VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE
INSTITUTE OF GEODESY

MONITORING STAVEBNÍ KONSTRUKCE POMOCÍ LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ
MONITORING OF THE BUILDING CONSTRUCTION USING LASER SCANNING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Michal Jirásek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Tomáš Volařík, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav geodézie
Student:	**Bc. Michal Jirásek**
Vedoucí práce:	**Ing. Tomáš Volařík, Ph.D.**
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	N3646 Geodézie a kartografie
Studijní obor:	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:

Monitoring stavební konstrukce pomocí laserového skenování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude postihovat vhodnost technologie laserového skenování pro monitoring stavební konstrukce liniové stavby (např. opěrné zdi). Kritéria použití této metody musí reflektovat geometrickou přesnost, časovou náročnost měření v terénu a následného zpracování v porovnání s terestrickým geodetickým měřením.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Proveďte rešerši literatury ohledně monitoringu staveb pomocí laserového skenování. Na vybraném stavebním objektu proveďte etapové geodetické zaměření a laserové skenování. Vyhodnoťte výsledky a popište vhodnost této metody s ohledem na potřeby geodetické firmy.

Seznam doporučené literatury a podklady:

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

BUREŠ J., SLÁMA J. - Měření deformací ocelových střešních vazníků výrobní haly výhybkárny Prostějov. Sborník přednášek z 38. geodetických dnů v Brně, Spolek zeměměřičů Brno, 2002

ŠVÁBENSKÝ O., ŠVEC M., VITULA A., FIŠER Z. – Měření odchylek tvaru kruhových konstrukcí.
Knižnice odborných a vědeckých spisů, VUT v Brně, svazek B-125, 1990 ŠVÁBENSKÝ O., VITULA A. – Inženýrská geodézie –

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2023

L. S.

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D. vedoucí ústavu	Ing. Tomáš Volařík, Ph.D. vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá použitím alternativního přístupu k etapovému měření v rámci monitoringu stavebního objektu konvenčními geodetickými metodami. Monitoring dvou opěrných zdí byl proveden terestrickým měřením a technologií pozemního laserového skenování (TLS). Byly vyhodnoceny vodorovné a svislé posuny z terestrického měření. Mračna bodů jednotlivých etap byla zavedena do referenčního systému JTSK. Byly porovnány výsledné posuny z TLS a klasického měření. Po zhodnocení výsledků obou technologií se práce zamýšlí nad uplatněním technologie TLS pro etapová měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

monitoring stavebních konstrukcí, laserové skenování, etapová měření

ABSTRACT

The thesis deals with the use of an alternative approach to stage measurement in the monitoring of a building object by conventional geodetic methods. Monitoring of two retaining walls was carried by terrestrial measurement and terrestrial laser scanning technology. Horizontal and vertical displacements from terrestrial measurements were evaluated. The point cloud of individual stages was conducted into the JTSK reference system. The resulting displacements from TLS and classical measurement were compared. After evaluating the results of both technologies, the thesis contemplates the application TLS technology for stage measurements.

KEYWORDS

Monitoring building construction, laser scanning, stage measurment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JIRÁSEK, Michal. *Monitoring stavební konstrukce pomocí laserového skenování*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí Ing. Tomáš Volařík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Monitoring stavební konstrukce pomocí laserového skenování* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2023

Bc. Michal Jirásek
autor

OBSAH

1. ÚVOD 9
2. TEORETICKÁ ČÁST 10
2.1. Monitoring staveb 10
2.2. Pojmy 10
2.3. Metody sledování posunů a přetvoření 11
2.3.1. Geodetické metody 11
Prostorová polární metoda 12
Metoda protínání z úhlů 13
Metoda prostorové sítě 14
Geometrická nivelace 14
Trigonometrická nivelace 15
Fotogrammetrie 15
Technologie laserového skenování 16
Technologie GNSS 18
2.3.2. Geotechnické metody 21
Hydrostatická nivelace 21
Extenzometrická měření 21
Inklinometrie 22
Geoakustická metoda 23
Metoda křehkých vodičů 24
2.4. Norma 25
2.4.1. Účel 25
2.4.2. Přesnost 25
3. VMO TOMKOVO NÁMĚSTÍ – ROKYTOVA 26
3.1. Lokalita 27
3.2. Projektová dokumentace SO 28
3.3. Záměr 30
4. GEODETICKÝ MONITORING 31
4.1. Přístroje, pomůcky a programy 31
4.1.1. Totální stanice Trimble S5 2“ 32
4.1.2. Nivelační přístroj Zeiss DiNi 010 34
4.1.3. Laserový skener Faro Focus 3D 120 35
4.2. Metody měření 37
4.3. Základní vytyčovací síť 38
4.4. Hybridní soustava pro laserové skenování 41
5. MONITORING OPĚRNÉ ZDI SO 218 43
5.1. Etapa 4 44
5.2. Etapa 5 45
5.3. Etapa 6 46
5.4. Zpracování 47
5.5. Výsledky 52
6. MONITORING OPĚRNÉ ZDI SO 217 57
6.1. Etapa 0 58
6.2. Etapa 1 59

6.3. Etapa 2 60
6.4. Etapa 3 61
6.5. Zpracování 62
6.6. Výsledky 64
7. ZÁVĚR 67
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 68
9. SEZNAM OBRÁZKŮ 70
10. SEZNAM TABULEK 71
11. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 72
12. SEZNAM PŘÍLOH 73

1. Úvod

V diplomové práci prozkoumávám možnost geodetického monitoringu za použití technologie laserového skenování stavební konstrukce jako alternativy k běžnému terestrickému geodetickému měření. Tato metoda slibuje rychlý sběr dat a zpracování, což by znamenalo zvýšení efektivity a lepší rozložení pracovních sil.

Geodetický monitoring stavebních konstrukcí je nedílnou součástí budování důležitých a náročných staveb. Je důležité postihnout nežádoucí jevy, které můžou mít vliv na bezpečnost, funkčnost a spolehlivost daného objektu. Při monitorování staveb musí geodet zajistit, aby sledovaná konstrukce byla měřena s předepsanou přesností a případně tak zachytit nebezpečné sedání, náklon, torzi či jinou deformaci.

Pro geodetické firmy je to komplexní úloha vyžadující množství zdrojů, času, přesných pomůcek a pracovní síly. Ve spolupráci s firmou DD plus – Geodetická kancelář s.r.o. (dříve DD plus v.o.s.), sídlící v Brně, která působí jako geodet zhotovitele na stavbě VMO Tomkovo náměstí – Rokytova, byla příležitost ověřit alternativní možnosti měření a vyhodnocování stavebního monitoringu na dvou opěrných zdech, které byly aktuálně ve výstavbě.

Cílem je posoudit vhodnost technologie laserového skenování pro monitoring opěrné zdi. To vyžaduje provést klasické geodetické měření a hromadný sběr dat laserovým skenováním a porovnat geometrickou přesnost, časovou náročnost měření a zpracování oproti klasickému geodetickému měření.

2. Teoretická část

V této kapitole se věnuji teorii týkající se monitorování staveb, důležitých pojmů a metod používaných pro sledování posunů a přetvoření.

2.1. Monitoring staveb

Monitoring neboli sledování je součástí inženýrské geodézie. Zahrnuje činnosti, které na základě systematického etapového měření, pozorování a analýz stavu objektu, získávají informace o velikosti změn a rychlosti jejich vývoje. Tyto údaje jsou důležité pro navržení opatření, které zabrání nežádoucím jevům, neohrozí bezpečnost či nenaruší funkčnost konstrukce. Měřením posunů můžeme sledovat skutečné posuny porovnávat je s navrženými hodnotami a posoudit tak chování konstrukce. [1]

Interval měření se stanoví na základě funkce, významu a stavu konstrukce. Nanejvýš je důležitá základní etapa měření (nultá), k níž jsou vztaženy posuny. Pokud mezi etapami měření dochází ke změně polohy sledovaných bodů, nazývá se tato změna posun.

Monitoring lze uplatnit na většinu stavebních konstrukcích jako jsou mosty, nádrže, jímky, přehrady apod., ale i na liniové stavby, přírodní útvary, důlní díla nebo podzemní stavby.

2.2. Pojmy

Pozorovaný bod – bod osazený na sledovaném objektu

Vztažný bod – bod vztažné soustavy mimo sledovaný objekt a jeho vliv

Posun relativní – změna v soustavě pozorovaných bodů

Posun absolutní – změna v soustavě vztažných bodů

Sedání/zdvih – svislý posun směrem dolů/nahoru

Průhyb – přetvoření ve svislém směru

Náklon – odchýlení od svislice

Pootočení – otočení kolem obecně položené osy

Etapové měření – opakované zaměření bodů vztažné a pozorované soustavy v určeném časovém intervalu

Základní (nultá) etapa – výchozí etapa měření k níž jsou počítány posuny

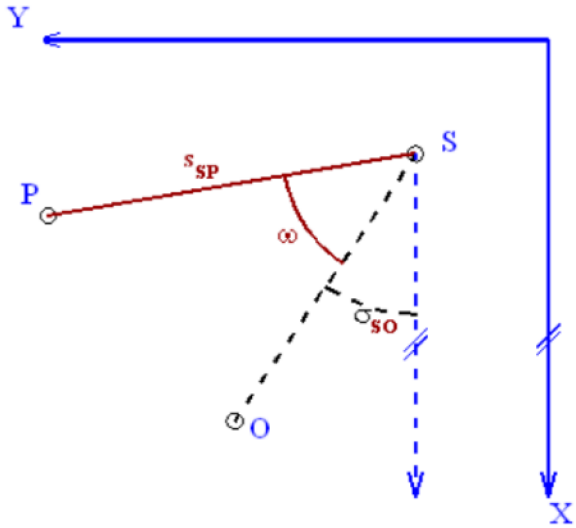
2.3. Metody sledování posunů a přetvoření

Způsoby sledování posunů a přetvoření můžeme rozdělit na metody geodetické s širokým spektrem dosahované přesnosti a využitelnosti a metody geotechnické, jež nejčastěji sledují změnu mechanických fyzikálních vlastností a geometrie. Geodetická měření sledují povrchové změny, geotechnické metody sledují vnitřní změny. Geotechnické metody sledují relativní změny, zatímco geodetické metody sledují i absolutní změny. Geodetické a geotechnické metody se díky tomu vzájemně doplňují a umožňují kontrolu shody.

2.3.1. Geodetické metody

- Prostorová polární metoda
- Metoda protínání z úhlů
- Metoda prostorové sítě
- Geometrická nivelace
- Trigonometrická nivelace
- Fotogrammetrie
- Technologie laserového skenování
- Technologie GNSS

Prostorová polární metoda



Obr. 1 – Polární metoda [27]

Principem metody je měření šikmé délky, vodorovného úhlu a zenitového úhlu na určovaný bod ze známého bodu (stanoviska). Polohu bodu (souřadnice X, Y) vypočteme podle principu polární metody. Pro výpočet musíme převést šikmou vzdálenost na vodorovnou (1) a vypočítat směrník na měřený bod (2).

$$S_{SP} = d_{SP} \cdot \sin z \qquad \textbf{(1)} \qquad \sigma_{SP} = \sigma_{SO} + \omega \qquad \textbf{(2)}$$

$$X_P = X_S + S_{SP} \cdot \cos \sigma_{SP}$$
$$Y_P = Y_S + S_{SP} \cdot \sin \sigma_{SP} \qquad \textbf{(3)}$$

Výšku bodu (souřadnici Z (H) určíme metodou trigonometrického určení výšky. K měřeným veličinám je třeba připočíst výšku přístroje a cíle.

$$Z_P = Z_S + d \cdot \cos z + v_p - v_c \qquad \textbf{(4)}$$

kde

X_S, Y_S, Z_S *...souřadnice stanoviska*

X_P, Y_P, Z_P *...souřadnice určovaného bodu*

d_{SP} *...šikmá délka*

z ... *zenitový úhel*

σ_{SO} ... *směrník stanovisko-orientace*

ω ... *měřený vodorovný úhel mezi orientací a určovaným bodem*

v_p ... *výška přístroje*

v_c ... *výška cíle*

Přesnost metody je závislá na přesnosti měření veličin, nejčastěji na měřené délce. Doporučuje se zvolit lokální souřadnicový systém, ve kterém je jedna z os přímo v měřeném objektu. Například u opěrné zdi je jedna osa ve směru zdi a druhá je na ni kolmá.

Metoda protínání z úhlů

Princip metody spočívá ve změření vodorovných úhlů a vodorovné vzdálenosti mezi dvěma stanovisky (též základna). Vypočítáme směrníky (5) a délky na určovaný bod (6).

$$\sigma_{AP} = \sigma_{AB} + \omega_A \quad \sigma_{BP} = \sigma_{BA} - \omega_B \quad \textbf{(5)} \qquad {}_{AP} = S_{AB} \cdot \frac{\sin \omega_B}{\sin(\omega_A + \omega_B)} \quad S_{BP} = S_{AB} \cdot \frac{\sin \omega_A}{\sin(\omega_A + \omega_B)} \quad \textbf{(6)}$$

kde

X_A, Y_A, Z_A (X_B, Y_B, Z_B) ... *souřadnice stanoviska A(B)*

X_P, Y_P, Z_P ... *souřadnice určovaného bodu*

S_{AB} ... *vodorovná délka (základna)*

$\sigma_{AB}/\sigma_{AP}(\sigma_{BP})$ ... *směrník základny/směrník na určovaný bod*

ω_A, ω_B ... *měřený vodorovný úhel mezi základnou a určovaným bodem*

Souřadnice určovaného bodu P vypočteme stejně jako u polární metody dosazením (5) a (6) do rovnic (3).

