České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra speciální geodézie

Diplomová práce

Bc. Novák Michal

Monitoring pilotové stěny

Vedoucí práce: doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.

Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Inženýrská geodézie

Praha 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Novák Jméno: Michal Osobní číslo: 477415

Zadávající katedra: Speciální geodézie

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor/specializace: Inženýrská geodézie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Monitoring pilotové stěny

Název diplomové práce anglicky: Monitoring of the pile wall

Pokyny pro vypracování:
Popis geodetických prací při monitoringu pilotové stěny. Rozbory přesnosti. Vlastní zaměření několika etap monitoringu. Vyrovnání měření. Vyhodnocení etapového měření. Grafické výstupy.

Seznam doporučené literatury:
ČSN 73-04-05
Urban, R.: Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů 1. vyd. Praha: CTU Publishing House, 2015. 227 s. ISBN 978-80-01-05786-5.
Hampacher, M. - Štroner, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 2. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 23.2.2023 Termín odevzdání DP v IS KOS: 22.5.2023
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá monitoringem pilotové stěny v Plzni. Práce popisuje různé metody geotechnického monitoringu, postup měření v terénu, následné vyhodnocení měření a interpretaci výsledků. Také jsou porovnány totální stanice s různou úhlovou přesností a dva softwary pro vyrovnávání geodetických sítí.

Klíčová slova

Monitoring, pilotová stěna, vyrovnání, posun, etapové měření, prostorová síť

Anotation

This diploma thesis focuses on monitoring of the pile wall in Pilsen.
The work describes several methods of geotechnical monitoring, the procedure of surveying in the field, the consequential evaluation of measurement and interpretation of results. There are also compared total stations with various angle accuracies and two softwares for adjustment of geodetic networks.

Keywords

Monitoring, pile wall, adjustment, displacement, stage measurement, spacial network

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma *Monitoring pilotové stěny* jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne ..... Bc. Novák Michal .....

Poděkování

Chtěl bych velmi poděkovat mému vedoucímu této diplomové práce
doc. Ing Rudolfu Urbanovi, PhD, za věcné připomínky a rady při konzultacích,
své rodině a také firmě Angermeier Engineers s.r.o. a mým kolegům.

Použité zkratky

GNSS	Global navigation satellite system
RTK	Real-time kinematic
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
GB	Geodetický bod
SŽDC	Správa železnic
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic ČR
ZVS	Základní vytyčovací síť
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
Bpv	Balt po vyrovnání
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
sm. odch	směrodatná odchylka
m	metr
mm	milimetr
mgon	miligon
ppm	parts per million
SW	software

Obsah

1 Úvod **10**

2 Stavební jámy **11**
2.1 Účel stavebních jam 11
2.2 Pažící konstrukce stavebních jam 12
2.2.1 Pilotové stěny 12
2.2.2 Záporové pažení 13
2.2.3 Mikrozáporové pažení 13
2.2.4 Trysková injektáž 14

3 Norma ČSN 73 0405 **15**
3.1 Potřeba měření 15
3.2 Projekt měření posunů 15
3.3 Přesnost měření 16
3.4 Měření 17

4 Projekt geotechnického monitoringu **18**
4.1 Organizace monitoringu 18
4.2 Provádění monitoringu 18
4.2.1 Inklinometrická měření 18
4.2.2 Měření kotevních sil dynamometry 18
4.2.3 Geodetická měření deformací 19
4.3 Definice varovných stavů a způsob hodnocení výsledků monitoringu 19
4.3.1 Varovné stavy 19
4.3.2 Stupně a hodnoty kritérií varovných stavů 20
4.3.3 Zásady pro hodnocení výsledků monitoringu 20
4.4 Způsob předávání výsledků monitoringu 21

5 Geotechnický monitoring **22**
5.1 Geodetické sledování posunů a deformací 22
5.1.1 Prostorová polární metoda 22
5.1.2 Prostorové protínání z úhlů 23
5.1.3 Prostorová síť 23
5.1.4 Průseková fotogrammetrie 24
5.1.5 Metoda 3D skenování 24
5.1.6 Metoda GNSS 24

5.2 Negeodetické sledování posunů a deformací 25
5.2.1 Měření na trhlinách 25
5.2.2 Extenzometrická měření 26
5.2.3 Inklinometry 26
5.2.4 Měření polohových změn sondami 26
5.2.5 Dynamometry 27

6 Monitoring pilotové stěny v Plzni 28
6.1 Lokalita 28
6.2 Historie města 29
6.3 Popis stavby 29
6.3.1 Uzel Plzeň, 5. stavba - Lobzy-Koterov 30
6.3.2 Tunelový zárodek na stavbě I/20 Plzeň 30
6.4 Bodové pole 31
6.4.1 Základní bodové pole 31
6.4.2 Sledované body 32

7 Použité přístroje a softwary 34
7.1 Přístroje a pomůcky 34
7.1.1 Totální stanice Leica Nova MS50 34
7.1.2 Totální stanice Leica Viva TS15 5” 35
7.1.3 Měřické vybavení 36
7.1.3.1 Odrazné hranoly 36
7.1.3.2 Ostatní 36
7.2 Software 37
7.2.1 PrecisPlanner 3D 3.3.1 37
7.2.2 EasyNET 3.5.1 38
7.2.3 Vector Diagram 1.23 38
7.2.4 Neptan/GPS 39
7.2.5 Notepad++ 39
7.2.6 LaTeX 40

8 Rozbory přesnosti před měřením 41
8.1 Leica Nova MS50 43
8.2 Leica Viva TS15 5” 44

9 Měření 48
9.1 Postup měření 48

10 Zpracování měření 51
10.1 Vyrovnání geodetické sítě 51
10.1.1 Vyrovnání geodetické sítě obecně 51
10.1.2 Vyrovnání sítě EasyNET 56
10.1.2.1 Vyrovnání sítě pro totální stanici Leica MS50 . 56

10.1.2.2 Vyrovnání sítě pro totální stanici Leica TS15 . 60
10.1.3 Vyrovnání sítě Netpan/GPS 62
10.1.4 Rozbory přesnosti po měření 64
10.1.4.1 Rozbory přesnosti po měření pro totální stanici Leica MS50 64
10.1.4.2 Rozbory přesnosti po měření pro totální stanici Leica TS15 65
10.1.5 Porovnání softwarů pro vyrovnání 66
10.2 Vyhodnocení posunů 68
10.2.1 Vyhodnocení posunů obecně 68
10.2.2 Určení deformací 69
10.2.3 Grafické výstupy 70
10.3 Porovnání totálních stanic 70

11 Závěr **72**

Seznam obrázků **74**

Seznam tabulek **76**

Použitá literatura **77**

Seznam přílohy **78**

1 Úvod

Měření posunů a deformací má dnes mimořádně velký význam pro získání stavů stavebních konstrukcí. Na tyto objekty působí vnější i vnitřní jevy, které způsobují dočasné i trvalé změny, proto se geodetické měření provádí v etapách, ve kterých lze tyto změny zachytit a následně vhodně posoudit. Geodetické práce při měření posunů a deformací jsou náročné na dodržování určitých zásad a postupů, protože je třeba dosáhnout vysoké přesnosti. Pro měření posunů a deformací existuje velká řada měřických postupů a metod, ty jsou popsány v normě ČSN 73 0405.

Jako zaměstnanec geodetické firmy Angermeier Engineers s.r.o., která se zabývá i měřením posunů a deformací, jsem měl možnost měřit tyto deformace ve stavební jámě v Plzni. Zde byla z důvodu výstavby a rekonstrukce nového křížení železniční tratě a silniční komunikace vytvořena pažící konstrukce z převrtávaných pilot, proto je tedy nutné říci, co se rozumí pojmem stavební jáma. Jelikož je celá lokalita geologicky nestabilní a stavební jáma je v úrovni spodní vody, je potřeba monitorovat tuto pažící konstrukci. Geodetický monitoring stavební jámy je jen jedna část geotechnického monitoringu, který provádí firma GEOtest a.s.. Té jsou dodávány výsledky měření (respektive vyrovnané souřadnice sledovaných bodů).

Měření probíhá robotickou totální stanicí s automatickým docilováním, proto nevznikají chyby způsobené měřičem, které mohou negativně ovlivnit výsledky. Protože firma disponuje velkým množstvím totálních stanic různých přesností, byla jedna etapa zaměřena i přístrojem s horší úhlovou přesností (tj. 5”), tím je možné dokázat, že na přesné práce lze použít při dodržení daných postupů a metod přístroj s horší úhlovou přesností a získat obdobné výsledky. Jelikož ve firmě Angermeier se na vyrovnání sítí využívá softwaru Neptan/GPS, bude výpočet dvou etap ověřen v softwaru EasyNET. Výsledky z těchto softwarů budou následně porovnány.

2 Stavební jámy

Jelikož se monitoring, kterým se zabývá tato práce, odehrává ve stavební jámě, která je pažena piloty, bude v této kapitole popsáno co je stavební jáma a dále i druhy pažení.

2.1 Účel stavebních jam

Stavební jámy jsou výkopy, sloužící pro spolehlivé založení stavby a výstavbu podzemních prostor objektu. Různě hluboké stavební jámy se provádějí prakticky ve všech případech plošných základů, ale velmi často i v případech, kdy objekty jsou zakládány hlubinně (*Obr. 1*). Při výstavbě objektů pozemního stavitelství, tj. zvláště budov bytových a občanských, je dnes téměř pravidlem návrh suterénních prostor těchto objektů, jež jsou budovány ve stavebních jámách. Stavební jámy mohou být hloubeny jak v zeminách suchých, tak i částečně, nebo zcela pod hladinou podzemní vody, v oblastech nezastavěných i v územích se stávající zástavbou. Rovněž tak objekty inženýrského a vodního stavitelství, jako jsou mosty, hloubené tunely, hloubené stanice podzemních drah, nábřežní zdi, jezy a přehrady bývají zakládány ve stavebních jámách, hloubených především za účelem dosažení únosné základové půdy, nebo i ochrany základů před výmoly apod. Při ražbě štol, kolektorů a jiných drobných podzemních staveb je třeba vybudovat v předstihu těžní a přístupové šachty [1].

Obr. 1: Stavební jáma
Zdroj: zakladani.cz

2.2 Pažící konstrukce stavebních jam

Z důvodu nedostatku místa, ceny pozemků a rychlosti výstavby (většinou v intravilánu) se pro zajištění svislé stěny stavebních jam volí pažící konstrukce. Pažící konstrukce se většinou skládá z:

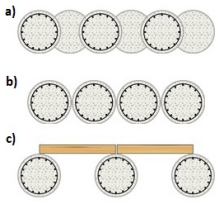
- pažení
- převázek nebo také horních ztužujících věnců
- podpěrných konstrukcí (rozpěry nebo kotvy)

Podle [1] se pro pažení stavebních jam používají následující metody:

- pilotové stěny
- záporové pažení
- mikrozáporové pažení
- podzemní stěny
- trysková injektáž

2.2.1 Pilotové stěny

K pažení stavební jámy lze využít několik pažících metod. Stavební jáma, ve které probíhal monitoring, je pažena metodou pilotových stěn. Jedná se o jednu z nejstarších a zároveň nejpoužívanějších pažících technik. Stěny jsou tvořeny pravidelnou řadou vrtaných pilot o různé osové vzdálenosti. Právě osová vzdálenost pilot rozděluje pilotové stěny na tři kategorie. První z nich jsou piloty s velkou osovou vzdáleností. Zde je osová vzdálenost mezi jednotlivými pilotami větší než jejich průměr. Další variantou jsou piloty, jejichž osová vzdálenost je rovna jejich průměru. Tyto piloty se nazývají tangenciální piloty. Poslední a nejpoužívanější kategorií jsou piloty převrtané, u nichž je osová vzdálenost menší než průměr jednotlivých pilot (*Obr. 2*). Při této metodě rozlišujeme piloty primární a sekundární. Jak je z názvu zřejmé, primární piloty jsou vrtány jako první, nejsou armované a jsou vylité torkretem. Sekundární piloty, jsou vrtané po ztuhnutí betonu v pilotách primárních. Sekundární piloty jsou již armované a mají nosnou funkci. Nad pilotami se nachází železobetonová převázka, která má nosnou funkci, v této převázce se nacházejí horninové kotvy.



Obr. 2: Schéma uspořádání pilot: a) piloty převrtávané, b) tangenciální a c) volně stojící
Zdroj: fine.cz

2.2.2 Záporové pažení

Záporové pažení (tzv. berlínské) je metoda dočasného pažení stěn stavebních jam nad hladinou podzemní vody. Toto pažení se skládá ze zápor, pažin a případně z kotev provedených přes ocelové převázky. Zápory jsou prvky z válcovaných ocelových profilů, které jsou do horniny osazeny buď do předhloubených vrtů, nebo jsou zaberaněny (zavibrovány) pod úroveň budoucího dna stavební jámy (*Obr. 3*).

Obr. 3: Záporové pažení
Zdroj: zakladani.cz

2.2.3 Mikrozáporové pažení

Mikrozáporové stěny (též Janovské stěny) představují jistou alternativu k nejrozšířenějšímu pažení - záporovému. Využití nacházejí ve stísněných prostorách bez možnosti manipulace s větší stavební technikou a tam, kde je třeba navrhnout pažící konstrukci s minimální tloušťkou. Nejčastěji se uplatňují v případech zástavby městských proluk, ve kterých je třeba hlubokou stavební jámu zapažit tak, aby využitelný prostor proluky byl pro účely novostavby co možná největší (*Obr. 4*). Vzhledem k rozměrům jednotlivých prvků je zřejmé, že se jedná o konstrukci poměrně měkkou, jež musí být kotvena či rozpírána v několika úrovních.

Obr. 4: Mikrozáporové pažení
Zdroj: zakladani.cz

2.2.4 Trysková injektáž

Trysková injektáž je moderní, rychlá a efektivní metoda vytváření speciálních základových prvků v zeminách a případně poloskalních horninách. Podstatou technologie je injektáž z vrtu do okolní zeminy, prováděná vysokým tlakem, 30-55 MPa s použitím cementových a jílocementových směsí. Paprsek injekční směsi proudící přes trysky rozpojuje horninu na jednotlivé úlomky nebo jednotlivá zrna, přičemž dochází k jejich vzájemnému mísení a po zatuhnutí k vytvoření požadovaných prvků (sloup, lamela či jejich kombinace) a požadovanému zlepšení vlastností injektovaného prostředí (*Obr. 5*).

Obr. 5: Realizace tryskové injektáže
Zdroj: zakladani.cz

3 Norma ČSN 73 0405

Pro pochopení problematiky měření posunů a deformací je důležité znát normu, která o této problematice pojednává: Měření posunů a stavebních objektů ČSN 73 0405 [2]

3.1 Potřeba měření

Posuny stavebních objektů se měří během jejich výstavby a po jejím dokončení:

a) mohou-li mít posuny význam pro bezpečnost a použitelnost objektu nebo zařízení,
b) při užití neobvyklých nebo nových konstrukcí, nebo konstrukčních systémů,
c) nacházíme-li se v nepříznivých geologických podmínkách,
d) jestliže se v průběhu výstavby objeví známky jejich porušení,
e) jsou-li postaveny v poddolovaném území.

3.2 Projekt měření posunů

Pro každý stavební objekt, jehož posuny se mají měřit, se vypracuje projekt měření posunů. Mají-li se měřit posuny více stavebních objektů, které jsou součástí téže stavby, vypracuje se společný projekt měření.
V projektu měření posunů se uvedou zejména:

a) účel a druh měření (etapová, periodická, kontinuální),
b) potřebné údaje o geologických, geotechnických a hydrotechnických poměrech a vlastnostech základové půdy,
c) stručné údaje o způsobu založení, funkci a zatěžovacím postupu stavební konstrukce,
d) hodnoty očekávaných postupů vypočtené z projektové dokumentace,
e) potřebná přesnost měření s apriorním rozborem,
f) metody měření,
g) způsob označení a zajištění bodů měřickými značkami, druh a rozmístění pozorovaných a vztažných bodů, způsob osazení měřických značek a jejich ochrany proti poškození či zničení,
h) projektová dokumentace úprav stavební konstrukcí, popř. zřízení přídavných stavebních konstrukcí a zařízení potřebných pro osazení měřických přístrojů a pomůcek a pro měření posunů,
i) časový plán stabilizace měřických značek a úprav stavebních konstrukce, popř. zřízení přídavných stavebních konstrukcí a zařízení,

j) časový plán měření u etapových a periodických měření, nebo intervaly záznamu u kontinuelního měření, popř. zásady pro změnu časového plánu v závislosti na průběhu posunů a podmínky ukončení měření,
k) způsob matematického a grafického zpracování a vyjádření výsledků měření a jejich interpretace z hlediska prokazatelnosti posunů, z hlediska mechaniky zemin, zakládání staveb apod.,
m) lhůty předávání dílčích zpráv a závěřečné zprávy o měření.

