mračno bodů do příslušného geodetického souřadnicového systému. Vlícovací body mohou být značky na zemi nebo speciální terče, které lze umístit například na stativ. Přesnost mračna bodů závisí na přesnosti zaměření vlíčovacích bodů a také na přesnosti samotného skeneru, která je dána výrobcem. [4,5]



Obrázek 2.1 - Ukázka vlíčovacího bodu [6]



Obrázek 2.2 - Ukázka signalizačních štítků [6]

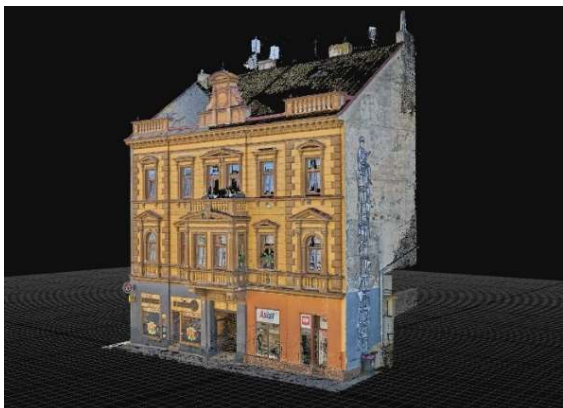
Po naskenování objektů v terénu je třeba mračno bodů vyexportovat a následně zpracovat například v programu Leica Cyclone REGISTER 360. Nevýhodou těchto mračen bodů je jejich velikost, která může dosahovat až stovek gigabajtů. Mračno je

potřeba nejprve spojit s dalšími mračny, pokud jich bylo skenováno více než jedno. Spojení mračen může probíhat buď přes vlíčovací body, anebo pomocí modulu Cloud-to-Cloud, kdy automatizovaný software vyhledává podobnosti v mračcích a následně je propojuje. Zde může nastat problém, pokud software vyhodnotí určité místo na jednom mračnu jako shodné s jiným místem, které je pouze podobné – v takovém případě se mračna nespojí správně. [7]

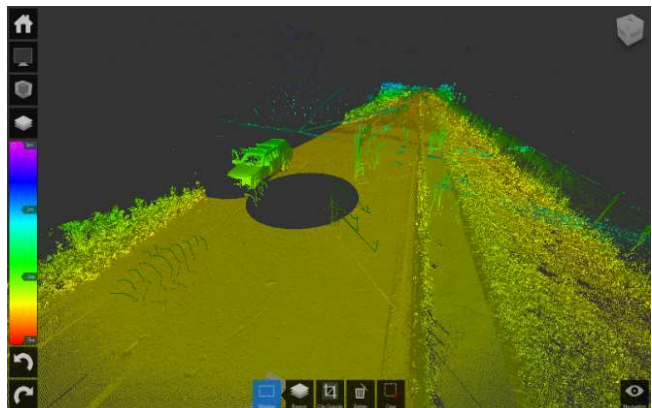
Jakmile jsou mračna spojena, je třeba je georeferencovat, tedy zasadit do souřadnicového systému. Georeferencování probíhá na základě vlíčovacích bodů, které byly naskenovány a u nichž jsou známy souřadnice. [7]

Po spojení a georeferencování mračen se musí data vyčistit od šumu. Laserový skener zaznamená tisíce bodů za minutu a může zároveň nasnímat i pohybující se objekty, jako jsou stromy, keře nebo vozidla. Šum může také vzniknout špatným odrazem paprsku, jako například od vodní hladiny. Tento šum je následně nutné odstranit, aby bylo možné získat korektní mračna bodů. K tomu se využívá software, například Leica Cyclone 3DR, který obsahuje nástroje pro automatizované odstranění šumu. Následně se mračno ořízne na požadovanou plochu tak, aby v něm nezůstala místa, která sice byla naskenována, ale nepatří do sledovaného objektu. [7]

Finálním procesem zpracování je tvorba 3D modelu terénu. Často se využívá generace modelu typu Mesh, ovšem v případě výpočtu kubatur je vhodnější TINový model terénu. TINový model lépe vykresluje členitější tvary z hlediska geometrie, zatímco model typu Mesh je více orientován na vizualizaci a jeho tvorba je výrazně náročnější na výpočetní výkon. [7,8]



Obrázek 2.3 - Ukázka výsledného modelu [9]

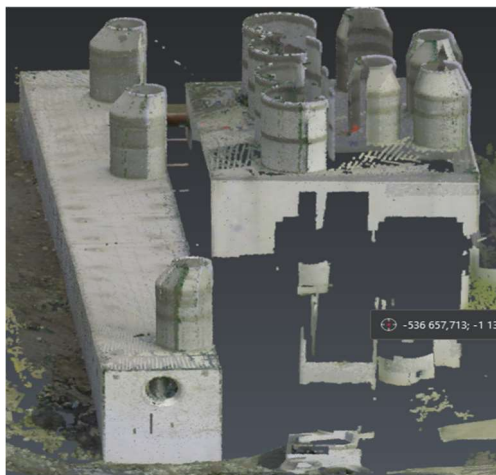


Obrázek 2.4 - Mesh model [10]

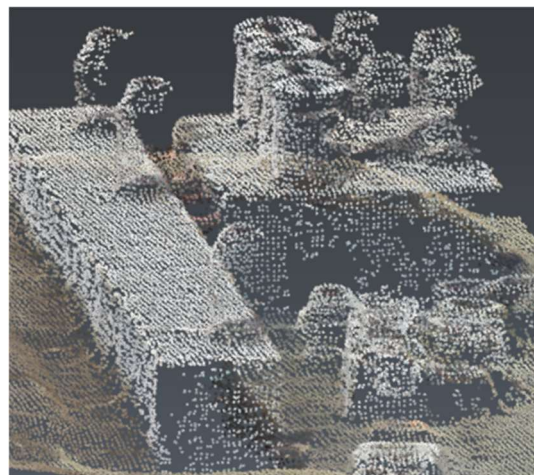
2.1.3 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je jednou z moderních geodetických metod. Metoda spočívá v rekonstrukci 3D reality na základě 2D fotografií. Fotografie je zachycením reality na 2D snímku pomocí optiky. Tento proces je také možné obrátit a tím zrekonstruovat 3D model pomocí parametrů kamery neboli vnitřních a vnějších orientačních parametrů. Aby však bylo možné realitu zrekonstruovat, je zapotřebí větší množství snímků s dostatečným překryvem, aby mohl být objekt správně vytvořen. [11]

Pomocí fotogrammetrie lze vytvořit 3D model terénu. Je ovšem nutné, stejně jako u laserového skenování, zaměřit takzvané vlčovací body, díky nimž jsme schopni model zasadit do souřadnicového systému. Hlavní rozdíly mezi laserovým skenováním a fotogrammetrií spočívají v tom, že fotogrammetrie nabízí lepší barevné textury, zatímco laserové skenování poskytuje přesnější geometrické informace. Například hrany z laserového skenování jsou ostré, kdežto hrany z fotogrammetrie bývají spíše oblé – to je důsledkem skládání jednotlivých snímků. [11]



Obrázek 2.5 - Model z laserového skenování



Obrázek 2.6 - Model z fotogrammetrické metody

Snímky je potřeba zpracovat ve specializovaném softwaru, jako například Agisoft Metashape, a výstupem tohoto zpracování je jednotné mračno bodů. Dále se postupuje stejně jako u skenování – je potřebné provést georeferencování a následně odstranit šum, tedy ořezat mračno bodů tak, aby se v něm nacházel pouze požadovaný objekt, a následně vytvořit model vhodný pro výpočet kubatur. V tomto případě je opět nejvhodnější TINový model. [8,11]

2.1.4 Tachymetrie

Tachymetrie je geodetická metoda, která určuje prostorovou polohu bodů v terénu pomocí měření úhlů a délek zároveň. Přístroj užívaný k měření tachymetrie se nazývá tachymetr a je to přístroj, který kombinuje úhlové měření a délkové měření neboli teodolit a dálkoměr. Tachymetrům se dnes také říká totální stanice. [1]

Zaměření kubatur probíhá za pomoci totální stanice a odrazného hranolu, kdy je potřeba zaměřit celý objekt. U tohoto typu měření je zapotřebí mít stabilizovanou měřickou síť, aby bylo možné dosáhnout co největší přesnosti. Nevýhodou této metody je, že nám nestačí pouze jedno postavení a zorientování přístroje. Při větších objektech je důležité využít více stanovisek, aby byla zachována výšková přesnost. [1]

Prostorová poloha bodů se dále získá za pomoci měření, výpočtem z vodorovných a vertikálních úhlů a šikmé délky. Následuje spojení bodů do požadovaného tvaru za pomoci různých softwarů, například MicroStation V8i Select Series. Tachymetrická metoda se zpracovává podobně jako GNSS, kdy je třeba vykreslit za pomoci měřených bodů hrany a následně vytvořit 3D model terénu – opět je v tomto případě nejvhodnější model TINový. [1,8]

V této diplomové práci nebyla tachymetrická metoda využita k zaměření kubatur, protože hlavním cílem bylo porovnat skenování, fotogrammetrii a GNSS. Metoda byla ovšem použita jako pomocné měření, například pro zaměření sítě a následné zaměrování vlíčovacích bodů, jak pro laserové skenování, tak pro fotogrammetrii.

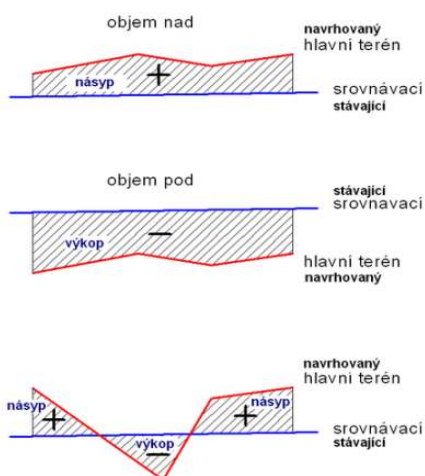


Obrázek 2.7 - Totální stanice Leica TS16 [12]

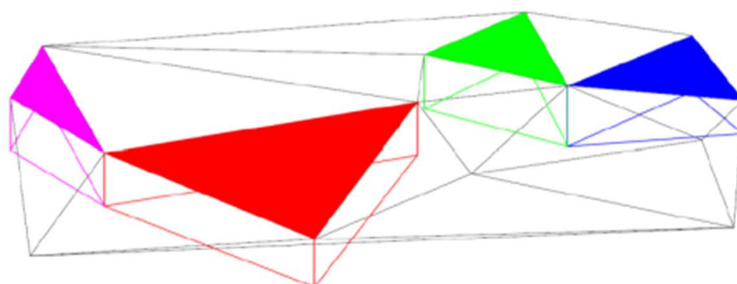
2.2 METODY VÝPOČTU KUBATUR

Pojem kubatura označuje objem tělesa v prostoru. Jde o velmi důležitou součást geodézie, zemních prací nebo například těžební činnosti. Kubatury lze vypočítat několika různými způsoby. Vždy jde o matematické operace výpočtu objemu těles.

Nejčastější metodou pro výpočet kubatur je metoda výpočtu objemu TINového 3D modelu povrchu země. TINový model je složen z nepravidelné trojúhelníkové sítě. Každý z vrcholů trojúhelníku je bod o známých souřadnicích v prostoru. Výpočet probíhá na základě součtu objemů jednotlivých hranolů, jejichž podstavami jsou právě zmíněné trojúhelníky. Pro výpočet objemů se obvykle používají dvě trojúhelníkové sítě. Jedna představuje původní terén a druhá představuje aktuální stav. Software následně provede porovnání jednotlivých stavů mezi těmito modely a vypočítá rozdílový objem. Alternativně je možné stanovit referenční rovinu, ke které je model vztažen. Každý trojúhelníkový hranol je buď přičten, nebo odečten v závislosti na tom, zda se nachází nad nebo pod srovnávací rovinou. [13,15]



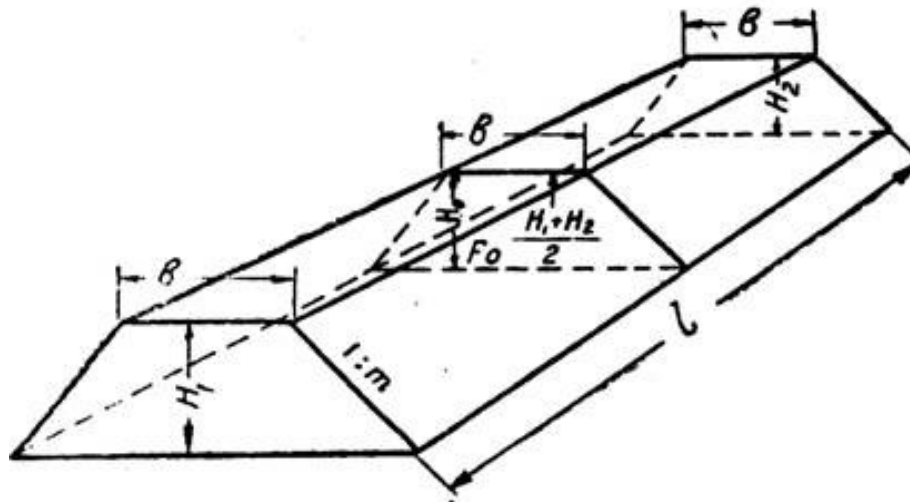
Obrázek 2.8 - Výpočet kubatur mezi rovinou a objektem [14]



Obrázek 2.9 - Princip výpočtu objemu z TINového modelu [16]

Další možnou metodou je metoda příčných profilů. Tento typ výpočtu spočívá v pravidelném rozříznutí 3D modelu pomocí vertikálních rovin kolmo k ose objektu. U každého takového objektu lze spočítat objem nejprve výpočtem obsahu jednotlivých řezů a následným vynásobením vzdáleností mezi řezy. Tato metoda výpočtu je jednoduchá, tudíž nutně nevyžaduje žádný specializovaný software. Jde o jednoduché matematické

operace. Je vhodná pro liniové stavby, jako jsou cesty, dálnice nebo železnice, ovšem záleží na hustotě řezů. Čím více jsou řezy od sebe vzdálené, tím větší je potenciální možnost chybovosti výpočtu. [13,15]



Obrázek 2.10 - Výpočet objemu pomocí metody příčných profilů [16]

Další metodou výpočtu kubatur je metoda rastrů. To znamená rozdělení plochy na pravidelnou síť buněk, přičemž každá buňka má hodnotu výšky. Výsledný objem je vypočítán jako součet výškových rozdílů jednotlivých buněk vynásobený jejich plochou. Tato metoda je vhodná především pro povrchy, kde již máme datovou strukturu v rastrové formě, například digitální modely reliéfu. Metoda je velmi rychlá a efektivní, ale bohužel méně přesná v detailních strukturách, obzvláště pokud je rastr příliš hrubý. [13,15]

Nejvhodnější metodou pro naše účely je metoda TINová, jelikož se nejvíce hodí na členitý terén. V této diplomové práci bude pro účely výzkumu použita i metoda příčných řezů, avšak ne v takové míře jako metoda TINových modelů. [13,15]

3 LOKALIZACE STAVBY, POPIS STAVBY

3.1 D1, STAVBA 0136 ŘÍKOVICE–PŘEROV

Dálnice D1 je nejvýznamnější dálnicí v České republice. Spojuje hlavní město Prahu s městy Brno a Ostrava, což jsou velká průmyslová centra. Z toho důvodu má dálnice velký význam pro ekonomiku České republiky a zároveň je nejvytíženější dálnicí u nás. Plány na výstavbu D1 vznikly už ve 30. letech minulého století. Do konce 80. let bylo dokončeno spojení mezi Prahou a Brnem a na přelomu tisíciletí bylo dokončeno propojení s Ostravou. [18]

Úsek 0136 Říkovice – Přerov je poslední nedostavěný úsek dálnice D1. Jeho výstavba byla původně plánována na 10. léta tohoto století, avšak z vícero důvodů byla stavba odložena. Mezi hlavní důvody patřily složité výkupy pozemků, ekologické námitky a stavební povolení, která se řešila až do roku 2022. Námitky ekologů se týkaly především blízkých chráněných přírodních lokalit. [18]

Výstavba úseku započala v prosinci roku 2022 a její plánované dokončení je březen 2026. Úsek se nachází na západní straně Přerova a jeho dokončení je zásadní jak pro dopravu celé České republiky, tak pro dopravu samotného Přerova, který je důsledkem aktuální situace přehlcen. Na tento úsek je plánován rozpočet okolo 12 miliard, z čehož 6,6 miliardy pochází z fondů Evropské unie. [18]



Obrázek 3.1 - Dálnice D1 0136 Říkovice – Přerov [17]

Stavba se rozkládá na území záplavových oblastí, a z toho důvodu jsou plánovány zvýšené nivelety a protipovodňová opatření, což výrazně komplikuje plánování stavby. Dále se stavba nachází v nížině, kde převládají sedimentární horniny, jako písky, štěrky a jílovité sedimenty, důsledkem čehož bylo nutné zvýšit nároky na mosty a jejich upevnění, například pomocí pilotů. Jílové podloží představuje také větší hrozbu při intenzivních srážkách. Jak už bylo zmíněno výše, stavba prochází důležitými ekologickými oblastmi. Byla přijata a zařazena do plánů opatření na ochranu přírody. [18]

Úsek protíná několik důležitých dopravních tratí. Na několika místech prochází přes významné železniční tratě. Nejdůležitější z nich jsou tratě na trase Hulín – Přerov a Přerov – Olomouc, kde je výstavba komplikovaná frekventovaným provozem osobních a nákladních vlaků. Dále stavba prochází skrz významné silnice, například I/55, která spojuje Olomouc s Uherským Hradištěm a vede právě přes Přerov. [18]