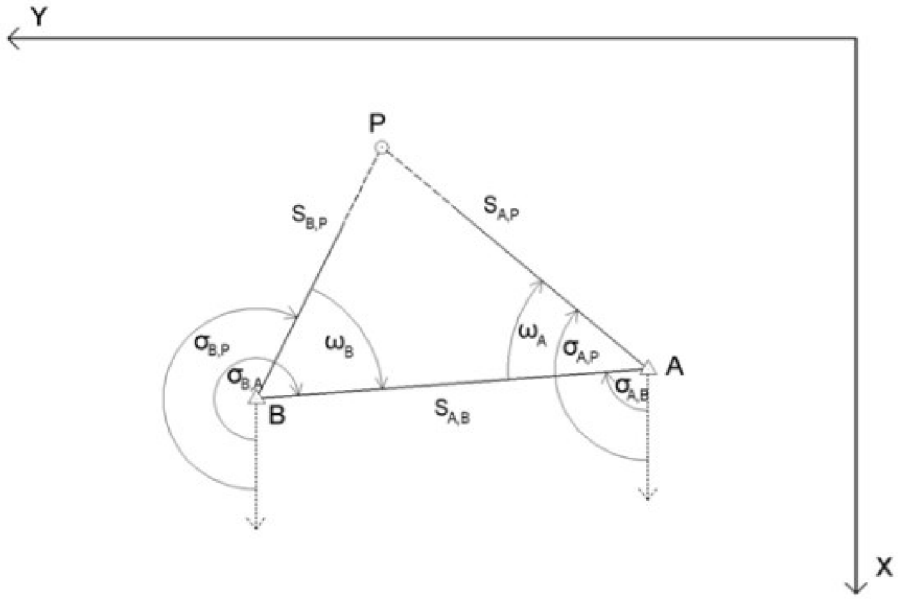
$$\begin{aligned} X_P &= X_A + S_{AP} \cdot \cos \sigma_{AP} \\ Y_P &= Y_A + S_{AP} \cdot \sin \sigma_{AP} \end{aligned} \qquad \textbf{(7)}$$

Analogicky lze spočítat souřadnice určovaného bodu ze stanoviska B. Při výpočtu výšky postupujeme stejně jako u trigonometrického určení výšky (4). Místo šikmé délky upravíme vzorec na vodorovnou délku a dosadíme (6).

$$Z_P = Z_A + S_{AP} \cdot cotg\ z_A + v_p - v_c \qquad \textbf{(8)}$$

kde

z_A *...zenitový úhel z bodu A*



Obr. 2 – Metoda protínání z úhlů [2]

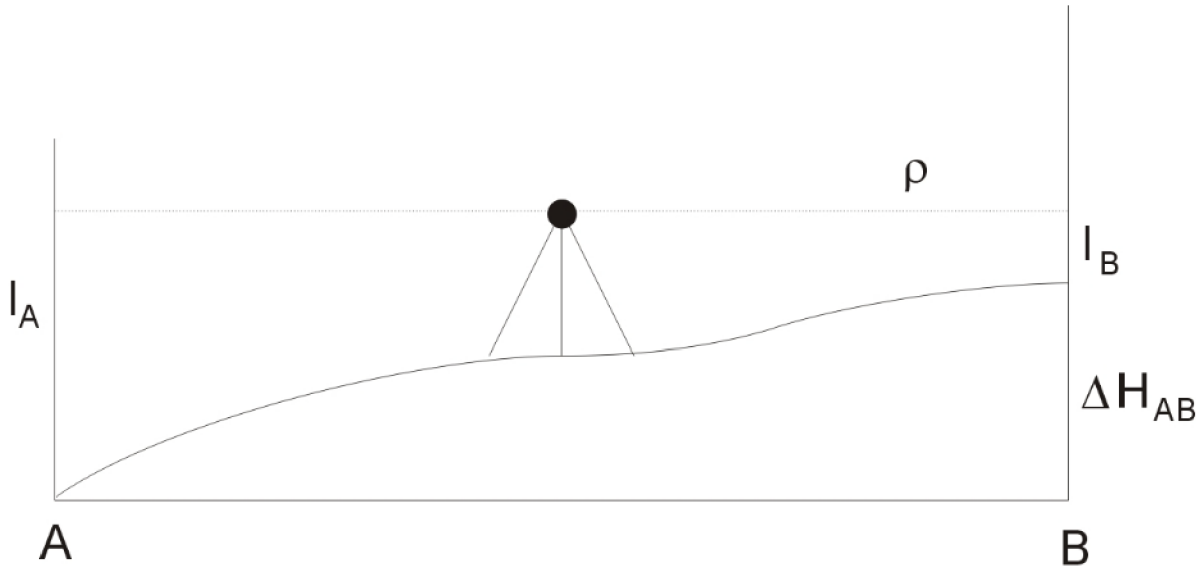
Metoda prostorové sítě

Principem metody je měření vodorovných, zenitových směrů a šikmých délek z velkého množství základen. Cílem je získat nadbytečné množství veličin, která pak vstupují do vyrovnání metodou nejmenších čtverců. Tato metoda se použije, je-li potřeba vysoká přesnost sledování posunů. Pro výpočet těchto měření se používají nejrůznější softwary, které umožňují kontrolovat dosaženou kvalitu.

Geometrická nivelace

Nejběžnější metoda měření svislých posunů, nejčastěji ve formě přesné nebo velmi přesné nivelace. Při nivelaci je důležité dodržovat technologický postup geometrické nivelace. V případě, že technologii dodržet nelze, například u nestejné délky záměry, je

nutné zavádět opravy. Hodnota sklonu záměrné osy se zjišťuje testováním přístroje, nejlépe před a po měření. Pro zvýšení spolehlivosti výsledků je snaha měřit nadbytečné množství převýšení v síti monitorovaných bodů.



Obr. 3 – Metoda geometrické nivelace [3]

Metodou určíme výšku bodu z rozdílu dvou čtení na lati.

$$\Delta H_{AB} = l_A - l_B \rightarrow H_B = H_A + \Delta H_{AB} \qquad \textbf{(8)}$$

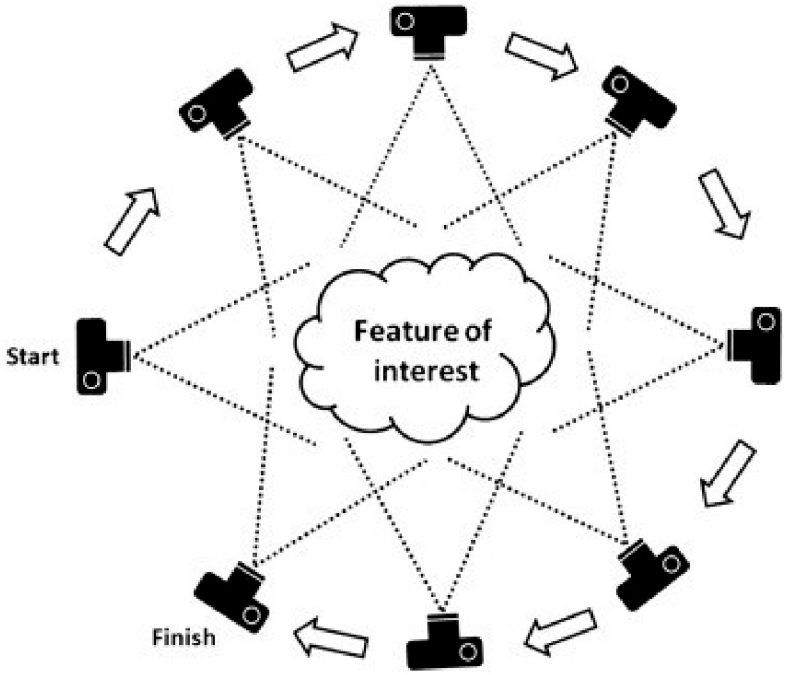
Trigonometrická nivelace

Je kombinace metod geometrické nivelace a trigonometrického určení výšky. Při trigonometrické nivelaci se určuje výškový rozdíl mezi dvěma body, které tvoří sestavu. Tato metoda je vhodná pro určování výšek špatně přístupných bodů, které by nešlo určit geometrickou nivelací. Metoda je méně přesná než v případě geometrické nivelace, ale je rychlá [1].

Fotogrammetrie

Fotogrammetrickými metodami lze získat přesné souřadnice ze snímků digitálních neměřických kamer. Pomocí dvou a více snímků lze rekonstruovat scénu objektu a vytvořit tak 3D model. Snímky musí být velmi kvalitní, je potřeba dbát na kvalitu osvětlení. Nutné kalibrovat kameru, tedy znát přesně prvky vnitřní orientace. Ty lze získat společně s prvky vnější orientace při vyrovnání. Výhodou metody je rychlost sběru dat, ale nevýhoda je v náročnosti zpracování.

V dnešní době se nejčastěji používá metoda Structure from Motion (Sfm), což je metoda rekonstrukce objektu, která pracuje na principech stereoskopické fotogrammetrie a průsekové fotogrammetrie. 3D model objektu vzniká překrýváním sekvencí 2D snímků, které jsou spjaty s pohybem snímače. Prvky vnitřní orientace kamery jsou odvozeny společně se scénou v jednom z kroků zpracování. [4] Pro tuto metodu není potřeba kalibrovat kameru. Pro zpracování je nutné mít sadu snímků s velkým překrytím. [5]



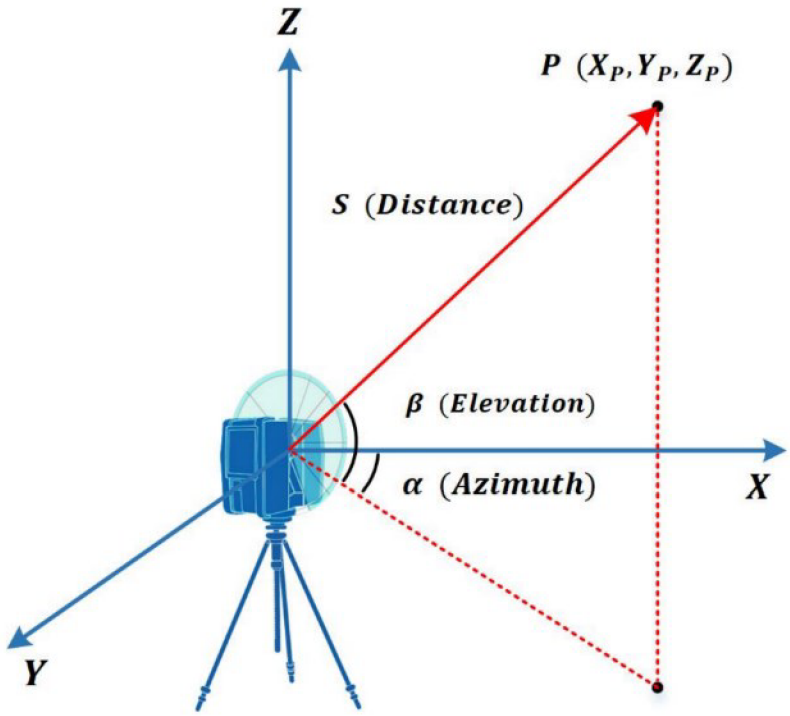
Obr. 4 – Metoda Structure from Motion potřebuje několik překrývajících se snímků pro rekonstrukci 3D modelu. [6]

Technologie laserového skenování

Je neselektivní metoda sběru prostorových dat. Skenování probíhá rozmítáním laserového paprsku, rotujícím hranolem či jiným optickým zařízením. Laserovým skenováním se získává velké množství dat (několik desítek i stovek milionů bodů) z jediného měření, tzn. mračno bodů. Touto metodou získáme velmi rychle kvalitní prostorová data, včetně intenzity a barevnosti. Z takových dat lze vypočítat plochy, objemy či rekonstruovat objekty či modely terénu. Nevýhodou skenerů jsou vysoké požadavky na výkon i paměť hardwaru a drahé softwary pro zpracování takových dat.

Pozemní laserové statické skenování (TLS) shromažďuje data z pozemního skeneru připevněném na stativu. Další možností je shromažďování dat mobilním laserovým skenováním (MLS), kde jsou data shromažďována z pohybujících se vozidel, nebo letecké laserové skenování (ALS), kde jsou data sbírána letadlem či dronem. [7]

Polohu bodu z TLS jsou definovány polárními souřadnicemi, které jsou převedeny do místní pravoúhlé soustavy se středem v centru skeneru. Polární souřadnice jsou tvořeny vertikálním úhlem, horizontálním úhlem a šikmou délkou. Délka je získávána pomocí laserového dálkoměru. [8]



Obr. 5 – Pozemní laserové skenování, měřena šikmá vzdálenost S, vertikální úhel β a vodorovný úhel α [8]

Polohu bodu P vypočteme z polárních souřadnic takto:

$$X_P = S\cos\beta\cos\alpha$$
$$Y_P = S\cos\beta\sin\alpha \qquad \textbf{(9)}$$
$$Z_P = S\cos\beta$$

Princip laserového dálkoměru je měření doby, po kterou laserový paprsek putuje z rozmítací soustavy k cíli a zpět. [8]

$$r = \frac{c}{n}\frac{\Delta t}{2} \qquad \textbf{(10)}$$

kde

c ... *rychlost světla ve vakuu*

n ... *index lomu světla*

Δt ... *doba tranzitního času*

Ke stanovení tranzitního času se používají nejčastěji dvě metody: na bázi pulsu nebo fáze. U pulsního systému jsou z laserového zdroje vyzařovány krátké pulsy, čas je měřen přesným časovacím obvodem, který je součástí skeneru. Touto metodou jsou komerční skenery schopny měřit s přesností 3 až 15 mm, za předpokladu dobrého poměru signálu k šumu. Jako další metodu se používají fázové systémy, kdy kontinuální proud laserového světla je modulován v amplitudě. Tranzitní čas je stanoven porovnáním vyřazovaných a odražených paprsků, tedy měření fázového rozdílu. Přesnost se pohybuje okolo 1-10 mm, ale je omezen dosah. [7]

$$\Delta t = \frac{\lambda_m}{2\pi}\frac{\Delta\phi}{c} \qquad \textbf{(11)}$$

kde

$\Delta\phi$ ... *fázový rozdíl*

λ_m ... *vlnová délka amplitudové modulace*

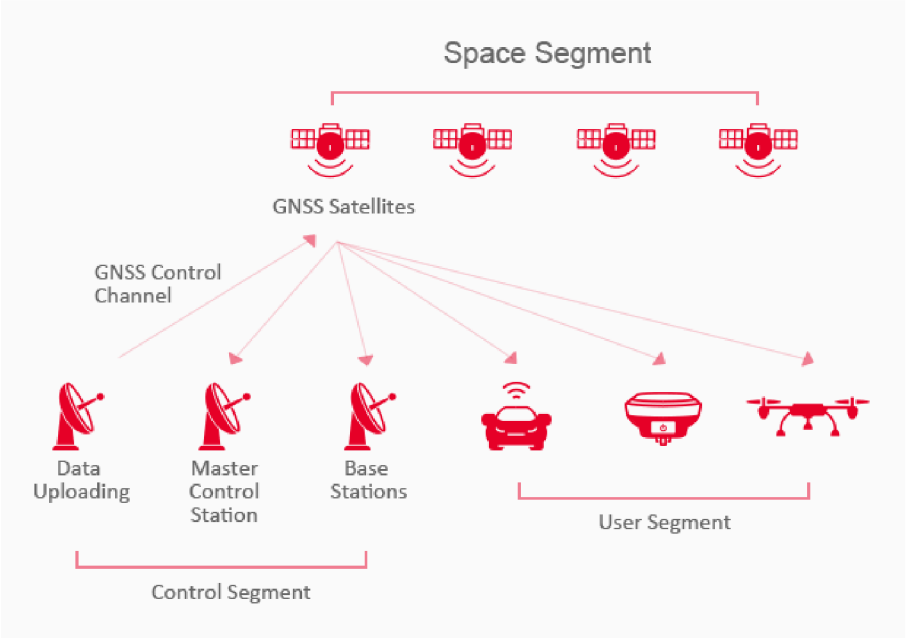
Technologie GNSS

Globální navigační satelitní systémy (GNSS) je systém, který vysílá signál z družic tzn. navigační zprávu. Určujeme polohu přijímače, ten musí přijmout signál z min. 4

družic. Měří se čas mezi vysláním signálu družicí a přijetím signálu přijímačem. Z času získáme délku a díky znalosti polohy družic dokážeme prostorovým protínáním z délek vypočítat polohu přijímače. Důležitá pro přesnost je konfigurace a počet viditelných družic. [9]

Systém se skládá ze tří částí:

- Kosmický segment – zahrnuje družice obíhající kolem Země
- Řídící segment – stará se o údržbu, monitoruje a koordinuje činnost celého systému
- Uživatelský segment – sestává z přijímačů schopné přijímat a zpracovávat signál z družic



Obr. 6 – Segmenty GNSS, kosmický segment, řídící a kontrolní segment a uživatelský segment [23]

Dnes kosmický segment tvoří velké množství družic globálních systému jako je Galileo (EU), GPS NAVSTAR (USA), Beidou (Čína), Glonass (Rusko) a další. Velká hustota přijímaných signálů a pokrytí umožňuje zvyšování přesnosti určované polohy.

Zpracování dat:

Absolutní metody

- PPP – umožňuje přesné určení polohy se stejnou přesností kdekoliv na Zemi. Eliminace systematických vlivů se provede zavedením korekcí a vyrovnáním MNČ z nadbytečných měření.

Relativní metody

- Statická metoda

Používá kontinuální dlouhodobá měření (hodiny, dny) dvou a více přijímačů; nutný post-processing.

- Rychlá statická metoda

Kontinuální několika minutová měření dvou a více přijímačů; zpracování post-processingem.

- Kinematická

Kinematická metoda využívá jeden přijímač referenční a druhý se pohybuje; na počátečním bodě se vyřeší ambiquity; v post-processingu se vyhodnotí celá trajektorie.