3.3 Přesnost měření

Přesnost měření posunů nových staveb je dána mezní odchylkou:

$$\delta_1 \leq \frac{2}{15} \cdot p. \tag{1}$$

Kde:

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

Hodnota mezní odchylky měření posunu stavebních objektů nemá podle charakteru základové půdy překročit hodnoty:

a) $\delta_2 < 1$ mm pro skalní a poloskalní horniny,
b) $\delta_3 < 2$ mm pro písčité, hlinité a jiné stlačitelné zeminy a zhutněné násypy,
c) $\delta_4 < 5$ mm pro nezhutněné násypy a silně stlačitelné zeminy.

Hodnota mezní odchylky měření posunů užívaných stavebních objektů, ovlivněných stavební činností v okolí, nemá překročit hodnotu (v mm):

$$\delta_5 \leq \frac{2}{5} \cdot p_k. \tag{2}$$

Kde:

p_k ... kritická hodnota posunu v mm.

Přesnost určení posunů se prověřuje dosaženou hodnotou úplné výběrové směrodatné odchylky s_s, která se testuje mezní hodnotou výběrové směrodatné odchylky s_m dle:

$$s_m \leq \sigma \left(1 + \sqrt{\frac{2}{n}}\right) \tag{3}$$

Kde:

n ... počet nadbytečných měření
σ ... základní směrodatná odchylka, která se vypočte z hodnot δ_1 až δ_5.

3.4 Měření

Pro určení posunů jednoduchých objektů malého rozsahu je třeba v soustavě vztažných bodů měřit nejméně dvě nadbytečné veličiny. Pro měření rozsáhlejších objektů a objektů s vysokou funkční závažností se buduje vztažná soustava tvořena geodetickými body. Jejich úhlové, délkové a výškové zaměření tvoří síť. Stabilita polohy vztažných bodů mezi jednotlivými etapami měření posunů se posuzuje pomocí testování, která vycházejí ze statických hypotéz pro rozlišení skutečného posunu od vlivu posunu.

Při prokázání nestability vztažné soustavy je nutné statistickými testy prokázat změnu polohy jednotlivých bodů vztažné soustavy. Pro statistické testy hypotéz se doporučuje volit koeficient spolehlivost - $u_p = 2,5$.

4 Projekt geotechnického monitoringu

Pro sledování posunů a přetvoření stavební jámy bylo nutné vypracovat projekt, jehož obsahem bude kromě jiného stanovení kritických hodnot posunů. Z toho vyplývají požadované přesnosti geodetických měření, volba vhodného měřického postupu a harmonogram měření, včetně způsobu zpracování a předání výsledků. Projekt geotechnického monitoringu byl vytvořen firmou Geotest a.s. [3].

4.1 Organizace monitoringu

Geotechnický monitoring bude v průběhu výstavby zaměřen na sledování dočasných pažících konstrukcí. Prováděna budou:

a) inklinometrická měření na inklinometrech v pilotách,
b) měření kotevních sil dynamometry,
c) geodetická měření deformací.

Dle projektu geotechnického monitoringu je stanoven počet etap na 105, přičemž jedna etapa je počítána na jeden týden.

4.2 Provádění monitoringu

4.2.1 Inklinometrická měření

Inklinometry v pilotách budou sledovány vodorovné deformace sekundárních pilot převrtávané pilotové stěny po její výšce. Vlastní inklinometrická měření budou realizována speciální aparaturou v kroku po 0,5 m. Celkem bude osazeno 15 ks inklinometrů o délce 10 m.

4.2.2 Měření kotevních sil dynamometry

Kotevní síly budou měřeny strunovými nebo elektrickými dynamometry. Sledovány budou změny velikostí kotevních sil vybraných kotev 1. a 2. kotevní úrovně pilotové stěny a mikrozáporového pažení. Dynamometry budou umístěny na kotvy v těsné blízkosti inklinometrů v pilotách, aby s nimi tvořily sdružené profily.

4.2.3 Geodetická měření deformací

Polohovým a výškovým geodetickým měřením budou sledovány deformace bodů stabilizovaných do pilotové stěny a mikrozáporového pažení. Určovány budou prostorové (absolutní) změny polohy těchto bodů v trojrozměrných souřadnicích (trigonometricky). Celkem bude osazeno a sledováno 55 ks bodů (vždy na pilotách s inklinometry a/nebo dynamometry, s nimiž budou tvořit sdružené profily) - body GB001 až GB044 na 1. kotevní úrovni a body GB101 až GB111 na 2.kotevní úrovni.

Součástí systému geodetického měření deformací bude i cca 9 ks hloubkově stabilizovaných referenčních pilířů s nucenou centrací, které umožní dosáhnout požadovanou přesnost určení deformací sledovaných bodů, která je dána přesností určení změny polohy sledovaného bodu: δ_{xy}= 2 mm.

4.3 Definice varovných stavů a způsob hodnocení výsledků monitoringu

4.3.1 Varovné stavy

Pro potřeby vyhodnocování monitoringu byly zpracovatelem v součinnosti se zhotovitelem stavby a projektantem definovány následující varovné stavy a jejich kritéria. Varovný stav v chování sledovaného systému stavební konstrukce - horninové prostředí - je definován jako taková kvalitativní změna v jeho chování, která znamená zásadní změnu v úrovni podstupovaného rizika nebo nebezpečí.

Dosažení určitého varovného stavu je podnětem pro přijetí určitých technicko-organizačních opatření. Tato opatření jsou nástrojem pro udržení chování sledovaného systému v přijatelných mezích a pro odvrácení důsledků vzniku nežádoucích jevů během výstavby.

Tato opatření spočívají v:

- úpravě provádění vlastního monitoringu (organizačně - zvýšení/snížení frekvence měření, technicky - rozšíření monitoringu o měřené body, sledované objekty atd.),
- úpravě projektu stavby,
- úpravě technologie/provádění stavebních prací.

Spolu s definicí varovných stavů je nutno definovat i jejich stupeň a kritérium:

a) Stupeň varovného stavu je určitý stav v chování horninového masívu a/nebo stavební konstrukce, který má vztah k stanovenému cíli monitoringu a je spojen s určitým opatřením. Čím vyšší je stupeň varovného stavu, tím větší je podstupované riziko/nebezpečí. Pro posouzení, zda bylo či nebylo dosaženo stupně varovného stavu, jsou rozhodující hodnoty kritérií varovných stavů.

b) Kritéria varovných stavů vychází z hodnot sledovaných veličin stanovených

statickým výpočtem (tzn. mezní, limitní hodnoty v projektu), dále posouzením statického stavu sledovaného objektu, nebo jsou stanoveny odborným odhadem. V průběhu výstavby mohou být hodnoty kritérií varovných stavů zpřesňovány na základě skutečného chování horninového masívu a stavebních konstrukcí.

4.3.2 Stupně a hodnoty kritérií varovných stavů

Pro tento projekt monitoringu byly vytvořeny tři stupně varovných stavů:

1. varovný stav - klidový stav
2. varovný stav - stav zvýšené opatrnosti
3. varovný stav - stav nutných opatření

Tyto varovné stavy jsou odvozeny z předpokládaných hodnot sledovaných veličin (deformace, kotevní síly), označenými jako *hodnota A*. Pro zvýšení přehlednosti je na obrázku znázorněné schéma posloupnosti stupňů varovných stavů (viz *Obr. 6*).

Obr. 6: Schéma posloupnosti varovných stavů
Zdroj: projekt GTM

Na následujícím obrázku (*Obr. 7*) jsou uvedeny varovné stavy pro všechny druhy měření.

				Varovný stav - stupně a kritéria		
Metodika měření	**Sledovaný objekt/veličina**	**Varovný stav - popis**	**Hodnota A**	1. varovný stav - klidový stav	2. varovný stav - stav zvýšené opatrnosti	3. varovný stav - stav nutných opatření
				75 - 100% A	100 - 150 % A	> 150% A
Inklinometrická měření	Inklinometr/vodorovná deformace	Vodorovná deformace větší než předpoklad	20 mm	15 - 20 mm	20 - 30 mm	> 30 mm
Měření kotevních sil - piloty	Dynamometr/kotevní síla	Kotevní síla větší než předpoklad	200 kN	150 - 200 kN	200 - 300 kN	> 300 kN
Měření kotevních sil - mikrozápory	Dynamometr/kotevní síla	Kotevní síla větší než předpoklad	110 kN	85 - 110 kN	110 - 165 kN	> 165 kN
Geodetická měření deformací	Geodetický bod/deformace	Deformace větší než předpoklad	20 mm	15 - 20 mm	20 - 30 mm	> 30 mm

Obr. 7: Hodnoty varovných stavů
Zdroj: projekt GTM

4.3.3 Zásady pro hodnocení výsledků monitoringu

Výsledky monitoringu budou hodnoceny ve vztahu k varovným stavům. Posuzování, zda bylo či nebylo dosaženo varovného stavu, se provede komplexně, za použití nadhledu a inženýrského citu. Vývoj kotevních sil a deformací bude nezbytné hodnotit komplexně, ne odděleně (zvlášť síly a zvlášť deformace). Při posuzování výsledků monitoringu bude zohledněno především:

- absolutní hodnoty sledované veličiny,
- rychlost růstu/ustalovaní hodnot sledované veličiny,
- zrychlení/zpomalení, s jakým se mění hodnoty sledované veličiny,
- míra shody teoretické/předpokládané a skutečné hodnoty sledované veličiny.

Přihlíží se k hodnocení celkových trendů ve vývoji sledovaných veličin a ke komplexnímu posouzení chování všech monitoringem sledovaných bodů a veličin, ne jen jednoho jediného bodu/veličiny. Vždy je nutno posoudit platnost přijaté hypotézy přetváření stavební konstrukce a/nebo horninového masívu i technicko ekonomické analýzy důsledků vyhlášení varovného stavu a existujících rizik. Pouze v odůvodněném případě lze kritéria varovných stavů přehodnotit. Toto přehodnocení se provádí na jednání účastníků výstavby, např. v rámci kontrolního dne.

4.4 Způsob předávání výsledků monitoringu

Výsledky monitoringu (grafy, tabulky, zprávy, fotodokumentace atd.), budou průběžně ukládány do informačního systému monitoringu, odkud budou přístupné prostřednictvím sítě internet určeným účastníkům výstavby 24 hodin denně. Přístupové jméno a heslo do informačního systému monitoringu bude přiděleno dodavatelem monitoringu vybraným účastníkům výstavby dle dispozic objednatele.

Dále bude dodavatel monitoringu výsledky monitoringu komplexně shrnovat v rámci etapových zpráv v předpokládané četnosti 1x za 3 měsíce. Po ukončení provádění monitoringu budou všechny získané poznatky shrnuty a zhodnoceny v závěrečné zprávě geotechnického monitoringu.

5 Geotechnický monitoring

Geotechnický monitoring lze rozdělit na dvě části podle způsobu měření posunů a deformací a to konkrétně na část geodetickou a část negeodetickou (např. fyzikální). Zde budou popsány pouze některé metody měření posunů a deformací.

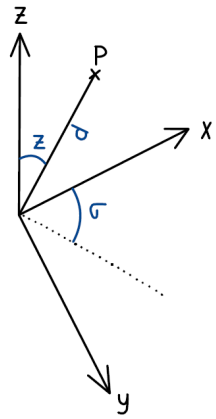
5.1 Geodetické sledování posunů a deformací

Dle [4] mezi základní geodetické metody sledování prostorových posunů a deformací patří:

- Prostorová polární metoda
- Prostorové protínání z úhlů
- Prostorová síť
- Průseková fotogrammetrie
- Metoda 3D skenování
- Metoda GNSS

5.1.1 Prostorová polární metoda

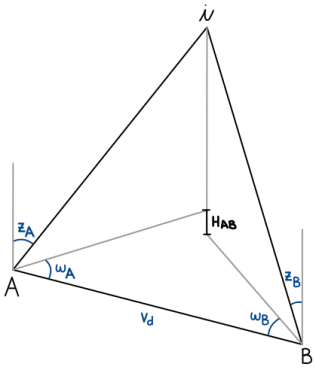
Jedná se o nejrozšířenější a nejjednodušší metodu. Její význam vzrostl s implementací elektrooptických dálkoměrů do geodetických přístrojů. Základní princip výpočtu včetně přesností vychází z polární metody a trigonometrické nivelace (*Obr. 8*).



Obr. 8: Prostorová polární metoda
Zdroj: autor

5.1.2 Prostorové protínání z úhlů

Prostorové protínání z úhlů je v dnešní době metoda spíše teoretická, neboť při využití moderních totálních stanic, lze tuto úlohu pomocí měřených délek přeurčit a řešit ji následně vyrovnáním geodetické sítě. Princip metody spočívá v kombinaci protínání z úhlů a trigonometrické nivelace (*Obr. 9*).



Obr. 9: Prostorové protínání z úhlů
Zdroj: autor

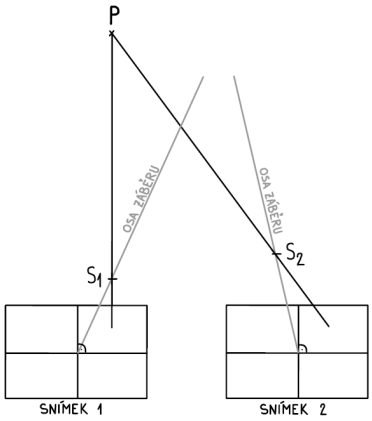
5.1.3 Prostorová síť

Určování prostorových posunů s využitím metody prostorové sítě je v běžné praxi používáno v mnoha případech, kdy je potřeba dosahovat vysoké přesnosti. Princip metody spočívá v zaměření pozorovaných bodů z několika stanovisek pomocí vodorovných a zenitových úhlů či vzdáleností tak, aby obecně vzniklo velké množství nadbytečných veličin a výpočet mohl být proveden vyrovnáním dle MNČ. Pro výpočet je využito geodetické vyrovnání včetně určení směrodatných odchylek určovaných veličin.

Přesnost metody je vhodné modelovat na základě apriorních směrodatných odchylek měřených veličin a vlivu podkladu. Realizace sítě vyžaduje nejen praktickou zkušenost měřiče, ale také teoretickou zdatnost ve výpočtech a rámcový pojem o hromadění směrodatných odchylek. Interpretace výsledků této metody v mnoha případech není jednoduchou záležitostí a je nutné analyzovat všechny negativní vlivy či chyby v měření. Vhodnou metodou pro eliminaci chyb v souboru měření je robusní metoda vyrovnání.

5.1.4 Průseková fotogrammetrie

Tato metoda je založena na využití minimálně dvou snímků, na kterých je vzájemný překryv. Objekt je vyfotografován z několika míst tak, aby byl vždy na dvojici fotografií dostatečný počet identických bodů (viz *Obr. 10*). Přesnost této metody nedosahuje přesností měření totální stanicí, je však méně časově náročná.



Obr. 10: Průseková fotogrametrie
Zdroj: autor

5.1.5 Metoda 3D skenování

Metoda, při které jsou neselektivně určeny prostorové souřadnice objektu. Výstupem měření je poté mračno bodů, které se skládá z několika desítek milionů bodů. Při této metodě je ve velmi krátkém čase dosaženo velmi velkého objemu naměřených dat, která dávají kvalitní informace o objektu. Avšak post-processing takového mračna bodů je náročný jak na software, tak i na hardware.

5.1.6 Metoda GNSS

Díky neustálému vývoji technologie GNSS se tato metoda začíná více využívat i v inženýrské geodézii pro měření posunů a deformací objektů. Pro měření se využívá metoda statická, kinematická a RTK. Toto měření lze využít pro monitorování stability například přehrad, mostních objektů, ropných plošin apod. Data jsou odesílána průběžně, aby mohla být v krátké době vyhodnocena a zpracována.