Zajímavou stavbou v tomto úseku je bezesporu most 209, který má měřit kolem 900 metrů a prochází nad řekou Bečvou, železniční tratí na Olomouc a nad areálem firmy Precheza, což jsou přerovské chemické závody, a dále přes obec Dluhonice. Most je budován pomocí ocelové konstrukce složené z dílců speciálně vyrobených pro tento účel. Na ocelovou konstrukci bude přistavěna betonová mostní část a následně samotná komunikace. Další důležitou částí stavby je velká mimoúrovňová křižovatka, jež má spojovat dvě dálnice – D1 a D55, která povede od Olomouce do Přerova. Tato mimoúrovňová křižovatka bude nejen křížit obě zmíněné dálnice, ale také pomocí soustavy sjezdů a nájezdů připomínajících kruhový objezd nad dálnicemi umožní přejetí do všech směrů. [18]

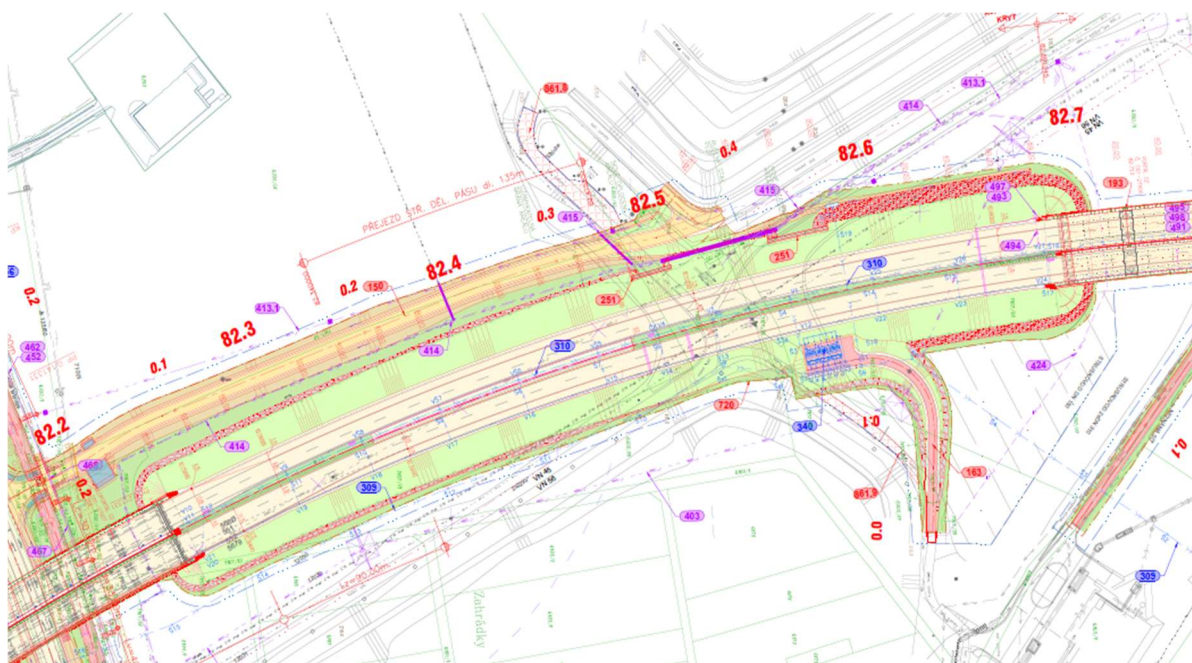


Obrázek 3.2 - Mimoúrovňová křižovatka spojující D1 a D55 [18]

3.2 ZÁJMOVÁ LOKALITA

Lokalita, na které probíhaly veškeré měřičské práce za účelem stanovení kubatur, což je předmětem této diplomové práce, je část plánované dálnice D1, úsek 0136 Říkovice – Přerov. Lokalitu vymezují dvě mostní konstrukce, z nichž jedna je most 209, který, jak již bylo výše zmíněno, bude přes 900 metrů dlouhý a povede nad dvěma železničními tratěmi, přerovskou chemickou továrnou Precheza, obcí Dluhonice, řekou Bečvou a nad několika silničními komunikacemi. Druhá mostní konstrukce je most přes silnici vedoucí z Přerova do obce Troubky a do města Tovačov. [18]

Sledovaný úsek je přibližně 470 metrů dlouhý, široký 70 metrů a bude sahat do výšky 8 metrů. Konkrétně se nachází ve staničení 82,3 – 82,8 km. Souběžně se sledovaným objektem vede užitková cesta, která směřuje do chatarské oblasti u Přerova. Přes objekt vedou dráty vysokého napětí, které značně komplikovaly skenování a fotografování objektu v rámci metody fotogrammetrie. [18]



Obrázek 3.3 - Projektová dokumentace sledovaného úseku

4 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A SOFTWARE

4.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A VYBAVENÍ

4.1.1 Leica RTC360

Pro potřeby statického laserového skenování byl použit přístroj Leica RTC360. Jde o velmi výkonný 3D laserový skener, který je navržen pro rychlé, přesné a efektivní skenování. Přístroj má velmi vysokou rychlost skenování, která může dosáhnout až 2 milionů bodů za sekundu. Skener má dosah až 130 metrů, což zaručuje možnost měření velkých objektů, jako například hal, skladů nebo zemních těles. Skener je dále vybaven funkcí na odstranění pohybujících se objektů, avšak tento proces zdvojnásobuje délku skenování. Dále je vybaven objektivy pro zachycení panoramatických snímků a následné obarvení mračen bodů. Taktéž disponuje vestavěnou IMU (inerciální měřicí jednotkou), která sleduje pozici skeneru vůči již naskenovaným stanoviskům a tím zrychluje proces zpracování. Přístroj je taktéž vybaven třemi kamerami, které jsou schopné dosáhnout rozlišení až 432 MPx. Přesnost přístroje závisí na zvoleném typu skenování, které jsou 1,9 mm na 10 m; 2,9 mm na 20 m a 5,3 mm na 40 m. Výsledná přesnost měření ovšem závisí na přesnosti zaměření vlčivovacích bodů. [12]



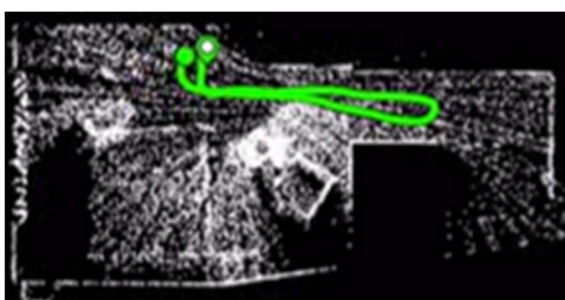
Obrázek 4.1 - Leica RTC 360 [12]

4.1.2 Leica BLK2GO

Pro skenování typu SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) byl použit skener Leica BLK2GO. Jedná se o ruční skener, který využívá jednotku LiDAR pro skenování a jednotku IMU, která v reálném čase sleduje pohyb zařízení bez nutnosti použití technologie GNSS. Poloha skeneru i naskenované mračno se rovnou přenáší do příslušného zařízení, například mobilu nebo tabletu. Maximální vzdálenost skenovaných bodů je 25 m a rozlišení přibližně 10 mm na vzdálenost 1,5 m. Přístroj je vhodný pro skenování interiérů, ovšem v tomto případě byla testována jeho funkčnost v otevřeném prostoru. [12]



Obrázek 4.2 - Leica BLK2GO [12]



Obrázek 4.3 - Ukázka dat přenesených do mobilního zařízení ze skenování SLAM skenerem

4.1.3 Leica GS18T

Pro potřeby měření GNSS byl použit přístroj Leica GS18T. Jedná se o přijímač signálu GPS. Tento přístroj je vybaven moderním systémem, který umožňuje měřit i body, které se nacházejí mimo svislou osu antény. Je tedy schopen měřit s takzvaným náklonem. To je velmi užitečné při měření bodů, které jinak měřit nelze, neboť se nachází moc blízko budov, stromů, a jiných vysokých objektů. Přístroj dosahuje při RTK měření horizontální přesnosti 8 mm a vertikální přesnosti 15 mm. Při maximálním náklonu 30° je schopen dosáhnout přesnosti 20 mm v horizontálním měření. [12]



Obrázek 4.4 - Leica GS18T a Leica CS20 [12]

4.1.4 Leica TS16

Pro pomocná měření v této diplomové práci byl použit přístroj Leica TS16 2''. Jedná se o plně automatizovanou totální stanicí, která se vyznačuje vysokou spolehlivostí a přesností. Totální stanice je vybavena automatickým zaměřovacím systémem ATRplus, který je schopen sledovat hranol s vysokou přesností a v kombinaci s technologií PowerSearch umožňuje rychlé nalezení při ztrátě hranolu. Přístroj umožňuje měření v robotickém režimu, takzvaném OneMan módu. Přístroj má absolutní přesnost v kontinuálním měření vodorovných a horizontálních úhlů 2 vteřiny, což odpovídá 0,6 mgon. Délková přesnost přístroje je 1 mm + 1,5 ppm. Přesnost měření v bez hranolovém módu je 2 mm + 2 ppm. [12]

4.1.5 Leica CS20

Leica CS20 je přístroj používaný v kombinaci s totální stanicí nebo přijímačem GNSS. Jedná se o terénní kontrolér, který je vybaven funkcí Leica Captivate a umožňuje uživateli intuitivní práci s prostorovými daty přímo v terénu. V přístroji je podporováno připojení pomocí Bluetooth, Wi-Fi, USB a GSM/LTE. Pro snadné a přehledné ovládání je přístroj vybaven velkým 5palcovým displejem s rozlišením 800 × 480 pixelů. Displej nabízí dobrou viditelnost i na slunci, což je velmi důležité při práci v terénu. Při měření v rámci této diplomové práce byl tento přístroj použit právě jako kontrolér k totální stanicí i k přijímači GNSS. [12]



Obrázek 4.5 - Leica TS16 a Leica CS20 [12]

4.1.6 DJI Phantom 4 RTK

DJI Phantom 4 RTK je typ UAS (bezpilotní letecký systém), který je určen především pro vysoce přesné mapování a fotogrammetrii. Dron je vybaven modulem RTK, který umožňuje až centimetrovou přesnost v reálném čase. Díky tomu není nutné při fotogrammetrii nebo mapování mít velký počet vlíčovacích bodů, jelikož poloha dronu je zaznamenávána přímo pomocí tohoto modulu. Dron je dále vybaven integrovanou kamerou s 1palcovým CMOS senzorem o rozlišení 20 Mpix. Kamera je navíc vybavena mechanickou uzávěrkou, díky níž jsme schopni eliminovat nežádoucí jevy. Snímky jsou pořizovány v intervalu 0,7 sekundy. Rychlost dronu dosahuje až 58 km za hodinu. Maximální doba trvání letu je 30 minut. [19]

Minimální výška letu pro snímkování fotogrammetrickou metodou s GSD 2 cm/px závisí na velikosti pixelu. Obvykle se však minimální výška udává v rozmezí 80 až 90 metrů nad povrchem. Doporučený překryv snímkování je 80% příčný překryt a 70% podélný překryt.



Obrázek 4.6 - DJI Phantom 4RTK [19]

4.1.7 Další pomůcky

Dalšími pomůckami jsou běžně používané geodetické nástroje – odrazné hranoly, stativy a pásmo, které slouží jako pomůcky při všech geodetických měřeních. V případě laserového skenování musely být navíc použity signalizační terče, které slouží jako pomůcka při tvorbě vlíčovacích bodů.

4.2 POUŽITÉ SOFTWARE

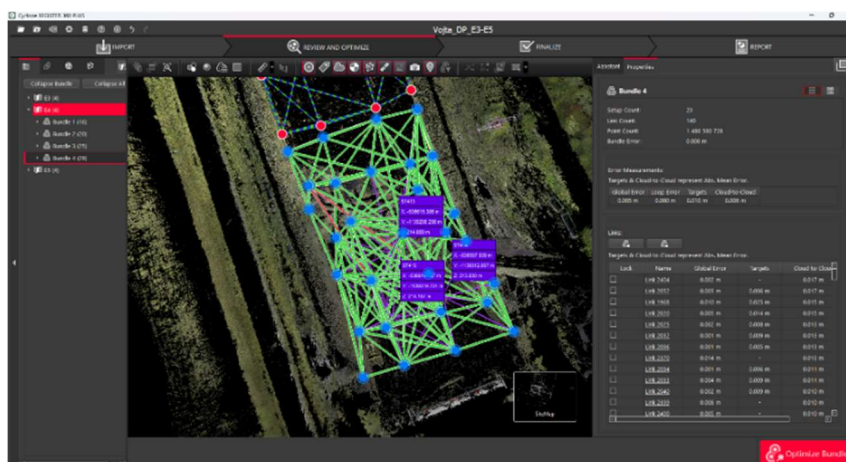
4.2.1 Leica Cyclone REGISTER 360

Leica Cyclone REGISTER 360 je specializovaný software pro práci s mračky bodů pořízenými laserovým skenováním. Program je součástí sady Leica Cyclone, která slouží ke specializovanému zpracování mračen bodů. Software je schopen pracovat s daty z různých typů skenerů. Výhodou softwaru je vysoký stupeň automatizace. [7]

Jednou z hlavních funkcí programu je registrace neboli spojování mračen bodů. Program umožňuje registrovat mračka bodů na základě vlčivocích bodů, což jsou naskenované signalizační terče, u nichž známe prostorové souřadnice. Další možností registrace je princip „cloud to cloud“. Software automaticky vyhledává shodná místa na dvou mračkách na základě algoritmů. Někdy je nutné určit přibližnou pozici mračen, aby software mohl správně vyhodnotit společné znaky. Software při registraci využívá i doplňkové údaje ze skeneru, například IMU, GNSS, snímky a časová data. [7]

Další důležitou funkcí softwaru je proces georeferencování mračen bodů. Pomocí přesných algoritmů systém dokáže vyhodnotit vlčivocí body a následně natransformovat mračno do jejich prostorových pozic. Souřadnice vlčivocích bodů lze importovat z textového nebo CSV souboru.

Program nabízí mnoho dalších funkcí, například ořezání mračka bodů, ovšem nejčastěji se používá právě pro registraci a georeferencování. Jakmile je mračno georeferencováno, lze jej vyexportovat pro další použití v různých formátech, jako jsou E57, LAS, LAZ, RCP, POD, PTS, LGS nebo PDF. [7]



Obrázek 4.7 - Ukázka prostředí z Leica Cyclone 360

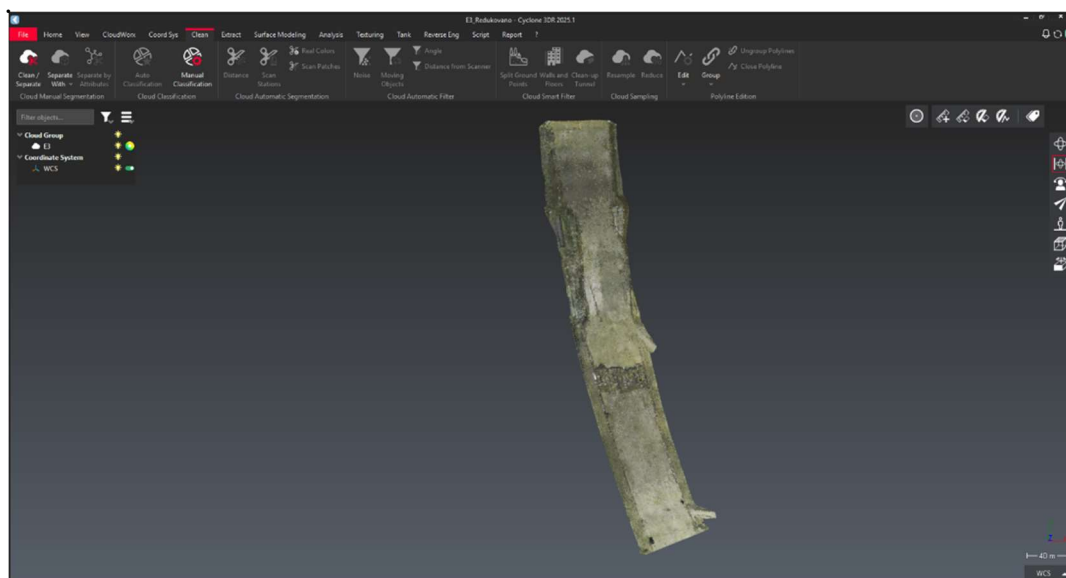
4.2.2 Leica Cyclone 3DR

Leica Cyclone 3DR je taktéž specializovaný software pro práci s mračky bodů. Stejně jako program Leica Cyclone REGISTER 360 patří do skupiny softwarů Leica Cyclone. Software je specializován na následnou úpravu mračen bodů po registraci a georeferencování. [7]

Jednou ze zásadních funkcí programu je možnost ořezat mračno bodů pomocí nakreslených nebo vložených linií. Další důležitou použitou funkcí byla funkce Split Ground Points, což je nástroj, který identifikuje terénní body a odděluje je od neterénních objektů. Je třeba nejprve nadefinovat sklonovou rovinu, díky níž software automaticky vyčistí mračno bodů terénního objektu od šumu a dalších nežádoucích prvků. Mračno je možné očistit od šumu také pomocí funkce Noise. [7]

Software disponuje i funkcí pro redukci mračna. Mračno bodů je redukováno na procentuální poměr vzhledem k původnímu rozsahu dat. Software nabízí mnoho dalších funkcí, jako například tvorbu Mesh modelu nebo filtrování podle určené roviny. Pomocí těchto funkcí lze výrazně urychlit práci s mračky bodů. [7]

Stejně jako u Cyclonu REGISTER 360 lze i z tohoto softwaru vyexportovat různé typy dat. Například je možné exportovat mračna ve formátech LAS, LAZ, E57, PTX, PTS, NSD, ASC, CSV, TXT a mnoha dalších. [7]

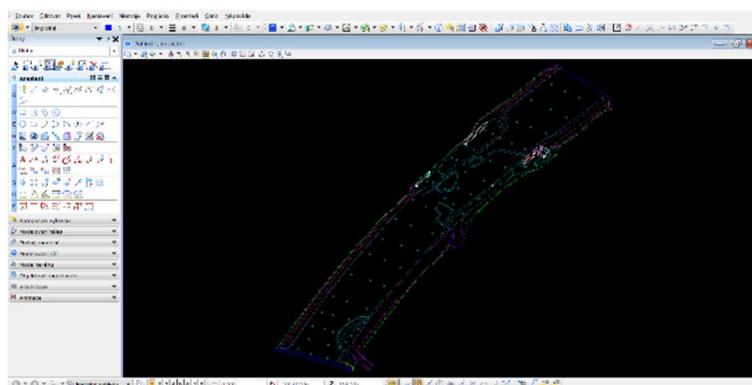


Obrázek 4.8 - Ukázka prostředí z Leica Cyclon 3DR

4.2.3 Microstation V8i Select series

MicroStation je program typu CAD. Jedná se o software od společnosti Bentley Systems, který se zaměřuje na tvorbu technické kresby. Od klasických CAD softwarů se však liší tím, že je více uzpůsoben pro práci geodetů. Tento program patří mezi základní nástroje, které využívají především geodeti. [20]

Program umožňuje kreslení ve 2D i 3D verzi. Nabízí funkce od jednodušších prvků, jako jsou linie, až po složitější kreslicí nástroje, například spojení v průsečíku. Program podporuje širokou škálu CAD formátů, aby usnadnil propojení mezi různými softwary. Mezi podporované formáty patří DGN, DXF, DWG a OBJ. Tento program byl použit pro tvorbu výkresů, ze kterých byly následně vytvořeny 3D modely. [20]



Obrázek 4.9 - Ukázka prostředí z Microstationu V8i Select series

4.2.4 Groma

Jedná se o český program od společnosti GEOLINE. Program je specializovaný na geodetické výpočty a zpracování měření z terénu.