- Stop and go

Kombinace statické a kinematické metody; nesmí dojít ke ztrátě signálu; rychlá metoda po inicializaci, již stačí na bodě být jen pár sekund; vyhodnocení post-processingem.

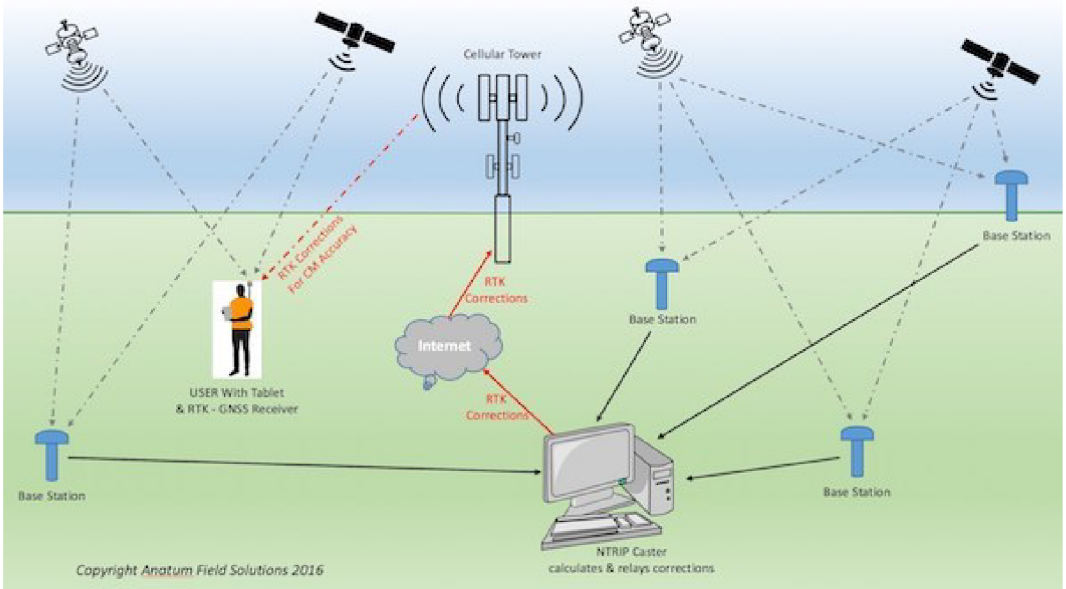
Diferenční metody

- DGPS – snižuje projevy systematických chyb pomocí diferenciálního měření mezi dvěma přijímači; přesnost 5-10 m.
- RTK

Rychlá metoda měření a získávání polohy bodu v reálném čase; jedna referenční stanice „base“ o známých souřadnicích a druhý přijímač se pohybuje „rover“; referenční stanice může být nahrazena sítí stanic, která poskytuje korekce; přijímač musí být připojen k internetu. [10]

Korekce jsou komerčně nabízeny sítí permanentních referenčních stanic například CZEPOS a Trimble VRS Now. Lze využít metody pseudoreferenčních stanic (PRS),

korekce jsou poslány z virtuální stanice, které jsou vygenerovány ze síťového řešení permanentních stanic. [11]



Obr. 7 – Metoda RTK, pohyblivý GNSS přijímač + příjem korekcí přes internet [10]

2.3.2. Geotechnické metody

- Hydrostatická nivelace
- Extenzometrická měření
- Inklinometrie
- Geoakustická měření
- Metoda křehkých vodičů

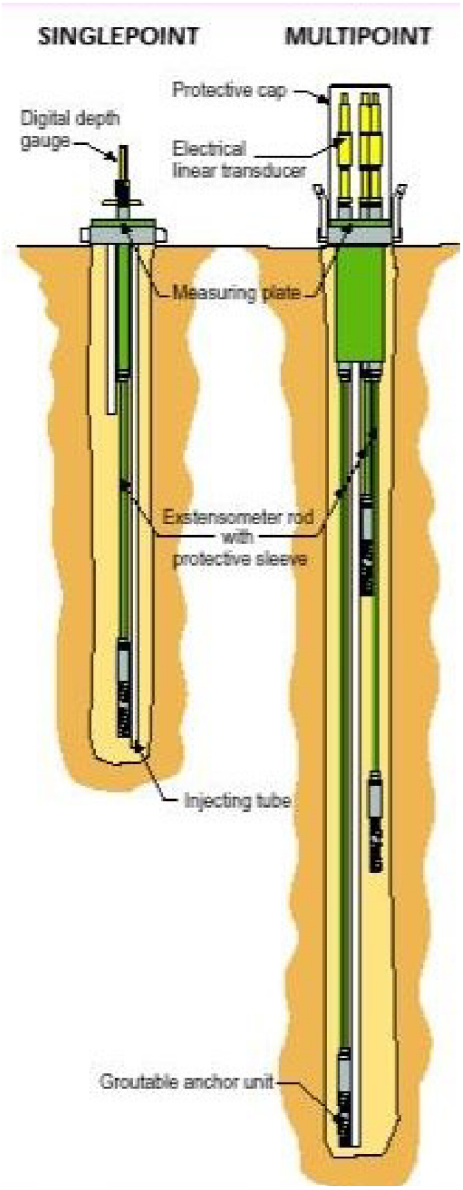
Hydrostatická nivelace

Je metoda založená na principu spojených nádob. Zdlouhavá, ale velmi přesná metoda měření svislých posunů. Vhodná do špatně přístupných míst například v podzemí, nevýhodou je, že značky pozorovaných bodů musí být osazeny ve stejném výškovém horizontu. Jedna z nádob je referenční, ta je umístěna na stabilním místě, nebo určována geodeticky, ostatní body jsou pozorované. [1]

Extenzometrická měření

Extenzometry se souhrnně používají k měření posunů uvnitř horninových masivů či sesuvů půd. Tyčové extenzometry jsou zařízení, kde se určuje změna polohy hlavy

extenzometru vůči kotvě. Do vrtu se umístí tyč zakotvená na dně vrtu, tyč je pak vedena v chráničce k hlavě vrtu. Posun se měří na zhlaví vrtu, měří se buď mechanicky (číselníkovým úchylkoměrem, posuvným měřidlem) nebo samočinně pomocí čidla. Do jednoho vrtu lze umisťovat více extenzometrů v různých hloubkách vrtu. [12]



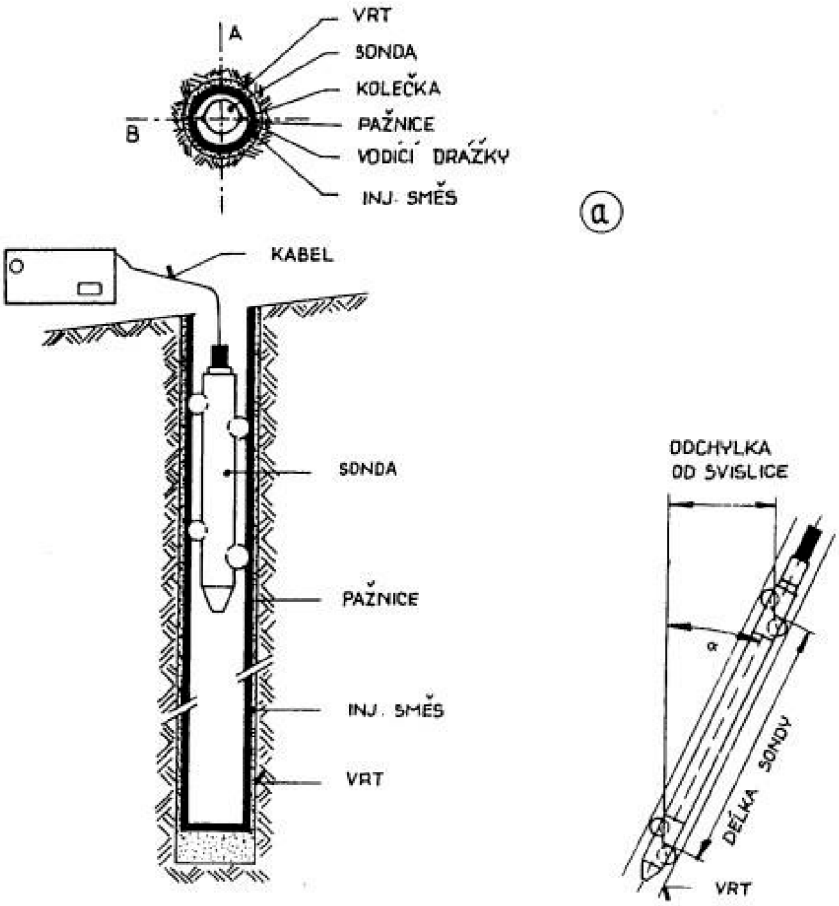
Obr. 8 – Tyčový extezometr – vlevo jednoúrovňový, vpravo víceúrovňový [12]

Inklinometrie

Metoda určená k měření vodorovných posunů půd a hornin. Měří se náklon vodící sondy ve svislém vrtu. Umožňuje sledovat rychlost a směr pohybu sledovaných objektů. Náklon sondy měřený přesnými náklonoměry se převádí na vodorovnou složku. Je

důležité, aby dno vrtu bylo v hloubce, kde zaručeně nedochází k přetváření horninového masivu. Výhodou inklinometrie je možnost sledování posunů několika smykových ploch najednou. Směr se určuje pomocí vodících drážek, kterými je sonda do vrtu posílána. [13]

Geoakustická metoda



Obr. 9 – Princip inklinometrického měření [13]

Při této metodě se ve vrtu opatřeným vodotěsnou pažnicí, která je naplněna vodou, snímají geoakustické projevy v horninovém masivu. Měří se pomocí speciálních zařízení, tj. geofonů. Tvoří se záznam, který se pak v laboratoři vyhodnocuje. Ze změn počtu akustických projevů se určuje porušení horninového masivu. [14]

Metoda křehkých vodičů

Křehké vodiče slouží k indikaci hloubky, kde se nachází smykové plochy, ne však časový průběh sesouvání podél ní. Princip metody je založen na přerušení elektrického vodiče v určitém místě vrtu. Nejčastěji se používají pásky, které obsahují různě dlouhé tenké drátky. Vrt společně s páskem se zalije cementovou zálivkou. Dojde-li k smykovému posunu, zálivka se v tomto místě naruší a zároveň dojde k přerušení el. obvodů pod ní, obvody nad ní budou stále funkční. Poloha smykové plochy se určuje s takovou přesností, s jakou byly voleny vzdálenosti mezi konci jednotlivých el. vodičů. Jedná se o jednoduchou a levnou metodu. [13]

2.4. Norma

Měřením posunů stavebních objektů se zabývá norma ČSN 73 0405, která upravuje důvody měření posunů stavebních objektů a způsoby měření těchto objektů. [15]

2.4.1. Účel

a) Získat podklady pro posouzení, jak se chová základová půda účinkem stavby a jak působí na blízké objekty
b) Porovnání skutečných hodnot posunů s očekávanými hodnotami vypočtenými ve stavebním projektu
c) Sledování stavu, funkce a bezpečnosti nových stavebních objektů
d) Sledování stavu, funkce a bezpečnosti stávajících stavebních objektů, ovlivněných stavební činností v jejich blízkosti

2.4.2. Přesnost

Přesnost měření nových stavebních objektů je charakterizována mezní odchylkou určení délky výsledného posunu nebo jeho složky. Hodnota mezní odchylky δ v mm, pokud není stanoveno jinak, se určí takto:

$$\delta \leq \frac{2}{15} p \qquad \textbf{(12)}$$

kde

p ...je očekávaný celkový posun nebo jeho složka v mm

δ ...je mezní odchylka výsledného posunu

Hodnota mezní odchylky měření svislého posunu nově navrhovaných stavebních objektů nemá podle charakteru základové půdy překročit:

a) $\delta \leq 1{,}0\ mm$ pro skalní a poloskalní horniny
b) $\delta \leq 2\ mm$ pro písčité, hlinité a jiné stlačitelné zeminy a zhutněné násypy
c) $\delta \leq 5\ mm$ pro nezhutněné násypy a silně stlačitelné zeminy

3. VMO Tomkovo náměstí – Rokytova

V následujících podkapitolách je popsána sledovaná stavba. V těchto podkapitolách uvádím popis lokality stavby a sledovaných stavebních objektů. Dále uvádím projektovou dokumentaci stavebních objektů a požadavků projektu na geodetický monitoring. Nakonec popisuji samotný záměr mé diplomové práce.

3.1. Lokalita

V rámci práce geodeta zhotovitele byly ke sledování vybrány dva stavební objekty, opěrné zdi. Zdi jsou budovány pro stavbu I/42 Brno VMO Tomkovo náměstí – Rokytova, jež se nachází v Brně v katastrálním území Maloměřice. Investorem stavby je ŘSD, do jehož správy a vlastnictví po ukončení stavby přejdou i opěrné zdi. Nový úsek brněnského velkého městského okruhu (VMO) na silnici I/42 bude dlouhý 680 m od Husovického tunelu až po ulici Karlovu, kde bude napojen na mostní estakádu úseku Rokytova. Úsek řeší vybudování čtyřpruhové komunikace a mimoúrovňové křižovatky. Součástí je vybudování čtyř mostních objektů. Projekt si klade za cíl odlehčení tranzitní a vnitřní dopravy, vytvoření kapacity pro plynulejší a bezpečnější provoz, a zlepšení životního prostředí. Výstavba byla oficiálně zahájena v červnu 2021. [16]

Obr. 10 – Vizualizace budoucího Velkého městského okruhu Tomkovo náměstí, Rokytova [24]

3.2. Projektová dokumentace SO

Projektová dokumentace na stavební objekt (SO) 218 a 217 Opěrná zeď rampa VMO – Karlova – vlevo (vpravo) byla vyhotovena projekční firmou v roce 2021. Jedná se o železobetonovou zeď založenou plošně a hlubině s proměnlivou výškou (2,87-8,93m) a šířkou základu (3,50-6,85m). Opěrná zeď SO 218 je rozdělena na 24 dilatačních celků dilatovaných od sebe dvoucentimetrovým polystyrenem, zeď SO 217 má 32 dilatačních celků. Dokumentace je ve stupni RDS, která navazuje na projektovou dokumentaci stupně PDPS. Na základě zjištěných geologických podmínek bylo změněno technické řešení stavby na částečně hlubinné a částečně plošné založení SO. Opěrné zdi slouží ke zvýšení výšky terénu pro navazující komunikace SO 112 a 111 odbočovacích dvou pruhů do ulice Karlova. Objekty jsou řešeny s ohledem na blízkou bytovou zástavbu, včetně patrových garáží. [17]

V rámci terénních prací byli zjištěny nepříznivé geotechnické poměry horší, než předpokládal projekt ve stupni PDPS. Technické řešení bylo změněno a část opěrné zdi byla založena plošně, část hlubině na velkoprofilových vrtaných betonových pilotech a část hlubině založená technologií injektovaných mikropilot, a to z důvodu prostorových možností v okolí SO 221 – Podchod pro parovod. [18]

Každý dilatační celek bude osazen min. 4 geodetickými značkami, 2 nivelačními značkami a 2 odraznými štítky umístěnými na lícové straně dříku. Sledují se vodorovné a svislé deformace a náklon dilatačního celku v čase. Měření je součástí geotechnického monitoringu, výsledky slouží k ověření předpokladů projektu, predikci zbytkového sedání konstrukce a korekce výšky zdi v rámci betonáže říms. Rozvržení geodetických značek pro každý dilatační celek je uvedeno ve výkresech tvaru. Předpokládá se poměrně rychlý průběh sedání konstrukce a násypů. Velká část sedání by měla proběhnout v průběhu sypání násypů, ovšem realizace násypu je rozdělena do několika fází, je třeba očekávat i postupný vývoj sedání konstrukce. [18]

Monitoring bude probíhat v následujících časových intervalech. [18]

- Nulté měření bude provedeno po dokončení železobetonové konstrukce a osazením geodetických značek