5.2 Negeodetické sledování posunů a deformací

Dále lze posuny a přetvoření sledovat i negeodetickými metodami. Tyto metody převážně porovnávají absolutní posuny. Podle [5] mezi tyto metody patří:

- Měření na trhlinách
- Extenzometrická měření
- Inklinometry
- Měření polohových změn sondami
- Dynamometry

5.2.1 Měření na trhlinách

Pokud se na sesuvu objeví výrazné trhliny, lze zahájit přesnější a častější kontrolu pohybu sesuvu měřením vzájemné změny polohy vhodně stabilizovaných bodů na opačných stranách trhliny. Jestliže je znám směr pohybu, lze pro kontrolu odlučných trhlin použít zpravidla dva body. V případě okrajových trhlin je vhodné použít systém tří bodů, jeden na sesuvu a zbylé dva mimo sesuv. Vzdálenost bodů se měří např. trhlinoměry. Po obou stranách trhliny jsou osazeny měřické body, jejichž hlavy jsou upraveny pro nasazení posuvného přístroje s indikátorovými hodinkami, skládacím metrem, pásmovým extenzometrem, měřickým pásmem (vhodné se siloměrem), drátovým extenzometrem a páskovými měřidly s automatickým záznamem (*Obr. 11*).

Obr. 11: Příklad trhlinoměru
Zdroj: geologie.vsb.cz

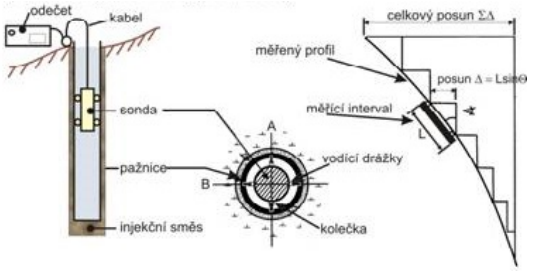
5.2.2 Extenzometrická měření

Tato metoda je založena na měření vzájemné polohy stabilizovaných bodů a to za předpokladu, že je alespoň jeden z nich mimo deformovanou oblast. Měření se provádí pásmovým extenzometrem a při každém měření je zaznamenána teplota pro nezbytné teplotní korekce (*Obr. 12*).

Obr. 12: Příklad pásmového extenzometru
Zdroj: geologie.vsb.cz

5.2.3 Inklinometry

Pomocí inklinometrů se měří horizontální deformace ve vrtu vyvolané pohybem na smykové ploše. Inklinometrický vrt se po odvrtání osazuje inklinometrickými pažnicemi se speciálními vodícími drážkami, vyfrézovanými na vnitřní straně pažnice. Inklinometrická zařízení jsou sondy, dlouhé většinou 0,5 - 1,0 m, o průměru 25 až 30 mm, které obsahují přesná náklonoměrná čidla. Při vlastním měření se postupně odečítají hodnoty úklonu osy vodící pažnice pro každý úsek odpovídající délce měřicí sondy. Schéma měřicí soustavy je znázorněno na *Obr. 13*.



Obr. 13: Schéma měřické setavy inklinometru
Zdroj: geologie.vsb.cz

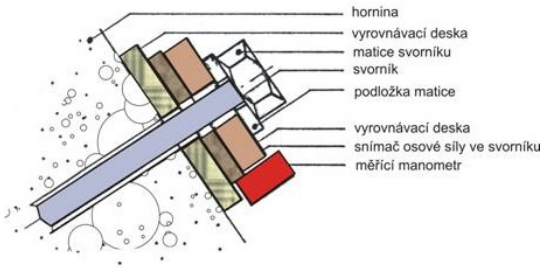
5.2.4 Měření polohových změn sondami

Pro měření náklonu a polohových změn mezi definovanými úseky ve vrtu, se používá např. deflektometr, který představuje soustavu měřících článků propojených tyčovými nebo drátovými spojkami. Lze je zabudovat do vrtu s libovolným sklonem. Měřicí sonda se skládá z posuvného tyčového mikrometru, na němž jsou pevně osazena dvě náklonoměrná čidla, která jsou stejná jako

v inklinometrické sondě. Pro měření posuvů mezi značkami lze dosáhnout přesnosti 0,003 mm, pro měření náklonu ± 0,05 mm/m (10”).

5.2.5 Dynamometry

U opěrných konstrukcí se sleduje tlakové působení zeminy prostřednictvím instalace tlakové podušky na rubovou stranu zdi a naměřené tlaky se srovnávají se statickým výpočtem. U kotev se měří síla, kterou jsou jednotlivé kotvy zatíženy pomocí dynamometru. Mezi dvě ocelové podložky se instaluje měřicí buňka, přičemž ta je naplněna kapalinou. Se změnou osové síly v kotvě se změní i tlak kapaliny v měřicí buňce a hodnotu osové síly udává jeho hodnota na manometru. Vše se opět srovnává se statickým výpočtem a s předpoklady projektu. Schéma dynamometru je znazorněno na *Obr. 14*.

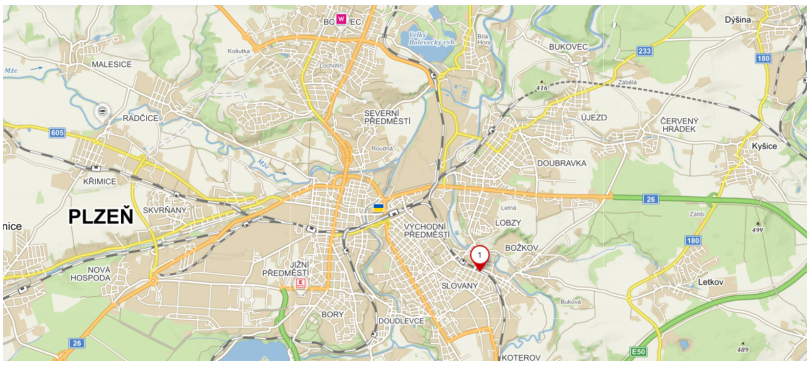


Obr. 14: Schéma dynamometru
Zdroj: geologie.vsb.cz

6 Monitoring pilotové stěny v Plzni

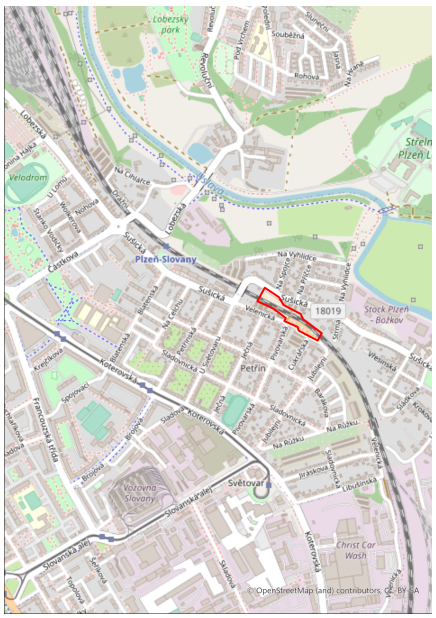
6.1 Lokalita

Sledovaná stavba se nachází na jihovýchodním okraji statutárního města Plzně, a to mezi městskými částmi Slovany a Božkov. Lokalita je znázorněna na *Obr.15*



Obr. 15: Lokalita stavby
Zdroj: mapy.cz

Na *Obr.16* je zobrazena lokalita detailněji.



Obr. 16: Lokalita stavby
Zdroj: autor

6.2 Historie města

Jak uvádí [6] město Nová Plzeň bylo založeno na příkaz českého krále Václava II. asi roku 1295 na soutoku řek Radbuzy, Mže, Úhlavy a Úslavy. Od počátku se stalo důležitým obchodním střediskem na významné křižovatce cest do Norimberka a Řezna. Svojí rozlohou (ve 14. stol. 20 ha a 3 000 obyvatel) bylo po Praze a Kutné Hoře třetím největším městem v Čechách.
V 16. stol. zde působili italští stavitelé. V letech 1599 - 1600 byla Plzeň dočasně sídlem římského císaře a českého krále Rudolfa II.

V první polovině 19. stol. nastal mohutný rozvoj města. V roce 1842 byl založen Měšťanský pivovar a v tomtéž období strojírenský podnik Škoda. Dnes žije v Plzni přibližně 171 000 obyvatel. Město je mimo jiné sídlem Západočeské univerzity a biskupství.

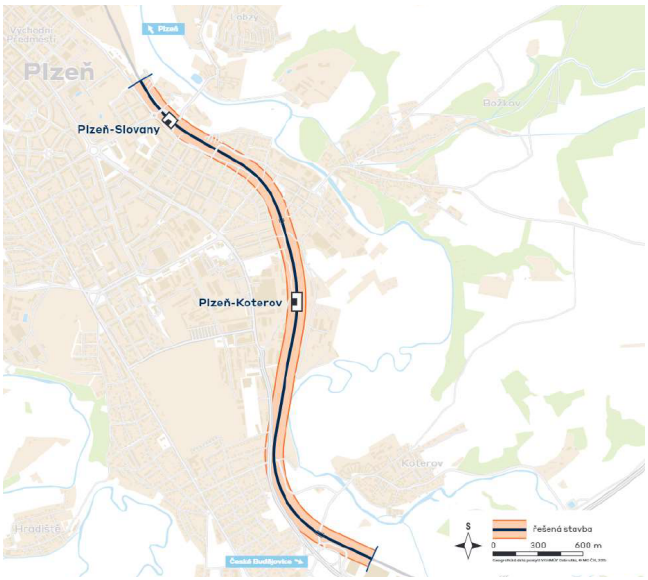
6.3 Popis stavby

Zájmová lokalita pro sledování geotechnického monitoringu se nachází ve stavební jámě, ve které se odehrávají dvě stavby zároveň. Stavební jáma je pažena převrtávanými piloty s dvěma převázkami (*Obr.17*). Jedná se o modernizaci železničního uzlu Plzeň hl.n. - Plzeň-Koterov (Uzel Plzeň, 5. stavba - Lobzy-Koterov), která je součástí celostátní železniční tratě Plzeň-České Budějovice, jejímž investorem je SŽDC. Druhou stavbou je tunelový zárodek, který bude součástí východního obchvatu Plzně na silnici I/20, jejímž investorem je ŘSD. Zárodek tunelu vzniká pod modernizovanou tratí nyní, aby v budoucnu nebyl omezen provoz na železniční trati.

Obr. 17: Pilotová stěna ve stavební jámě, stav ke dni 10. března 2023
Zdroj: autor

6.3.1 Uzel Plzeň, 5. stavba - Lobzy-Koterov

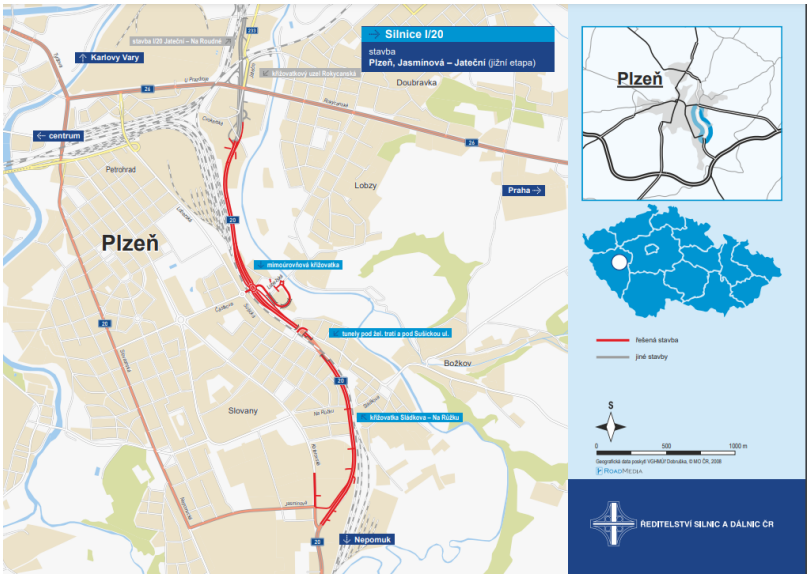
V rámci tohoto projektu proběhne rekonstrukce železničního svršku i spodku, nástupišť, mostů a propustků, pozemních objektů, trakčního vedení i například osvětlení. Cílem rekonstrukce je také zvýšení rychlosti z dnešních 100 km/h na 120 km/h, zvýšení kapacity dráhy a odstranění nevyhovujících prvků železniční dopravní cesty. Bude vybudována nová železniční zastávka Plzeň-Slovany, která má sloužit jako přestupní uzel na městskou hromadnou dopravu [7]. Na *Obr. 18* je znázorněna rekonstruovaná část železniční trati.



Obr. 18: Uzel Plzeň, 5. stavba - Lobzy-Koterov
Zdroj: spravazeleznic.cz

6.3.2 Tunelový zárodek na stavbě I/20 Plzeň

Současně na stavbě probíhá výstavba tzv. tunelového zárodku, který se stane součástí plánované stavby I/20 Plzeň, Jasmínová–Jateční. Samotný tunelový zárodek tvoří dva zhruba 180 m dlouhé tunelové tubusy. Ty budou v budoucnu sloužit jako čtyřpruhová komunikace vedoucí pod rekonstruovanou železniční tratí. Důvodem pro zahájení hloubení tunelu již několik let před plánovanou stavbou nového silničního úseku je, aby následně nebylo nutné železnici opět demontovat a omezit provoz. Konstrukce tunelu zůstane celá pod zemí, tedy pod tělesem dráhy (rekonstruované železniční tratě Plzeň-České Budějovice). To až do doby realizace stavby I/20 Plzeň, Jasmínová-Jateční, kterou plánuje ŘSD realizovat cca v letech 2029 - 2033. Při realizaci silniční stavby bude tunel následně odkopán a vystrojen [8]. Na *Obr. 19* je znázorněný projektovaný průběh obchavtu města Plzně.



Obr. 19: I/20 Plzeň, Jasmínová-Jateční
Zdroj: rsd.cz

6.4 Bodové pole

Bodové pole monitoringu se skládalo ze základního bodového pole (připojovací body) a sledovaných bodů na převázce na pilotové stěně.