Program umožňuje výpočet deseti základních geodetických úloh, kterými jsou výpočet polární metody, ortogonální metody, vyrovnání na přímku a další. Navíc je program vybaven nástroji pro výpočty geodetických sítí, a to jak výškových, tak polohových. Kromě toho je zde možnost i zpracování měřených dat před samotným výpočtem. Toto zpracování zahrnuje redukci do kartografického zobrazení, redukci délek ze šikmé na vodorovnou, redukci směrů a další.

Součástí je také grafický modul určený pro zpracování geometrických plánů. Výstupem z tohoto programu jsou převážně textové formáty, jako jsou TXT, ASC a CSV. V této diplomové práci byl program použit převážně pro výpočty sítě a výpočty souřadnic vlíčovacích bodů.

4.2.5 Atlas DMT

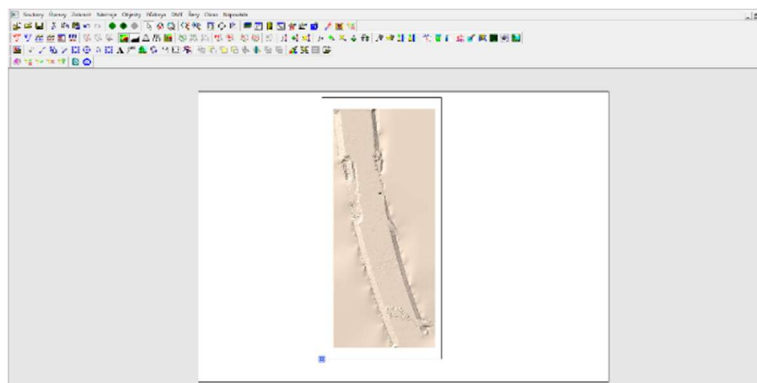
Atlas DMT je, stejně jako GROMA, českým softwarem. Program slouží k práci s prostorovými daty, přičemž se zaměřuje především na digitální modely terénu, které nacházejí uplatnění ve stavebnictví, těžebním průmyslu, hydrologii a ekologii. Hlavními výhodami tohoto softwaru jsou univerzálnost, stabilita a kompatibilita. Do Atlasu je možné nahrát soubory z různých jiných softwarů. Umožňuje import formátů LAS, LAZ, E57, DXF, TXT, ASCII, CSV, PTX a dalších. [8,15,23]

Mezi klíčové vlastnosti softwaru patří tvorba 3D modelů terénu a následná práce s nimi. Program umožňuje vytvořit 3D model terénu z různých zdrojů, například z mračna bodů ve formátu LAS nebo z vektorové kresby. Lze zde vytvořit různé typy modelů, například bodový model a TINový model. [8,15,23]

Další důležitou funkcí Atlasu je vytvoření sestav řezů, kde lze nastavit počet řezů, počet řezaných modelů, rozdíly mezi modely a mnoho dalších parametrů. Atlas zahrnuje také funkce pro tvorbu kresby, tvorbu polygonových ploch a mnoho dalších možností. [8,15,23]

Modul DMT obsahuje funkce spojené s modely terénu. Nachází se zde nástroje pro tvorbu 3D modelů terénu a následnou práci s nimi. Modul je schopen vygenerovat rozdílový model, který může být užitečný při porovnávání dvou modelů. Modely lze transformovat do jiné souřadnicové soustavy, nebo je možné je výškově či polohově upravit podle potřeby. K dispozici jsou i funkce pro výpočty objemů modelu terénu, výpočty poklesu nebo editaci bodů modelů. [8,15,23]

V této diplomové práci byl program Atlas DMT použit na tvorbu a editaci 3D modelů terénu. Následně byl program využit i pro výpočty kubatur, což je hlavním předmětem této práce.



Obrázek 4.10 - Ukázka prostředí z Atlas DMT

5 PŘÍPRAVNÉ PRÁCE

5.1 REKOGNOSKACE

Rekognoskace je velmi důležitou a klíčovou součástí všech geodetických prací. Hlavním cílem rekognoskace je zajistit detailní přehled o podmínkách měření a zjistit stav měřické sítě nebo popřípadě zbudovat novou měřickou síť. V neposlední řadě je rekognoskace důležitá činnost při plánování celého projektu.

V této diplomové práci byla rekognoskace prováděna na probíhající stavbě, tudíž bylo nutné při pohybu na staveništi dodržovat předpisy. Bylo zapotřebí opatřit auto výstražným majákem a pohybovat se na stavbě v helmě, vestě, a především s největší opatrností.

Geodetická firma, která má na starost stavbu dálnice u Přerova, se nazývá Geocentrum spol. s.r.o. Tato firma mi poskytla kompletní vybavení a zázemí pro sběr dat a následné vyhodnocení. Od firmy jsem taktéž obdržel souřadnice bodů měřické sítě stabilizované v terénu a zaměřené v rámci vytyčovací sítě stavby.

Při rekognoskaci bylo zjištěno, že poskytnutá měřická síť není tak hustá, aby vyhovovala podmínkám této diplomové práce. Síť bylo třeba zhustit více body. Body převzaté od firmy Geocentrum byly stabilizovány mikropilotami v zemi a body, které bylo teprve nutno vytvořit, byly stabilizovány hřebem. Při výběru míst bodů byl brán ohled na budoucí růst stavby. Body byly zvoleny na objektech, které neměly být stavbou ohroženy. Bylo zde zbudováno sedm bodů měřické sítě tak, abychom na každém místě projektu měli dostatek orientace pro podrobný sběr dat.



Obrázek 5.1 - Bod 4003 vytvořený pro účely této diplomové práce



Obrázek 5.2 - Bod původní vytyčovací sítě stavby 7065

5.2 BUDOVÁNÍ MĚŘICKÉ SÍTĚ

Po rekognoskaci terénu a podmínek stavby bylo zapotřebí zajistit měřickou síť. Síť byla převzata od zhotovitele stavby a následně doplněna o body 4001 až 4008. Body byly stabilizovány do pevných povrchů nástřelovým hřebem. Místa byla volena v dostatečné vzdálenosti od stavby, aby nebyla ovlivněna jejím průběhem.

Převzaté body sítě od zhotovitele byly konkrétně body 7063, 7065, 7066, 9034, 9043. Tyto body byli součástí vyrovnání měřické sítě.

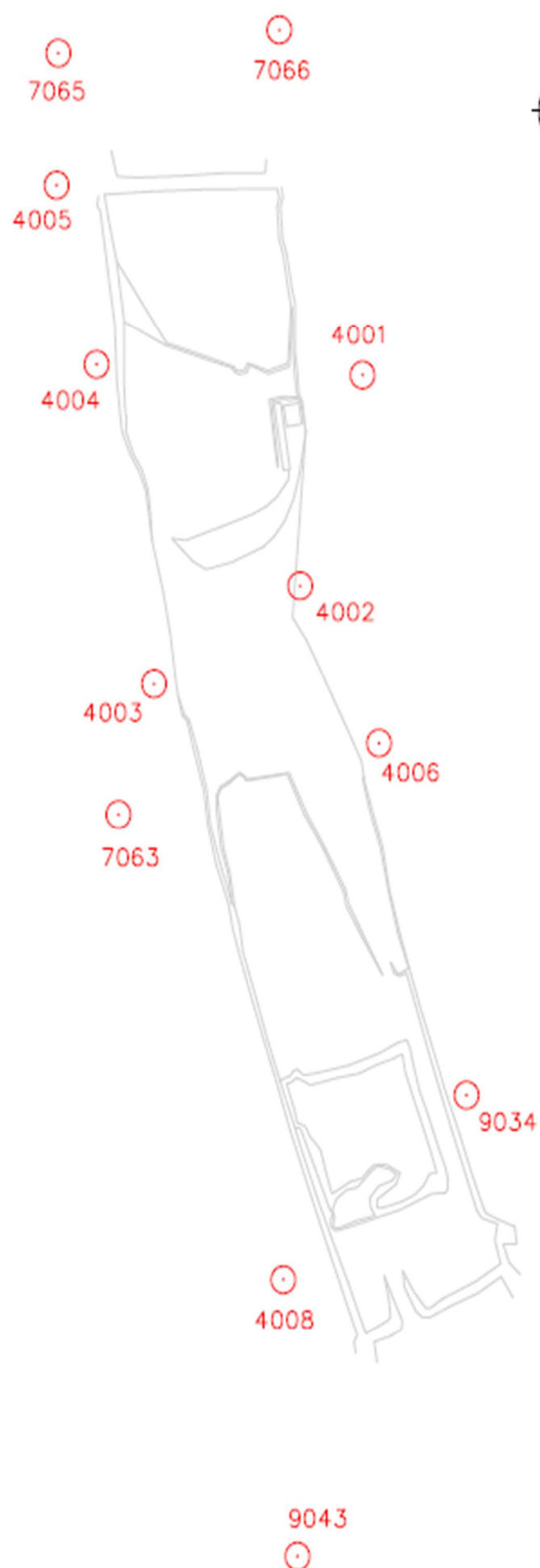
K zaměření sítě byly použity přístroj Leica TS16, odrazné hranoly a stativy. Zaměření probíhalo pomocí zcentrování a horizontování stativů s odraznými hranoly na všechny body měřické sítě. Následovalo vzájemné proměření bodů tak, abychom získali dostatek nadbytečných měření pro vyrovnání. Výšku bodů jsme zaměřili velmi přesnou nivelací. Body měřické sítě byly brány jako přestavbové body, aby mohly vstupovat do výškového vyrovnání. Body převzaté od firmy Geocentrum byly brány jako body výchozí.

Vyrovnání probíhalo v softwaru GROMA. Síť byla nejprve vyrovnána polohově. Jako přibližné souřadnice byly zvoleny body změřené pomocí GPS. Po polohovém vyrovnání následovalo vyrovnání výškové.



Obrázek 5.1 - Totální stanice Leica TS16

Schéma bodů měřické sítě



5.3 TESTOVÁNÍ SKENERU

Před samotným sběrem dat bylo zapotřebí otestovat, zda všechny přístroje měří s přesností udávanou výrobcem. Totální stanice a GNSS aparatura jsou přístroje, které jsou velmi často používány. Ačkoliv byly před naším měřením nakalibrovány, následné testování už nebylo zapotřebí právě díky častému používání, tudíž jsme si byli dobře vědomi možností těchto přístrojů.

Skener Leica RTC360 byl taktéž nakalibrován, bylo ale zapotřebí provést testovací měření, abychom zjistili, jak skener funguje a jaký typ měření skenerem použít. Skener nabízí 3 varianty skenování, přičemž každá z nich ovlivňuje výslednou hustotu mračna bodů a její přesnost.

Testování proběhlo na sledovaném objektu, abychom dosáhli správného zjištění, jakým způsobem se nám další objekty na sledovaném území zobrazí na výsledném mračnu bodů. K dispozici jsme měli pomůcky určené k následnému sběru dat, jako například signalizační terče. Bylo zapotřebí zjistit, jak dobře je skener schopen zachytit na mračnu bodů signalizační terče, jelikož signalizační terče jsou velmi malé.

Testováním bylo zjištěno, že signalizační terče jsou příliš malé na to, aby byly dobře identifikovatelné na výsledném mračnu z velké vzdálenosti. Na základě testování jsme určili maximální vzdálenost skeneru od terče, která byla stanovena na 35 metrů při skenování na nejlepší rozlišení.



Obrázek 5.2 - Signalizační terč na stativu

6 SBĚR DAT

Při sběru dat bylo potřeba postupovat tak, abychom získali co nejlepší a dostatečně velký vzorek měřených dat a poté je mohli porovnat podle jednotlivých metod. Tím získáme lepší představu o chybách, které vznikají u každé z těchto metod měření, ať už statickým laserovým skenováním, skenováním pomocí skeneru SLAM, získaných měřeními technologie GNSS a fotogrammetrickým sběrem dat. Sběr dat probíhal v 5 etapách. Tyto etapy byly rozděleny vždy po měsíci, bez ohledu na to, jak se stavba posunula. Důsledkem toho byly jednotlivé etapy odlišné a my tak získali dobrý vzorek dat.

Každé měření bylo plánováno s ohledem na probíhající stavbu a také na plánování fotogrammetrických náletů. Kvůli provozu na stavbě bylo zapotřebí měření plánovat tak, aby vycházela na dny, kdy byl na stavbě nejmenší pohyb. Primárně se tedy jednalo o víkendy. Za tuto dobu bylo třeba zaměřit aktuální stav všemi metodami, abychom měli přesné porovnání jednotlivých metod ve stejnou dobu.

Občas bylo nutné kvůli fotogrammetrickému náletu, který plánovala a prováděla firma STRABAG, uzpůsobit měření na dny, které byly v co nejkratším časovém úseku od náletu.

Sběr dat musel být taky naplánován s ohledem na vývoj stavby. První etapa byla provedena začátkem července. Tou dobou se na objektu ještě nenavázela hlína, a tudíž se dal považovat za vstupní hodnotu při výsledné klasifikaci. Sběr dat skončil 5. etapou, která se uskutečnila začátkem listopadu. Tehdy už násyp sahal do 2/3 výšky plánované podle projektu. Následné etapy, například po skončení navážecích prací, už nebyly realizovány z důvodu časového a také z důvodu, že 5 etap vykazuje dobrý vzorek.



Obrázek 6.1 - Sledovaný objekt před první etapou měření

6.1 LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

6.1.1 Leica RTC 360

Měření bylo třeba naplánovat s ohledem na předešlé testování skeneru a s ohledem na další faktory. Hlavním z těchto faktorů byla chyba softwaru při spojování mračen bodů pomocí funkce cloud to cloud. Cloud to cloud vyhledává podobnosti v jednotlivých skenech a následně dva skeny napojí na sebe. Ovšem v případě projektu, kde se nachází minimum objektů, pomocí kterých by se snáze identifikovaly podobnosti, tato funkce selhává. Software v takové situaci vyhledal podobná místa a spojil je dohromady. Při prozkoumání bylo proto později zjištěno, že se nejedná o stejná místa, nýbrž pouze podobná. Na základě toho jsme museli při skenování postupovat tak, abychom byli schopni skeny spojit pomocí vlícovacích bodů.

Jako vlícovací body byly použity signalizační terče o průměru 12 cm, které byly připevněny na stativěch. Z předešlého testování nám ale vyšlo, že vzdálenost skeneru by neměla tvořit více jak 35 metrů, tudíž bylo nutné značně zhustit měření. Na přiloženém schématu je znázorněno, že se při měření vytvořila síť vlícovacích bodů a skeny byly prováděny ve čtvercové síti okolo těchto bodů. V případě hran a jiných objektů jako jsou sloupy elektrického vedení bylo možné mít méně skenů, jelikož zde potenciální chyba ve funkci cloud to cloud už nepředstavovala takové riziko chybovosti.

Abychom si spojení mračen bodů ještě usnadnili, použili jsme větší signalizační terče. Jednalo se o terč na zalaminovaném papíře, přilepený k tyči a zatlučený do země. Tyto signalizační terče plnily účel doplňkových terčů a hlavní kostra mračna na ně spojována nebyla.