- Kontrolní měření bude probíhat po dosažení každých 2 m násypu nebo po 2 týdnech (podle toho, které kritérium bude dosaženo dřív)
- Po dokončení násypu do spodní hrany říms
- 2x po 2 týdnech po dokončení násypu říms
- 1x po měsíci, další měření na základě výsledků měření
- Měření po dokončení říms a konstrukčních vrstev vozovky
- 3x po měsíci, pokud nebude na základě výsledku stanoveno jinak

Způsob založení	Označení DC	Stav mezní přijatelnosti – náklon [mm]	Kritický stav – náklon [mm]	Předpokládané sedání [mm]
Varovné stavy SO 218				
Piloty	DC 1 + schodiště	24	36	10-20
Piloty	DC 3-7	26	40	10-20
Piloty	DC 8-9	32	47	9-19
Plošně	DC 10-13	44	66	61
Mikropiloty	DC 14	33	50	6-16
Mikropiloty	DC 15	31	46	6-16
Plošně	DC 16-17	33	49	73
Plošně	DC 18-19	37	55	87
Plošně	DC 20-22	37	56	71
Plošně	DC 23	27	41	14
Plošně	DC 24	14	22	17
Varovné stavy SO 217				
Piloty	DC 1-2	28	42	9-19
Piloty	DC 3-4	25	38	9-19
Piloty	DC 5-6 + schodiště	29	44	-
Piloty	DC 7	32	48	9-19
Piloty	DC 8-11	36	53	9-19
Mikropiloty	DC 12	35	53	5-15
Mikropiloty	DC 13	34	52	5-15
Piloty	DC 14-15	31	46	9-19
Piloty	DC 16	32	48	9-19
Plošně	DC 17-19	40	60	30
Plošně	DC 24-25	29	44	11
Plošně	DC 28-31	21	32	20
Plošně	DC 32	15	23	2

Tab. 1 – Varovné stavy pro sledování naklonění jednotlivých DC na SO 217 a SO 218 [17], [18]

3.3. Záměr

Záměrem práce bylo provést na opěrných zdech SO 218 a 217 geodetický monitoring klasickými metodami zadanými projektovou dokumentací. Dále bylo záměrem zjistit, zda došlo k náklonu a sedání stavby. Metodou pozemního laserového skenování naskenovat obě zdi. Porovnat výsledky TLS a klasického měření. Také se zjišťovala dosažená přesnost a další parametry jako je čas měření, zpracování a technická náročnost.

Opěrná zeď SO 218 byla monitorována 3x s čtyřtýdenním intervalem. Etapy po dokončení konstrukčních vrstev vozovky. Opěrná zeď SO 217 byla monitorována 4x s čtyřtýdenním intervalem od nulté etapy až po etapu dokončení násypu po spodní hranu říms.

Obr. 11 – Opěrná zeď SO 218

4. Geodetický monitoring

V následujících podkapitolách se věnuji použitým přístrojům, pomůckám a programům. Popisuji použité metody měření geodetického monitoringu a body základní vytyčovací sítě a hybridní soustavy pro laserové skenování.

4.1. Přístroje, pomůcky a programy

Pro měření a následné zpracování projektu byly použity různé geodetické přístroje. Nivelační přístroj Zeiss Dini 010 pro měření přesné nivelace. Pro prostorové zaměření sledovaných bodů byla použita totální stanice Trimble S5 2“. Na pozemní laserové skenování byl použit statický laserový skener Faro Focus 3D. Totální stanice, nivelační přístroj a příslušenství, které byly k měření použity, jsou součástí geodetického vybavení firmy DD plus v.o.s. Laserový skener byl zapůjčen z inventáře VUT FAST ústavu geodézie. Totální stanice, nivelační přístroj a lať byly kalibrovány VÚGTK.

Pro následné zpracování měřených dat byly použity programy Trimble RealWorks, určené pro práci s mračny bodů, Trimble Bussines Center, CloudCompare, GROMA (viz kapitoly 5.4 Zpracování a 6.5 Zpracování). Pro porovnání etap a vyhodnocení posunů byl použit Excel.

4.1.1. Totální stanice Trimble S5 2“

Trimble S5 je řada robotických totálních stanic vybavených softwarem Trimble Access. Totální stanice disponuje magnetickými servoustanovkami a automatickým ostřením, umožňuje měření ve dvou polohách dalekohledu s automatickým otočením přístroje. Poskytuje možnost sledování pohybujícího se hranolu ať už pasivního nebo aktivního. Je vybaven přesným dálkoměrem určeným i pro bezhranolové měření. K řízení totální stanice je potřeba bezdrátový kontroler. [19]

Obr. 12 – Trimble S5 [25]

Obecné informace	
El. dvojosá libela s rozlišením	0,3“ (0,1 mgon)
Optický centrovač v trojnožce	
Hmotnost přístroje	5,5 kg
Zvětšení dalekohledu (zvětšení / min. vzdálenost na ostření)	30x / 1,5 m
Sériové číslo	36910442
Úhlová přesnost	
Přesnost (dle ISO 17123-3)	2“ (0,6 mgon)
Čtení (nejmenší dílek)	0,1“ (0,01 mgon)
Měření vzdálenosti	
Hranol (dle ISO 17123-4)	1 mm + 2 ppm
Hranol (Směrodatná odchylka Standard)	2 mm + 2 ppm
Bez. hranol (Směrodatná odchylka Standard)	2 mm + 2 ppm
Dosah (hranol/bez. hranol)	2500 m / 1300 m

Tab. 2 – Technické specifikace Trimble S5 2“ [19]

4.1.2. Nivelační přístroj Zeiss DiNi 010

Digitální nivelační přístroj vyráběný v 90. letech firmou Zeiss. Přístroj je určen k elektronickému čtení kódových latí. Umožňuje vytvářet záznam nivelačního měření do textového souboru, který je možné exportovat z interní paměti do počítače.

Obr. 13 – Nivelační přístroj Zeiss DiNi [26]

Obecné informace	
Zvětšení dalekohledu	26x
Hmotnost přístroje	±3 kg
Sériové číslo	212035
Přesnost	
Přesnost	0,3 mm /1 km
Čtení (nejmenší dílek)	0,01 mm
Rozsah (min./max.)	1,5 m / 100 m

Tab. 3 – Technické specifikace Zeiss DiNi 010 [20]

4.1.3. Laserový skener Faro Focus 3D 120

Faro Focus 3D 120 je panoramatický skener, vzdálenost měří výkonným dálkoměrem založeným na technologii fázového posunu. Skener určuje odrazivost povrchů měřením intenzity přijatého laserového paprsku. Tmavé povrchy odrážejí méně světla než povrchy světlé. Ke každému bodu je tak přiřazena hodnota intenzity od 0 do 1. Výstupem je formát fls, který obsahuje kartézské souřadnice a hodnotu intenzity, případně i barvy. [21]

Obr. 14 – Laserový skener FARO Focus 3D 120

Obecné informace	
Hmotnost přístroje	5 kg
Rozlišení barev	<70 Mpix
Rychlost (tisíc bodů za sekundu)	122/ 244 / 488 / 976
Sériové číslo	LS061304311, LS061303451
Přesnost	
Zorné pole (vertikální / horizontální)	300° / 360°
Velikost kroku (vertikální / horizontální)	0,009° / 0,009°
Rozsah chyby 10 m a 25 m, u 90% a 10% odrazivosti	±2 mm

Tab. 4 – Technické specifikace FARO Focus 3D 120 [21]

Společnými charakteristikami měření etap, je provedení justáží přístrojů. U nivelačního přístroje byla provedena Kukkamakiho metoda justáže záměrné přímky. Tato metoda je přímo nastavena v přístroji a po dokončení úlohy bude vypočtena přístrojem nová odchylka od záměrné přímky. Pokud by se při justáži významně změnila vypočtená odchylka od předešlé byla by nastavena nově vypočtená. Odchylka se za celou dobu měření etap pohybovala ± 1‘‘ od nastavené hodnoty. U totální stanice se provedla justáž kolimační a indexové chyby. I v tomto přístroji je celý proces justáže připravený a po jeho dokončení přístroj vypočte nové hodnoty kolimační a indexové chyby. Tato justáž se při běžném užívání přístroje používá i několikrát týdně. Před každým měřením byla provedena zběžná kontrola pomůcek.

4.2. Metody měření

Dle zadání projektu se budou monitorovat min. 4 geodetické značky, 2x odrazné štítky a 2x nivelační čepy, na každém dilatačním celku. Projektová dokumentace neupravuje požadavky na přesnost měření vodorovných a svislých posunů. Proto se geodetický monitoring opěrných zdí provádí dle pokynů hlavního geodeta zhotovitele stavby. Pro měření výšek byla zvolena metoda přesné nivelace. Měření vodorovných posunů bylo určeno z prostorové polární metody podrobněji v kapitole 2.3.1 Geodetické metody.

Mezní hodnotu svislého posunu dle ČSN 73 0405 vypočítáme pro předpokládanou nejnepříznivější hodnotu sedání 20 mm, dosazením do vzorce (12). Střední chybu rozdílu dvou etap vypočítáme ze zákona hromadění středních chyb.

$$\delta_p = \frac{2}{15} p = 2{,}7\ mm \qquad m_{H_{ij}} = \frac{\delta_p}{2\sqrt{2}} = 1\ mm$$

Přístroj Zeiss Dini 010: $m_z = \pm\, 0{,}50\, mm$ pro předpokládaný počet sestav $n = 3$ vyhovuje.

Mezní hodnotu náklonu, tedy kritický posun hlavy dříku, se vypočítá obdobně. Nejnepříznivější mezní hodnota pro kritický stav náklonu je 22 mm.

$$\delta_p = \frac{2}{15} p = 2{,}9\ mm \qquad m_{P_{ij}} = \frac{\delta_p}{2\sqrt{2}} = 1\ mm$$

Přístroj Trimble S5 2“: $m_p = \pm\, 1\, mm$ přístroj pro měření polární metodou vyhovuje.

Technologií laserového skenování byly skenovány opěrné zdi ve vzdálenosti do cca 10 m od zdi. V některých místech byla volena delší vzdálenost od zdi z důvodu dodržení dobrého překrytu skenů. Kvalita skenování byla nastavena na 6x, rozlišení na 1/5. Skener byl nastaven na skenování bez barev, čímž byl výrazně snížen čas skenování (okolo 4 min na stanovisko). Orientační hustota mračna bodů je 6 mm/10 m. Před samotným sběrem dat každé etapy byl přístroj nastaven stejně.

4.3. Základní vytyčovací síť

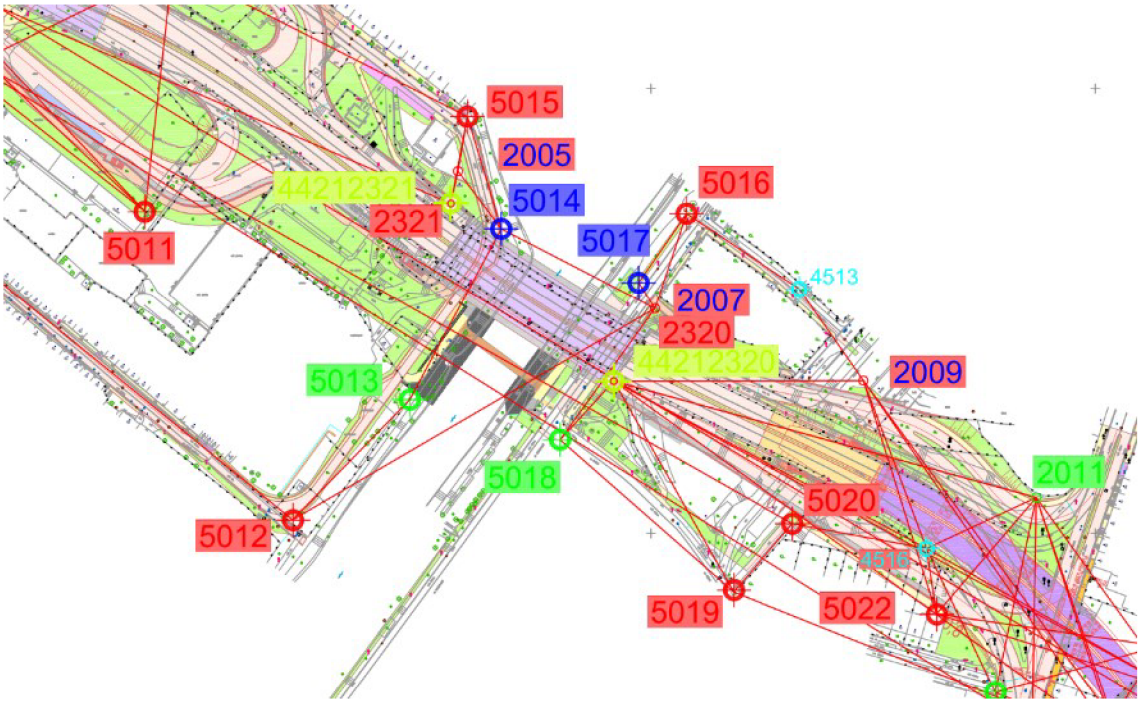
Pro monitoring stavby se využije základní vytyčovací sítě (ZVS), na kterou budou tyto měření připojeny. ZVS tvoří celkem 49 trvale stabilizovaných bodů. Polohově byly body připojeny do S-JTSK technologií GNSS metodou RTK. Výškově byly body připojeny do Bpv metodou přesné nivelace na 3 body ČSNS. Výpočet souřadnic a výšek byl proveden vyrovnáním sítě metodou MNČ. [22]

Rozdělení bodů podle stabilizace [22]:

- 12 bodů s nucenou centrací pro přesné vytyčení a monitorování mostních objektů, opatřené šroubem a nivelační značkou s hloubkou založení do pevného podloží (2,5 m – 10,0 m)
- 8 bodů s hloubkovou stabilizací pro sledování výškových posunů s hloubkou založení (5,0 m – 9,0 m)
- 19 bodů s těžkou stabilizací s hloubkou založení (1,6 m – 1,3 m)
- body osazené hřebovými značkami a body osazené oboustrannými odraznými štítky

Obr. 15 – Nucená centrace ZVS bod 5018

Monitorované body opěrné zdi SO 217 jsou připojeny do S-JTSK a Bpv na body ZVS 5018, 5022, 5023, 5019, 5020 a body opěrné zdi SO 218 jsou připojeny na body ZVS 2007, 5017, 2009, 2011. Pro zajištění dostatečné hustoty orientací pro monitorování z volného stanoviska byly určeny rajonem odrazné štítky (zajišťovací body). Odrazné štítky byly voleny mimo vliv stavby a zároveň v různých směrech.



Obr. 16 – Přehled ZVS [22]

Vlivem stavební činnosti je podezření na narušení stability bodů 2009 a 5020. Pro bod 2009 bylo vytvořeno několik výškových povrchových zajišťovacích bodů. V blízkosti bodu 5020 byla vyhloubena jáma, která by pravděpodobně mohla narušit stabilitu bodu. Dokud nebude jáma opět zasypána a zhutněna, není doporučeno tento bod využívat.

Obr. 17 – Body 2009 a 5020 narušené stavební činností

4.4. Hybridní soustava pro laserové skenování

Pro kontrolu a vlícování mračna bodů z laserového skenování se použila hybridní soustava vztažných a sledovaných bodů (HSVS). Tuto soustavu tvoří šachovnicové terče a referenční koule. Na obě opěrné zdi byly umístěny šachovnicové terče pro kontrolu georeferencování mračna bodů. U SO 217 se soustava proměřovala současně při skenování, u SO 218 se měřila maximálně den před/po skenování. Pro určování hybridní soustavy se vycházelo ze stejných bodů ZVS jako pro terestrické měření.