6.4.1 Základní bodové pole

Základní bodové pole pro měření deformací je totožné se základní vytyčovací sítí stavby. Ta měla být tvořena devíti pilíři 1001-1009 (*Obr. 20a*), avšak pilíř 1004 nebyl nikdy zhotoven. Souřadnice ZVS byly dodány zhotovitelem stavby, tedy firmou Metrostav a.s.. Tato ZVS byla před měřením 0. etapy ověřena a vyrovnána pro účely měření deformací, byla tedy přeurčena. Dále byly dodány souřadnice odrazných štítků. Tyto body ale nejsou pro monitoring využity. Souřadnice pilířů v S-JTSK a Bpv jsou uvedeny v *Tabulce 1.*

Tabulka 1: Souřadnice bodů základní vytyčovací sítě stavby

Číslo pilíře	X [m]	Y [m]	Z [m]
1001	1071617,598	820142,137	332,019
1002	1071681,220	820081,050	330,082
1003	1071722,421	820033,503	331,128
1004	/	/	/
1005	1071803,522	819995.512	332,000
1006	1071776,837	820036,688	331,763
1007	1071724,035	820097,307	332,851
1008	1071708,047	820110,872	332,948
1009	1071666,252	820144,399	329,450

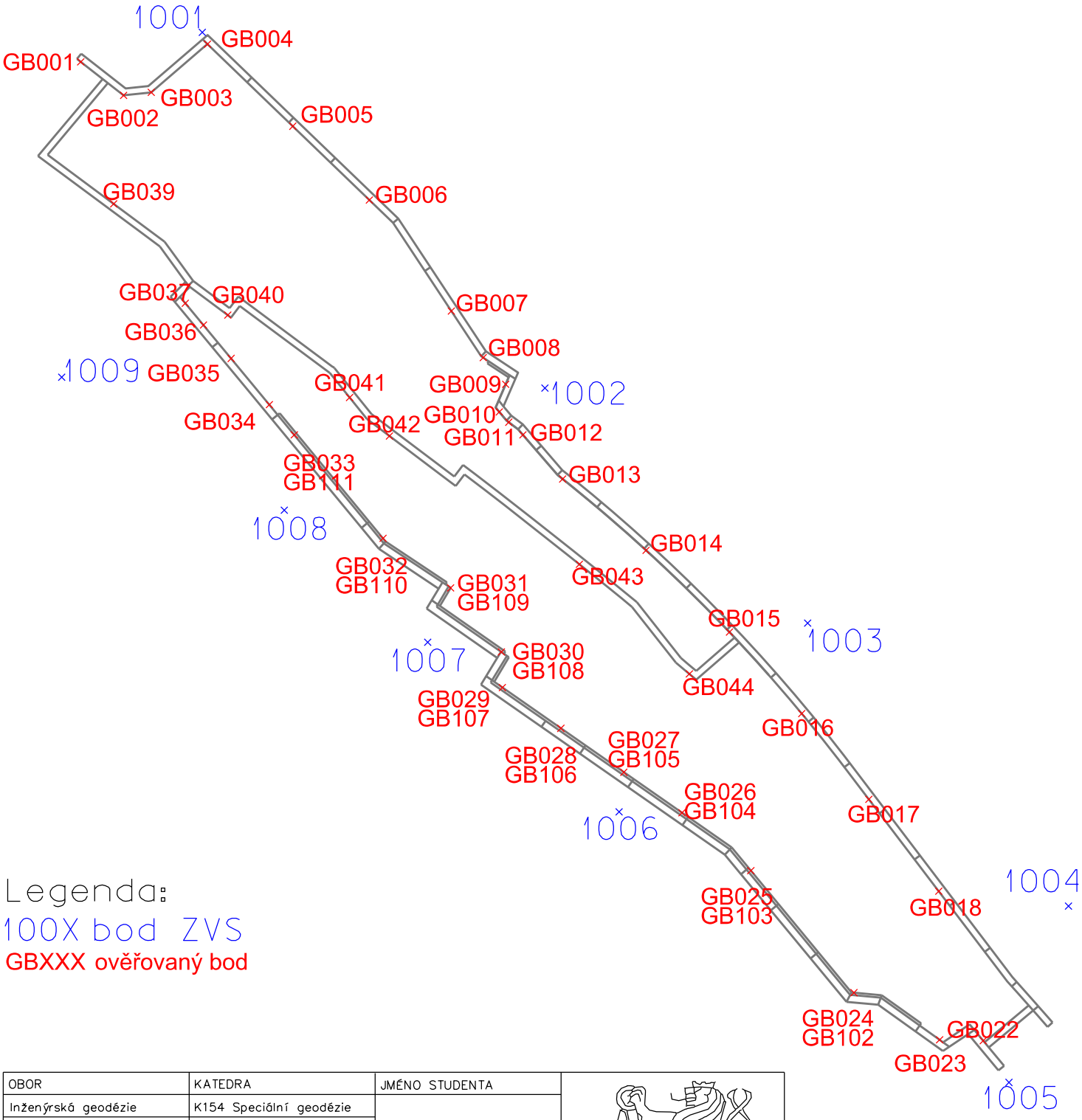
6.4.2 Sledované body

Sledované body jsou navrtány na převázkách pilotové stěny ve dvou úrovních (*Obr. 20b*). Při nulté etapě nebyly měřeny všechny sledované body, protože z důvodu postupu stavby nebyly některé pilotové stěny vystavěny. Tyto body jsou stabilizovány pomocí hmoždiny a adaptéru s konstantní velikostí.

(a) Pilíř č.1005 (b) Body GB025 a GB103

Obr. 20: Bodové pole monitoringu
Zdroj: autor

Bodové pole stavby je zobrazeno na následující přehledce bodů.



Legenda:

100X bod ZVS

GBXXX ověřovaný bod

OBOR	KATEDRA	JMÉNO STUDENTA	
Inženýrská geodézie	K154 Speciální geodézie	Bc. Michal Novák	
ROČNÍK	VYUČUJÍCÍ		
Druhý	doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.		
AKCE : Diplomová práce – Monitoring pilotové stěny		FORMÁT	A4
		MĚŘÍTKO	1:1000
		DATUM	březen 2023
OBSAH : Přehledka bodů		Č. VÝKR.	1

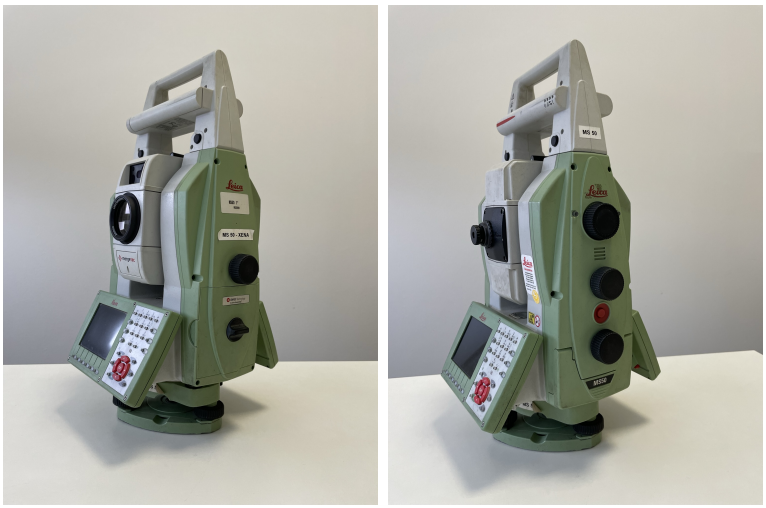
7 Použité přístroje a softwary

7.1 Přístroje a pomůcky

Při měření posunů a deformací byla použita totální stanice Leica Nova MS50 a na jedno etapové měření byla využita totální stanice Leica Viva TS15 5". Obě totální stanice jsou pravidelně kalibrovány ve VÚGTK, a mají tedy kalibrační list.

7.1.1 Totální stanice Leica Nova MS50

Dále jen Leica MS50. Jedná se o přesnou robotickou totální multistanici s automatickým cílením na odrazný hranol. Totální stanice též disponuje automatickým ostřením. Přístroj Leica MS50 má možnost 3D skenování, digitálního snímkování a připojení ke GNSS. K totální stanici lze připojit kontroler a vytvořit tak one-man stanici. Totální stanice pracuje s firmwarem SmartWorx Viva (*Obr. 21*).



Obr. 21: Leica Nova MS50
Zdroj: autor

Přesnost udávaná výrobcem je **0,3 mgon** při měření vodorovného směru a zenitovém úhlu a **1 mm + 1,5 ppm** při standardním měření délek na hranol. Další specifikace totální stanice jsou uvedeny v [9]. Rychlost automatického měření bodů se udává 12-15 bodů/min, v závislosti na prostředí a rozmístění cílů. Výrobní číslo totální stanice Leica MS50 je 367465.

7.1.2 Totální stanice Leica Viva TS15 5”

Dále jen Leica TS15. Tato totální stanice byla použita pouze pro měření jedné kontrolní etapy, která slouží jako praktické porovnání měření s měřením z Leica Nova MS50 a ověření, zda je možné použít, při dodržení správného postupu, totální stanici s výrazně horší úhlovou přesností pro přesná deformační měření.

Jedná se o robotickou totální stanici se stejným firmwarem jako má Leica Nova MS50. Tato totální stanice je vyráběna ve variantách s různou úhlovou přesností. V našem případě bude použita ta s nejnižší přesností, a to **1,5 mgon** při měření vodorovného směru a zenitového úhlu a **1 mm + 1,5 ppm** při standardním měření délek na hranol (*Obr. 22*). Další specifikace totální stanice jsou uvedeny v [10]. Výrobní číslo totální stanice Leica TS15 je 1666503.

Obr. 22: Leica Viva TS15 5”
Zdroj: autor

7.1.3 Měřické vybavení

7.1.3.1 Odrazné hranoly

Pro měření je využíváno dvou druhů hranolů, jejichž Leica součtová konstanta je stejná, a to 4 mm. Prvním z nich je hranol Sokkia, který lze umístit do trojnožky a jehož točná osa je upravena tak, aby odpovídala hodnotě 196 mm, což odpovídá výšce točné osy většiny totálních stanic umístěných v trojnožce (*Obr. 23a*). Proto je ideální pro měření polygonů a sítí, protože výška stroje a výška hranolu na stativu je stejná. Nemusí se zavádět redukce kámen-kámen. Druhý hranol, od výrobce Sinning, slouží ke stabilizaci sledovaných bodů a orientací, jedná se o hranol pro měření přesných deformací (*Obr. 23b*).

(a) Hranol Sokkia (b) Hranol Sinning

Obr. 23: Použité hranoly
Zdroj: autor

7.1.3.2 Ostatní

Mezi další použité vybavení patří těžký stativ značky Nedo s rychlosvorkami pod totální stanici a velké hranoly (*Obr. 24*).

Obr. 24: Stativ Nedo s rychlosvorkami
Zdroj: geoobchod.cz

Pro měření teploty a tlaku byl využit přesný tlakoměr, vlhkoměr a barometr v jednom přístroji Greisinger GFTB200 (*Obr. 25*).

Obr. 25: Greisinger GFTB200
Zdroj: greisinger.cz

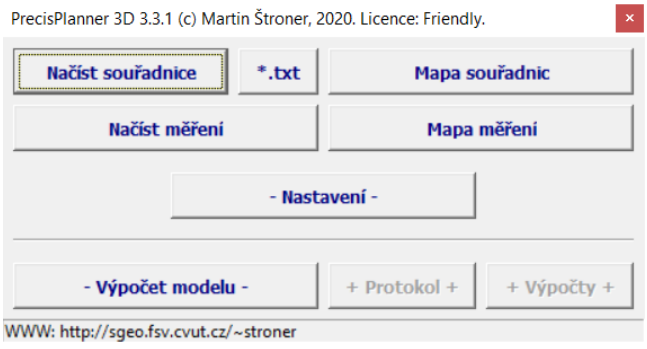
Mezi neměřické vybavení patří vrtačka Parkside, která slouží pro vytvoření zcela nových bodů nebo převrtání bodů, které byly zničeny či poškozeny vlivem stavebních prací.

7.2 Software

Pro vyhodnocení měření je nutno využít celou řadu výpočetních softwarů a aplikací.

7.2.1 PrecisPlanner 3D 3.3.1

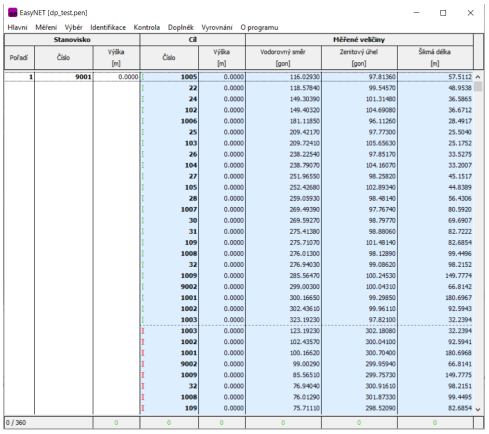
Program PrecisPlaner 3D umožňuje na základě přibližných souřadnic definujících konfiguraci měření, výběru měřených veličin a jejich přesnosti určit přesnost výsledných souřadnic, včetně kovarianční matice umožňující další výpočty přesnosti odvozených veličin (např. délky, úhly apod.) [11]. Na *Obr. 26* je uživatelské prostředí programu.



Obr. 26: PrecisPlanner 3D 3.3.1
Zdroj: autor

7.2.2 EasyNET 3.5.1

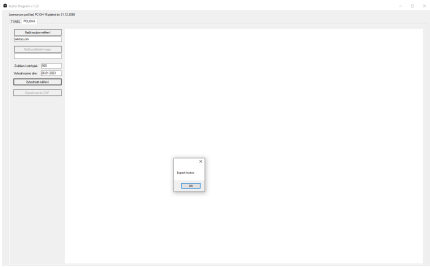
EasyNET je softwarová aplikace, která slouží pro snadné zpracování přesných geodetických měření. Měřická data jsou automaticky vyhodnocována metodou vyrovnání prostorové geodetické sítě. Klasická měření pomocí totálních stanic mohou být doplněna o nivelační měření, nebo měření gyroteodolitem. Významnou předností softwaru EasyNET je funkce pro automatickou detekci a vyloučení odlehlých měření. Na *Obr. 26* je zapisník měření v tomto softwaru. Další detekce odlehlých měření, včetně jejich vyloučení, probíhá díky robustnímu vyrovnání geodetické sítě. Vyrovnání probíhá prostorově. Díky tomu zůstavají vazby mezi měřenými veličinami [12]. Vstupní soubor je ve formátu MAPA2 s příponou **.asc*.



Obr. 27: EasyNET 3.5.1
Zdroj: autor

7.2.3 Vector Diagram 1.23

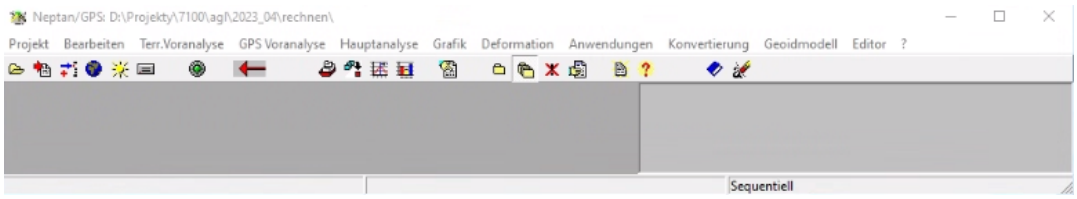
Vector Diagram je interní software firmy Angermeier od Ing. Jana Doležela, který slouží k vykreslení polohových deformací na bodě. Vstupním souborem je textový soubor, který obsahuje souřadnice všech bodů ve všech etapách, a výsledkem je soubor s příponou **.dxf*, který zobrazuje jednotlivé posuny v daném měřítku (*Obr. 28*).



Obr. 28: Vector Diagram 1.23
Zdroj: autor

7.2.4 Neptan/GPS

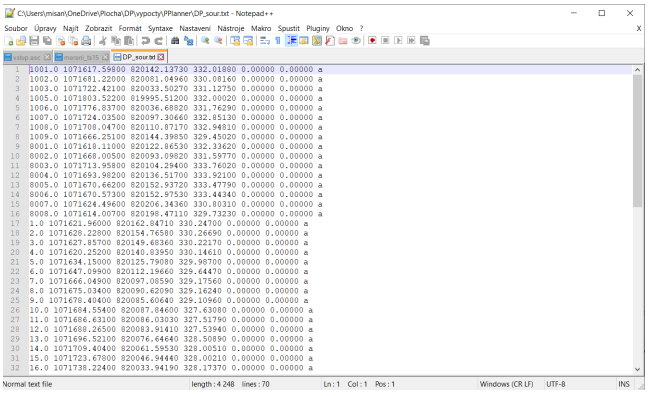
Tento program od německé firmy *technet GmbH* se používá pro jedno, dvou nebo trojrozměrné vyhodnocení a analýzu všech běžných geodetických měření. Program lze také použít pro plánování sítě. Tento software vyrovnává obdobným způsobem jako software EasyNET, tedy pomocí robusního vyrovnání. Vyrovnání opět probíhá prostorově. Neptan/GPS je software staršího data, proto je uživatelské prostředí méně přehledné a výstupy jsou ukládány do textových souborů. Vše je v německém jazyce. Vstupní soubor je ve formátu BEO Datei s příponou **.beo*. Tento formát má obdobnou strukturu jako formát MAPA2. Zápisník měření obsahuje redukované směry a průměr skupin měření. Uživatelské prostředí je na *Obr. 29*. Podrobně je software a práce s ním popsán v [13].



Obr. 29: Neptan/GPS
Zdroj: autor

7.2.5 Notepad++

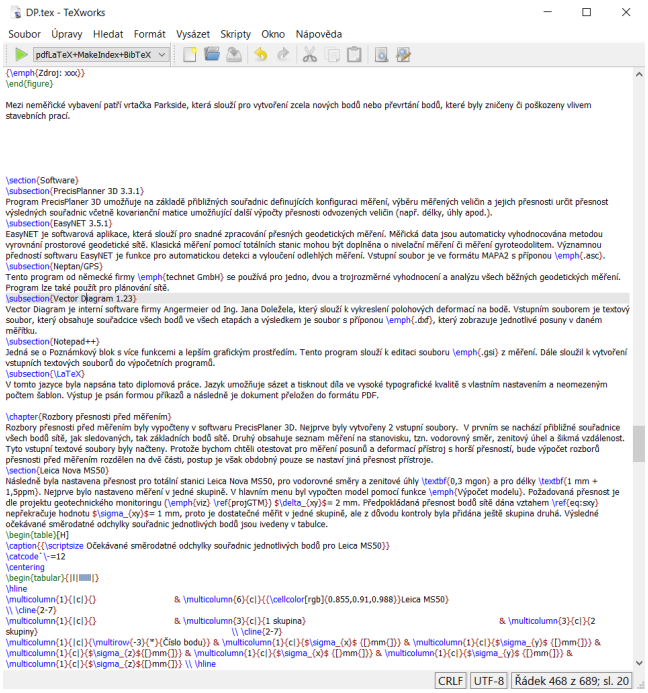
Jedná se o Poznámkový blok s více funkcemi a lepším grafickým prostředím (*Obr. 30*). Tento program slouží k editaci souboru **.gsi* z měření. Dále slouží k vytvoření vstupních textových souborů do výpočetních programů. Jeho výhodou je sloupcový výběr.