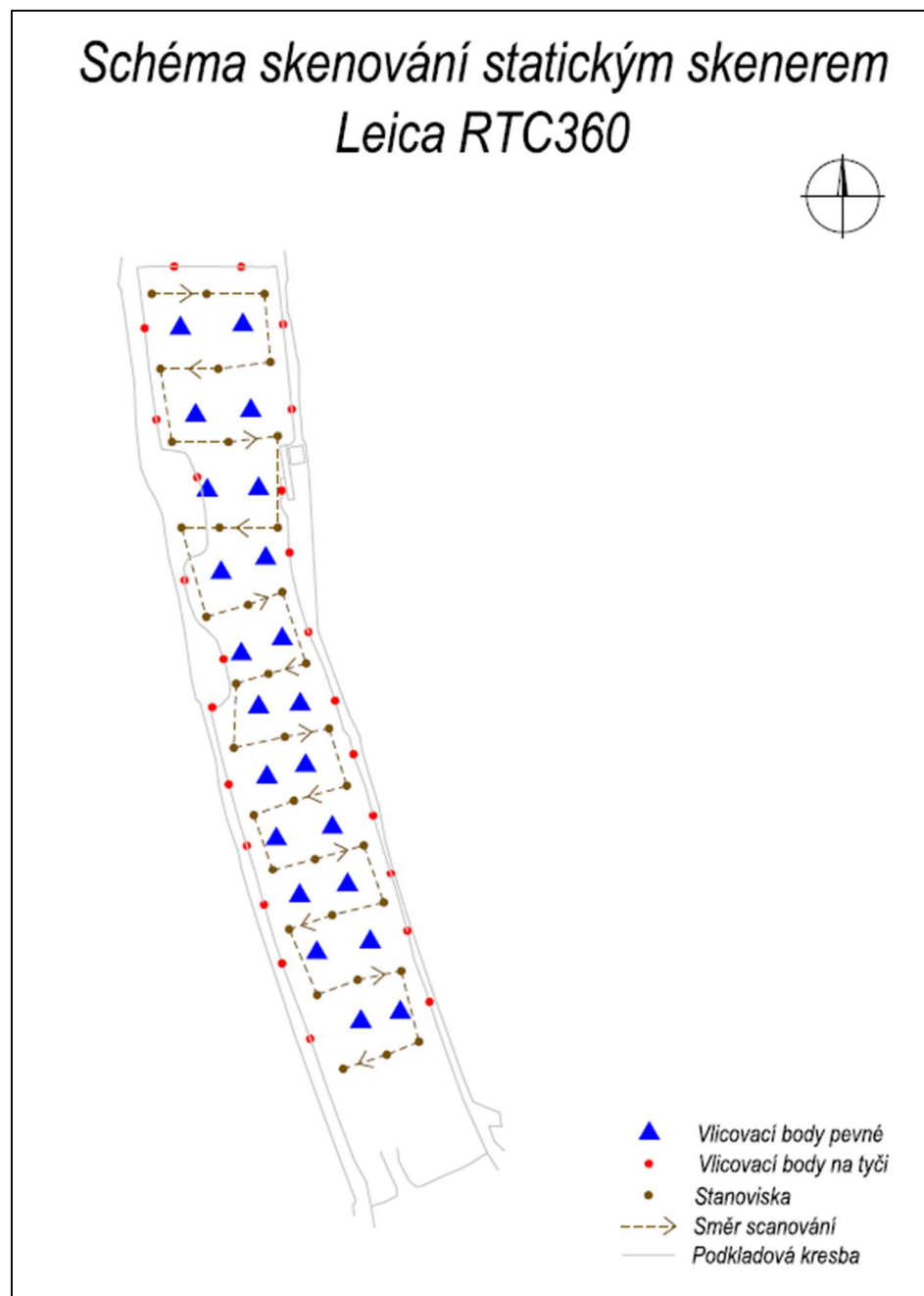


Obrázek 6.2 - Skener Leica RTC 360 a signalizační terče na stativěch



Obrázek 6.3 - Doplňkové signalizační terče

Skenování vyžaduje taktéž více stanovišek než obyčejná totální stanice, jelikož objekty, které jsou v zákrytu, nemohou být naskenovány. Skenováno bylo po 5 etapách opět vždy po 1 měsíci, abychom získali co nejlepší vzorek. Tudiž z měření pomocí skeneru RTC360 máme k dispozici 5 mračen bodů. Z důvodu vyššího počtu skenů byla průměrná délka skenování objektu den a půl, což odpovídá zhruba 11-13 pracovním hodinám. Na přiloženém obrázku se nachází přibližné schéma skenování pomocí skeneru RTC360. Na tomto schématu se nachází pouze hlavní kostra objektu. Bylo zapotřebí provést dodatečné skenování určitých míst důsledkem neviditelnosti nebo zákrytu.



6.1.2 Leica BLK2GO

Měření pomocí ručního SLAM skeneru Leica BLK2GO probíhalo současně s měřením statického skeneru. Mluvíme v tomto případě o takovém ručním skeneru, který lze bez problémů přenášet a naskenovat tak i objekty, které by pro statický skener byly problémové, jako například členité objekty a objekty v zákrytu.

Pro urychlení procesu měření bylo zapotřebí zaměřit část sledované lokality ve stejnou dobu jako v případě statického skeneru. Nebylo tudíž nutné znovu stavět a zaměřovat signalizační terče. Souřadnice těchto terčů byly určeny totální stanicí v návaznosti na naši zbudovanou síť. Tudíž před přesunem jednotlivých terčů bylo třeba zaměřit oblast pomocí ručního SLAM skeneru BLK2GO.

Samotné měření pomocí ručního skeneru probíhalo nastavením výchozího bodu, ze kterého mohlo měření vycházet, a na kterém muselo měření taktéž skončit. Bylo také nutné dodržet takový časový interval, ve kterém je možno skenovat. Výrobce přístroje udává, že pokud skenování s přístrojem BLK2GO trvá déle než 15 min, tak výrazně klesá přesnost a životnost přístroje. Skenování jsme tudíž prováděli po částech tak, abychom tuto časovou hranici nepřekročili. Během tohoto času bylo zapotřebí se skenerem a propojeným telefonem s funkční polohou projít námi zvolenou část lokality, a naskenovat i signalizační terče pro pozdější registraci a georeferencování. Samotná časová náročnost práce nebyla velká. Čas měření se průměrně pohyboval okolo 1–2 hodin.



Obrázek 6.4 - Ukázka skenování SLAM skenerem

6.2 MĚŘENÍ METODOU GNSS RTK

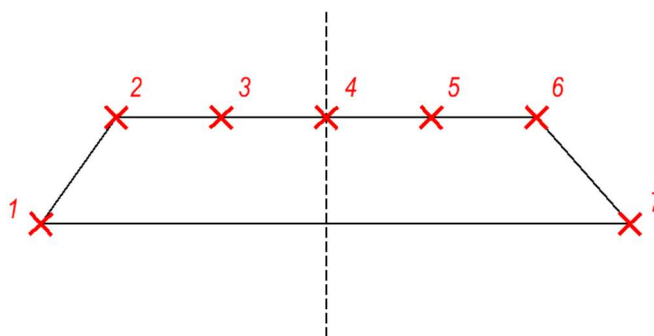
Technologie GNSS nám umožňuje změřit body na povrchu země za použití družic. Existuje několik typů metod použití této technologie. Metoda použitá při sběru dat této diplomové práce je metoda RTK. Metoda RTK umožňuje získávání korekcí pro data z družicového systému, například GPS, pomocí sítě permanentních stanic jako je CZEPOS.

Při každé etapě sběru dat bylo třeba zaměřit body naší měřické sítě, abychom dokázali určit jednotlivé výškové odchylky mezi měřením technologií GNSS a měřením pomocí skenerů. Všechny body měřické sítě byly zaměřeny 2x a s dostatečným časovým odstupem, abychom získali co nejpřesnější obrázek o rozdílu GNSS a skenování.

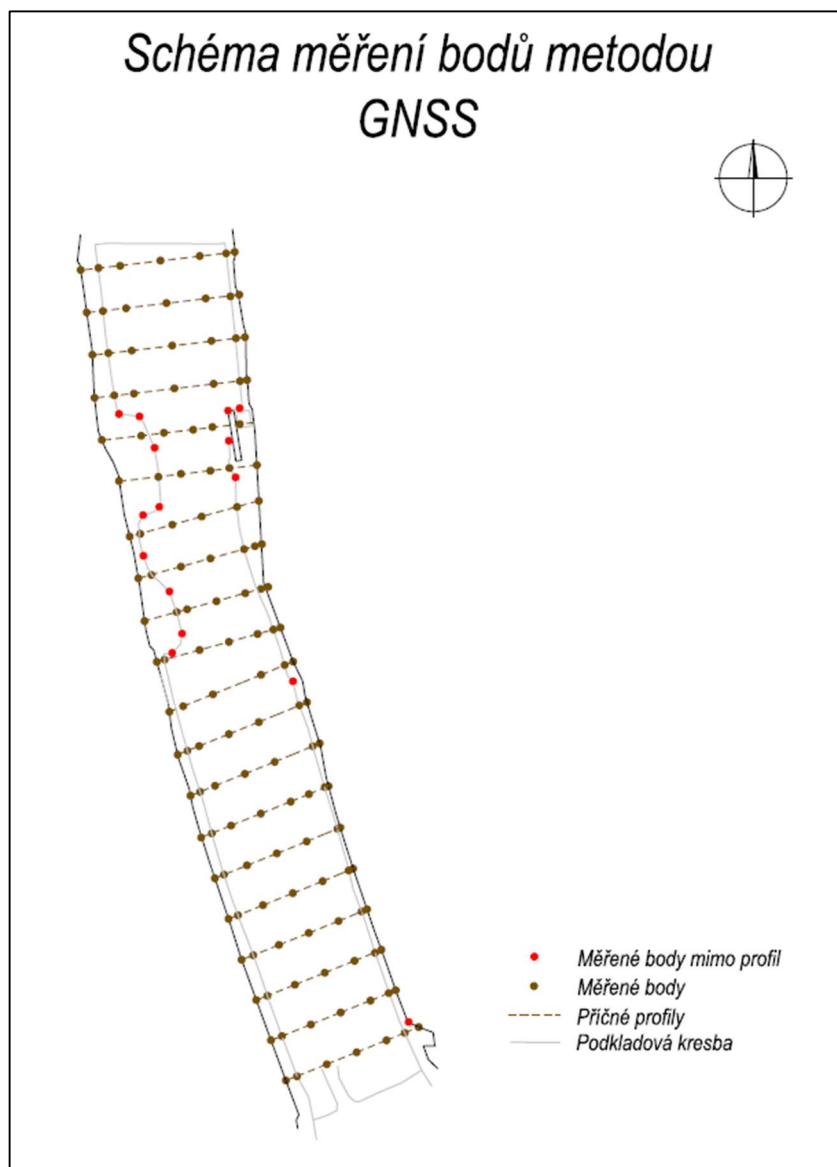
Samotné měření probíhalo na základě měření profilů. Profily byly voleny po 20 metrech, abychom dosáhli co nejlepšího vykreslení stávajícího stavu. Každý profil obsahoval body na patě, hraně a dle možností i body na vrcholu násypu. Dále bylo zapotřebí doměřit také některé hrany a jiné objekty, abychom získali co nejpřesnější model našeho sledovaného objektu. Viz. přiložené schéma.

Při samotném sběru dat byl kladen důraz na přesnost polohového, a především výškového měření, abychom neovlivnili výsledek. Zásadní bylo nezabodávat přístroj do terénu, abychom získali lepší výškový vzorek. Měření byla situována na kameny zaválcované do roviny povrchu nebo přímo na samotný již zválcovaný povrch, který tak měl rovnoměrnou strukturu.

Samotné měření pomocí technologie GNSS probíhalo na sledovaném objektu v průměru 2 hodiny a bylo provedeno v 5 etapách, čímž jsme získali 5 modelů z technologie GNSS, metody RTK.



Obrázek 6.5 - Schéma měření bodů v příčných profilech



6.3 FOTOGRAMMETRICKÉ SNÍMKOVÁNÍ

Sběr dat pomocí fotogrammetrického snímkování používá firma STRABAG na vytvoření modelů probíhající stavby a také k výpočtu kubatur jednotlivých násypů na celé stavbě 0136 Říkovice Přerov. Jelikož firma Geocentrum, jež mi poskytovala přístrojové vybavení, neměla k dispozici dron na fotogrammetrické snímkování, požádal jsem firmu STRABAG o zpracovaná data z fotogrammetrického snímkování. STRABAG mi tyto data poskytl k účelům diplomové práce.

Měřená a zpracovaná data byla převzata z měření firmy STRABAG. Focení bylo pořízeno pomocí dronu DJI Phantom 4 RTK a celá stavba byla snímkována jako jeden celek. Georeferencování bylo provedeno pomocí vlíčovacích bodů vyznačených sprejem na objektu. Vlícovací body byly zaměřeny technologií GNSS, konkrétně metodou RTK. Měření vlíčovacích bodů zprostředkovala firma Geocentrum spol. s.r.o. jako geodetický zhotovitel stavby. Měření probíhalo za použití přijímače Leica GS18 T a kontroléru Leica CS20.

Při pořizování leteckých snímků je potřeba důkladně naplánovat parametry letu, abychom byli schopni vypočítat model a jeho následnou přesnost. Parametry při náletu dronem byly nastaveny na rozpětí 72 metrů. Rychlost letu byla nastavena na 5 metrů za sekundu a výška letu na 110 metrů. Příčné a podélné překryty byly nastaveny na 78 %. Všechny tyto údaje byly převzaty z technické zprávy firmy STRABAG.

Nutné bylo také naplánovat měření laserového skenování a GNSS na termíny odpovídající termínům náletů dronu, abychom zajistili, že pomocí všech metod byla zaměřena stejná plocha.

Jelikož se interval časových rozestupů leteckých náletů lišil od časových intervalů skenování a měření pomocí GNSS, máme pouze dva odpovídající výsledky z této metody, a ty jsou konkrétně ve 2. a 4. etapě měření.



Obrázek 6.6 - Fotogrammetrická metoda v rámci celé stavby



Obrázek 6.7 - Vlícovací bod pro fotogrammetrickou metodu

7 TVORBA 3D MODELŮ Z NAMĚŘENÝCH DAT

7.1 ZPRACOVÁNÍ MRAČEN BODŮ Z LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

Ke zpracování naskenovaných mračen bodů byl použit software Leica Cyclon, který obsahuje dva specializované softwary na práci s mračny bodů. První z nich je software Leica Cyclon 360, který se specializuje výhradně na registraci mračen bodů a následné georeferencování. Jde tedy o program určený spíše k tvorbě celkových mračen bodů. Naproti tomu druhý software Leica Cyclon 3DR se zase specializuje na estetické prvky mračna bodů, jako například začištění hran nebo vyčištění šumu. V tomto softwaru se již pracuje se sjednoceným a georeferencovaným mračnem bodů.

7.1.1 Statické laserové skenování

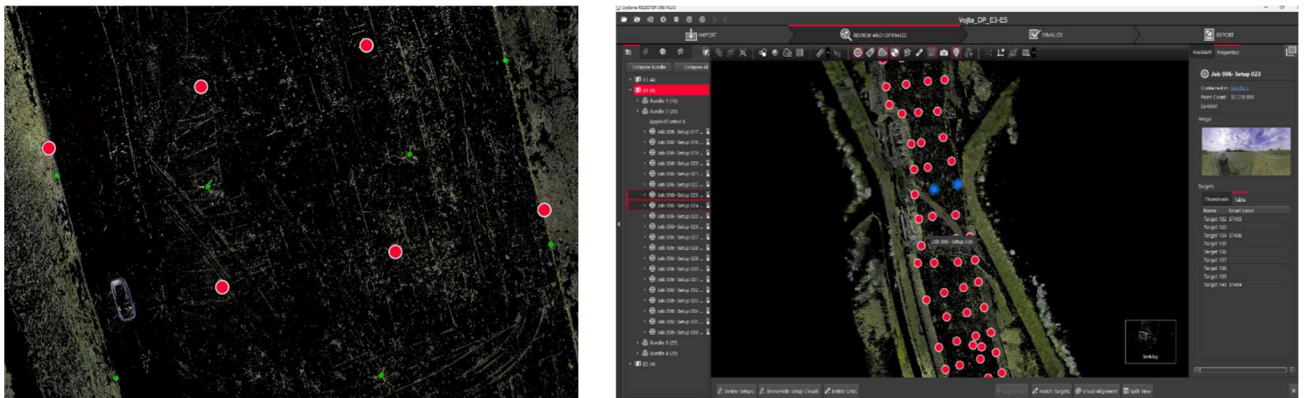
7.1.1.1 Leica Cyclone 360

Práce v softwaru Leica Cyclon 360 by se dala rozdělit do 4 jednotlivých kroků, a to Importem surových naskenovaných mračen bodů, následné spojení mračen bodů, georeferencování neboli transformace do geodetického souřadnicového systému a následný export sjednoceného a nageoreferencovaného mračna pro použití v dalším softwaru.

Prvním nutným krokem, abychom mohli dále pracovat v softwaru, bylo importování mračen bodů z jednotlivých měření. Import jako takový nepředstavuje náročnou práci, celý proces byl ale zkomplikován obrovským množstvím pořízených dat. Jak již bylo zmíněno v testování přesnosti a měření statickým skenerem, bylo nutné skenovat mnohem více skenů než při jiném skenovacím procesu, jelikož jsme se nacházeli na pláni s minimem objektů, které by nám byly užitečné při spojování mračen. V každé z 5 provedených etap bylo zhruba 70-90 jednotlivých skenů a velikost těchto dat byla kolem 80-100 GB dat. Import jednotlivé etapy nám zabral v průměru 6-8 hodin. Při importu byly také softwarem automaticky vyhledávány vlíčovací body, v našem případě tvořeny signalizačními terči na stavivu.