Body určené pro vlícování a kontrolu zavedení mračen bodů do referenčního systému jsou tvořeny šachovnicovými terči. Šachovnicové terče jsou vytištěny na samolepícím voděodolném nereflexním papíře. Tento papír se prodává ve formátu A4 od firmy AVERY Zweckform, list je rozdělen na 4 štítky o velikosti 10x14 cm. Na každý štítek byl vytištěn jeden šachovnicový vzor o rozměru 10x10 cm, zbylé místo se využilo na číslo bodu. Souřadnice šachovnicových terčů byly určeny prostorovou polární metodou totální stanicí Trimble S5 2“.

Obr. 18 – Šachovnicový terč

Dále se pro spojování mračen a georeferencování použili referenční koule. Referenční koule jsou umělé navazovací body, které slouží k zajištění kvalitní registrace mračna. Tyto koule se využijí hlavně tam, kde není dostatek přirozených bodů pro spojení mračen. Jsou vyrobeny z umělé hmoty s přesností ± 1 mm, malá sada referenčních koulí má nominální průměr 140 mm a velká sada referenčních koulí má průměr 200 mm. [7] Koule se rozmisťují tak, aby byly co nejvíc viditelné na dvou či více navazujících mračnech. Umisťují se v různých výškách a vzdálenostech od skeneru, neměly by se umisťovat do přímé linie. Důležité je zajistit, aby se při skenování s těmito koulemi nepohnulo. Tyto koule byly použity pouze při skenování zdi SO 217.

Obr. 19 – Velká referenční koule

5. Monitoring opěrné zdi SO 218

Zeď byla měřena od dilatačního celku DC 4 až po DC 24. První dilatační celky 1-3 (částečně i DC 4) jsou v této fázi výstavby zasypány a je přes ně umístěn provizorní most a vozovka SO 205.1. Na zeď bylo umístěno 7 kontrolních bodů a pro zavedení mračna do referenčního systému bylo určováno 13 vlícovacích bodů mimo objekt v různé vzdálenosti (viz příloha č. 1.1_Schéma rozmístění sledovaných bodů SO 218).

Byly měřeny 3 etapy po měsíci, dle harmonogramu jsou to etapy č. 4-6 po dokončení říms a konstrukčních vrstev vozovky. Po instalaci konzol byla část sledovaných bodů zakryta a nebylo možné sledovat všechny body a provádět plnohodnotný geodetický monitoring. V tuto dobu byla zeď včetně říms už hotová a byly již odstraněny konzoly a bednění. Z tohoto důvodu se začalo s monitorováním pro diplomovou práci etapou 4. Během tohoto období se dle projektové dokumentace předpokládá, že většina pohybu a sedání již proběhla (viz kapitola 3.2 Projektová dokumentace SO).

Tyto etapy sledování probíhají po dokončení monitorování konsolidace násypů, tzn. etapa 4 byla měřena při poslední etapě monitorování konsolidace násypu. V případě nepříznivého výsledku monitorování konsolidace násypů by znamenalo, že násyp není správně zhutněn a stále probíhá sedání. V tomto případě by nebylo možné povolit konstrukci vozovkových vrstev a bylo by prodlouženo sledování opěrné zdi a násypů. Tato nepříznivá situace však nenastala, a tak bylo povoleno pokračovat v monitorování opěrné zdi dle harmonogramu.

5.1. Etapa 4

Terestrické měření probíhalo 14. až 16. 9. 2022, tato etapa byla měřena za slunného počasí. Laserové skenování proběhlo 16. 9. 2022. V tento den byly vylepeny všechny šachovnicové terče. Zaměření šachovnicových terčů se uskutečnilo 20. a 21. 9. 2022.

Obr. 20 – Měření SO 218 - 4. etapa

5.2. Etapa 5

Terestrické měření probíhalo 11. a 12. 10. 2022, tato etapa byla měřena za mírné oblačnosti. Laserové skenování a zaměření terčů proběhlo 14. 10. 2022. Během měření vlícovacích bodů bylo zjištěno, že terče 10, 3 a KON 7 byly zničeny.

Obr. 21 – Měření SO 218 – 5. etapa

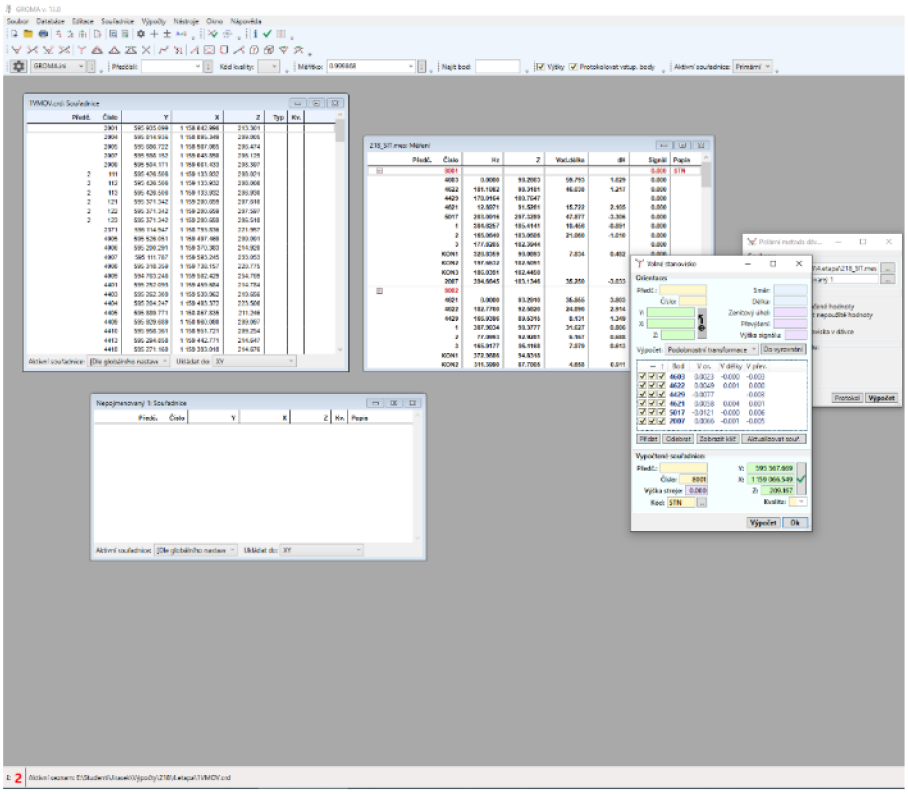
5.3. Etapa 6

Terestrické měření probíhalo 8. a 9. 11. 2022, tato etapa byla měřena za oblačnosti a mírného větru. Laserové skenování a zaměření terčů proběhlo 9. 11. 2022.

Obr. 22 – Měření SO 218 – 6. etapa

5.4. Zpracování

Vyhodnocení posunů na dilatačních celcích bylo vypočteno z rozdílu souřadnic na zaměřených bodech (viz příloha č.: 1.1_Schéma rozmístění sledovaných bodů SO 218). Souřadnice sledovaných bodů pro terestrické měření byly vypočteny nepřímo z měřených veličin v polním SW Trimble Access. Výšky sledovaných bodů byly vypočteny nepřímo z měřených veličin softwarem nivelačního přístroje.



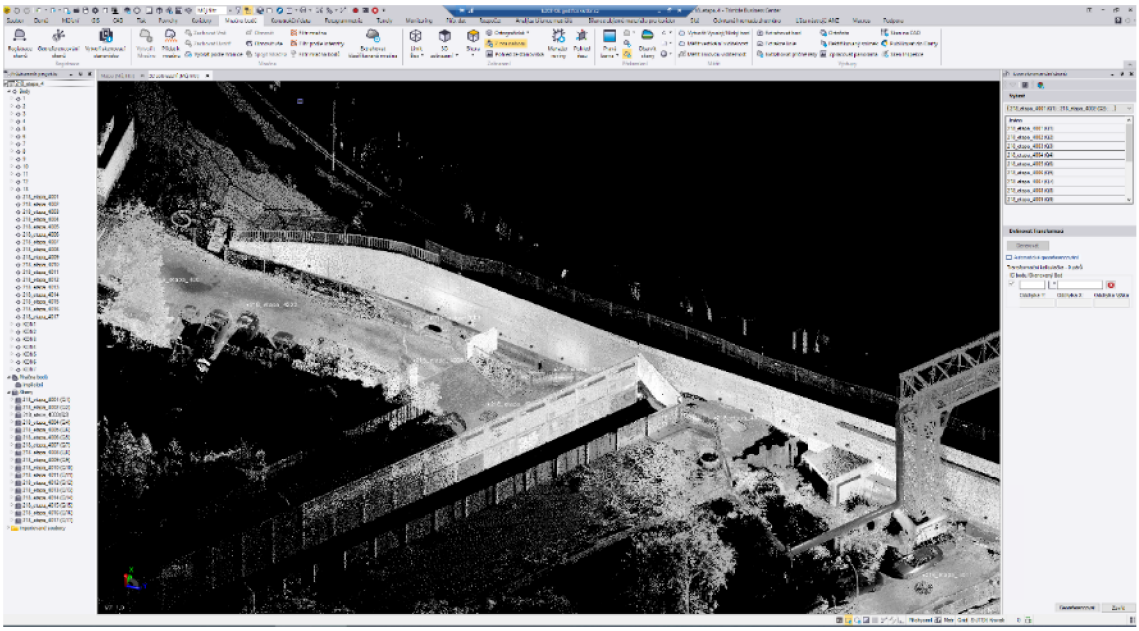
Obr. 23 – Software GROMA v. 13

Hybridní soustava vztažných a sledovaných (HSVS) bodů byla určena prostorovou polární metodou. Souřadnice bodů byly vypočteny v softwaru GROMA v. 13. Stanoviska etap byla vypočtena metodou volného stanoviska, z nich pak polární metodou vypočteny body HSVS. Některé body byly určeny z více stanovisek. Byly porovnány odchylky mezi těmito určeními. Pokud odchylky přesáhly 2 mm, byla posouzena konfigurace jednotlivých určení (úhel záměry, vzdálenost bodu od stanoviska apod.). To se týkalo zejména bodů 7, 9, 12 a KON6, kde byly řešené odchylky největší. V ostatních případech bylo ponecháno první určení bodu. Měřítkový faktor použitý pro přepočet veličin do Křovákova zobrazení je 0,999868. Kompletní

výpočetní protokol všech etap je součástí příloh (viz příloha č.: 1.3_Protokoly o výpočtu bodů HSVS).

Registrace mračen bodů jednotlivých etap byla provedena v softwaru Trimble Business Center (TBC). Program TBC neumožnuje komplexní práci s mračnem bodů, ale na rozdíl od Trimble Realworks (TRW) dokáže aplikovat délkové zkreslení Křovákova zobrazení. Poté co byl nastaven souřadnicový systém a zobrazení, byly do TBC naimportovány body HSVS a poté jednotlivé skeny ve formátu fls. Pro registraci mračen byla použita funkce Registrace pomocí rovin, protokoly vygenerované z registrace jsou součástí přílohy č.: 1.2_Protokoly registrace etap SO218. Celková odchylka registrace mračen se pohybovala okolo 1 mm.

V Trimble Business Center bylo provedeno kromě registrace mračen bodů i georeferencování. Registrované mračno je potřeba zavést do geodetického referenčního systému S-JTSK, v kterém je zavedena základní vytyčovací síť.

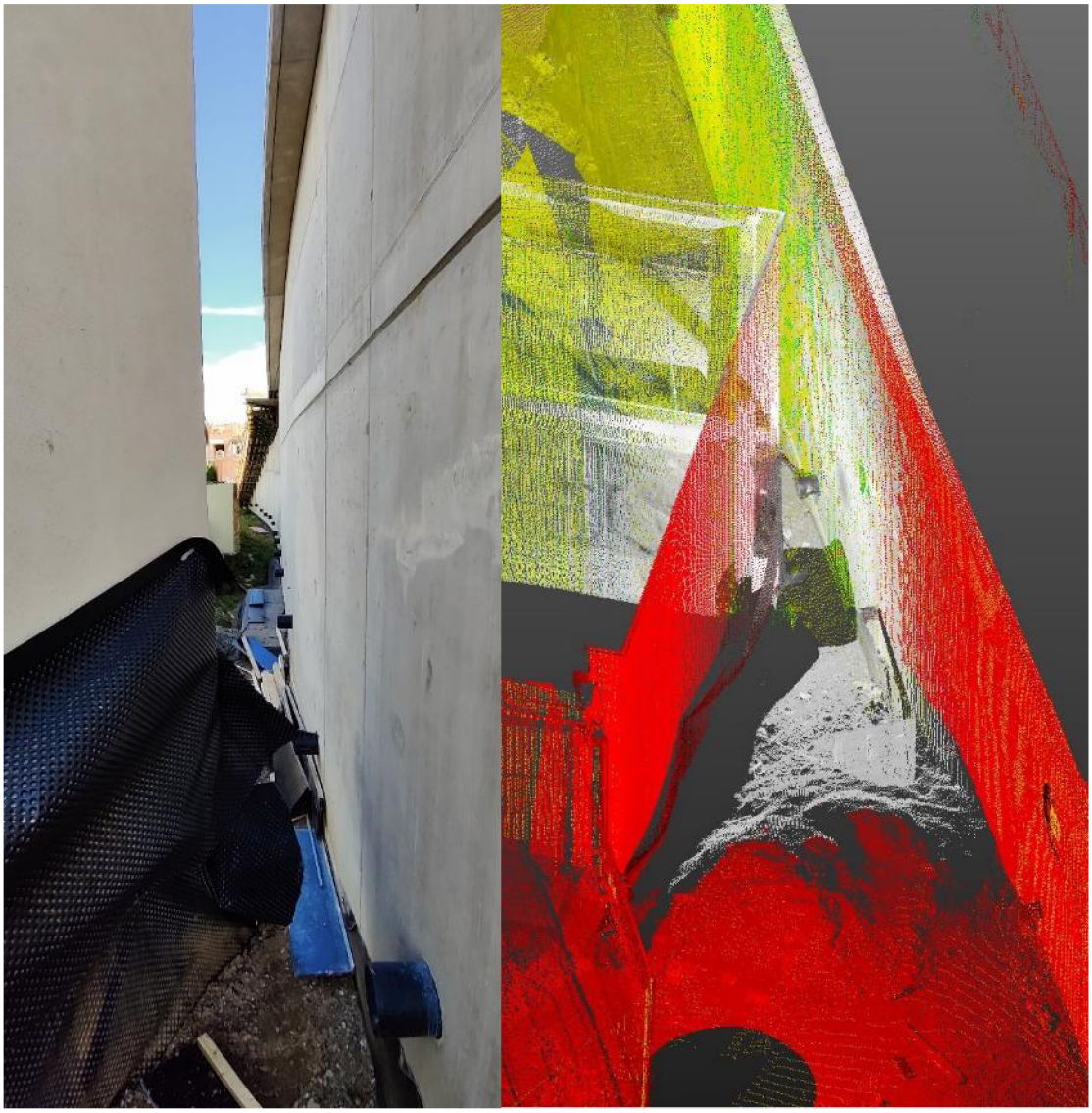


Obr. č. 24 – Program Trimble Business Center

U zdi SO 218 bylo provedeno georeferencování na body HSVS, jejichž souřadnice byly předtím vypočteny v softwaru GROMA viz výše. Pokud by délkové zkreslení nebylo aplikováno na základní vytyčovací síť a tím pádem na HSVS, je možné provést georeferenci mračna bodů i v TRW. V TBC není možné vyhledávat terče. Bod mračna, který je nejblíže středu terče, je zároveň použit pro vlícování. Odchylky vlícování