Obr. 30: Notepad++
Zdroj: autor

7.2.6 LaTeX

V tomto jazyce byla napsána tato diplomová práce. Jazyk umožňuje sázet a tisknout díla ve vysoké typografické kvalitě s vlastním nastavením a neomezeným počtem šablon. Výstup je psán formou příkazů a následně je dokument přeložen do formátu **.pdf* (*Obr. 31*).



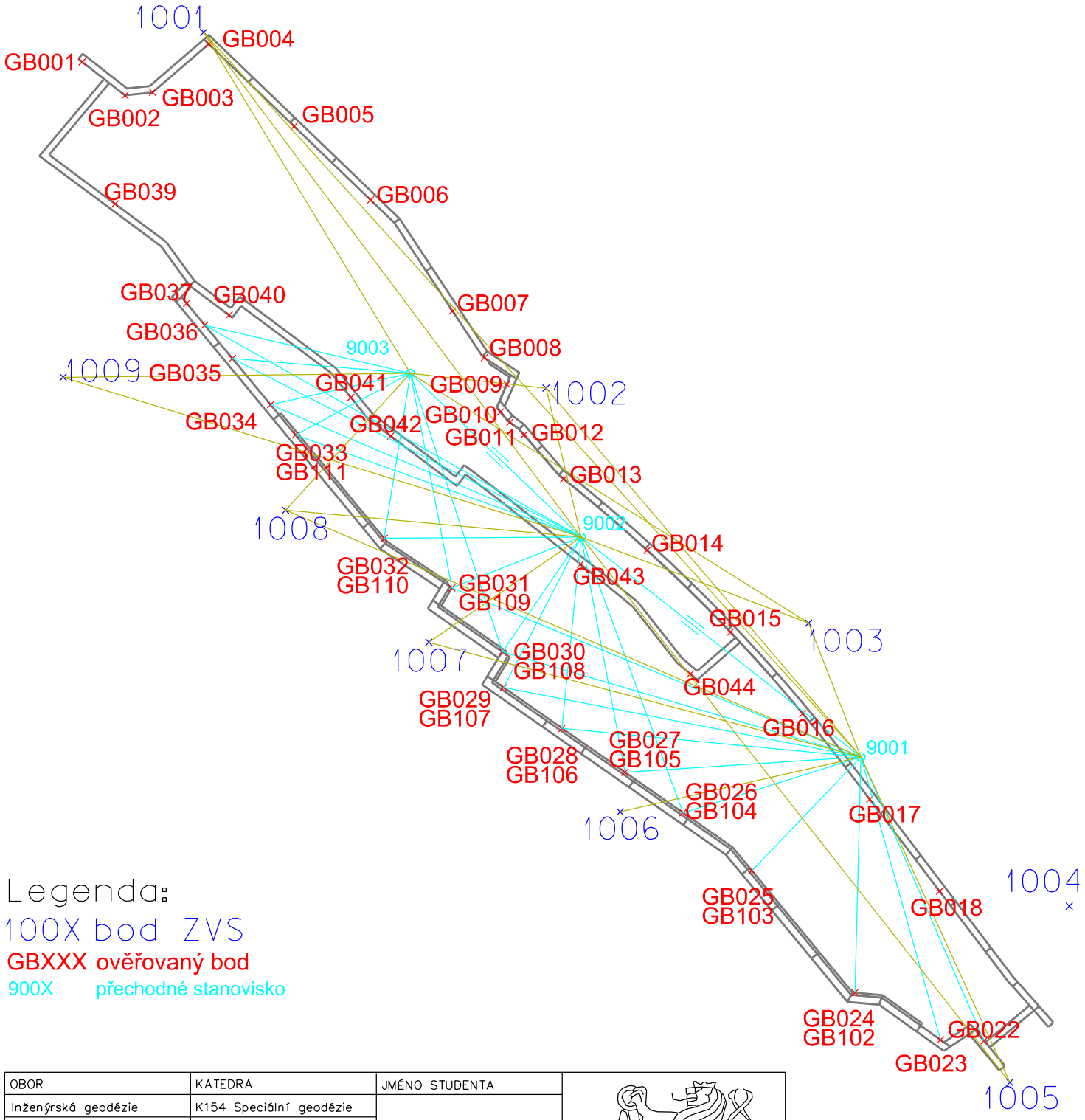
Obr. 31: LaTeX
Zdroj: autor

8 Rozbory přesnosti před měřením

Rozbory přesnosti před měřením byly vypočteny v softwaru PrecisPlaner 3D. Nejprve byly vytvořeny 2 vstupní soubory. V prvním se nachází přibližné souřadnice všech bodů sítě - jak sledovaných, tak základních. Druhý obsahuje seznam měření na stanovisku, tzn. vodorovný směr, zenitový úhel a šikmou vzdálenost. Tyto vstupní textové soubory byly načteny do softwaru.

Protože byla jedna etapa měřena přístrojem s horší úhlovou přesností, byly rozbory přesností před měřením vypočteny i pro tento přístroj. Výpočet byl tedy rozdělen do dvou částí, postup je však obdobný, pouze byla nastavena jiná přesnost přístroje. Vstupní soubory jsou součástí *Přílohy 1.1-1.3*

Na observačním plánu lze vidět způsob měření a přibližné rozestavení stativů (body 9001-9003).



Legenda:

100X bod ZVS

GBXXX ověřovaný bod

900X přechodné stanovisko

OBOR	KATEDRA	JMÉNO STUDENTA	
Inženýrská geodézie	K154 Speciální geodézie	Bc. Michal Novák	
ROČNÍK	VYUČUJÍCÍ		
Druhý	doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.		
AKCE : Diplomová práce – Monitoring pilotové stěny		FORMÁT	A4
		MĚŘÍTKO	1:1000
		DATUM	březen 2023
OBSAH : Observační plán		Č. VÝKR.	2

8.1 Leica Nova MS50

V programu byla nastavena přesnost pro totální stanici Leica Nova MS50, pro vodorovné úhly a zenitové úhly **0,3 mgon** a pro délky **1 mm + 1,5 ppm**. Nejprve bylo nastaveno měření v jedné skupině. V hlavním menu byl vypočten model pomocí funkce *Výpočet modelu*. Požadovaná přesnost je dle projektu geotechnického monitoringu (*viz* 4) δ_{xy}= 2 mm.

Předpokládaná přesnost bodů sítě, dána *Vzorcem (4)*, nepřekračuje požadovanou souřadnicovou odchylku, proto je dostatečné měřit v jedné skupině. Jelikož však měříme robotickou totální stanicí a časová náročnost při přidání dalších skupin je minimální, měříme ve firmě observace ve třech či více skupinách. Proto je model vypočten znovu pro tři skupiny. Výsledné očekávané směrodatné odchylky souřadnic jednotlivých bodů jsou uvedeny v *Tabulce 2*.

Protokol o výpočtu je součást *Přílohy 1.4*. Očekávané přesnosti budou pro všechny etapy přibližně stejné, jelikož je měřeno stále stejným přístrojem ze stanovisek, které jsou přibližně ve stejným místech.

Tabulka 2: Očekávané směrodatné odchylky souřadnic jednotlivých bodů pro Leica MS50

Číslo bodu	Leica MS50					
	1 skupina			3 skupiny		
	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z[mm]	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z[mm]
GB022	0,68	0,52	0,28	0,39	0,30	0,16
GB024	1,03	0,39	0,23	0,59	0,23	0,13
GB025	1,01	0,26	0,12	0,58	0,15	0,07
GB026	0,23	0,27	0,10	0,13	0,15	0,06
GB027	0,15	0,27	0,12	0,09	0,15	0,07
GB028	0,20	0,23	0,14	0,11	0,13	0,08
GB029	1,04	0,22	0,18	0,61	0,13	0,10
GB030	0,26	0,15	0,12	0,15	0,09	0,07
GB031	0,18	0,13	0,09	0,10	0,07	0,05
GB032	0,14	0,12	0,08	0,08	0,07	0,05
GB033	0,11	0,40	0,07	0,06	0,23	0,04
GB034	0,14	1,02	0,12	0,08	0,59	0,07
GB035	0,42	0,96	0,15	0,24	0,56	0,09
GB036	0,55	0,91	0,18	0,32	0,53	0,11
GB102	1,03	0,39	0,24	0,59	0,22	0,13
GB103	1,01	0,26	0,15	0,58	0,15	0,09
GB104	0,65	0,80	0,14	0,38	0,47	0,08
GB105	0,15	0,27	0,12	0,09	0,15	0,07
GB106	1,06	0,28	0,21	0,61	0,16	0,12
GB108	1,03	0,18	0,16	0,60	0,10	0,09
GB109	0,40	0,30	0,15	0,23	0,17	0,08
GB110	0,14	0,12	0,08	0,08	0,07	0,05
GB111	0,25	0,96	0,25	0,14	0,56	0,15

8.2 Leica Viva TS15 5”

Následně byl model spočten znovu, tentokrát však pro přístroj s horší úhlovou přesností. Proto byla nastavena přesnost vodorovného směru a zenitového úhlu pro jednu skupinu na hodnotu udávanou výrobcem **1,5 mgon** a pro délku **1 mm + 1,5 ppm**. Toto nastavení bylo uloženo a model byl znovu vypočten. Výsledné očekávané směrodatné odchylky jsou uvedeny v *Tabulce 3*. Model byl opět vypočten pro tři skupiny. Protokol o výpočtu je součástí *Přílohy 1.5*.

Tabulka 3: Očekávané směrodatné odchylky souřadnic jednotlivých bodů pro Leica TS15

Číslo bodu	Leica TS15					
	1 skupina			3 skupiny		
	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z[mm]	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z[mm]
GB022	1,09	1,25	1,37	0,63	0,72	0,80
GB024	1,08	1,19	1,14	0,63	0,69	0,66
GB025	1,02	0,64	0,58	0,59	0,37	0,34
GB026	0,65	0,75	0,50	0,38	0,44	0,29
GB027	0,62	0,81	0,62	0,36	0,47	0,36
GB028	0,72	0,76	0,70	0,42	0,44	0,40
GB029	1,05	0,90	0,85	0,61	0,52	0,49
GB030	0,81	0,62	0,61	0,46	0,36	0,36
GB031	0,60	0,50	0,42	0,35	0,29	0,25
GB032	0,54	0,48	0,40	0,32	0,28	0,23
GB033	0,39	0,71	0,32	0,22	0,41	0,18
GB034	0,48	1,02	0,43	0,28	0,59	0,25
GB035	0,76	1,00	0,64	0,44	0,58	0,37
GB036	0,98	1,03	0,86	0,57	0,60	0,50
GB102	1,08	1,19	1,14	0,63	0,69	0,66
GB103	1,02	0,63	0,58	0,59	0,36	0,34
GB104	0,77	0,87	0,53	0,45	0,51	0,31
GB105	0,62	0,81	0,61	0,36	0,47	0,35
GB106	1,07	1,08	1,03	0,62	0,63	0,60
GB108	1,04	0,74	0,70	0,60	0,43	0,41
GB109	0,84	0,73	0,73	0,49	0,42	0,42
GB110	0,56	0,51	0,41	0,32	0,30	0,24
GB111	0,42	0,97	0,40	0,24	0,56	0,23

Výsledné souřadnicové směrodatné odchylky jednotlivých bodů vypočtené dle *Vzorce (4)*, jsou uvedeny v *Tabulce 4*. Dále jsou zde porovnány jednotlivé souřadnicové směrodatné odchylky při měření ve více skupinách a měření odlišným přístrojem.

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2}} \tag{4}$$

Tabulka 4: Očekávané směrodatné odchylky souřadnicové v jednotlivých skupinách

Číslo bodu	Leica MS50		Leica TS15	
	1 skupina	3 skupiny	1 skupina	3 skupiny
	σ_{xy} [mm]			
GB022	0,61	0,35	1,17	0,68
GB024	0,78	0,45	1,14	0,66
GB025	0,74	0,43	0,85	0,49
GB026	0,25	0,14	0,71	0,41
GB027	0,22	0,12	0,72	0,42
GB028	0,22	0,12	0,74	0,43
GB029	0,75	0,44	0,97	0,57
GB030	0,21	0,12	0,72	0,41
GB031	0,16	0,09	0,55	0,32
GB032	0,13	0,07	0,51	0,30
GB033	0,29	0,17	0,57	0,33
GB034	0,73	0,42	0,80	0,46
GB035	0,74	0,43	0,89	0,51
GB036	0,76	0,44	1,00	0,58
GB102	0,78	0,45	1,14	0,66
GB103	0,74	0,43	0,85	0,49
GB104	0,73	0,42	0,82	0,48
GB105	0,22	0,12	0,72	0,42
GB106	0,77	0,45	1,08	0,62
GB108	0,74	0,43	0,90	0,52
GB109	0,35	0,20	0,79	0,46
GB110	0,13	0,08	0,54	0,31
GB111	0,70	0,41	0,75	0,43

V *Tabulce 5* jsou uvedeny očekávané parametry elips chyb pro totální stanice Leica MS50 a Leica TS15. Kde a je hlavní poloosa elipsy, b je vedlejší poloosa elipsy a ω je stočení elispy. Očekávané parametry elips jsou vypočteny pro měření ve 3 skupinách.

Tabulka 5: Očekávané parametry elips pro měření ve třech skupinách

Číslo bodu	Leica MS50			Leica TS15		
	a [mm]	b [mm]	ω [gon]	a [mm]	b [mm]	ω [gon]
GB022	0,46	0,17	161,2932	0,47	0,84	158,4587
GB024	0,62	0,14	181,1735	0,62	0,70	181,1735
GB025	0,60	0,07	14,4620	0,60	0,35	14,4620
GB026	0,19	0,07	55,8555	0,50	0,29	59,1328
GB027	0,16	0,09	92,1196	0,47	0,35	85,6074
GB028	0,14	0,11	129,6977	0,42	0,44	2,6383
GB029	0,61	0,11	7,3210	0,61	0,52	7,3210
GB030	0,15	0,07	198,1703	0,47	0,36	8,3897
GB031	0,11	0,06	27,5704	0,37	0,26	33,5690
GB032	0,08	0,07	21,9814	0,32	0,27	22,8637
GB033	0,23	0,04	86,3769	0,42	0,20	83,6568
GB034	0,59	0,06	105,8583	0,59	0,27	105,8583
GB035	0,60	0,09	124,6278	0,60	0,41	124,6278
GB036	0,61	0,12	133,4074	0,61	0,55	133,4074
GB102	0,62	0,14	181,2404	0,62	0,70	181,2404
GB103	0,60	0,07	13,9367	0,60	0,35	13,9367
GB104	0,60	0,06	56,6259	0,60	0,32	56,6259
GB105	0,16	0,08	92,7385	0,47	0,35	85,9435
GB106	0,62	0,13	189,5438	0,62	0,63	189,5438
GB108	0,60	0,09	5,7057	0,60	0,43	5,7057
GB109	0,27	0,10	161,5636	0,49	0,42	8,7396
GB110	0,08	0,07	23,6736	0,33	0,29	17,9469
GB111	0,59	0,04	84,7856	0,59	0,21	84,7856

9 Měření

9.1 Postup měření

Samotné měření deformací probíhalo jednou týdně, ale s ohledem na vývoj stavebních prací lze měřit častěji nebo naopak méně častěji. Avšak maximální rozmezí mezi měřením jednotlivých etap je 14 dní. Jelikož bylo měření deformací naplánováno na 105 etap, je logické, že není možné zaručit stále stejné podnebné podmínky, stejné postavení přístoje a viditelnost všech cílů. Sám jsem se podílel na zaměření 20 etap. Zbylá měření byla převzata od kolegů, kteří na tomto projektu taktéž pracovali. Měření bylo rozděleno na tzv. malé a velké etapy. Ve velké etapě byly měřeny všechny sledované body. Při malé etapě byly měřeny body pouze na jihozápadní pilotové stěně. Tato etapa je popsána a zpracována v této práci.