Druhým a třetím krokem v tomto procesu bylo spojení mračen do jednoho výsledného mračna a georeferencování. V první řadě bylo zapotřebí mračna seskládat do přibližné

polohy, abychom dále mohli provést spojení, takzvanou registraci mračen bodů. Dále bylo zapotřebí naimportovat spočítané souřadnice vřícovacích bodů, které byly spočteny v softwaru GROMA. Po importu souřadnic bylo zapotřebí dodatečně označit vřícovací body, které nedokázal software samostatně vyhodnotit při importu. Software při importu vyhledal většinu jednotlivých vřícovacích bodů, avšak nepřidal k nim správné pojmenování. Bylo proto zapotřebí projít každý vřícovací bod na mračně bodů a přejmenovat ho na požadovaný název, abychom docílili co nejlepšího spojení. Po přejmenování a označení všech vřícovacích bodů byly označeny jednotlivé skeny, a následně byla zvolena funkce Match targets, pomocí které software vyhodnotí vřícovací body, provede georeferencování a spojení mračen bodů – ovšem jen těch mračen bodů, u kterých je dostatek vřícovacích bodů. Vzhledem k povaze měření byla pomocí vřícovacích bodů propojena hlavní kostra mračna, tedy skeny, které byly měřeny na vrcholu násypu.



Obrázek 7.1 - Ukázky práce s mračny bodů při registraci

Jelikož software nedokázal propojit úplně všechna mračna bodů, museli jsme je následně propojit manuálně pomocí funkce cloud to cloud. Mračna bodů, která nebyla propojena, byla z velké části ta mračna, která neměla dostatek vřícovacích bodů. Vřícovací body byly ovšem voleny tak, abychom obsáhli plochu s minimem objektů, které zlepšují funkci cloud to cloud, jako například sloupy elektrického vedení. Jednalo se především o mračna, která byla mimo vršek násypu, a tudíž mimo hlavní kostru sledovaného objektu. Funkce cloud to cloud funguje na principu, kdy algoritmus vyhledává podobná místa na mračnech bodů, které následně propojí do jednoho mračna. Tato funkce ovšem nedokáže dobře propojit mračna na místech bez okolních objektů a

jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, velmi často se stává, že některá místa jsou vyhodnocena jako stejná, ačkoliv se jedná pouze o místa podobná. Velmi často tento problém nastával například na pláni násypu. Z toho důvodu bylo použito více vlíčovacích bodů. Tato funkce není plně automatizována, jelikož je zapotřebí korelovat co nejpřesněji dvě mračna bodu na sebe. Následně software vyhodnotí podobnosti, a navíc upřesní polohu mračen bodů.



Obrázek 7.2 - Spojování mračen funkcí cloud to cloud

Po propojení všech ostatních skenů do jednoho celistvého mračna bodů bylo mračno připraveno pro export. Kvůli velkému objemu dat jsme nakonec toto mračno rovnoměrně rozdělili na 4-5 stejných částí, kdy každá taková část obsahovala dostatek vlíčovacích bodů. Tyto jednotlivé části byly následně vyexportovány ve formátu .e57, abychom je mohli nahrát do programu Leica Cyclone 3DR. Tento postup byl zopakován pro všech 5 měřených etap. Doba práce na jedné etapě bez importu a exportu trvala zhruba 6-8 hodin. Výsledný export byl taktéž velmi časově náročný a trval přibližně 6-8 hodin. Po zahrnutí importu a exportu tak práce na jedné etapě v tomto softwaru byla kolem 18-24 hodin.

Overall Quality															
Error Results for Bundle 6															
Setup Count:	32														
Link Count:	114														
Strength:	29 %														
Overlap:	39 %														
Global Bundle Error:	0.003 m														
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Bundle Error</td> </tr> <tr> <td colspan="2">0.008 m ✓</td> </tr> <tr> <td>Overlap</td> <td>Strength</td> </tr> <tr> <td>39 % ✓</td> <td>29 %</td> </tr> <tr> <td>Cloud-to-Cloud</td> <td>Target Error</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"> <table border="1"> <tr> <td>0.007 m ✓</td> <td>0.010 m ✓</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>		Bundle Error		0.008 m ✓		Overlap	Strength	39 % ✓	29 %	Cloud-to-Cloud	Target Error	<table border="1"> <tr> <td>0.007 m ✓</td> <td>0.010 m ✓</td> </tr> </table>		0.007 m ✓	0.010 m ✓
Bundle Error															
0.008 m ✓															
Overlap	Strength														
39 % ✓	29 %														
Cloud-to-Cloud	Target Error														
<table border="1"> <tr> <td>0.007 m ✓</td> <td>0.010 m ✓</td> </tr> </table>		0.007 m ✓	0.010 m ✓												
0.007 m ✓	0.010 m ✓														
<p> ■ Max error of 0.015 m. ■ Max error of 0.020 m. ■ Error greater than 0.020 m. </p>															

Obrázek 7.3 - Protokol o přesnosti spojení mračen

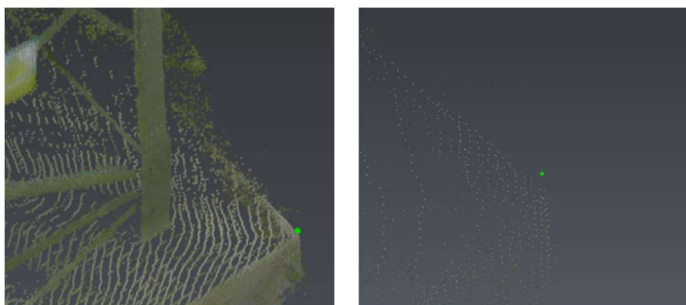


Obrázek 7.4 - Spojené a nageoreferencované mračno bodů

7.1.1.2 Leica Cyclone 3DR

Po vytvoření propojených a georeferencovaných mračen bodů bylo zapotřebí importovat takto vytvořená mračna do softwaru Leica Cyclone 3DR. Tento program je určen převážně ke zlepšení estetických prvků mračna bodů. Program má dále také funkci na tvorbu a práci s Mesh modely. Čas importu do programu Leica Cyclone 3DR byl srovnatelný s časem exportu v Leica Cyclone 360. Import trval pro každou etapu zhruba 6-8 hodin.

Po provedení importu bylo jako první zapotřebí mračna rozdělená pro snazší export opět spojit. Jelikož se jednalo o mračna v souřadnicovém systému, stačilo pouze mračna v softwaru sloučit do jednoho. Následně jsme nahráli identické body zaměřené totální stanicí z naší měřické sítě. Polohu těchto identických bodů jsme poté porovnávali s polohou na mračnu bodů, abychom zjistili přesnost propojení mračen bodů.

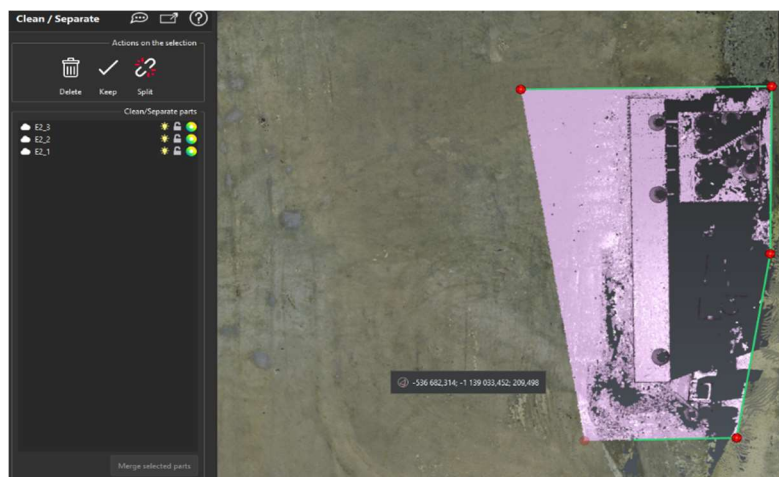


Obrázek 7.5 - Porovnávání polohy identických bodů

Tab. 7.1 - Odchytky skenů na identických bodech

Identické body	Odchytky na identických bodech [m]																			
	Etapa 1				Etapa 2				Etapa 3				Etapa 4				Etapa 5			
	Odchytky				Odchytky				Odchytky				Odchytky				Odchytky			
	dX	dY	dZ	dP	dX	dY	dZ	dP	dX	dY	dZ	dP	dX	dY	dZ	dP	dX	dY	dZ	dP
1	-0,005	0,000	-0,042	0,005	-0,001	-0,001	-0,042	0,002	0,004	0,011	-0,015	0,012					-0,004	0,008	-0,012	0,009
2	0,002	-0,003	-0,025	0,004	-0,001	-0,001	-0,044	0,002	0,001	0,017	-0,014	0,017	-0,022	0,009	-0,010	0,024	-0,003	0,010	-0,007	0,010
3	0,005	0,005	-0,019	0,007	0,022	-0,002	-0,031	0,022	0,018	0,003	-0,006	0,019	-0,008	-0,002	0,007	0,008	0,009	0,019	-0,016	0,021
4	-0,006	-0,003	-0,052	0,007	-0,002	-0,010	-0,032	0,010	0,007	-0,011	-0,021	0,013	-0,018	-0,007	-0,029	0,019	0,000	-0,003	-0,018	0,003
5	-0,005	-0,006	-0,015	0,008	0,046	-0,035	0,000	0,058	0,005	-0,023	0,000	0,024	-0,014	0,113	-0,029	0,114	0,019	-0,051	-0,018	0,055
6	0,056	-0,053	-0,016	0,077	0,010	-0,211	0,005	0,211	0,000	-0,019	-0,010	0,019	0,000	0,033	-0,033	0,033	0,025	-0,099	-0,019	0,102
7	-0,020	-0,030	0,020	0,036	-0,004	-0,008	0,013	0,009	-0,004	0,000	-0,002	0,004	-0,006	-0,005	0,002	0,008	-0,041	0,009	-0,036	0,042
8	-0,018	-0,036	0,026	0,040	-0,002	-0,009	0,010	0,010	-0,004	-0,007	-0,003	0,008	-0,022	-0,020	0,015	0,029	-0,026	0,009	-0,031	0,027
9	-0,038	0,007	0,029	0,039	-0,034	-0,011	0,031	0,036	-0,026	0,020	-0,013	0,033	-0,049	-0,005	0,018	0,049	-0,010	0,005	0,002	0,011
10					-0,015	-0,017	0,020	0,023	0,000	0,024	0,016	0,024	-0,016	-0,002	0,027	0,016	0,022	0,015	0,019	0,026
11	-0,001	0,009	0,024	0,009	0,003	-0,005	0,029	0,006	0,015	0,002	0,029	0,016	-0,009	0,022	0,034	0,024	0,004	0,012	0,022	0,012
12	-0,003	0,000	0,002	0,003	0,000	-0,006	-0,006	0,006	0,011	0,002	-0,007	0,012	-0,016	0,008	-0,048	0,017	0,058	0,057	-0,013	0,081
13	-0,003	0,006	0,025	0,007	-0,003	0,003	0,029	0,004	0,008	0,015	0,006	0,017	-0,028	0,008	0,015	0,029	0,006	0,003	-0,003	0,007
14	0,000	0,005	-0,001	0,005	0,005	-0,004	-0,017	0,007	0,004	0,019	0,008	0,019	-0,013	0,008	-0,016	0,015	0,011	0,006	-0,020	0,013
15	-0,046	0,000	-0,009	0,046	-0,035	0,017	-0,003	0,039	-0,009	0,042	0,009	0,043	-0,010	0,044	0,002	0,045	-0,019	0,019	0,020	0,027
16	-0,048	0,001	-0,008	0,048	-0,035	0,013	-0,009	0,037	-0,016	0,037	-0,012	0,041	-0,013	0,042	-0,007	0,044	-0,015	0,016	-0,009	0,022
17					-0,071	0,016	0,009	0,072	0,005	0,023	0,027	0,024	-0,023	0,013	0,047	0,026	-0,051	-0,013	0,042	0,052
18					-0,036	-0,003	0,022	0,037	0,045	0,014	0,011	0,047	0,007	0,006	0,030	0,009	-0,016	-0,026	0,037	0,031
19					-0,053	0,030	0,016	0,061	0,006	0,054	0,021	0,054	-0,023	0,040	0,027	0,046	-0,046	-0,017	0,034	0,049
20					-0,064	0,017	0,023	0,066	0,016	0,029	0,008	0,033	-0,009	0,002	0,023	0,009	-0,048	-0,020	0,035	0,052
Průměry	-0,009	-0,007	-0,004	0,023	-0,014	-0,011	0,001	0,036	0,004	0,013	0,002	0,024	-0,015	0,016	0,004	0,030	-0,006	-0,002	0,000	0,033

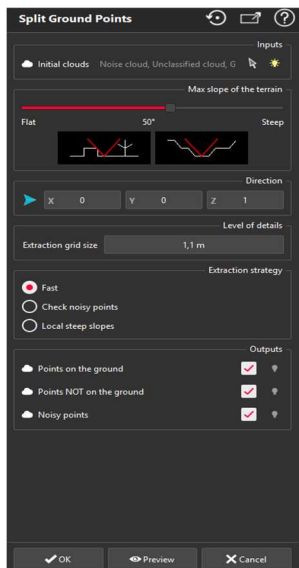
Po zkontrolování polohy mračen bodů jsme pokračovali jejich ořezáním na požadovaný tvar. Byl vytvořen obrys mračen bodů tak, abychom ho mohli aplikovat na všechna mračen bodů a také na měření GNSS. Pomocí funkce oříznout mračno byla mračna ořezána na požadovaný tvar. Tato funkce umožňuje ořezat mračno pomocí definovaných linií nebo přímo v kreslicím modulu tyto linie definovat.



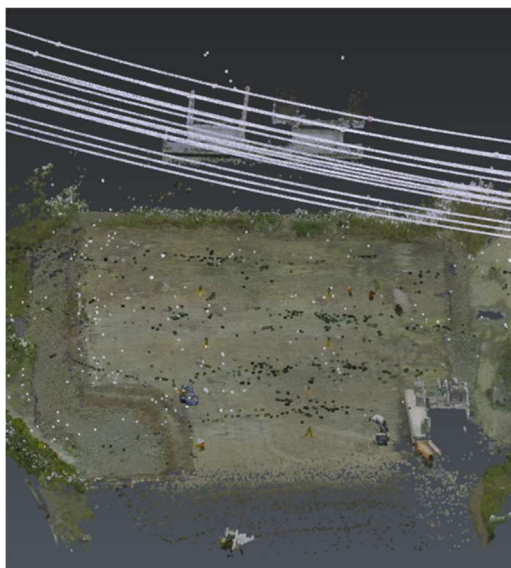
Obrázek 7.6 - Ukázka funkce oříznutí mračen bodů

Následně jsme pomocí funkce Noise, která dokáže automatizovaně identifikovat šum v mračnu bodů, vyhledali všechny šumové prvky těchto mračen bodů. Šum může vzniknout například díky pohybujícím se objektům nebo špatným odrazům paprsku. V našem případě byla většina šumu vytvořena vlivem aktivního pohybu na stavbě ať už aut, nebo lidí.

Další použitá funkce v tomto softwaru byla funkce split Ground points. Pomocí předem zvoleného sklonu svahu tato funkce detekuje objekty, které se nenachází v tomto úhlovém rozpětí. Sklon svahu byl definován na 50 stupňů. Využitím této funkce rozdělíme mračno na prvky, které se nachází v mém zvoleném úhlu od roviny, a na prvky, které se v něm nenachází. Tím jsme schopní filtrovat objekty nežádoucí pro výsledný výpočet kubatur. Jako příklad lze uvést auto, které jsme často používali při měření na vhodně zvoleném místě, abychom zlepšili možnosti propojení mračen bodů pomocí cloud to cloud. Dalším takovým prvkem byly naše naskenované stativy s aparaturou nebo s vlčovacími body. Jelikož mračno už bylo zasazeno do souřadnicového systému, nebylo žádoucí, aby se nacházeli ve výsledném modelu.



Obrázek 7.7 - Funkce *split ground points*

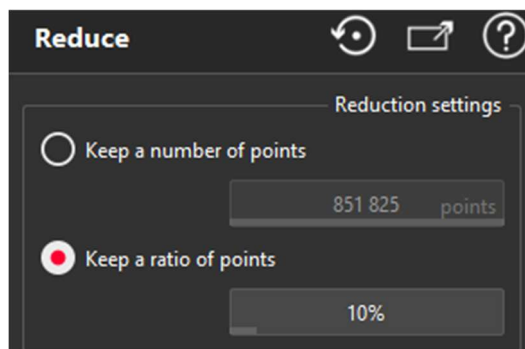


Obrázek 7.8 - Mračno bodů před využitím funkce *split ground points*



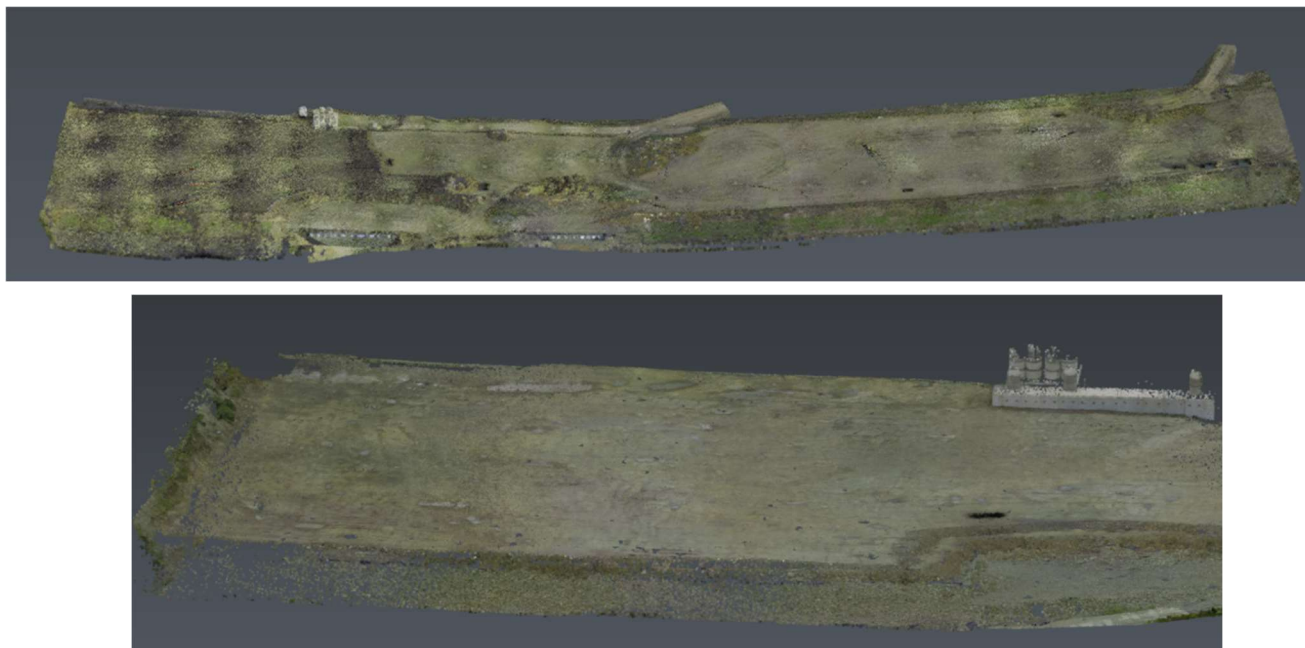
Obrázek 7.9 - Mračno bodů po využití funkce *split ground points*

Po vyčištění mračen bodů od nežádoucích vlivů a objektů bylo mračno zředěno, díky čemuž jsme usnadnili převod do dalšího softwaru. Práce s daty o takových objemech byla velmi náročná. Všechna mračna byla zředěna na stejnou procentuální hodnotu původního mračna, a to na 5 % z původního celkového objemu mračna. Během ředění mračna byly průběžně počítány pomocné kubatury, abychom zjistili, kdy už ředění dosáhlo hodnot ovlivňujících náš výpočet. Při přílišném zředění mračna bodů může dojít ke špatnému zákresu hran, a tudíž i ke špatnému výpočtu kubatur.