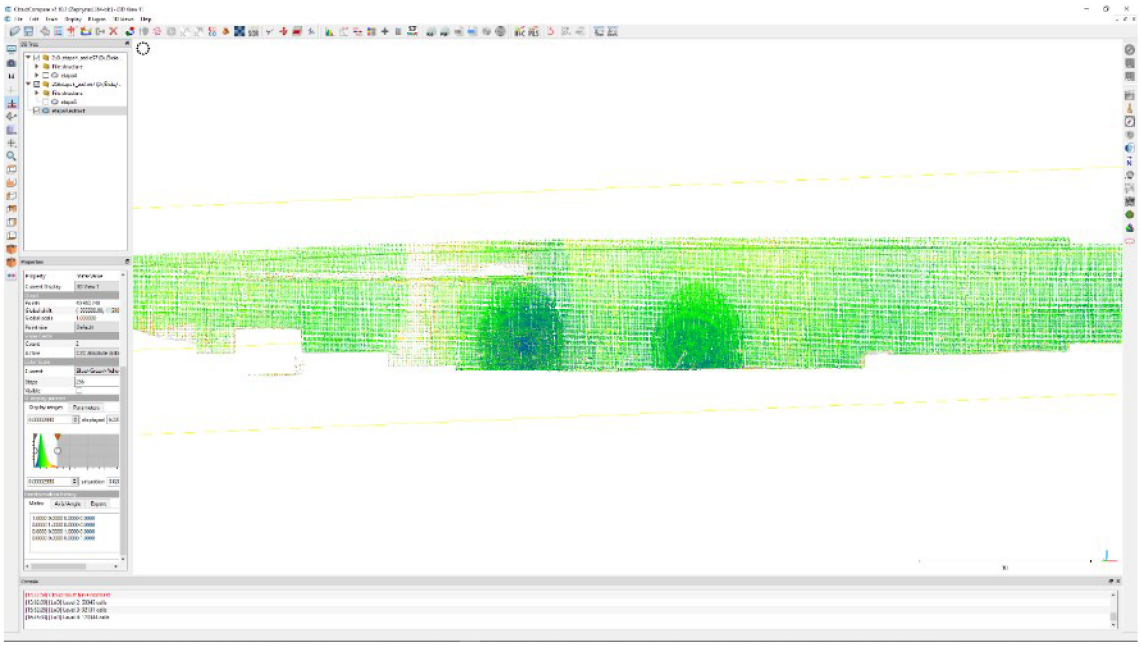
v TBC jsou zobrazeny pouze, když provádíme georeferencování, ale nelze vygenerovat protokol. Proto musely být hodnoty ručně přepsány do excelu viz příloha č.: 1.4_Tabulka výpočtu posunů. Byl vyexportován strukturovaný soubor e57, který obsahuje mračno bodů.

V kritickém místě, kde je ke sledované zdi velmi blízko patrová garáž (viz Obr. 25), hrozilo riziko malého překrytu skenů v takto úzkém prostoru, proto zde byl doplněn sken během skenování. Registrace skenů v tomto místě byla zkontrolována pomocí funkce *Registration Visual Check* v softwaru Trimble Realworks.



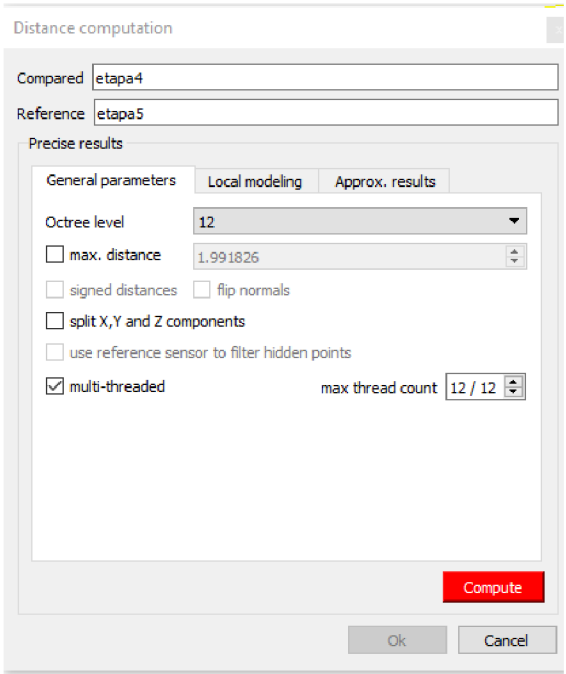
Obr. 25 – Mezera mezi garáží a zdí SO 218

Pro ořezání mračen bodů a porovnání etap byl použit program CloudCompare. Pro práci pouze se zájmovým objektem (opěrnou zdí) bylo každé mračno bodů ořezáno pomocí funkce *Segment*. CloudCompare umožňuje spočítat vzdálenost mezi mračny bodů nebo mezi mračnem a rekonstruovanou plochou (mesh). Pro porovnání byla z mračna bodů etapy 4 vytvořena rekonstruována plocha (mesh) pomocí funkce *PoissonRecon*. Před samotnou rekonstrukcí musely být vypočítány normály funkcí *Edit-Normals-Compute*, orientace normál je vypnuta. Rekonstruovanou plochu tvoří trojúhelníková síť (TIN), jejich hustota je dána nastavením Octree levelu, čím vyšší, tím hladší průběh (víc trojúhelníků).



Obr. 26 – Mračna bodů v CloudCompare

Pro výpočet odchylek mezi etapami se použije funkce *Compute cloud/cloud distance* nebo *Compute cloud/mesh distance*. Funkce spočítá nejkratší vzdálenost mezi dvěma nejbližšími sousedy nebo nejkratší vzdálenost k referenční ploše. Vizualizace odchylek se provedla vytvořením barevné škály. Podrobné výsledky porovnání jsou uvedeny v následující kapitole.



Obr. 27 – Funkce Compute cloud/cloud distance

5.5. Výsledky

Schéma rozvržení sledovaných a kontrolních bodů na opěrné zdi SO 218 je uvedeno v příloze č.: 1.1_Schéma rozmístění sledovaných bodů SO218. Číslování etap je navázáno s realizací násypu nebo po dosažení časového intervalu (viz Tab. 5 více v kapitole 3.2 Projektová dokumentace SO). Laserové skenování bylo provedeno od etapy 4 až po etapu 6.

Tab. 5 – Přehled etap monitoringu

etapa č.	popis etapy sledování SO 218
0	po dokončení zdi a osazení značek
1	po dosažení 2 m násypu
1.1-1.n	po dosažení každých dalších 2 m násypu, nebo po 2 týdnech
2	po dokončení násypu do úrovně spodní hrany římsy
2.1, 2.2	2x po 2 týdnech po dokončení násypu pro římsu
3	1x po měsíci
3.1-3.n	další měření na základě výsledků měření
4	po dokončení říms a konstrukčních vrstev vozovky
5, 6, 7, ...	min. 3x v intervalu 1x za měsíc ...

Z výsledků terestrického měření (viz Tab. 6) je patrné, že v etapě 4 po dokončení říms proběhlo na některých dilatačních celcích zbytkové sedání a náklon. Jedná se hlavně o DC 10-14, které jsou nejvyšší. V dalších etapách jsou již hodnoty sedání malé. Podrobné výsledky a vyhodnocení terestrického měření je v příloze č.: 1.5_Vyhodnocení posunů z terestrického měření SO 218.

Tab. 6 - Výsledné hodnoty posunů z terestrického měření na jednotlivých DC

Posun od předchozí etapy

SO 218

	Sedání			Náklon		
DC	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6
4	0	0	0	+2	+1	0
5	0	0	0	+1	+1	+1
6	0	0	0	+3	+2	+1
7	0	0	0	+3	+1	+1
8	-1	-1	0	+3	+1	+2
9	-1	-1	-1	+4	+2	+1
10	-2	-1	-1	+4	+2	+1
11	-4	-1	-1	+3	0	+1
12	-3	-2	-1	+2	+2	0
13	-4	0	0	+2	+2	+1
14	-2	+2	0	+2	+2	+1
15	-1	0	-1	+3	+3	0
16	-2	-2	-1	+2	+2	+2
17	-3	-2	0	-	+1	+3
18	-1	0	-1	-	+1	+3
19	-2	0	-1	+1	+2	+2
20	-2	0	-1	+2	+3	+1
21	-2	0	-1	+2	+3	+2
22	-3	-1	-1	+2	+3	+1
23	-3	-1	-1	-	+3	+1
24	-1	-1	-1	-	+3	+2

**+/- zdvih/pokles* **+/- posun ven/dovnitř*

**zaokrouhleno na celé milimetry*

DC na kterých byly umístěny terče HSVS a bylo provedeno vyhodnocení laserového skenování

V CloudCompare byli odečteny souřadnice kontrolních bodů pomocí funkce *Point Picking*, a ty porovnány se souřadnicemi zaměřenými klasickou metodou. V tabulce 7 jsou uvedeny průměrné polohové odchylky a průměrné výškové odchylky z vlícování a z kontrolních bodů. Pro kvalitnější navlícování mračen bodů by bylo potřeba přidat více zajišťovacích terčů a počítat body HSVS jako síť, což by ale kvůli husté zástavbě v okolí této opěrné zdi bylo obtížně řešitelné. Byl porovnán náklon a sedání na bodech HSVS z předchozí etapy.

Tab. 7 – Přehled průměrných polohových a výškových odchylek

Přehled průměrných odchylek			
Etapa	[mm]	Vlícování	Kontrolní
4	S_P	2.7	3.4
	S_H	2.0	1.1
5	S_P	5.9	6.2
	S_H	1.6	2.2
6	S_P	4.6	4.5
	S_H	3.5	1.5

Velké rozdíly mezi výslednými posuny na bodech HSVS a posuny z TLS, mohly být způsobeny rozdílnou dosaženou přesností navlícovaných mračen, zničením signalizace některých bodů HSVS i nedostatečným množstvím vlícovacích bodů HSVS na konci opěrné zdi z důvodu nepřístupnosti. Významně rozdílné výsledky jsou na DC 20 a 24. To bylo pravděpodobně způsobeno zvoleným rozmístěním zajišťovacích bodů na konci zdi, z kterých se určovaly kontrolní a vlícovací body. Posuny se mohou lišit, protože se jedná o neselektivní metodu sběru dat. Vybraný bod mračna bodů není středem terče, pro přesný odečet bodu by se musel střed vypočítat.

Tab. 8 – Výsledné hodnoty posunů od 4 etapy z laserového skenování na vybraných DC

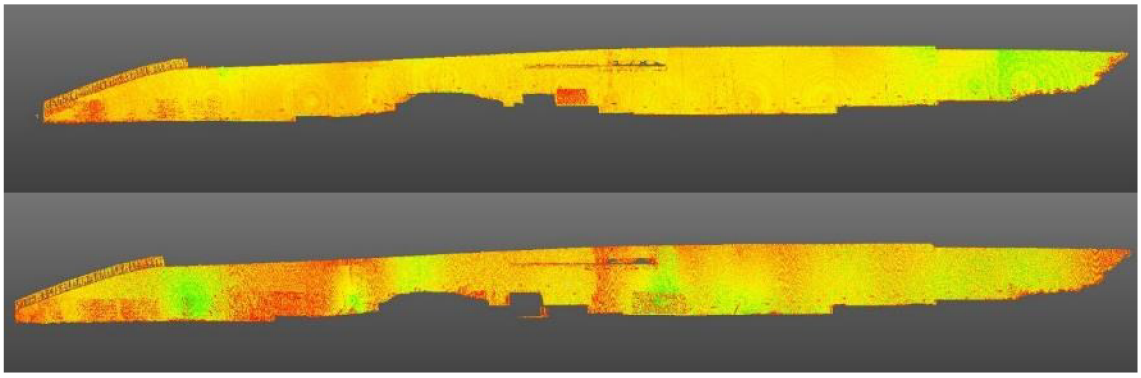
Výsledné posuny na bodech HSVS na vybraných DC

SO 218	**Sedání**		**Náklon**	
DC	Etapa 5	Etapa 6	Etapa 5	Etapa 6
4	-1	-1	0	1
8	-1	-1	2	2
12	1	1	1	-2
16	-3	-3	-4	-3
20	-6	-8	-6	-10
24	-3	-5	-4	-8

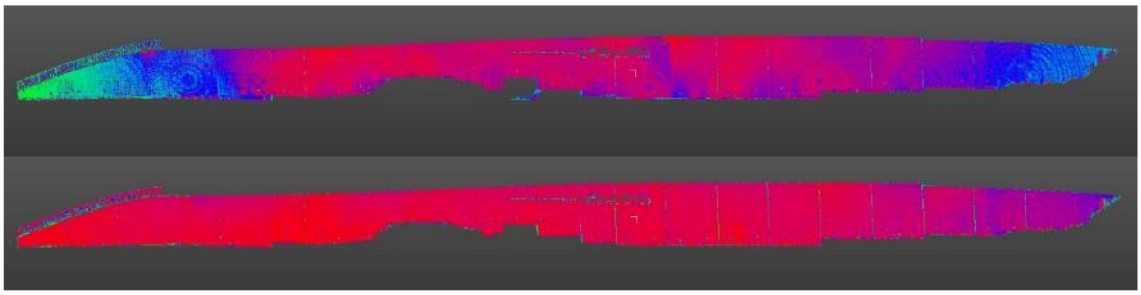
Výsledné posuny z laserového skenování na vybraných DC

SO 218	**Sedání**		**Náklon**	
DC	Etapa 5	Etapa 6	Etapa 5	Etapa 6
4	-1	-1	1	-1
8	-1	-1	-1	1
12	-4	-1	-1	-3
16	0	-1	0	-1
20	1	-1	1	-4
24	1	-1	9	-4

Následně bylo v softwaru CloudCompare provedeno porovnání mračen bodů. Podrobné výsledky a vizualizace jsou součástí přílohy č. 1.6_Vyhodnocení posunů z TLS SO 218. Jelikož výpočet odchylek mezi mračny bodů je vztažen k nejbližšímu sousedovi, byl vytvořen referenční mesh z mračna bodů etapy 4 (viz kapitola 5.4 Zpracování).

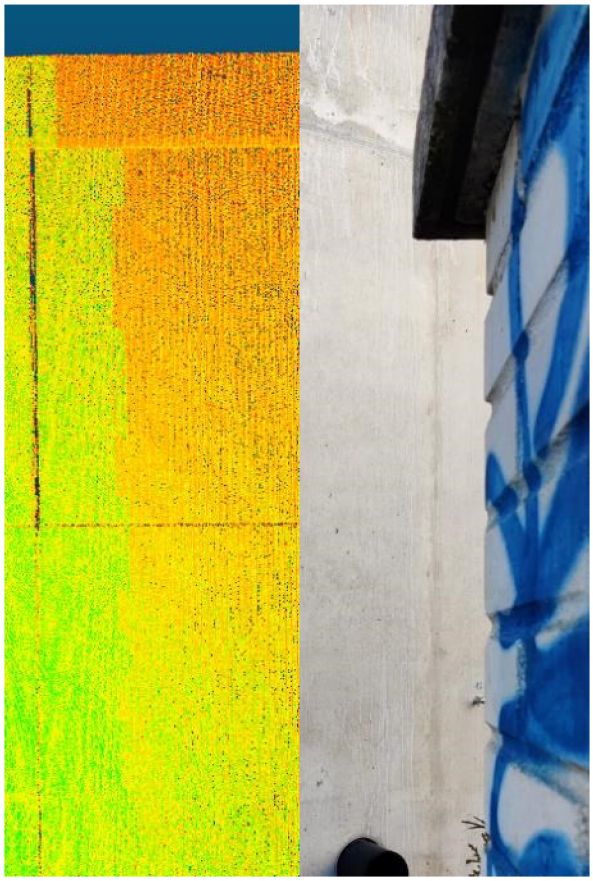


Obr. 29 – Porovnání etap C2C: nahoře etapa 4-5, dole etapa 4-6



Obr. 28 – Porovnání C2M: nahoře etapa 4-5, dole etapa 4-6

Při porovnání metodou C2C bylo zjištěno, že na místech, kde byl sken blízko opěrné zdi, jsou odchylky nižší, než když byl sken dál. Na několika místech je vidět „stín“ konstrukce a patrně sloupek plotu (viz Obr. 31). U metody porovnání C2M je vidět poměrně plynulejší zobrazení odchylek. U porovnávané etapy 4-5 jsou na koncích opěrné zdi zobrazeny záporné hodnoty odchylek. To by znamenalo, že se stěna na koncích oproti celku naklání dovnitř. Na těchto místech se nepředpokládají velké odchylky z důvodu malého zatížení násypem. Je také velmi nepravděpodobné, že by se stěna po náklonu dovnitř v další etapě nakláněla ven s rozdílem desítek milimetrů.