Ve stavební jámě byly postupně osazeny všechny sledované body GB022-GB037 a GB102-GB111 a pilíře 1001-1009 (*viz Přehledka bodů*). Dále jsou ve stavební jámě zhorizontovány tři stativy tak, aby bylo možné z každého stanoviska měřit co nejvíce sledovaných bodů a pilířů pro orientaci. Také musela být zajištěna viditelnost mezi stativy pro lepší provázání sítě. Tento úkol je mnohdy velice složitý. Jedná se o stavbu, kde se pohybovalo velké množství těžké techniky a stavbařů. Tato stanoviska byla však každou etapu umisťována přibližně do stejných míst. Dále byl na dva ze tří stativů umístěn velký hranol a na stativ poslední totální stanice. Bylo využito metody prostorové sítě (*viz* 5.1.3), díky níž bylo dosaženo vysoké přesnosti měření a výsledných souřadnic sledovaných bodů. Na *Obr. 32* je vidět postavení přístrojů ve stavební jámě.

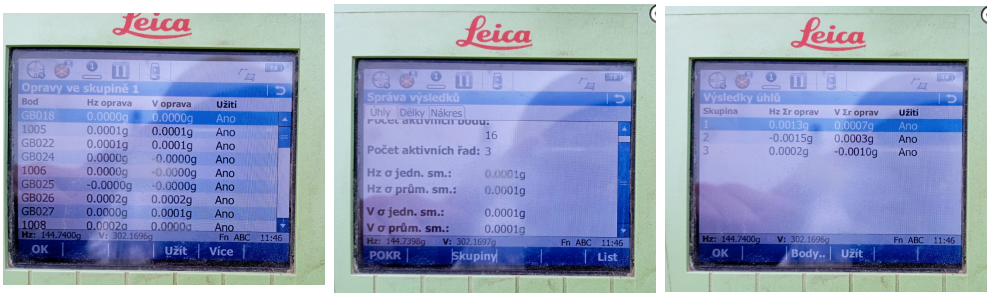
(a) Postavení přístroje MS50 ve stavební jámě (b) Autor DP s přístrojem TS15

Obr. 32: Postavení přístrojů ve stavební jámě
Zdroj: autor

Před měřením byl přístroj temperován a následně byly nastaveny atmosferické korekce, tímto docílíme co největší přesnosti při měření délek. Poté byla provedena kalibrace automatického docilování přístoje (ATR), při které bylo manuálně zacíleno na hranol, který byl vzdálen přibližně 100 m a zenitový úhel byl přibližně 100 gon. Pomocí této elektronické kalibrace byly určeny i následující přístrojové chyby, které jsou následně pomocí korekcí při měření opraveny:

- *l,t* chyba podélné a příčné osy kolimátoru,
- *i* vertikální indexová chyba vztažená ke svislé ose,
- *c* horizontální kolimační chyba,
- *a* chyba točné osy dalekohledu,
- *ATRplus* nulová chyba v horizontálním a vertikálním úhlu.

Nejdříve byly zaměřeny minimálně tři pilíře a vypočteno volné stanovisko. Následovalo samotné měření skupin a řad. Měření mohlo být naučeno nebo lze ze seznamu přibližných souřadnic vybrat měřené body. Měření probíhal ve třech skupinách v módu automatického měření metodou *ABB'A'*. Byly měřeny všechny viditelné body, včetně orientací a stativů s hranoly. Měřilo se ve třech skupinách, i když z rozborů přesnosti vyšlo, že je dostatečné měřit v jedné skupině, protože časová náročnost na jednu skupinu při měření robotickou totální stanicí je velice malá. Na konci měření na stanovisku byly zkontolovány opravy jednotlivých měření a směrodatná odchylka měření (*Obr. 33*).



Obr. 33: Ukázka prohlížení a kontroly měřených dat
Zdroj: autor

Jako kontrola stability stanoviska sloužilo zaměření nového volného stanoviska a zkontolování elektorické libely. Pokud byla prokázána chyba při měření bylo měření po odstranění chyb opakováno. Tento postup byl opakován na všech třech stanoviskách. Po měření byla data exportována ve formátu **.gsi* na USB flash disk. Tyto surové zápisníky jsou součástí *Přílohy 0.1* a *Přílohy 0.2*.

Jelikož v jámě probíhaly stavební práce, byly některé body zničeny, proto bylo třeba navrtat bod nový, který se nacházel hned vedle bodu zničeného (*Obr. 34*). U těchto bodu byla měřena nultá etapa. V průběhu stavby byly zničeny a znovu stabilozovány body GB029, GB108 a GB109.

Jedna etapa, konkrétně etapa 91, byla změřena i přístrojem Leica Viva TS15 5". Stroj byl umístěn do trojnožky místo přístroje Leica Nova MS50. Měření

dále probíhalo stejným postupem. Při této etapě nebylo možné měřit bod GB102 a následně nebylo možné totální stanicí Leica Viva TS15 5” měřit bod GB108. Bod GB107 je dlouhodobě neměřitelný z důvodu postavení armatury před tímto bodem.

Obr. 34: Nově stabilizovaný bod GB108
Zdroj: autor

10 Zpracování měření

Po samotném měření bylo třeba toto měření zpracovat. Nejprve bylo měření ve formátu **.gsi* editováno v programu Notepad++. Následně bylo měření vyrovnáno v softwaru Neptan/GPS. Samotné zpracování není nikterak náročné. Níže jsou popsány jednotlivé kroky.

10.1 Vyrovnání geodetické sítě

Z důvodu měření nadbytečných veličin je nutné tyto veličiny vyrovnat.
V následující kapitole je vyrovnání obecně popsáno.

10.1.1 Vyrovnání geodetické sítě obecně

Jak uvádí [14], základní vztah pro vyrovnání geodetické sítě metodou nejmenších čtverců vychází z podmínky:

$$v^T \cdot P \cdot v = min. \tag{5}$$

Kde:

v ... matice oprav
P ... matice vah

Geodetická síť se rozděluje podle způsobu fixace bodů v síti. Základní rozdělení je:

- Vázaná síť - alespoň 2 fixované body
- Volná síť - žádný bod, nutné dodat podmínky
- Modifikovaná síť - bod a směrník, Helmertova transformace, ...

Pro určení vyrovnaných souřadnic byla použita modifikovaná volná síť. Vyrovnané souřadnice jsou pomocí Helmertovy transformace transformovány na identické body. Vyrovnání volné sítě se využívá, pokud všechny body vstupují do výpočtu jako neznámé.

Pro umístění sítě do prostoru je nutné doplnění podmínek pro neznámé do řešení, tj. řeší se vyrovnání zprostředkujících měření s podmínkami pro neznámé, jehož normální rovnice mají tvar:

$$\begin{pmatrix} A^T \cdot P \cdot A & B \\ B^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A^T \cdot P \cdot l' \\ b \end{pmatrix} = 0. \tag{6}$$

Kde:

A ... matice plánu,
P ... diagonální matice vah,
l' ... redukované měření,
$B^T \cdot dx + b = 0$ ... linearizované podmínky.

Obecně v prostoru umístěná volná geodetická síť v závislosti na měřených veličinách musí být umístěna do prostoru minimálním počtem prvků.

Lineární transformace n-rozměrného prostoru je dána rovnicí:

$$X = M \cdot R \cdot x + T. \tag{7}$$

Kde:

x, X ... vektory souřadnic v jedné a druhé soustavě $(n, 1)$,
M ... matice měřítkových koeficientů (n, n),
R ... matice rotace (n, n),
T ... vektor translací $(n, 1)$.

Vektory mají následující tvar:

$$X = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, x \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, T \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Zde X, Y, Z jsou souřadnice v soustavě, do které je transformováno (dále X), x, y, z v soustavě, ze které je transformováno (dále x), T_x, T_y, T_z pak posunutí v jednotlivých osách.

A matice (zobrazení) jsou:

$$M = \begin{pmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Zde matice M obsahuje na diagonále měřítkové číslo pro jednotlivé osy soustavy x a R je ortogonální matice rotace, která je složena z dílčích otočení v jednotlivých osách dle , $R = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma)$.

U inženýrsko - geodetických sítí není žádoucí měnit jejich tvar, pouze velikost a natočení, pro to připadá v úvahu pouze transformace shodnostní a podobnostní. Pro prostorový případ je to tedy maximálně sedm prvků. Postupně pro jednotlivé typy sítí:

Prostorová 3D síť - sedm parametrů (λ, α, β, γ, T_x, T_y, T_z)

- pokud je měřena alespoň jedna délka, definuje měřítko a měřítkový koeficient λ se neuplatní,
- pokud je měřen zenitový úhel je dán směr svislé osy Z a neuplatní se otočení α a β,
- pokud je měřena vodorovná délka, je dán směr vodorovné základny XY a neuplatní se otočení α a β,
- pokud je měřeno převýšení, je dán směr svislé osy Z a neuplatní se otočení α a β.

Rovinná 2D síť - čtyři parametry (λ, γ, T_x, T_y)

- pokud je měřena alespoň jedna (vodorovná) délka, definuje měřítko a měřítkový koefient λ se neuplatní.

Výšková 1D síť - dva parametry (λ, T_z), ačkoliv měřením převýšení je dán rozměr a připadá v úvahu pouze jeden parametr T_z.

Podmínka pro umístění sítě do prostoru pomocí Helmertovy transformace, je minimalizace kvadrátu posunu bodů použitých pro podmínku dle:

$$dx^T \cdot dx = min. \tag{10}$$

Tuto podmínku nelze jednoduše aplikovat a je nutné ji na přibližné souřadnice umístit lineární transformací. Vzhledem k malým hodnotám veličin transformačního klíče lze zjednodušit tvar matice rotace R. Zjednodušení lze provést za předpokladu, že úhly otočení jsou malé a tedy jejich *siny* se přibližně rovnají hodnotám argumentů v radiánech a *kosiny* jedné. Vznikne pak matice R používaná pro malá otočení, která díky lineárnímu tvaru neznámých lze snadno spočítat takto:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix}, \tag{11}$$

Vzhledem ke tvaru neznámých se tato transformace nazývá diferenciální dle vztahu:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}. \tag{12}$$

V této rovnici lze provést úpravu s ohledem na to, že transformované změny souřadnic jsou prakticky diferenciální, do tvaru:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z & y & 1 & 0 & 0 & x \\ z & -0 & -x & 0 & 1 & 0 & y \\ -y & x & 0 & 0 & 0 & 1 & z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ T_x \\ T_y \\ T_z \\ \lambda \end{pmatrix}. \tag{13}$$

Matice B^T má za předpokladu měření délek a zenitových úhlů v síti tvar:

$$B^T = \begin{pmatrix} Y_{1,0} & -X_{1,0} & 0 & Y_{2,0} & -X_{2,0} & 0 & ... & Y_{n,0} & -X_{n,0} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & ... & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & ... & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & ... & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{14}$$

Robusní metody dle [14] slouží primárně k detekci hrubých chyb v měřených datech. Předpokladem pro správné fungování je normální rozdělení chyb. Při vyrovnání geodetické sítě je pro aplikaci robusní metody odhadu nutné využít iterační proces. Princip metody je zjednodušeně takový, že na základě spočtených oprav z vyrovnání je jednotlivým měřeným veličinám spočtena nová váha, která příslušnou veličinu zvýhodňuje či naopak. Výsledkem takového iteračního procesu jsou vyrovnané neznámé, které nezatěžují hrubé chyby, protože byly z vyrovnání eliminovány pomocí vah.

Princip zavedení robusní metody do vyrovnání zprostředkujících lze jednoduše popsat pomocí základního vztahu vázané sítě:

$$dx = -\left(A^T \cdot P \cdot A\right) \cdot A^T \cdot P \cdot l'. \tag{15}$$

Matice vah je tedy vložena do vyrovnání takto:

$$P = diag\left(p_1, p_2, p_3, ..., p_m\right), \tag{16}$$

kde $p_i = \frac{{\sigma_0}^2}{{\sigma_i}^2}$ a σ_0 je apriorní směrodatná odchylka jednotková a σ_i je směrodatná odchylka jednotlivého měření.

Robusní metoda vyrovnání se aplikuje po prvním výpočtu vyrovnání v celém iteračním procesu tak, že se vypočtou opravy měřených veličin z vyrovnání dle:

$$v = A \cdot dx + l'. \tag{17}$$

A na základě oprav je vypočtena nová matice vah W:

$$W = diag\left(w_1, w_2, w_3, ..., w_m\right), \tag{18}$$

a v další iteraci se řeší normální rovnice již ve tvaru:

$$A^T \cdot W \cdot A \cdot x = A^T \cdot W \cdot l. \tag{19}$$

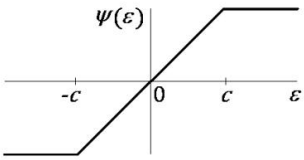
Konstrukce nové váhové matice z první iterace je dána dle vztahu:

$$W = P \cdot F. \tag{20}$$

Zde P je váhová matice použitá pro vyrovnání a F je diagonální matice, která udává změny vah dle funkčního vztahu použité metody robusního vyrovnání.

Po každé iteraci je tedy znovu vypočtena matice F na základě vypočtených oprav a z ní určena nová matice vah pro další iteraci.

Huberův M-odhad vychází z normálního rozdělení náhodné veličiny. Jeho řešení je založeno na nahrazení okrajových částí normálního rozdělení pravděpodobnosti Laplaceovým rozdělením na *Obr. 35.*



Obr. 35: Huberův robusní odhad
Zdroj: inggeo.fsv.cvut.cz

Váhy se tedy volí podle předpisů:

$$\begin{aligned} {w_i}^{(m)} &= 1 & pro|v| \leq c \\ {w_i}^{(m)} &= c\frac{\sigma}{|{v_i}^{(m-1)}|} & pro|v| > c \end{aligned}$$

Zde c je konstanta závisející na předpokládaném množství kontaminace měřených dat odlehlými hodnotami. Podle [15] se pro 4% odlehlých měření volí $c = 1,5$, pro méně než 1% $c = 2,0$.

Poměr apriorní jednotkové směrodatné odchylky/aposteriorní směrodatné odchylky se vypočte ze vzorce:

$$pomer = \frac{\sigma_0}{s_0} \tag{21}$$

Kde:

σ_0 ... apriorní směrodatná odchylka,
s_0 ... aposteriorní směrodatná odchylka.

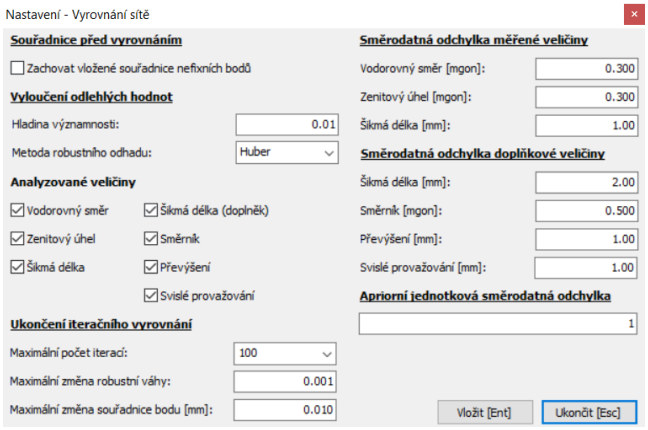
10.1.2 Vyrovnání sítě EasyNET

Pomocí softwaru EasyNET byly vyrovnány dvě etapy měření (Etapa 91 a 92). Tyto etapy slouží jako ověření pro vyrovnání v softwaru Neptan/GPS. Dále bylo v tomto softwaru vyrovnáno měření totální stanicí Leica TS15.