Obrázek 7.10 - Redukce velikosti mračen bodů

Následovalo vyexportování hotových mračen bodů ve formátu .las. Časová náročnost práce v tomto softwaru byla v rámci jedné etapy: 6-8 hodin import, následné práce trvaly 6 hodin a výsledný export už byl časově zanedbatelný díky zředění mračen bodů.



Obrázek 7.11 - Ukázka mračen bodů v programu Leica Cyclone 3DR



Obrázek 7.12 – Ukázky jednotlivých etap mračen bodů v programu Leica Cyclone 3DR

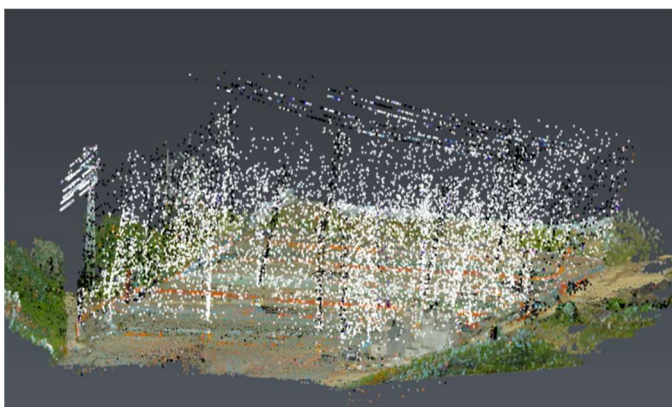
7.1.2 Skenování pomocí SLAM skeneru

Přístroj BLK2Go je navržen primárně na měření interiérů nebo projektů s dostatečným množstvím okolních objektů. Ovšem u naší diplomové práce byl testován na liniové stavbě, na které bylo minimum okolních objektů.

Ihned po importu měřených skenů do softwaru Leica Cyclon 360 bylo zjištěno, že tato metoda není vhodná pro použití ve venkovním prostředí s minimem objektů. Ihned při pohledové kontrole importovaného mračna bodů bylo zjištěno množství chyb. Na mračnu bodů bylo znatelné například zřejmé zdvojení jednotlivých objektů. Pokud by zdvojené objekty byly pouze mezi jednotlivými stanovisky, problém by byl dále řešitelný ať už použitím jiné metodiky měření nebo v rámci zpracování. Tyto zdvojené objekty byly nicméně pozorovány i v rámci jednoho stanoviska, čímž nám bylo znemožněno s mračny dále pracovat. Je tedy nutné prohlásit tuto metodu jako nevhodnou pro měření projektů takového typu, jako na kterém náš test probíhal.

Ideální možností skenování takového objektu pomocí tohoto přístroje by bylo vybavit objekt dalšími objekty, například auty, čehož ale v našem případě nebylo dosaženo.

Při skenování vnitřních prostor nebo dodatečném skenování míst, která nebyla zachycena na statickém skeneru, se přístroj prokázal jako velmi dobrý a užitečný. V ideálním případě by se tedy skenování mělo skládat ze skenování statickým skenerem a dodatečného skenování pomocí přístroje BLK2GO.



Obrázek 7.13 - Mračno bodů ze skenování SLAM skenerem



Obrázek 7.14 - Zdvojení objektů v mračnu bodů ze SLAM skeneru

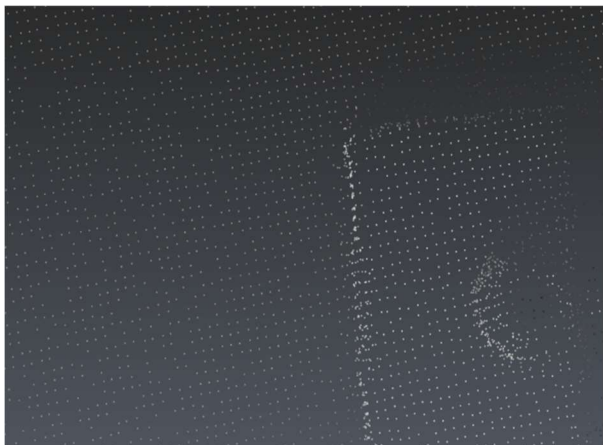
7.2 ZPRACOVÁNÍ MRAČEN BODŮ Z FOTOGRAMMETRICKÉHO SNÍMKOVÁNÍ

Fotogrammetrické snímkování bylo zpracovááno ve firmě STRABAG. Snímkování bylo zpracováno v programu Propeller, což je software uzpůsobený přímo na práci s fotogrammetrickou metodou. Od této firmy jsme získali data o výpočtu a následná vyhotovená mračna bodů. Byla převzata pouze mračna bodů odpovídající druhé a čtvrté etapě skenování, jelikož úsek byl nalétáván pouze v tomto časovém rozmezí.

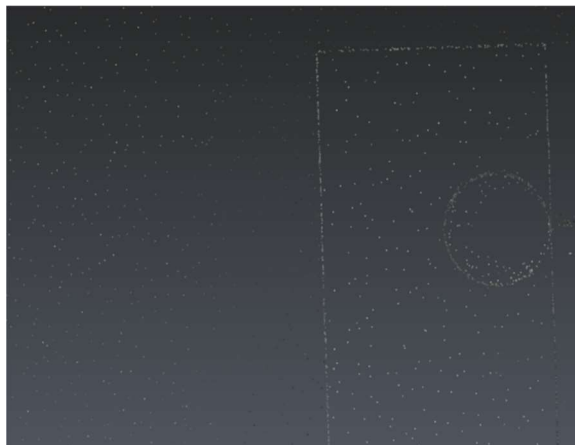
Převzatá mračna bodů byla nahrána do programu Leica Cyclone 3DR. Bylo zapotřebí mračna polohově transformovat do naší souřadnicové sítě, abychom se polohově neodlišovali od dalších měření. Výškové transformace byly řešeny až později v programu atlas DMT. Převzatá mračna bodů byla již firmou STRABAG vyčištěna od nežádoucích vlivů, jako je šum nebo nevhodné objekty.

Bylo tedy nezbytné pouze oříznout transformované mračno na požadovaný tvar, abychom zachovali souvislost mezi jednotlivými metodami. Následovalo zředění mračen bodů na menší velikost, přičemž byl opět kladen důraz na to, abychom zachovali všechny hrany potřebné pro výpočet kubatur. Mračna byla rovněž vyexportována s příponou .las.

Časová náročnost práce v programu činila 3-4 hodiny a po započtení doby importu se jednalo o 10 hodin pro každou etapu. V softwaru Propeller bylo toto měření zpracovááno za 2 pracovní dny, tedy 16 hodin.



Obrázek 7.15 - Mračno bodů z fotogrammetrického snímkování



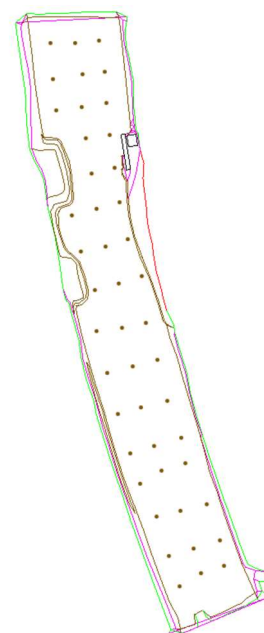
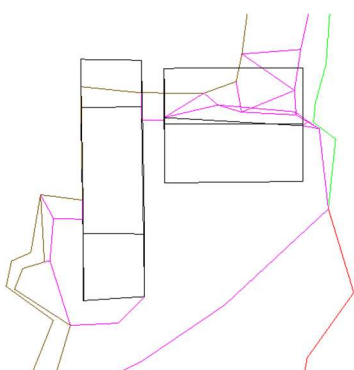
Obrázek 7.16- Mračno bodů z laserového skenování

7.3 ZPRACOVÁNÍ DAT METODY GNSS RTK

Zpracování měření z technologie GNSS probíhala v softwaru Microstation Vi8 Select Series. Na území našeho zájmu byly zaměřeny body profilů a doplňujících hran. Následně bylo zapotřebí tyto zaměřené souřadnice naimportovat do softwaru Microstation Vi8 Select Series. Import byl proveden do zakládajícího výkresu ve verzi 3D. Měřené body byly dále pospojovány liniemi s pomocí kódů tvořených při měření a také s pomocí vizuální paměti.

Při spojování kresby byly dokresleny betonové objekty, které se na stavbě nacházely. Ty byly změřeny buď právě metodou RTK, nebo měřickým pásmem v případě takových míst, kde nám vypadal signál družic.

Kresba byla dále ořezána na požadovaný tvar tak, aby odpovídala tvaru zaměřeného pomocí laserového skenování. Časová náročnost této metody zpracování se pohybuje okolo 2-3 pracovních hodin. Výstupem byla potom vektorová kresba s body na vrcholku násypu, které nebyly spojovány pomocí linií, nýbrž byly ponechány pro přesnější tvorbu 3D modelu v programu Atlas. Bylo zapotřebí vyexportovat kresbu ve formátu DXF, aby s ní bylo možné dále pracovat v programu Atlas DMT. Pomocí této metody bylo vypracováno 5 kreseb z 5 etap.



Obrázek 7.17 - Vykreslení betonové konstrukce pomocí vektorové kresby

Obrázek 7.18 - Vektorová kresba

7.4 TVORBA 3D MODELŮ V PROGRAMU ATLAS DMT

7.4.1 Tvorba modelů z mračen bodů

Z předešlého zpracování jsme měli k dispozici 7 mračen bodů ve formátu .las, které bylo potřeba zpracovat na modely terénu. Konkrétně se jednalo o 5 etap statického laserového skenování a 2 etapy zpracované pomocí fotogrammetrického náletu. Etapy z fotogrammetrické metody byly etapy odpovídající etapě 2 a etapě 4 v rámci statického skenování.

Atlas DMT je program vhodný pro tvorbu 3D modelů z různých typů dat a následnou práci s nimi. Atlas DMT nám umožňuje vytvořit 3 typy digitálních modelů terénu (DMT), a to konkrétně model TINový hladký, model TINový lomený a model bodový. Abychom byli schopni vypočítat kubatury, bylo zapotřebí použít některý z typů TINového modelu. Bodový model nám totiž neumožňuje výpočet kubatur z důvodu absence ploch, díky kterým je možno kubatury určit. Hlavním rozdílem mezi hladkým a lomeným TINovým modelem je jejich způsob výpočtu trojúhelníku. V hladkém modelu jsou trojúhelníky aproximovány tak, aby zde docházelo k plynulejším přechodům mezi jednotlivými trojúhelníky, a tudíž jsou měřená data upravována do vizuálně lepší podoby. Naproti tomu lomený TINový model ponechává měřená data nedotčena a počítá trojúhelníky přímo z nich, čímž zachovává měřené nerovnosti, které by hladký model zkreslil. Díky této znalosti bylo třeba usoudit jako nejlepší možnost při výpočtu kubatur použít TINové lomené modely.



Obrázek 7.19 - 3D model terénu jednotlivých etap v rámci laserového skenování

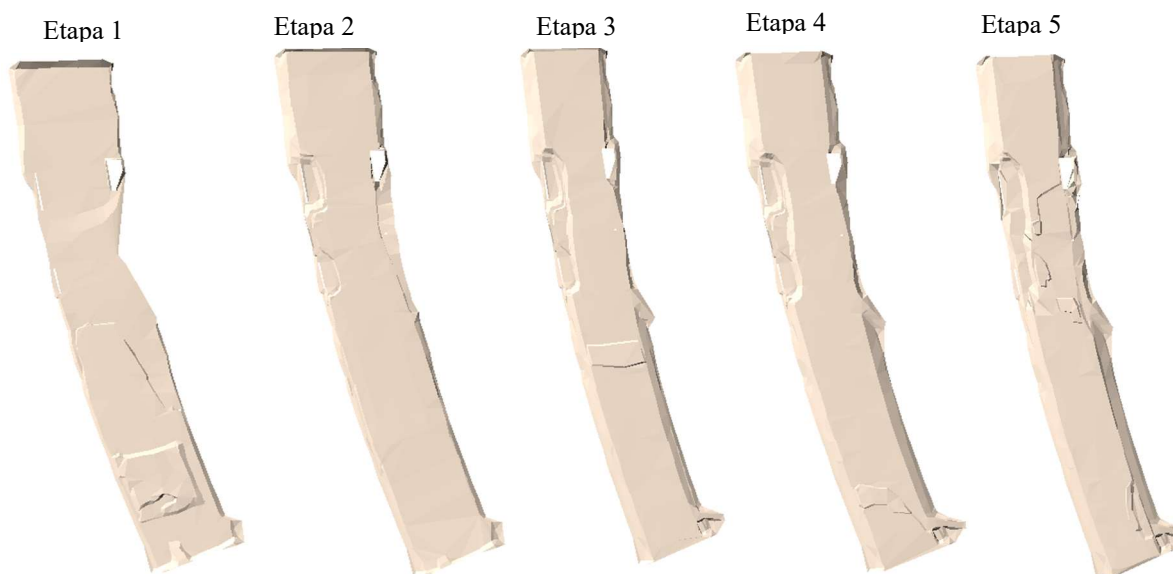
Z mračen bodů ve formátu .las byly pomocí funkce generace modelů terénu vytvořeny TINové lomené modely terénu. Celkem bylo vytvořeno 7 digitálních modelů terénu z fotogrammetrické metody a z metody sběru dat pomocí statického laserového skenu.

7.4.2 Tvorba modelů z vektorové kresby

Ze zpracování pomocí technologie GNSS bylo vytvořeno 5 vektorových kreseb odpovídajících 5 etapám měření pomocí statického laserového skeneru. Tyto zpracované kresby bylo zapotřebí nejprve naimportovat pomocí formátu DXF, který umožňuje import vektorové kresby a bodů přímo do Atlasu. Následně bylo zapotřebí vybrat všechny prvky kresby. Poté jsme pomocí funkce generace modelů terénu z prvků obsažených v půdoryse vygenerovali digitální modely terénu.

Stejně jako v případě laserových skenů a fotogrammetrie byl i zde opět vybrán TINový model lomený, který zajišťuje lepší vykreslení, dbáme-li na neměnnost měřených dat.

Jako další krok byla použita funkce vložit ostrov, což je funkce, která umožní vynechat část modelu terénu z našeho zkoumaného modelu terénu. Tato funkce byla použita na betonové konstrukce, které se nepočítají do výsledných kubatur, jelikož se nejedná o zemní těleso. Tyto konstrukce byly například studny, revizní šachty anebo gabióny. Tyto objekty byly vynechány ze všech modelů terénu pomocí předem definovaných stejných souřadnic pro všechny modely. Pro objektivní posouzení byly jednotlivé souřadnice upraveny tak, aby zachovávaly stejnou kubaturu ve všech třech typech měření stejnou.