Obr. 30 – Ukázka ze „stínu“ sloupku na skenu

Technologie pozemního laserového skenování je rychlá metoda hromadného sběru dat. Čas potřebný pro měření opěrné zdi SO 218 se pohyboval okolo 1,5-2 hodin. Zaměření kontrolních a vlícovacích bodů trvalo okolo 1-1,5 hodiny. Nejdéle trvalo změření etapy 4, kdy byly vylepeny terče a ty následně byly proměřeny z několika stanovisek. Pro terestrické měření jsou oproti TLS potřeba dva pracovníci. Měření nivelace v podmínkách stavby, trvá obvykle 3 hodiny. Polární měření trvalo okolo 2 hodin. Zpracování klasického měření je pro zkušeného pracovníka rutinní záležitostí, která i s vyhotovením potřebné dokumentace obvykle nezabere více než 2 hodiny. Výsledek z technologie TLS je hodně závislý na podmínkách okolí sledovaného objektu, počtu a rozmístění vlícovacích bodů a také na vzdálenosti skeneru od sledovaného objektu. TLS je na zpracování náročnější a po naučení se postupu zpracování odhaduji, že čas potřebný k celkovému výstupu je cca dvojnásobný oproti klasickému měření.

6. Monitoring opěrné zdi SO 217

Zeď byla měřena od dilatačního celku DC 6 až po DC 20. První dilatační celky 1-6 nebyly před měřením nulté etapy osazeny geodetickými značkami, dilatační celky 21-31 byly měřeny v dřívější etapě výstavby a byl na nich realizován násyp. U DC 21-31 byl dočasně pozastaven monitoring, jelikož byly namontovány konzole pro stavbu říms, které zakryly odrazné štítky.

Na zeď bylo umístěno 7 kontrolních bodů a pro zavedení mračna do referenčního systému bylo určováno 7 vlícovacích bodů mimo objekt v různé vzdálenosti. Z toho 3 vlícovací body byly určovány na šachovnicové terče, a 4 vlícovací body na velké referenční koule. Zároveň bylo použito 5 malých referenčních koulí pro registraci skenů.

Byly měřeny 4 etapy po měsíci, dle projektové dokumentace jsou číslovány 0, 1, 1.n až 2. Protože číslování etap je vázáno na realizaci násypu za jednotlivými dilatačními celky, je číslování etap pro SO 217 nejednotné. Z tohoto důvodu jsou etapy skenování pracovně nazvány 0 až 3, a to od nulté etapy až po dokončení násypu po spodní hranu římsy.

Během tohoto období se předpokládá, že proběhne většina pohybu a sedání. Tyto etapy sledování probíhají při realizaci násypů. Realizace násypu sebou nese nepříznivé vlivy jako vibrace z hutnění válcem, což je problém hlavně při nivelaci. Je nutné přizpůsobit se stavbě a naplánovat měření na dobu, kdy hutnění neprobíhá nebo se domluvit na přerušení hutnění na nezbytnou dobu měření.

6.1. Etapa 0

Terestrické měření probíhalo 23. a 24. 8. 2022, poté co byly osazeny měřící značky. Tato etapa byla měřena za slunného počasí. Realizace násypu začala probíhat až o měsíc později. Vylepení a zaměření šachovnicových terčů se uskutečnilo 23. 9. 2022 ve stejný den proběhlo i laserové skenování. Při stahování dat ze skeneru bylo zjištěno, že jeden sken je zřejmě poškozen a neobsahuje data.

Obr. 31 – Měření nulté etapy SO 217

6.2. Etapa 1

Terestrické měření probíhalo 19. a 20. 10. 2022, tato etapa byla měřena za mírné oblačnosti. Dne 19. 10. 2022 byly zaměřeny body HSVS i provedeno laserové skenování.

Obr. 32 – Měření 1 etapy SO 217

6.3. Etapa 2

Terestrické měření probíhalo 15. a 18. 11. 2022, tato etapa byla měřena za slunného počasí. Dne 14. 11. 2022 byly zaměřeny body HSVS a provedeno laserové skenování.

Obr. 33 – Měření 2 etapy SO 217

6.4. Etapa 3

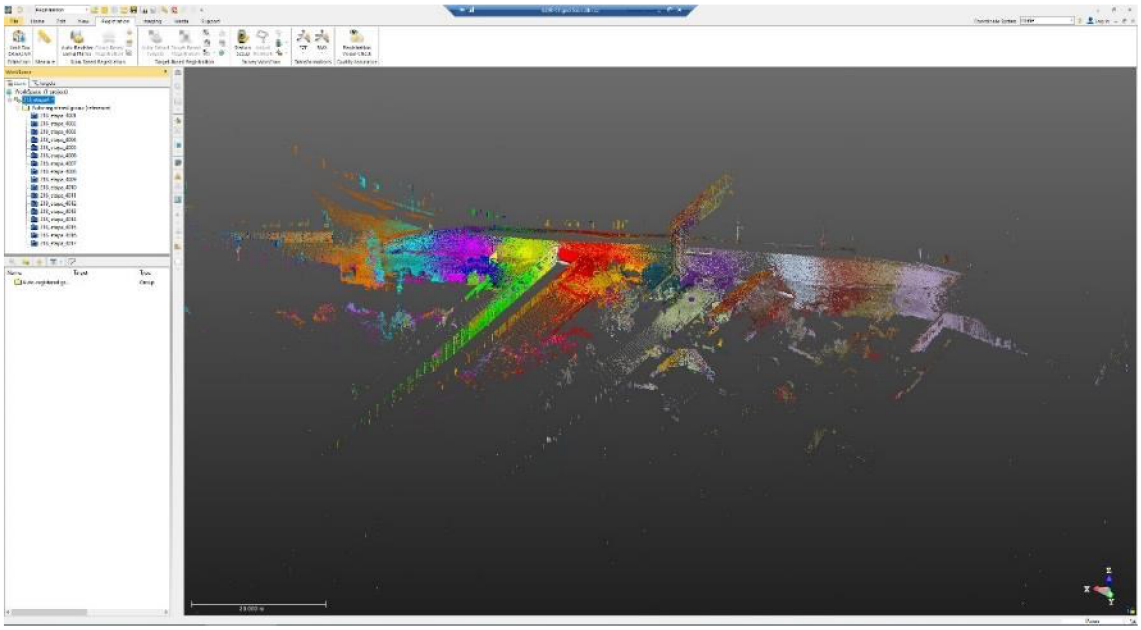
Terestrické měření probíhalo 5. 1. 2023, tato etapa byla měřena za chladného, polojasného počasí. Ve stejný den byly zaměřeny body HSVS i provedeno laserové skenování.

Obr. 34 – Měření etapy 3 SO 217

6.5. Zpracování

Opěrná zeď SO 217 byla zpracovávána obdobně jako SO 218. Body HSVS, které na tomto SO tvořily i referenční koule byly určovány v den skenování objektu kromě nulté etapy, kde byly všechny šachovnicové terče ještě proměřeny metodou prostorové sítě dva dny po skenování. Kompletní protokol o výpočtu bodů HSVS je součástí přílohy č. 2.3_Protokoly výpočtu bodů HSVS.

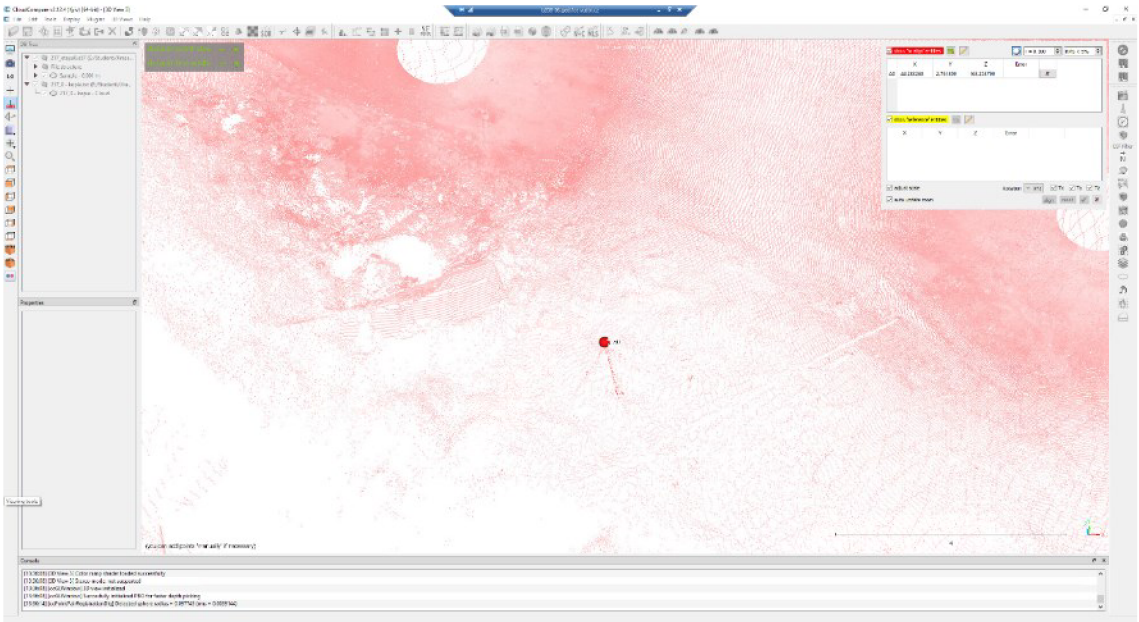
V softwaru RealWorks byla provedena registrace mračen. Tento software je určen k pokročilé práci s mračny bodů, k jejich registraci, klasifikaci a modelaci. Program umožňuje importování souborů fls, z laserového skeneru FARO.



Obr. 35 – Mračno bodů v softwaru RealWorks

Nejdříve byla provedena automatická registrace na základě ploch (*Auto-Register using Planes*), přitom bylo vygenerováno prohlížecí mračno (*Preview*). Poté byly v mračnu automaticky lokalizovány terče pomocí funkce *Auto-Extract Targets* a spuštěna registrace přes terče (*Target Based Registration*). Byly doplněny terče, které nebyly automaticky nalezeny a vymazány falešně přiřazené terče. Byl vytvořen protokol o registraci ve formátu rtf (viz příloha č. 2.2_Protokoly registrace etap SO 217), ve kterém je shrnutí odchylek na terčích a stanoviskách skeneru. Nakonec byla mračna vyexportována do formátu e57. Průměrné odchylky registrace se pohybovaly do 2 mm.

Problematické bylo vyřešit místo u patrové garáže, které bylo ještě užší než u SO 218. Pro georeferencování mračna bodů se použil software CloudCompare, ten na rozdíl od TBC dokáže použít pro vlícování sférické body (referenční koule). Georeferencované mračno každé etapy bylo uloženo ve formátu bin a ořezáno pro následné porovnání.



Obr. 36 – Georeferencování v softwaru CloudCompare

V softwaru Cloud Compare bylo provedeno porovnání mračen funkcí C2M stejným postupem jako u zdi SO 218 v kapitole 5.4 Zpracování.

6.6. Výsledky

Schéma rozvržení sledovaných a kontrolních bodů na opěrné zdi SO 217 je uvedeno v příloze č.: 2.1_Schéma rozmístění sledovaných bodů SO217. Číslování etap je stejné jako u zdi SO 218 a souvisí s realizací násypu nebo po dosažení časového intervalu (viz Tab. 5), laserové skenování bylo provedeno od etapy 0 až po etapu 2. Etapy jsou pracovně číslovány od 0 do 3.

Tab. 9 - Výsledné hodnoty posunů z terestrického měření na jednotlivých DC

Posun od výchozí etapy
SO 217

	Sedání			Náklon		
DC	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
7	-2	-4	-7	+1	+1	+3
8	-3	-5	-8	+3	+4	+7
9	-3	-5	-9	+2	+2	+4
10	-3	-5	-9	0	+1	+3
11	-3	-5	-8	+2	+1	+3
12	-3	-4	-6	+2	+1	+3
13	-3	-5	-6	+3	+2	+6
14	-3	-5	-6	+2	+1	+4
15	-2	-5	-6	+2	+1	+3
16	-3	-5	-6	+2	+2	+2
17	-14	-22	-24	+3	+7	+7
18	-13	-20	-23	+6	+9	+10
19	-12	-18	-20	+7	+12	+12
20	-9	-13	-15	+7	+12	+12

**+/- zdvih/pokles* **+/- posun ven/dovnitř*

**zaokrouhleno na celé milimetry*

DC na kterých byly umístěny terče HSVS a bylo provedeno vyhodnocení laserového skenování

Na základě výsledků terestrického měření (viz Tab. 9), je možné pozorovat rychlé sedání a náklon na dilatačních celcích zakládaných plošně. Jedná se o DC 17-20, mezi dilatačním celkem 16 a 17 bylo po dokončení třetí etapy možné pozorovat poruchy v konstrukci dilatace dříku (viz Obr. 36). Průběh na ostatních dilatačních celcích se vyvíjí dle předpokladu projektu. Podrobné výsledky a vyhodnocení terestrického měření je v příloze č.: 2.5_Vyhodnocení posunů z terestrického měření SO 217.

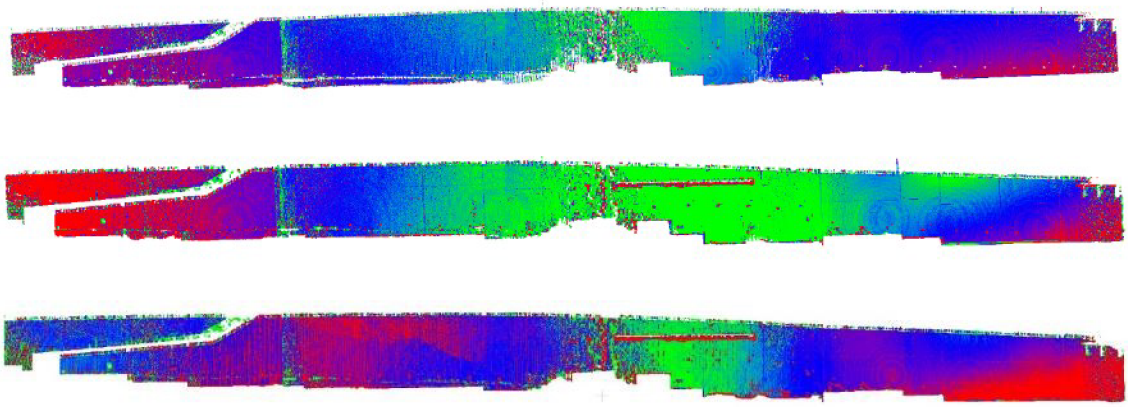
Obr. 37 – Sledovaná porucha mezi DC 16-17

Mračna bodů zdi SO 217 byla georeferencována v softwaru CloudCompare. Tento program vytváří při transformaci tabulku, kde jsou uvedeny prostorové chyby na jednotlivých bodech. Stejně jako u programu TBC nelze vygenerovat protokol o transformaci mračna, proto byly hodnoty přepsány do excelu (viz příloha č.: 2.4_Tabulka výpočtu posunů). Po provedené transformaci byly na kontrolních bodech odečteny souřadnice a porovnány se zaměřením polární metodou. V tabulce č. 10 jsou uvedeny průměrné prostorové odchylky (S_{3D}) z vlícování a z kontrolních bodů.