10.1.2.1 Vyrovnání sítě pro totální stanici Leica MS50

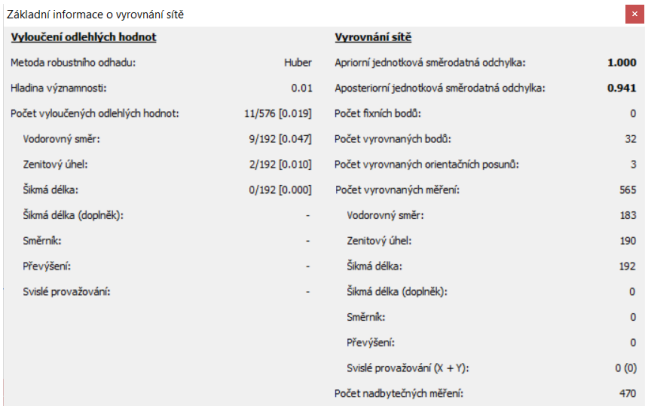
Etapa 91

Do programu byl naimportován zápisník z měření ve formátu MAPA2 s příponou **.asc*. Program automaticky detekuje chybná či podezřelá měření. Jako chybné měření bylo detekováno měření na bod GB103. Toto bylo způsobeno pravděpodobně chybnou stabilizací bodu, proto byl tento bod z výpočtu odstraněn. Následně byly nastaveny parametry pro vyrovnání sítě, tyto parametry jsou na *Obr. 36*. Nastaveny byly i parametry pro redukci délek, a to poloměr Země *R=6380 km* a průměrná nadmořská výška *h= 300m*.



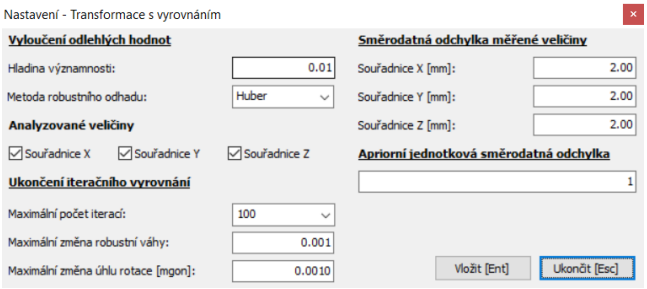
Obr. 36: Nastevení parametrů pro vyrovnání pro Leica MS50
Zdroj: autor

Následně byly naimportovány přibližné souřadnice všech bodů. Jako přibližné souřadnice byly zvoleny souřadnice bodů z minulé etapy. Následně byly všechny body zvoleny za nefixní, celá síť se vyrovnávala jako volná síť. Jelikož výrobcem uváděná apriorní přesnost přístroje je hodnota v ideálním prostředí a na dlouhé záměry, byla změnena apriorní přesnost měřených vodorovných směrů, na něž byla měřená šikmá délka menší než 25 metrů. Tato hodnota byla změněna z *0,3 mgon* na *0,6 mgon*. Program některá měření vyloučil (viz *Obr. 37*). Na tomto obrázku jsou i základní informace o vyrovnání sítě. Dle *Vzorce (21)* je poměr apriorní/aposteriorní odchylky roven hodnotě 1,06.



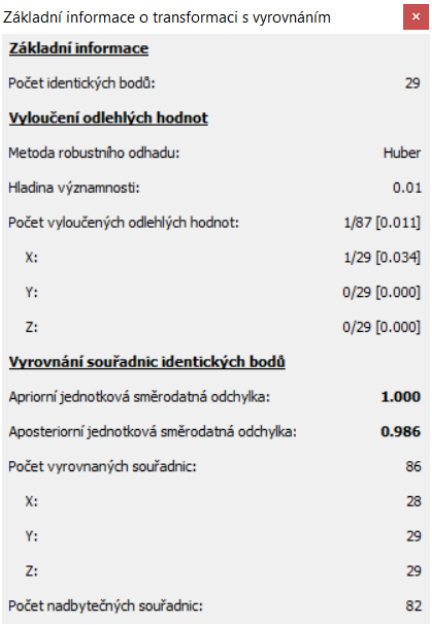
Obr. 37: Základní informace o vyrovnání pro Leica MS50
Zdroj: autor

Poté byl exportován protokol o vyrovnání (*Příloha 2.4*). Následně byly vyrovnané souřadnice transformovány pomocí Helmertovy transformace na identické body, protože takto vyrovnání počítá program Neptan/GPS. Vyrovnání v programu EasyNET slouží jako ověření vyrovnání z programu Neptan/GPS, proto musí být dodržen i obdobný postup výpočtu. Nastavení transformace je na *Obr. 38*.



Obr. 38: Nastavení parametrů pro transformaci sítě pro Leica MS50
Zdroj: autor

Na *Obr. 39* jsou základní informace o transformaci. Dle *Vzorce (21)* je poměr apriorní/aposteriorní odchylky roven hodnotě 1,01.



Obr. 39: Základní informace o transformaci sítě pro Leica MS50
Zdroj: autor

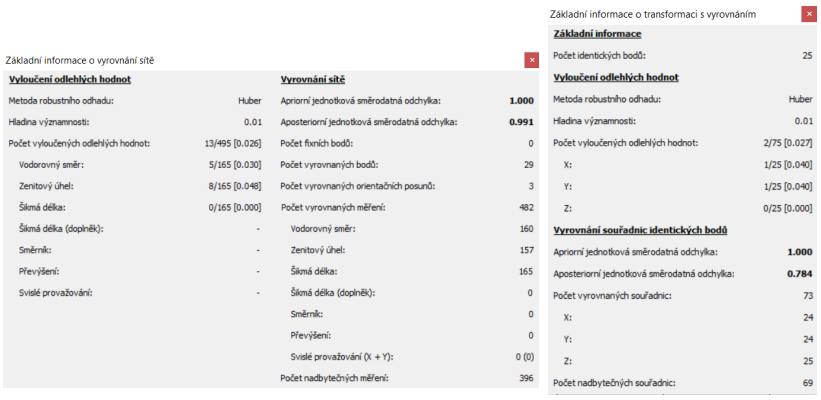
Na závěr byl exportován protokol o transformaci s transformačním klíčem (*Příloha 2.6*) a soubor s elipsami chyb sítě s příponou **.dxf*. Elipsy chyb jsou součástí *Přílohy 5.1*. V *Tabulce 6* jsou uvedeny vyrovnané souřadnice sledovaných bodů a jejich směrodatné odchylky.

Tabulka 6: Vyrovnané souřadnice bodů z etapy 91pomocí EasyNET měřené Leica MS50

Číslo bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [mm]	$\sigma_y[mm]$	$\sigma_z[mm]$
GB022	1071796,8270	820001,1894	330,3733	0,33	0,22	0,11
GB024	1071789,0481	820023,5860	329,2682	0,51	0,13	0,10
GB025	1071766,5247	820043,2586	330,9161	0,13	0,15	0,07
GB026	1071756,8444	820055,1951	331,1550	0,11	0,14	0,07
GB027	1071748,6296	820066,9357	331,2603	0,13	0,12	0,08
GB028	1071741,4411	820077,2860	331,3702	0,14	0,13	0,08
GB029	1071733,7223	820088,3431	331,4139	0,15	0,16	0,08
GB030	1071727,7735	820087,1071	331,3408	0,14	0,16	0,07
GB031	1071716,2109	820096,2849	331,4789	0,10	0,14	0,06
GB032	1071707,3093	820109,1485	331,4355	0,11	0,11	0,06
GB033	1071687,8842	820124,9852	329,2280	0,14	0,23	0,07
GB034	1071682,7141	820129,2323	328,5066	0,11	0,31	0,07
GB035	1071674,2684	820136,1745	327,8303	0,16	0,35	0,06
GB036	1071666,0833	820142,9713	327,6739	0,21	0,33	0,08
GB104	1071756,5044	820054,8566	327,8560	0,11	0,17	0,07
GB105	1071748,3365	820066,5660	327,9871	0,13	0,14	0,08
GB106	1071741,0501	820077,0372	328,1408	0,14	0,12	0,08
GB108	1071727,3644	820086,8512	327,9877	0,28	0,50	0,18
GB109	1071715,8872	820096,0749	328,1012	0,09	0,13	0,06
GB110	1071706,9063	820108,5856	328,0009	0,14	0,12	0,06
GB111	1071687,5740	820124,5915	326,6491	0,26	0,46	0,09

Etapa 92

Stejným způsobem a se stejným nastavením (*viz Obr. 37*) byla vyrovnána i etapa 92. Poté byla síť transformována stejným způsobem a nastavením (*viz Obr. 38*). Na *Obr. 40a* jsou základní informace o vyrovnání této etapy a na *Obr. 40b* jsou základní informace o transformaci.



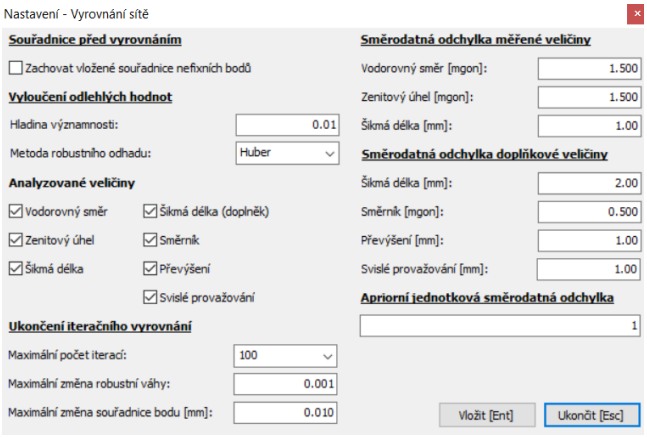
(a) Základní informace o vyrovnaní etapy 92 pro Leica MS50

(b) Základní informace o transformaci etapy 92 pro Leica MS50

Obr. 40: Základní informace o výpočtu sítě pro etapu 92
Zdroj: autor

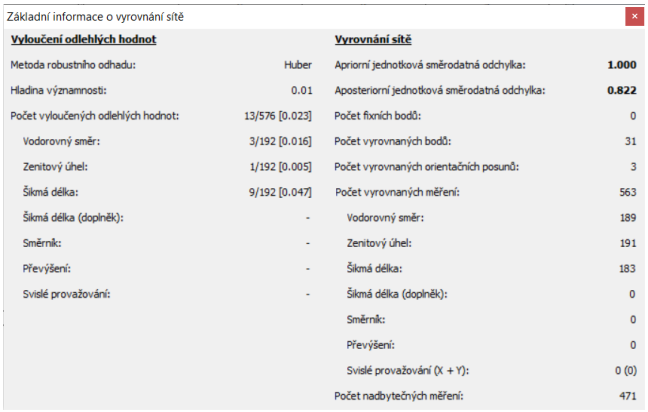
10.1.2.2 Vyrovnání sítě pro totální stanici Leica TS15

Vyrovnání probíhá obdobným způsobem jako u totální stanice Leica MS50. Jediný rozdíl je v nastavení vstupních parametrů pro vyrovnání *Obr. 41*.



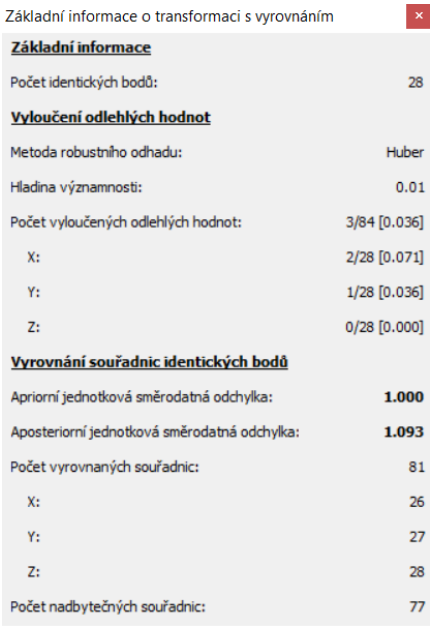
Obr. 41: Nastavení parametrů pro vyrovnání pro Leica TS15
Zdroj: autor

Následně byla síť vyrovnána a byl vyexportován protokol o vyrovnání (*Příloha 2.5*). Na *Obr. 42* jsou vidět základní informace o vyrovnání.
Dle *Vzorce (21)* je poměr apriorní/aposteriorní odchylky roven hodnotě 1,22.



Obr. 42: Základní informace o vyrovnání pro Leica TS15
Zdroj: autor

Na závěr byly vyrovnané souřadnice transformovány pomocí Helmertovy transformace na identické body. Nastavení transformace bylo shodné jako u Leica MS50, nastavení je na *Obr. 38*. Na *Obr. 43* jsou základní informace o transformaci.Dle *Vzorce (21)* je poměr apriorní/aposteriorní odchylky roven hodnotě 0,91.



Obr. 43: Základní informace o transformaci sítě pro Leica TS15
Zdroj: autor

Poté byl exportován protokol o transformaci(*Příloha 2.7*) a soubor s elipsami chyb sítě s příponou **.dxf*. Elipsy chyb jsou součástí *Přílohy 5.2*.
V *Tabulce 7* jsou uvedeny vyrovnané souřadnice sledovaných bodů a jejich směrodatné odchylky.

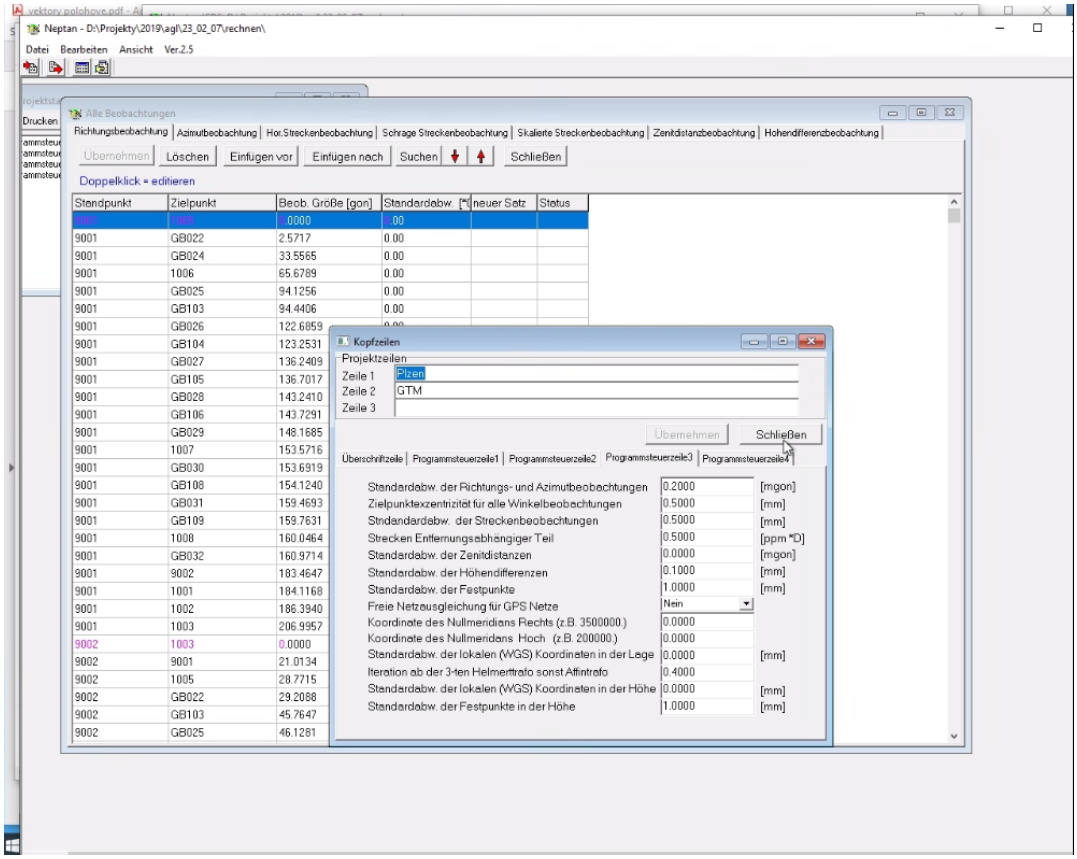
Tabulka 7: Vyrovnané souřadnice bodů pomocí EasyNET měřené Leica TS15

Číslo bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [mm]	$\sigma_y[mm]$	$\sigma_z[mm]$
GB022	1071796,8279	820001,1881	330,3732	0,38	0,46	0,50
GB024	1071789,0497	820023,5835	329,2671	0,47	0,42	0,42
GB025	1071766,5245	820043,2566	330,9151	0,30	0,38	0,29
GB026	1071756,8450	820055,1940	331,1544	0,30	0,36	0,32
GB027	1071748,6305	820066,9351	331,2601	0,35	0,34	0,35
GB028	1071741,4411	820077,2862	331,3702	0,38	0,32	0,35
GB029	1071733,7223	820088,3427	331,4139	0,39	0,33	0,36
GB030	1071727,7733	820087,1061	331,3405	0,37	0,33	0,32
GB031	1071716,2106	820096,2854	331,4789	0,28	0,29	0,27
GB032	1071707,3084	820109,1489	331,4355	0,33	0,24	0,26
GB033	1071687,8844	820124,9850	329,2277	0,24	0,32	0,19
GB034	1071682,7150	820129,2327	328,5065	0,21	0,34	0,21
GB035	1071674,2690	820136,1747	327,8306	0,28	0,33	0,27
GB036	1071666,0841	820142,9716	327,6745	0,36	0,34	0,35
GB104	1071756,5049	820054,8560	327,8554	0,30	0,36	0,32
GB105	1071748,3372	820066,5658	327,9872	0,35	0,34	0,35
GB106	1071741,0507	820077,0377	328,1407	0,38	0,32	0,35
GB108	/	/	/	/	/	/
GB109	1071715,8869	820096,0755	328,1013	0,28	0,28	0,27
GB110	1071706,9069	820108,5857	328,0010	0,34	0,27	0,26
GB111	1071687,5746	820124,5918	326,6489	0,27	0,41	0,20

10.1.3 Vyrovnání sítě Netpan/GPS

Jelikož vyrovnání prováděla kolegyně, bylo toto vyrovnání pouze převzato. Vyrovnání bude stručně popsáno. Postup je však velice podobný jako u softwaru EasyNET. Do programu bylo naimportováno měření ve formátu BEO Datei s příponou **.beo* (*Příloha 3.1*). Tento soubor obsahuje redukované a zprůměrované měření.