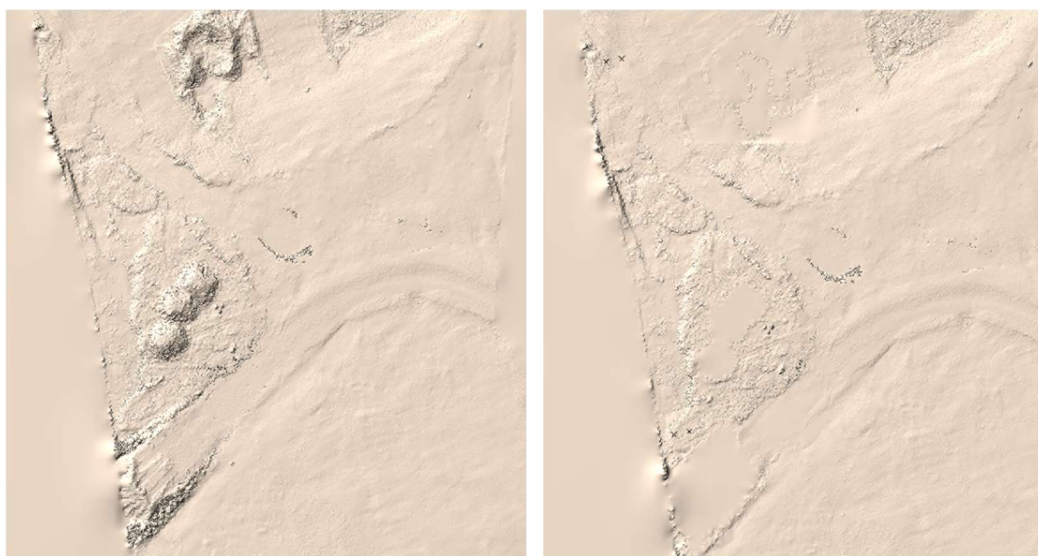
Obrázek 7.20 - 3D modely terénu jednotlivých etap v rámci metody GNSS RTK

8 PRÁCE S MODELÝ A VÝPOČET KUBATUR

8.1 ODDĚLENÍ ODLEHLÝCH HODNOT

Celkem bylo vytvořeno 12 digitálních modelů terénu. Konkrétně se jednalo o 5 etap modelů terénu z laserového statického skenování pomocí přístroje Leica RTC360. Další 5 modelů bylo vytvořeno pomocí měření GNSS. Dva modely byly vytvořeny z fotogrammetrické metody. Tyto modely odpovídají 2. a 4. etapě laserového skenování a měření pomocí technologie GNSS.

Abychom zajistili správnost výpočtu jednotlivých kubatur, museli jsme odfiltrovat odlehlé hodnoty na jednotlivých modelech terénu. Tyto odlehlé hodnoty představovaly objekty, které nebyly zaměřeny pomocí GNSS, zato na skeneru a fotogrammetrii zachyceny byly. Jedná se o některé hromady hlíny, které nebyly zaměřené technologií GNSS. K jejich zaměření nedošlo proto, že byly vzhledem k celkovému objektu nevýznamné. Jelikož byl objekt stále v provozu, velmi často se zde nacházely hromady nářadí, které se však podařilo úspěšně odfiltrovat již při tvorbě mračen bodů, a hromady hlíny, které bylo třeba odfiltrovat nyní pro dosažení co nejlepší přesnosti v rámci rozdílů použitých metod. Takto promazaná byla pouze odlehlá místa na skenech. Ostatní místa nebyla upravována za účelem zachování rozdílu mezi generalizací GNSS a skenováním. Tento rozdíl je důležitý pro výsledné porovnání kubatur a jednotlivých metod z hlediska přesnosti.



Obrázek 8.1 - Ukázka filtrace odlehlých hodnot

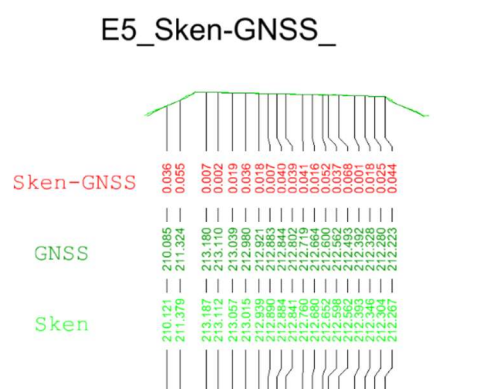
8.2 VÝŠKOVÉ POROVNÁNÍ MODELŮ

Po odfiltrování odlehlých hodnot bylo zapotřebí vyřešit výškový rozdíl mezi jednotlivými typy měření. Polohově byly tyto problémy vyřešeny transformací při tvorbě mračen, a navíc polohové rozdíly nedosahovaly takových hodnot jako rozdíly výškové.

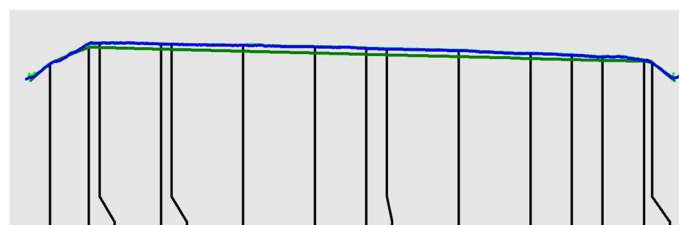
Před vyřešením tohoto problému bylo zapotřebí spočítat jednotlivé kubatury, abychom následně získali porovnání toho, co se změnilo díky výškovému posunu jednotlivých modelů. Byly spočítány všechny možné kubatury v rámci jednotlivých metod i v rámci stejných metod, kde byly metody porovnávány na stejných rozdílech v rámci několika etap.

Při měření pomocí technologie GNSS byly v rámci zaměřování též přiměřeny body naší měřické sítě, abychom viděli, jakých výškových rozdílů dosahují jednotlivé etapy při měření GNSS. Následoval výpočet výškového rozdílu odečtením výšek z měření GNSS a výšek naší měřické sítě. Tyto určené rozdíly se lišily v rámci každé měřené etapy, tudíž díky tomuto poznatku víme, že nemůžeme předpokládat stabilní odchylku při měření pomocí GNSS. Tato chyba byla konstantní pouze v řádech, ovšem její hodnoty se měnily v rámci 1-2 cm. Ze zjištěných kubatur víme, že tato chyba odpovídá zhruba 1000 metrům krychlovým, což odpovídá 100 nákladních aut.

Pro ověření této chyby byly využity sestavy řezů. Pomocí této funkce v programu Atlas DMT bylo vytvořeno 12 sestav příčných řezů nad 2 modely různých metod měření v rámci stejné etapy. Řezy byly takovýmto způsobem vytvořeny nad všemi měřeními v rámci stejné etapy.



Obrázek 8.2 - Ukázka příčných řezů



Obrázek 8.3 - Detail příčných řezů

Pomocí takto připravených sestav řezů bylo možno zkontrolovat výškovou odchylku mezi dvěma typy měření v rámci jedné časové etapy. V každém takovém řezu bylo určeno minimálně 15 hodnot rozdílů mezi dvěma metodami měření. Takto bylo získáno více než 180 hodnot rozdílů, které tvořily vhodný výběrový soubor pro výpočet výškového rozdílu jednotlivých metod.

Stejným způsobem byla testována i metoda fotogrammetrického sběru dat. Jelikož vlíčovací body pro fotogrammetrickou metodu byly zaměřeny pomocí metody RTK technologie GNSS, obsahovaly taktéž výškovou nepřesnost, kterou bylo nutno vyřešit pro lepší porovnání metod.

Z výběrových souborů byly vypočteny výškové odchylky metod v rámci jedné etapy. Dále byly výsledky tohoto výpočtu porovnány s přímým měřením v terénu, a tedy s hodnotami výškových odchylek získaných při měření. Tyto odchylky byly změřeny pouze pro GNSS. Při porovnání bylo zjištěno, že odchylky vypočtené ze sestav řezů a odchylky měřené v terénu dosahují přibližně stejných hodnot. Na základě toho jsme mohli vyvodit jednotlivé posuny pro každé měření GNSS a pořizování snímků fotogrammetrickou metodu.

Tab. 8.1 - Výškové odchylky GNSS a Fotogrammetrického měření

Model	Výšková odchylka [m]
GNSS_E1	0,031
GNSS_E2	0,018
GNSS_E3	0,021
GNSS_E4	0,009
GNSS_E5	0,011
FTG_E2	0,010
FTG_E4	-0,025

Pomocí těchto hodnot byly následně modely technologie GNSS a fotogrammetrického snímkování přetransformovány tak, abychom modely – pouze výškově – celé posunuli na požadovanou hodnotu.

X Y Z ... vstupní	X' Y' Z' ... cílové
X' = 1	*X + 0 *Y + 0 *Z + 0
Y' = 0	*X + 1 *Y + 0 *Z + 0
Z' = 0	*X + 0 *Y + 1 *Z + +0.026

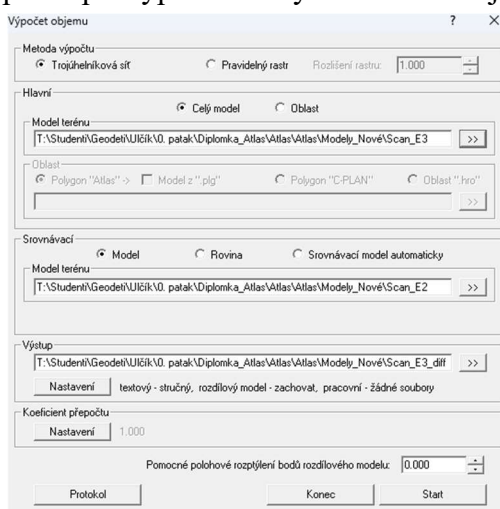
Obrázek 8.4 - Tabulka transformačních parametrů v programu Atlas DMT

8.3 VÝPOČTY KUBATUR

Výpočty kubatur byly prováděny v programu Atlas DMT. Funkce, díky které je možné vypočítat kubatury z rozdílů dvou modelů, je funkce výpočet objemu. Tato funkce spočívá v porovnání 2 modelů terénu a jejich trojúhelníkové sítě. Program vytváří výškové rozdíly v místech, kde se překrývají jejich trojúhelníkové sítě, a tyto rozdíly následně integruje do formy objemů. V podstatě lze říci, že Atlas DMT rozděluje společnou oblast obou modelů na malé trojúhelníkové buňky a pro každou z nich vypočítá průměrnou výškovou odchylku mezi „horní“ a „dolní“ plochou. Následně program vynásobí průměrnou výšku s plochou, a výsledkem je finální objem jednotlivé trojúhelníkové buňky. [23]

V našem případě byly objemy počítány 4x. První výpočet proběhl při ředění mračen bodů, abychom mračna nezředili příliš, jelikož by se tím změnil samotný výpočet. Následoval hrubý výpočet kubatur před odstraňováním odlehlých hodnot. V rámci třetího výpočtu již byly počítány výsledné kubatury uvedené v této diplomové práci. Jednalo se o kubatury před výškovým srovnáním modelů, abychom viděli, jak se změny objemy poté, co výškově porovnáme jednotlivé modely. Poslední výpočet kubatur proběhl po výškovém vyrovnání modelů terénu. Tento výpočet lze považovat za finální.

Objemy byly spočítány mezi všemi modely v rámci jednotlivých etap, abychom mohli vidět porovnání jednotlivých metod. Následně byl proveden výpočet všech možných kombinací kubatur v rámci jedné metody, abychom zjistili, jakých odchylek se můžeme dopustit při výpočtu různých kombinací jednotlivých etap.



Obrázek 8.5 - Funkce výpočet objemu

VÝSLEDNÝ OBJEM :		
V[+] =		88093.25
V[-] =		-231.72
V[+] + V[-] =		87861.53
abs(V[+]) + abs(V[-]) =		88324.96
CELKOVÁ PLOCHA :		
A[+] =		25337.92
A[-] =		655.22
A[0] =		0.00

		25993.14
POVRCH MODELU :		
Hlavní m.	S[celk] =	27805.66
Srovnávací m.	S[celk] =	28347.86

Obrázek 8.6 - Ukázka vypočtených kubatur

9 VYHODNOCENÍ

9.1 PREZENTACE VÝSLEDKŮ

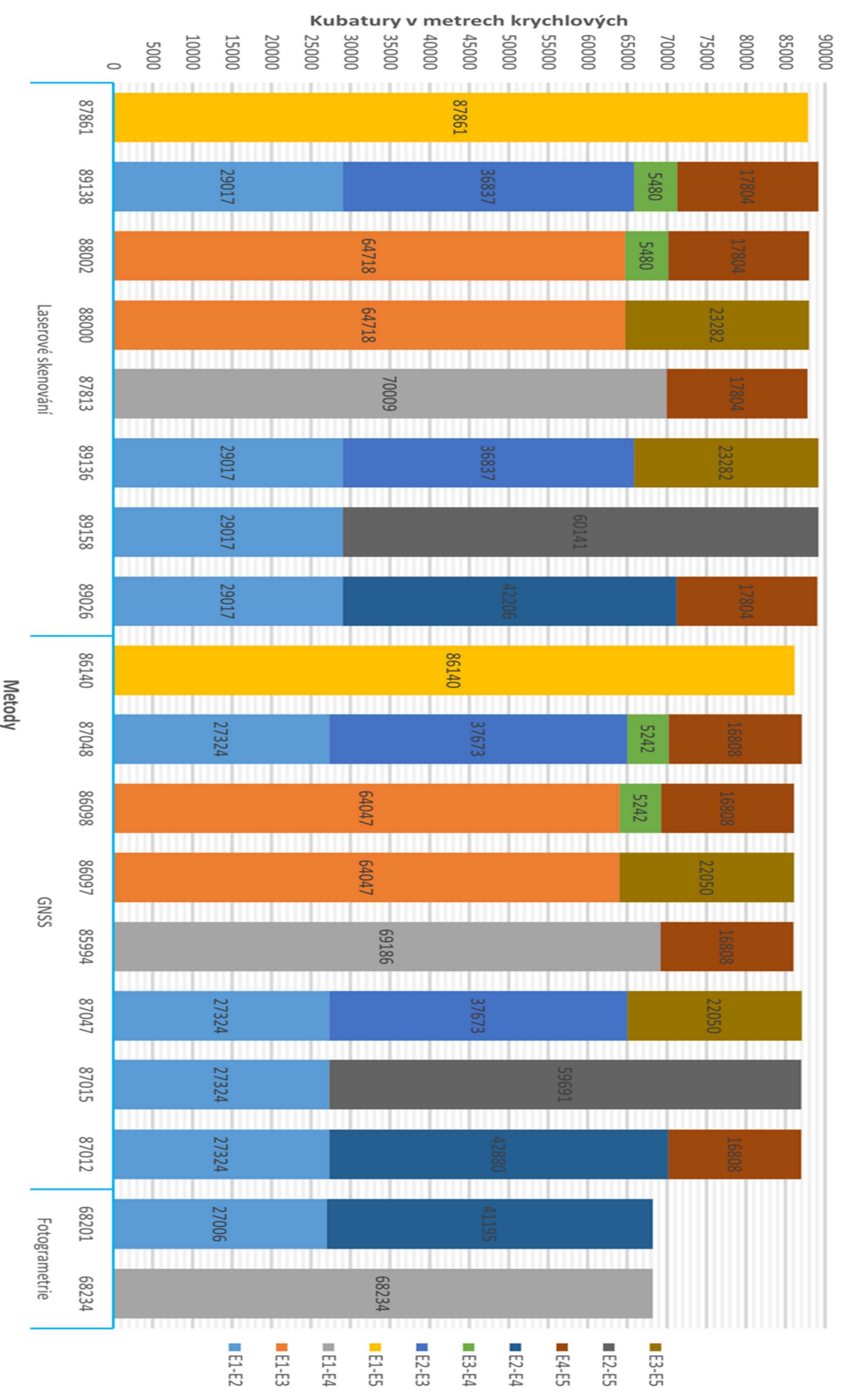
Po správném výškovém porovnání modelů a výpočtu finálních kubatur je zapotřebí správně interpretovat výsledky získaných hodnot. V rámci výškového porovnání došlo k výraznému zlepšení odchylek mezi jednotlivými metodami. Můžeme konstatovat, že výškové porovnání je nezbytnou součástí při porovnávání metod a mělo by být bráno v potaz i při měření v terénu pomocí technologie GNSS. Jinými slovy, při měření kubatur v terénu je zapotřebí mít zaměřené body navazující na měřickou síť, abychom dosáhli v kubaturách potřebné přesnosti. V opačném případě pak dochází k závažným výškovým odchylkám.

Tab. 9.1 - Porovnání použitých metod v rámci jednotlivých etap

Provnání metod v rámci stejných etap [m ³]			
Etapa	Metoda	Před výškovým porovnáním	Po výškovém porovnání
E1	Skenování	1164	356
	GNSS		
E2	Skenování	2554	2074
	GNSS		
	Fotogrametrie	273	54
	GNSS		
	Skenování	2290	2025
	Fotogrametrie		
E3	Skenování	1935	1368
	GNSS		
E4	Skenování	1762	1519
	GNSS		
	Fotogrametrie	-596	522
	GNSS		
	Skenování	2461	1739
	Fotogrametrie		
E5	Skenování	2949	2653
	GNSS		

Příložená tabulka znázorňuje porovnání jednotlivých metod v rámci jednotlivých etap. K hodnotám bylo dospěno výpočtem kubatur ze 2 modelů terénu, které byly pořízeny ve stejnou dobu rozdílnými metodami. Tabulka znázorňuje číselné vyjádření tohoto rozdílu. Dále zde také můžeme vidět porovnání kubického rozdílu před výškovým srovnáním modelů a po něm.

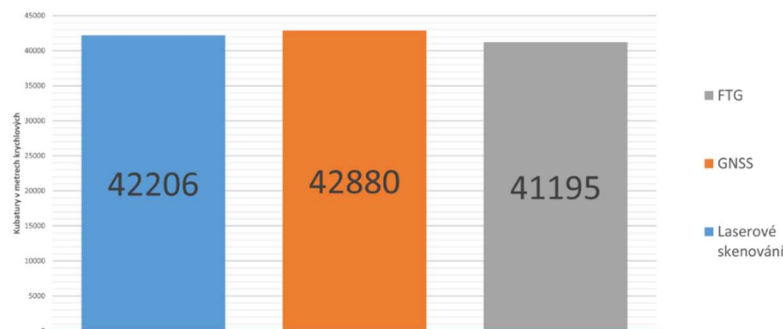
Možnosti výpočtů kubatur



Na předchozím grafickém znázornění můžeme vidět výpočet kubatur v rámci celé sledované doby. Jedná se o kubatury nasypané mezi měření první a páté etapy. Jsou zde znázorněny všechny možnosti výpočtu této kubatury za tento sledovaný časový úsek. Jelikož se v praxi převážně používá měření na začátku a na konci stavby, můžeme výslednou kubaturu označit jako rozdíl první a páté etapy měření. Výpočet byl vytvořen i ze všech možných variant měření. Na tom můžeme pozorovat nerovnoměrnost při výpočtu z různých kombinací takzvaných meziměření. Tato nerovnoměrnost je dána softwarovým výpočtem TINového modelu. Při výpočtu kubatur je počítána průměrná výška trojúhelníků a následně objem trojúhelníku. Tento výpočet se liší v případě, že jsou v něm meziměření zahrnuta, jelikož polohy trojúhelníku nejsou stejné v každé etapě měření.