Tab. 10 – Průměrné prostorové odchylky jednotlivých etap v mm

Etapa	Vlícování	Kontrolní
0	3,2	7,1
1	1,8	6,2
2	5,4	7,6
3	4,4	3,9

Na zdi SO 217 jsou větší rozdíly mezi odchylkami z vlícování a kontroly než u zdi SO 218. Je možné, že to bylo způsobeno použitím jiného softwaru pro georeferencování. U zdi SO 218 byl pro vlícování použit software TBC a u zdi SO 217 byl použit software CloudCompare. Po zavedení mračen jednotlivých etap do referenčního systému byla jednotlivá mračna ořezána a ponechána pouze zeď. Na mračnu bodů etapy 0 byla rekonstruována plocha a ta použita jako referenční plocha pro výpočet odchylek. Pro vizualizaci odchylek byla vytvořena jednotná škála hodnot pro všechny etapy (viz příloha č. 2.6_Vyhodnocení posunů z TLS SO 217).



Obr. 38 – Porovnání etap: Nahoře etapa 0-1, uprostřed etapa 0-2, dole etapa 0-3

Na rozdíl od porovnávané zdi SO 218 je u této zdi extrémnější rozdělení odchylek. U míst v okolí tubusu jsou záporné odchylky i 20 milimetrů naproti tomu na okrajích jsou odchylky kladné až 15 milimetrů. Zobrazené odchylky neodpovídají terestrickému měření, což je nejvýrazněji vidět u tubusu, kde se dle měření TLS zeď naklání dovnitř. Mezi DC 16-17, kde je rozdílné zakládání zdi, nejsou patrné posuny oproti klasickému měření a viditelným projevům.

Je možné, že tyto nesrovnalosti byly způsobeny při registraci mračen z důvodu velmi blízké patrové garáže a tím došlo ke špatnému propojení jednotlivých skenů. V místě u DC 17-20 je malé množství zajišťovacích bodů, navíc se zde nachází podezřelý bod ZVS 5020, čímž propojení sítě před/za garáží není úplně optimální. Rychlost a náročnost zpracování byla u tohoto SO obdobná jako v případě SO 218 (viz 5.5 Výsledky).

7. Závěr

V diplomové práci zaměřené na geodetický monitoring stavebního objektu dle požadavků projektu jsem se zabýval klasickými metodami pro vyhodnocení posunů a méně konvenční technologií laserového skenování. Pro plné pochopení problematiky jsem prostudoval a popsal obecně známé geodetické a geotechnické technologie, které lze pro monitorování stavební konstrukce použít.

Provedl jsem klasické terestrické měření a pozemní laserové skenování na dvou stavebních objektech. Jedná se o dvě opěrné zdi ve výstavbě, které budou sloužit pro držení násypu liniových objektů. Tyto stavební konstrukce jsou součástí stavby velkého městského okruhu v Brně, VMO Tomkovo náměstí – Rokytova.

Po vyhodnocení klasického měření a měření technologií laserového skenování na těchto specifických stavebních objektech, které jsou v husté městské zástavbě, jsem došel k závěru, že technologie TLS pro monitorování těchto opěrných zdí není vhodná.

Dle mého názoru by tato technologie mohla být použitelná s použitím skenovací totální stanice Trimble SX12, která se dá zároveň orientovat na stanovisku. Tím by se mohlo aplikovat délkové zkreslení přímo při měření (skenování) objektu a mít mračno bodů v S-JTSK. Nebo s použitím dostatečného množství speciálních sférických vlícovacích bodů namontovaných v okolí sledovaného objektu. Tím by se mohla vylepšit registrace mračen v problematických místech a zvýšila by se hustota vlícovacích bodů. I když je technologie laserového skenování velmi rychlá na sběr dat, následné zpracování vyžaduje více času oproti klasickým metodám.

8. Seznam použité literatury

[1] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *Inženýrská geodézie II: Geodézie ve stavebních oborech*. Brno, 2007. Studijní opora. VUT v Brně.

[2] *Geodézie pro stavební obory* [online]. In: . [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/ged/stavari/vypocty/protinani.html

[3] ČADA, Václav. *11.5. Metody nivelace* [online]. In: . [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: http://geomatika.kma.zcu.cz/studium/gen1/html-old/ch11s05.html

[4] KAČMAŘÍK, Michal. *Bezpilotní letecké prostředky v geoinformatice: 04 – Zpracování snímků technikou Structure for Motion* [online]. In: . Ostrava, 2022 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: https://geoinformatika-1.vsb.cz/uavgis/prednasky/04_SfM.pdf

[5] BEMIS, Sean, Steven MICKLETHWAITE, Darren TURNER, Mike JAMES, Sinan AKCIZ, Sam THIELE a Hasnain BANGASH. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. In: *Journal of Structural Geology* [online]. 2014, , s. 163-178 [cit. 2023-02-27]. ISSN 01918141. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsg.2014.10.007

[6] WESTOBY, M.J., J. BRASINGTON, N.F. GLASSER, M.J. HAMBREY a J.M. REYNOLDS. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 2012, **179**, 300-314. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021

[7] MRŮZEK, Tomáš. *3D model vybraného objektu*. Brno, 2021. Diplomová práce. VUT v Brně.

[8] WU, Chao, Yongbo YUAN, Yang TANG a Boquan TIAN. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. 2022, **22**(1). ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22010265

[9] ŠTRONER, Martin. *Globální navigační satelitní systémy* [online]. In: . Praha: ČVUT - Fakulta stavební [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/wp-content/uploads/2022/01/GNSS_obs.pdf

[10] RTK GPS Explained. In: *ANATUM: GeoMobile Solutions* [online]. Anatum Geomobile Solutions, 2023 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: https://www.agsgis.com/RTK-GPS-Explained_b_6.html

[11] CIBULKA, Miloš. *Globální navigační satelitní systémy* [online]. In: . Mendelu - Lesnická a dřevařská fakulta, 2018 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/geodezie/geodezie_2018/gnss.pdf

[12] HRUBEŠOVÁ, Eva. 7. Extenzometrická měření ve vrtech: Geotechnický monitoring. In: *VŠB Technická Univerzita Ostrava: Fakulta stavební* [online]. Ostrava: Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/hrubesova/mon7.htm

[13] HRUBEŠOVÁ, Eva. 8. Monitoring smykových ploch: Geotechnický monitoring. In: *VŠB Technická Univerzita Ostrava: Fakulta stavební* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/hrubesova/mon8.htm

[14] MARSCHALKO, Marian, Jarmila MÜLLEROVÁ a David IDES. *6. Geotechnický monitoring* [online]. In: . Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/svadef/text/6_monitoring.htm

[15] *ČSN 73 0405: Měření posunů stavebních objektů*. Praha: Český normalizační institut, 1997, 12 s.

[16] *Silnice I/42: Brno, VMO - Tomkovo náměstí, VMO - Rokytova* [online]. In: . ŘSD [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: https://brnovmo.cz/

[17] KOTAČKOVÁ, Alena, Jana NEVŘALOVÁ a Petr TOMÁŠ. *SO 217 OPĚRNÁ ZEĎ RAMPA VMO - KARLOVA - VPRAVO: Technická zpráva*. Praha: Mott MacDonald CZ, 2021.

[18] KOTAČKOVÁ, Alena, Jana NEVŘALOVÁ a Petr TOMÁŠ. *SO 218 OPĚRNÁ ZEĎ RAMPA VMO - KARLOVA - VLEVO: Technická zpráva*. Praha: Mott MacDonald CZ, 2021.

[19] Trimble S5 Total Station - Czech. In: *Trimble Geospatial: Survey and Mapping solutions* [online]. Trimble Inc., 2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-s5#product-downloads

[20] DiNi Digital Level User Guide. In: *Trimble Geospatial: Survey and Mapping solutions* [online]. Trimble Inc., 2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-dini-level#product-downloads

[21] FARO Laser Scanner Focus3D Users Manual. In: *FARO: 3D Measurment, Imaging & Realization Solutions* [online]. FARO Technologies Inc., 2023 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://knowledge.faro.com/Hardware/Focus/Focus/User_Manuals_and_Quick_Start_Guides_for_the_Focus_Laser_Scanner

[22] DLABOLA, Vlastimil. *SO 000.1 Základní vytyčovací síť (ZVS): Technická zpráva*. Brno: DDplus v.o.s., 2021, 119 s.

[23] GNSS: Global Navigation Satellite Systems. In: *Tersus GNSS: Right to the Point* [online]. c Tersus GNSS Inc., 2023 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: https://www.tersus-gnss.com/technology

[24] VMO TOMKOVO NÁMĚSTÍ, ROKYTOVA. In: *Kopeme za Brno* [online]. Magistrát města Brna [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: https://kopemezabrno.cz/uzavirky-a-omezeni/vmo-tomkovo-namesti-rokytova/

[25] Trimble S5. In: *GEOTRONICS Praha* [online]. Copyright Geotronics Praha, s. r. o., 2016 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: https://geotronics.cz/geodezie/totalni-stanice/trimble-s5/

[26] Zeiss Oberkochen DiNi 10. In: *Collection of geodetic instruments at UL FGG* [online]. Department of Geodetic Engineering, 2021 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: https://zbirka.fgg.uni-lj.si/en/instrument/73

[27] ŠTRONER, Martin. *Základy mapování a účelové mapování* [online]. In: . [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GEY2/pred_5_Metrologie_Ucelove_mapovani.pdf

9. Seznam obrázků

Obr. 1 – Polární metoda [26] ... 12
Obr. 2 – Metoda protínání z úhlů [2] ... 14
Obr. 3 – Metoda geometrické nivelace [3] ... 15
Obr. 4 – Metoda Structure for Motion, potřebuje několik překrývajících se snímků pro rekonstrukci 3D modelu [6] ... 16
Obr. 5 – Pozemní laserové skenování, měřena šikmá vzdálenost S, vertikální úhel β a vodorovný úhel α [7] ... 17
Obr. 6 – Segmenty GNSS, kosmický segment, řídící a kontrolní segment a uživatelský segment [22] ... 19
Obr. 7 – Metoda RTK, pohyblivý GNSS přijímač + příjem korekcí přes internet [9] ... 21
Obr. 8 – Tyčový extezometr – vlevo jednoúrovňový, vpravo víceúrovňový [11] ... 22
Obr. 9 – Princip inklinometrického měření [12] ... 23
Obr. 10 – Vizualizace budoucího Velkého městského okruhu Tomkovo náměstí, Rokytova [23] ... 27
Obr. 11 – Opěrná zeď SO 218 ... 30
Obr. 12 – Trimble S5 [24] ... 32
Obr. 13 – Nivelační přístroj Zeiss DiNi [25] ... 34
Obr. 14 – Laserový skener FARO Focus 3D 120 ... 35
Obr. 15 – Nucená centrace ZVS bod 5018 ... 38
Obr. 16 – Přehled ZVS [21] ... 39
Obr. 17 – Body 2009 a 5020 narušené stavební činností ... 40
Obr. 18 – Šachovnicový terč ... 41
Obr. 19 – Velká referenční koule ... 42
Obr. 20 – Měření SO 218 - 4. etapa ... 44
Obr. 21 – Měření SO 218 – 5.etapa ... 45
Obr. 22 – Měření SO 218 – 6.etapa ... 46
Obr. 23 – Software GROMA v.13 ... 47
Obr. č. 24 – Program Trimble Business Center ... 48
Obr. 25 – Mezera mezi garáží a zdí SO 218 ... 49
Obr. 27 – Mračna bodů v CloudCompare ... 50
Obr. 28 – Funkce Compute cloud/cloud distance ... 51
Obr. 30 – Porovnání C2M: nahoře etapa 4-5, dole etapa 4-6 ... 55
Obr. 29 – Porovnání etap C2C: nahoře etapa 4-5, dole etapa 4-6 ... 55
Obr. 31 – Ukázka ze „stínu“ sloupku na skenu ... 56
Obr. 32 – Měření nulté etapy SO 217 ... 58
Obr. 33 – Měření 1 etapy SO 217 ... 59
Obr. 34 – Měření 2 etapy SO 217 ... 60
Obr. 35 – Měření etapy 3 SO 217 ... 61
Obr. 36 – Mračno bodů v softwaru RealWorks ... 62
Obr. 37 – Georeferencování v softwaru CloudCompare ... 63
Obr. 38 – Sledovaná porucha mezi DC 16-17 ... 65
Obr. 39 – Porovnání etap: Nahoře etapa 0-1, uprostřed etapa 0-2, dole etapa 0-3 ... 66

10. Seznam tabulek

Tab. 1 – Varovné stavy pro sledování naklonění jednotlivých DC na SO 217 a SO 218 [16], [17] 29
Tab. 2 – Technické specifikace Trimble S5 2“ [18] 33
Tab. 3 – Technické specifikace Zeiss DiNi 010 [19] 34
Tab. 4 – Technické specifikace FARO Focus 3D 120 [20] 36
Tab. 5 – Přehled etap monitoringu 52
Tab. 6 - Výsledné hodnoty posunů z terestrického měření na jednotlivých DC 53
Tab. 7 – Přehled průměrných polohových a výškových odchylek 54
Tab. 8 – Výsledné hodnoty posunů od 4 etapy z laserového skenování na vybraných DC 54
Tab. 9 - Výsledné hodnoty posunů z terestrického měření na jednotlivých DC 64
Tab. 10 – Průměrné prostorové směrodatné odchylky jednotlivých etap v mm 65

11. Seznam použitých zkratek

VMO … Velký městský okruh
Sfm … Structure from motion
TLS … Terestrial laser scan
MLS … Mobile laser scan
ALS … Aerial laser scan
PPP … Precise point positioning
MNČ … Metoda nejmenších čtverců
DGPS … Differencial GPS
RTK … Real-Time Kinematic
PRS … Pseudo reference station
ŘSD … Ředitelství silnic a dálnic
SO … Stavební objekt
PDPS … Projektová dokumentace pro provádění stavby
RDS … Realizační dokumentace stavby
VUT FAST … Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně
VÚGTK … Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
ČSNS … Česká státní nivelační síť
TBC … Trimble Business center
ZVS … Základní vytyčovací síť
HSVS … Hybridní soustava vztažných a sledovaných bodů
S-JTSK … Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
Bpv … Balt po vyrovnání
TRW … Trimble Realworks
DC … Dilatační celek
C2C … Cloud to cloud
C2M … Cloud to mesh

12. Seznam příloh

1_SO 218

- 1.1_Schéma rozmístění sledovaných bodů SO 218 *(1.1_schema.pdf)*
- 1.2_Protokoly registrace etap SO 218 *(1.2_prot_reg.pdf)*
- 1.3_Protokoly výpočtu bodů HSVS SO 218 *(1.3_prot_HSVS.pdf)* **POUZE ELEKTRONICKY**
- 1.4_Tabulka výpočtu posunů *(1.4_tab_posun.xlsx)* **POUZE ELEKTRONICKY**
- 1.5_Vyhodnocení posunů z terestrického měření SO 218 *(1.5_posuny_tere.pdf)*
- 1.6_Vyhodnocení posunů z TLS SO 218 *(1.6_posuny_TLS.pdf)*

2_SO 217

- 2.1_Schéma rozmístění sledovaných bodů SO 217 *(2.1_schema.pdf)*
- 2.2_Protokoly registrace etap SO 217 *(2.2_prot_reg.pdf)*
- 2.3_Protokoly výpočtu bodů HSVS SO 217 *(2.3_prot_HSVS.pdf)* **POUZE ELEKTRONICKY**
- 2.4_Tabulka výpočtu posunů *(2.4_tab_posun.xlsx)* **POUZE ELEKTRONICKY**
- 2.5_Vyhodnocení posunů z terestrického měření SO 217 *(2.5_posuny_tere.pdf)*
- 2.6_Vyhodnocení posunů z TLS SO 217 *(2.6_posuny_TLS.pdf)*