Můžeme tedy říct, že výsledná kubatura z laserového skenování je 87861 kubických metrů, ovšem s chybovostí 952 kubických metrů, což odpovídá 1,07 % řešené kubatury. U technologie GNSS můžeme hovořit o výsledné kubatuře 86140 kubických metrů s chybovostí 676 kubických metrů, což odpovídá chybě 0,78 %. Do této statistiky je také potřeba zahrnout chybu z generalizace v rámci měření GNSS, jelikož měření GNSS je oproti skenování generalizováno. Skenování dokáže zachytit každý útvar na sledovaném objektu, zatímco u měření pomocí GNSS toho není možné dosáhnout. Výsledný rozdíl mezi GNSS a laserovým skenováním je dán právě generalizací měření GNSS. Tato odchylka odpovídá 1960 kubických metrů, což odpovídá 2,21 % chyby. Výsledná chyba měření GNSS by se dala shrnout jako 2,99 % z řešeného objemu.

V rámci fotogrammetrického snímkování, jelikož zde byly měřeny pouze dvě etapy, musíme vycházet z dat, která byla omezena těmito etapami. Konkrétně se jedná o etapu 2 a etapu 4. Budeme uvažovat druhou etapu jako etapu výchozí a etapu 4 jako etapu konečnou.



Obrázek 9.1 - Porovnání fotogrammetrické metody s laserovým skenováním a technologií GNSS

V rámci této metody sběru dat nemůžeme vypočítat přesnost důsledkem absencí meziměření. Výsledná kubatura uvažována pro tuto metodu je 41195 kubických metrů. V porovnání s laserovým skenováním je zřejmá odchylka 1011 kubických metrů, což odpovídá 2,40 % z výsledného objemu měření pomocí laserovým skenováním. Při porovnání s technologií GNSS je zřejmá odchylka 1685 kubických metrů, z čehož vyplývá chyba 3,93 %. Chybu můžeme zdůvodnit absencí navazujícího měření na měřickou síť, a tudíž nepřesnost výškového porovnání, jelikož výšková chyba byla vypočtena pouze ze sestav řezu, tudíž byla významně ovlivněna náhodnými vlivy.

9.2 HODNOCENÍ ČASOVÉ NÁROČNOSTI

Z hlediska časové náročnosti musíme brát v potaz povahu jednotlivých měření a samozřejmě podmínky stavby. Při laserovém skenování tím bylo nezbytné zvětšit množství skenovaných dat, což se nám projevilo na výsledné časové náročnosti. Do těchto skutečností nezapočítáváme časovou náročnost při tvorbě měřické sítě, jelikož ta byla využita i pro laserové skenování i pro měření pomocí GNSS. Tuto časovou náročnost tedy nezahrnujeme do výsledných časů.

Zaměření statickým laserovým skenerem trvala 1,5 dní což odpovídá 11-13 pracovním hodinám. Zpracovatelské práce včetně importů a exportů v programech Leica Cyclon 360 a 3DR bychom mohli shrnout do 36–40 pracovních hodin. Pokud bychom neuvažovali čas importu a exportu, jelikož během té doby je možné provádět zároveň jiné práce, časová náročnost zpracování jedné etapy v těchto programech by zabrala 12-14 hodin. Do zpracovatelských hodin nemůžeme zahrnout redukování odlehlých hodnot, jelikož tuto fázi bychom při běžném výpočtu vynechali. Je ovšem potřeba ji mít na paměti, abychom dosáhli co nejlepších výsledků. Časová náročnost v programu Atlas byla, bez zahrnutí této opravy, 1-2 hodiny. Výsledná časová náročnost se pohybuje mezi 48–55 hodinami, což odpovídá více než týdnu práce. Tato hodnota obsahuje i čas potřebný na import a export. Musíme taktéž brát v potaz, že při výpočtu kubatur bychom potřebovali tento čas vynásobit dvěma, abychom získali měření před budováním násypu a po něm.

Časová náročnost zpracování GNSS měření v rámci jedné etapy měření by se pohybovala okolo 8-9 pracovních hodin, což odpovídá jednomu pracovnímu dni. V tomto časovém údaji je zahrnutý i čas nutný k vyřešení výškových odchylek, jelikož i při

běžném měření se budou tyto odchylky objevovat a je proto nutné s nimi do budoucna počítat. V tomto případě je čas importu a exportu zanedbatelný. Musíme však rovněž mít na paměti, že takto vynaložený časový úsek je pouze pro jednu etapu měření, tudíž pro výpočet kubatur z rozdílů dvou měření bychom museli tento časový údaj opět vynásobit dvěma.

V rámci fotogrammetrického snímkování jsme nezískali přesná data o délce importu a exportu z programu Propeller, avšak známe časovou náročnost při zpracování v tomto programu a následně i v programu Leica Cyclon 3DR a Atlas DMT. Časová náročnost práce v programu Propeller odpovídá dvěma pracovním dům, tedy 16 hodinám. Práce v programu Leica Cyclone 3DR byl i s časem importu, který trval 6 hodin, a zpracovatelské práce 3-4 pracovní hodiny, jelikož nebylo potřebné mračna čistit od nežádoucích vlivů. Následná práce v programu Atlas trvala stejně dlouho jako v případě laserového skenování 1-2 hodiny. Časová náročnost této metody je tedy 26-28 hodin. Tento údaj nezahrnuje časy importu a exportu v rámci programu Propeller, ve kterém byly snímky zpracovávány firmou STRABAG. Dále také chybí časová náročnost samotného fotogrammetrického náletu, jelikož tento časový údaj nebyl od firmy STRABAG znám.

Tab. 9.2 - Hodnocení časové náročnosti metod

Hodnocení časové náročnosti jedné etapy v rámci jednotlivých metod v hodinách										
Metoda	Měření	Import	Export	Propeller	Microstation	Leica Cyclone 360	Leica Cyclone 3DR	Atlas DMT	Celkem	Převedeno na pracovní dny (8 hodin)
Skenování	12	12	6			6	6	2	44	5,5
Fotogrammetrie		6		16			4	2	28	3,5
GNSS	2				3			3	8	1,0

9.3 HODNOCENÍ EFEKTIVNOSTI

Míru efektivity lze vyjádřit jako poměr časové náročnosti ku výsledné přesnosti. Je však nutno mít na paměti mezikroky prováděné v každé metodě měření, jelikož například GNSS vyžaduje výškové srovnání, naproti tomu laserové skenování vyžaduje vyčištění mračen bodů od šumu a nežádoucích vlivů. Vycházíme-li ze získaných dat, můžeme určit jako nejefektivnější metodu měření GNSS, ovšem s menší přesností než laserové skenování a fotogrammetrické snímkování.

10 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo posoudit metody Statické a SLAM laserové skenování, fotogrammetrickou metodu a technologii GNSS. V rámci posouzení bylo zjištěno, že metoda sběru dat pomocí laserového SLAM skeneru se ukázala jako nepoužitelná v našich měřických podmínkách.

Jako nejlepší metodou z hlediska přesnosti hodnotíme metodu statického laserového skenování, ve které došlo k nejmenší celkové odchylce v rámci měřené kubatury, a to jen 1,07 % chybovosti. To představuje 952 kubických metrů, což odpovídá množství zeminy, které je nutné přepravit cca 95 nákladními soupravami Tatra, při jejich naložení množstvím zeminy o objemu 10 kubických metrů. Z hlediska času zpracování se nejefektivněji prokázala metoda měření pomocí technologie GNSS, konkrétně metodou RTK. Její výsledné časové zpracování trvalo pouze jeden pracovní den, tedy 8-9 hodin. Je zde ovšem nutné počítat s nižší přesností důsledkem výškové odchylky jednotlivých měření na objektu. Metoda fotogrammetrického snímkování se projevila jako přesnější než technologie GNSS, zato však méně přesná než laserové skenování. Co se týče časové náročnosti, opět se pohybuje mezi těmito metodami.

Nejlepší metodu pro zaměření kubatur nelze z dostupných dat určit, jelikož každá metoda má své výhody a nevýhody. Metoda laserového skenování vyniká přesností a detailností zaměření, protože se na mračnu bodů zobrazí všechny objekty. Technologie GNSS zase vyniká rychlostí, což může být často považováno za rozhodující faktor, ovšem z hlediska přesnosti je jednoznačně nejhorší z námi posuzovaných metod. Metoda fotogrammetrického snímkování taktéž nedosáhla takové přesnosti jako laserové skenování z několika možných důvodů.

Při výběru metody na výpočet kubatury je tedy nutné si stanovit, jak přesně tyto kubatury požadujeme a v jakém časovém úseku.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Křemen, T. a kol. (2015). Geodézie v inženýrské praxi. Praha: ČVUT.
- [2] ČÚZK – CZEPOS – Síť permanentních GNSS stanic [online] 2023. Dostupné z:
<https://www.cuzk.cz/CZEPOS.cz>
- [3] Satelitní systémy [online] 2025. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Satelitní_navigace
- [4] Böhm, J., Janata, T., & Merta, M. (2017). 3D laserové skenování v inženýrské geodézii. Brno: VUT FAST.
- [5] ŠTRONER, M., POSPÍŠIL, J., KOSKA, B., KŘEMEN, T., URBAN, R., SMÍTKA, V., TRŠÁK, P – 3D skenovací systémy. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2013, ISBN 978-80-01-05371-3
- [6] Vlčovací bod [online] 2025. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Vlčovací_bod
- [7] Leica Geosystems [online] 2025. Dostupné z:
<https://leica-geosystems.com>
- [8] Atlas DMT – uživatelský manuál a příklady výpočtů [online] 2025. Dostupné z:
https://www.atlasltd.cz/wp-content/uploads/2024/08/KresCom_24_04_1.pdf
- [9] Lava scan – Laserové skenování [online] 2025. Dostupné z:
<https://www.lava-scan.cz/3d-laserove-skenovani>
- [10] Civil 3D [online] 2025. Dostupné z:
<https://www.civil3d.cz/2013/10/jak-na-mracna-bodu.html>
- [11] Kraus, Karel. Fotogrammetrie. 4. vydání. VUT Brno, 2007.
- [12] Gefos-leica [online] 2025. [cit. 1.4.2025]. Dostupné z:
<https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/geodeticke-pristroje/totalni-stanice/ts16>

- [13] Paul L. Wolf, Charles D. Ghilani. Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics. Pearson, 2014. – Detailní popis výpočtu objemů pomocí profilových řezů i TIN modelů.
- [14] GeoWin [online] 2025. Dostupné z:
<https://www.geowin.cz/Help/DTM-CZ/html/kubatury.htm>
- [15] Atlas DMT modul objem [online] 2025. Dostupné z:
<https://www.atlasltd.cz/dmt/produkty/modul-objem/>
- [16] Metody výpočtů kubatur [online] 2025. Dostupné z:
https://www.stavarna.com/download2/3382_4374_cs_gev_dal_2_11_kubatury.pdf
- [17] Mapy.cz [online]. Dostupné z:
<https://mapy.cz/zakladni?source=traf&id=5074986&x=17.4375625&y=49.4312185&z=12>
- [18] Stavba D1 0136 Říkovice – Přerov [online] 2024. [cit. 1.4.2025]. Dostupné z:
https://apdos.roadmedia.cz/Upload/Stavby/8/infoletak_d1-0136-rikovice-prerov.pdf?t=2022-08-17%2011:28:05.065
- [19] W-technika [online] 2025. Dostupné z:
<https://w-technika.cz/products/dji-phantom-4-rtk>
- [20] Microstation Vi8 Select Series [online] 2024. Dostupné z:
<http://www.gissoft.cz/MicroStation/MicroStation>
- [21] ŠVÁBENSKÝ O., VITULA A., BUREŠ J. - Inženýrská geodézie I, GE16 modul 03, Návod ke cvičením, studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia, VUT v Brně, Fakulta stavební.
- [22] ŠTRONER, M., HAMPACHER, M. - Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. České vysoké učení technické v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04900-6
- [23] ATLAS DMT – Interní algoritmy výpočtu; ČSN 01 3411 – Výpočty objemů v geodézii; Leick, A.: *GPS Satellite Surveying*, Wiley, 2004. [cit. 1.4.2025]

12 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 - Ukázka vlíčovacího bodu [6].....	13
Obrázek 2.2 - Ukázka signalizačních štítků [6].....	13
Obrázek 2.3 - Ukázka výsledného modelu [9].....	14
Obrázek 2.4 - Mesh model [10].....	14
Obrázek 2.5 - Model z laserového skenování.....	15
Obrázek 2.6 - Model z fotogrammetrické metody	15
Obrázek 2.7 - Totální stanice Leica TS16 [12]	16
Obrázek 2.8 - Výpočet kubatur mezi rovinou a objektem [14].....	17
Obrázek 2.9 - Princip výpočtu objemu z TINového modelu [16].....	17
Obrázek 2.10 - Výpočet objemu pomocí metody příčných profilů [16]	18
Obrázek 3.1 - Dálnice D1 0136 Říkovice – Přerov [17]	19
Obrázek 3.2 - Mimoúrovňová křižovatka spojující D1 a D55 [18].....	20
Obrázek 3.3 - Projektová dokumentace sledovaného úseku	21
Obrázek 4.1 - Leica RTC 360 [12].....	22
Obrázek 4.2 - Leica BLK2GO [12].....	23
Obrázek 4.3 - Ukázka dat přenesených do mobilního zařízení ze skenování SLAM skenerem	23
Obrázek 4.4 - Leica GS18T a Leica CS20 [12].....	23
Obrázek 4.5 - Leica TS16 a Leica CS20 [12].....	24
Obrázek 4.6 - DJI Phantom 4RTK [19].....	25
Obrázek 4.7 - Ukázka prostředí z Leica Cyclone 360.....	26
Obrázek 4.8 - Ukázka prostředí z Leica Cyclon 3DR	27
Obrázek 4.9 - Ukázka prostředí z Microstationu V8i Select series.....	28
Obrázek 4.10 - Ukázka prostředí z Atlas DMT.....	29
Obrázek 5.1 - Bod 4003 vytvořený pro účely této diplomové práce.....	30

Obrázek 5.2 - Bod původní vytyčovací sítě stavby 7065	30
Obrázek 5.3 - Totální stanice Leica TS16	31
Obrázek 5.4 - Signalizační terč na stativu	33
Obrázek 6.1 - Sledovaný objekt před první etapou měření	34
Obrázek 6.2 - Skener Leica RTC 360 a signalizační terče na stativech.....	35
Obrázek 6.3 - Doplnkové signalizační terče.....	35
Obrázek 6.4 - Ukázka skenování SLAM skenerem	37
Obrázek 6.5 - Schéma měření bodů v příčných profilech	38
Obrázek 6.6 - Fotogrammetrická metoda v rámci celé stavby	40
Obrázek 6.7 - Vlíčovací bod pro fotogrammetrickou metodu.....	40
Obrázek 7.1 - Ukázky práce s mračny bodů při registraci	42
Obrázek 7.2 - Spojování mračen funkcí cloud to cloud	43
Obrázek 7.3 - Protokol o přesnosti spojení mračen.....	43
Obrázek 7.4 - Spojené a nageoreferencované mračno bodů	43
Obrázek 7.5 - Porovnávání polohy identických bodů	44
Obrázek 7.6 - Ukázka funkce oříznutí mračna bodů	45
Obrázek 7.7 - Funkce split ground points.....	46
Obrázek 7.8 - Mračno bodů před využitím funkce split ground points.....	46
Obrázek 7.9 - Mračno bodů po využití funkce split ground points.....	46
Obrázek 7.10 - Redukce velikosti mračen bodů.....	46
Obrázek 7.11 - Ukázka mračen bodů v programu Leica Cyclone 3DR	47
Obrázek 7.12 - Ukázky jednotlivých etap mračen bodů v programu Leica Cyclone 3DR ...	47
Obrázek 7.13 - Mračno bodů ze skenování SLAM skenerem.....	48
Obrázek 7.14 - Zdvojení objektů v mračnu bodů ze SLAM skeneru.....	48
Obrázek 7.15 - Mračno bodů z fotogrammetrického snímkování.....	49
Obrázek 7.16 - Mračno bodů z laserového skenování.....	49

Obrázek 7.17 - Vykreslení betonové konstrukce pomocí vektorové kresby	50
Obrázek 7.18 - Vektorová kresba	50
Obrázek 7.19 - 3D model terénu jednotlivých etap v rámci laserového skenování	51
Obrázek 7.20 - 3D modely terénu jednotlivých etap v rámci metody GNSS RTK.....	52
Obrázek 8.1 - Ukázka filtrace odlehlých hodnot.....	53
Obrázek 8.2 - Ukázka příčných řezů	54
Obrázek 8.3 - Detail příčných řezů.....	54
Obrázek 8.4 - Tabulka transformačních parametrů v programu Atlas DMT	55
Obrázek 8.5 - Funkce výpočet objemu.....	56
Obrázek 8.6 - Ukázka vypočtených kubatur	56
Obrázek 9.1 - Porovnání fotogrammetrické metody s laserovým skenováním a technologií GNSS.....	59

13 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 7.1 - Odchyly skenů na identických bodech.....	44
Tab. 8.1 - Výškové odchyly GNSS a Fotogrammetrického měření.....	55
Tab. 9.1 - Porovnání použitých metod v rámci jednotlivých etap.....	57
Tab. 9.2 - Hodnocení časové náročnosti metod.....	61