Poté byly nastaveny parametry pro vyrovnání sítě, ty jsou uvedeny na *Obr. 44*. Tato apriorní hodnota udává přenost zprůměrovaných veličin měřených ve třech skupinách. Následně bylo měření analyzováno, byla vyhledána odlehlá měření a duplicity měření, a také byla provedena kontrola měření osnovy směrů na stanovisku. Tyto kontroly byly uloženy v textových souborech *BETXXX.out* (*Příloha 3.3*). Soubory slouží jako příprava měření na vyrovnání. Například soubor *BETPOL.out* obsahuje přibližné souřadnice. Následně je měření vyrovnáno a transformováno na identické body. Výstupní soubor je přiložen jako *Příloha 3.2*.



Obr. 44: Nastavení parametrů pro vyrovnání
Zdroj: autor

Helmertova transformace vyrovnaných souřadnic bodů na identické body je prováděna automaticky. Proto nelze vidět výsledek samotného vyrovnání, jen výsledek vyrovnaných hodnot po transformaci. Dle *Vzorce (21)* je poměr apriorní/aposteriorní odchylky roven hodnotě 0,98. V *Tabulce 8* jsou uvedeny vyrovnané souřadnice sledovaných bodů a jejich směrodatné odchylky. Tímto způsobem byly vyrovnány všechny etapy měření.

Tabulka 8: Vyrovnané souřadnice bodů z etapy 91 pomocí Neptan/GPS měřené Leica MS50

Číslo bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_x [mm]	$\sigma_y[mm]$	$\sigma_z[mm]$
GB022	1071796,8218	820001,1948	330,3733	0,48	0,47	0,45
GB024	1071789,0437	820023,5903	329,2683	0,53	0,53	0,40
GB025	1071766,5210	820043,2608	330,9160	0,41	0,42	0,31
GB026	1071756,8421	820055,1968	331,1550	0,40	0,41	0,34
GB027	1071748,6283	820066,9370	331,2603	0,40	0,40	0,36
GB028	1071741,4401	820077,2866	331,3704	0,40	0,40	0,36
GB029	1071733,7219	820088,3427	331,4140	0,40	0,40	0,37
GB030	1071727,7734	820087,1061	331,3408	0,40	0,40	0,34
GB031	1071716,2117	820096,2842	331,4789	0,35	0,35	0,30
GB032	1071707,3103	820109,1471	331,4353	0,36	0,36	0,29
GB033	1071687,8873	820124,9827	329,2280	0,42	0,41	0,25
GB034	1071682,7176	820129,2301	328,5066	0,42	0,42	0,26
GB035	1071674,2722	820136,1716	327,8302	0,43	0,43	0,30
GB036	1071666,0882	820142,9681	327,6738	0,45	0,44	0,36
GB104	1071756,5019	820054,8585	327,8561	0,40	0,41	0,34
GB105	1071748,3347	820066,5672	327,9872	0,40	0,40	0,36
GB106	1071741,0494	820077,0377	328,1408	0,40	0,40	0,36
GB108	1071727,3644	820086,8511	327,9880	0,52	0,51	0,60
GB109	1071715,8879	820096,0740	328,1012	0,35	0,35	0,30
GB110	1071706,9078	820108,5841	328,0010	0,40	0,40	0,30
GB111	1071687,5771	820124,5895	326,6491	0,51	0,51	0,25

10.1.4 Rozbory přesnosti po měření

10.1.4.1 Rozbory přesnosti po měření pro totální stanici Leica MS50

V porovnání očekávaných výsledků rozborů přesnosti před měřením programem PrecisPlanner 3D a dosažených výsledků programy EasyNET a Neptan/GPS lze sledovat vyšší hodnoty u dosažených hodnot. Dosažené směrodatné odchylky vyrovnaných souřadnic v softwaru EasyNET jen minimálně přesahují očekávané směrodatné odchylky. Dosažené výsledky mohly ovlivňovat atmosferické vlivy, refrakce nebo vlivy vzniklé na staveništi. Z tabulky je patrné, že dosažené směrodatné odchylky vyrovnaných souřadnic v softwaru Neptan/GPS neodpovídají očekávaným hodnotám. To může být zapříčiněno postupem vyrovnání nebo nastavením jiných apriorních přesností v každém softwaru.

Tabulka 9: Rozbory přesnosti po měření, porovnání očekávaných a dosažených směrodatných odchylek pro Leica MS50

Číslo bodu	Oček. sm.odch.[mm]			Dosažené směrodatné odchylky [mm]					
	PrecisPlanner 3D			EasyNet			Neptan/GPS		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
GB022	0,39	0,30	0,16	0,33	0,22	0,11	0,48	0,47	0,45
GB024	0,59	0,23	0,13	0,51	0,13	0,10	0,53	0,53	0,40
GB025	0,58	0,15	0,07	0,13	0,15	0,07	0,41	0,42	0,31
GB026	0,13	0,15	0,06	0,11	0,14	0,07	0,40	0,41	0,34
GB027	0,09	0,15	0,07	0,13	0,12	0,08	0,40	0,40	0,36
GB028	0,11	0,13	0,08	0,14	0,13	0,08	0,40	0,40	0,36
GB029	0,61	0,13	0,10	0,15	0,16	0,08	0,40	0,40	0,37
GB030	0,15	0,09	0,07	0,14	0,16	0,07	0,40	0,40	0,34
GB031	0,10	0,07	0,05	0,10	0,14	0,06	0,35	0,35	0,30
GB032	0,08	0,07	0,05	0,11	0,11	0,06	0,36	0,36	0,29
GB033	0,06	0,23	0,04	0,14	0,23	0,07	0,42	0,41	0,25
GB034	0,08	0,59	0,07	0,11	0,31	0,07	0,42	0,42	0,26
GB035	0,24	0,56	0,09	0,16	0,35	0,06	0,43	0,43	0,30
GB036	0,32	0,53	0,11	0,21	0,33	0,08	0,45	0,44	0,36
GB104	0,38	0,47	0,08	0,11	0,17	0,07	0,40	0,41	0,34
GB105	0,09	0,15	0,07	0,13	0,14	0,08	0,40	0,40	0,36
GB106	0,61	0,16	0,12	0,14	0,12	0,08	0,40	0,40	0,36
GB108	0,60	0,10	0,09	0,28	0,50	0,18	0,52	0,51	0,60
GB109	0,23	0,17	0,08	0,09	0,13	0,06	0,35	0,35	0,30
GB110	0,08	0,07	0,05	0,14	0,12	0,06	0,40	0,40	0,30
GB111	0,14	0,56	0,15	0,26	0,46	0,09	0,51	0,51	0,25

10.1.4.2 Rozbory přesnosti po měření pro totální stanici Leica TS15

Dosažené směrodatné odchylky vyrovnaných souřadnic měřených totální stanicí Leica TS15 jen minimálně přesahují očekávané směrodatné odchylky. To může být opět způsobeno atmosferickými vlivy či refrakcí.

Tabulka 10: Rozbory přesnosti po měření, porovnání očekávaných a dosažených směrodatných odchylek pro Leica TS15

Číslo bodu	Oček. sm.odch. [mm]			Dos. sm. odch. [mm]		
	PrecisPlanner 3D			EasyNet		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
GB022	0,63	0,72	0,80	0,38	0,46	0,50
GB024	0,63	0,69	0,66	0,47	0,42	0,42
GB025	0,59	0,37	0,34	0,30	0,38	0,29
GB026	0,38	0,44	0,29	0,30	0,36	0,32
GB027	0,36	0,47	0,36	0,35	0,34	0,35
GB028	0,42	0,44	0,40	0,38	0,32	0,35
GB029	0,61	0,52	0,49	0,39	0,33	0,36
GB030	0,46	0,36	0,36	0,37	0,33	0,32
GB031	0,35	0,29	0,25	0,28	0,29	0,27
GB032	0,32	0,28	0,23	0,33	0,24	0,26
GB033	0,22	0,41	0,18	0,24	0,32	0,19
GB034	0,28	0,59	0,25	0,21	0,34	0,21
GB035	0,44	0,58	0,37	0,28	0,33	0,27
GB036	0,57	0,60	0,50	0,36	0,34	0,35
GB104	0,45	0,51	0,31	0,30	0,36	0,32
GB105	0,36	0,47	0,35	0,35	0,34	0,35
GB106	0,62	0,63	0,60	0,38	0,32	0,35
GB109	0,49	0,42	0,42	0,28	0,28	0,27
GB110	0,32	0,30	0,24	0,34	0,27	0,26
GB111	0,24	0,56	0,23	0,27	0,41	0,20

10.1.5 Porovnání softwarů pro vyrovnání

Oba vyrovnávací softwary vyrovnávají robusní metodou, ale každý počítá s jiným formatém vstupních dat. SW EasyNET vyrovnává jednotlivá měření zvlášť, kdežto SW Neptan/GPS vyrovnává již zprůměrovaná a redukovaná data. Počet nadbytečných měření je v našem případě v SW Neptan/GPS oproti SW EasyNET třikrát menší. Nejdříve byly porovnány vyrovnané souřadnic z obou softwarů. Jak je z *Tabulky 11* patrné, největší souřadnicové rozdíly ve vodorovném směru jsou na bodech GB022 a GB024 a to *5mm*. Ve svislém směru jsou tyto rozdíly zanedbatelné.

Tabulka 11: Rozdíly souřadnic dosažených softwary EasyNET a Neptan/GPS v etapě 91

Číslo bodu	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]
GB022	5,2	-5,4	0,0
GB024	4,4	-4,3	-0,1
GB025	3,7	-2,2	0,1
GB026	2,3	-1,7	0,0
GB027	1,3	-1,3	0,0
GB028	1,0	-0,6	-0,2
GB029	0,4	0,4	-0,1
GB030	0,1	1,0	0,0
GB031	-0,8	0,7	0,0
GB032	-1,0	1,4	0,2
GB033	-3,1	2,5	0,0
GB034	-3,5	2,2	0,0
GB035	-3,8	2,9	0,1
GB036	-4,9	3,2	0,1
GB104	2,5	-1,9	-0,1
GB105	1,8	-1,2	-0,1
GB106	0,7	-0,5	0,0
GB108	0,0	0,1	-0,3
GB109	-0,7	0,9	0,0
GB110	-1,5	1,5	-0,1
GB111	-3,1	2,0	0,0

Dosažené směrodatné odchylky jednotlivých souřadnic vyrovnaných v SW Neptan/GPS až čtyřikrát překračují očekávané přesnoti (*Tabulka 9*). To může být zapříčiněno tím, že je vložena apriorní přesnost přibližným souřadnicím a to *1 mm*. Tato hodnota negativně ovlivňuje přesnost vyrovnaných souřadnic. Dále může být příčinou také to, že do SW Neptan/GPS vstupuje již vypočítaný zápisník

Kvůli podezřelým hodnotám dosažených směrodatných odchylek vyrovnaných souřadnic ze SW Neptan/GPS a podezřele velkým souřadnicovým rozdílům vyrovnaných souřadnic z obou softwarů (*Tabula 11*), byly porovnány posuny bodů měřených v etapách 91 a 92. Tento způsob porovnání byl proveden proto, že by relativní posuny mezi body měly být podobné, nehledě na jejich absolutní souřadnice. Pokud rozdíly mezi posuny z obou softwarů pro vyrovnání nepřekročí mezní rozdíl, je ověření vyrovnání v SW Neptan/GPS správné. Tyto rozdíly jsou uvedeny v *Tabulce 12*.

Tabulka 12: Rozdíly mezi posuny bodů vyrovnaných v SW EasyNET a Neptan/GPS

Číslo bodu	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	Δ_MX [mm]	Δ_MY [mm]	Δ_MZ [mm]
GB022	2,6	3,5	0,2	2,3	1,9	1,6
GB024	3,0	1,9	0,1	2,6	1,9	1,4
GB025	0,2	2,6	-0,1	1,8	2,0	1,1
GB026	1,4	1,2	0,2	1,4	1,5	1,2
GB027	0,4	0,3	0,1	1,4	1,5	1,3
GB028	0,5	0,0	0,2	1,5	1,4	1,3
GB029	-0,1	-0,1	0,1	1,7	2,1	1,7
GB030	-0,5	-0,4	0,0	1,4	1,4	1,1
GB031	0,1	0,3	0,0	1,4	1,3	1,0
GB032	1,3	1,5	0,2	1,4	1,4	1,0
GB033	1,5	2,5	0,1	1,6	1,9	0,9
GB104	0,2	0,6	0,1	1,4	1,5	1,2
GB105	0,0	-0,4	0,1	1,4	1,5	1,3
GB106	0,3	-0,1	0,1	1,5	1,4	1,3
GB108	0,5	0,6	0,3	2,3	2,1	1,7
GB109	1,2	-0,8	0,1	1,4	1,3	1,0
GB110	1,0	0,0	0,0	1,4	1,4	1,0
GB111	2,1	1,1	0,0	2,0	2,4	0,9

Z tabulky je patrné, že jsou mezní rozdíly přesaženy, proto pomocí tohoto postupu nelze ověřit správnost vyrovnání. Nelze ani říci, které vyrovnání je chybné, ale na základě porovnání očekávaných a dosažených směrodatných odchylek by bylo na místě tvrdit, že vyrovnání ze SW Nepatan/GPS je chybné. Je však nutné si uvědomit, že postup výpočtu vyrovnání, a tedy i postup výpočtu rozborů přesností před měřením, je odlišný.

Po konzultaci s vedoucím této práce byly pro další výpočty převzaty vyrovnané souřadnice ze všech etap.

10.2 Vyhodnocení posunů

Vyhodnocení měření deformací bylo provedeno číselně a graficky. Číselné výsledky jsou uvedeny ve formě přehledných tabulek, kde jsou měření seřazena v časovém sledu jednotlivých etap.

10.2.1 Vyhodnocení posunů obecně

Při malých hodnotách zjištěných posunů je obtížné vyhodnotit, zda se jedná o posun, nebo je výsledek zatížen měřickými chybami. Proto se uplatňuje statistické testování pomocí intervalů spolehlivosti. Jak uvádí [16]

Jak uvádí [16] zjištěný posun $\Delta x_{i,j}$ se vypočte jako $\Delta x_{i,j} = x_j - x_j$, kde x_i, x_j jsou souřadnice bodu v etapě i a j, které jsou dány se směrodatnou odchylkou m_{x_i}, m_{x_j}. Úplná směrodatná odchylka posunu se poté vypočte jako $m_{\Delta x_{i,j}} =$

$\sqrt{m_{x_i}^2 + m_{x_j}^2}$. Statistické testování se provádí pomocí intervalů spolehlivosti:

$$
\begin{aligned}
|\Delta x_{i,j}| &< m_{\Delta x_{i,j}} && \text{...posun není prokazatelný} \\
m_{\Delta x_{i,j}} < |\Delta x_{i,j}| &< u_p \cdot m_{\Delta x_{i,j}} && \text{...bod je podezřelý z posunu} \\
u_p \cdot m_{\Delta x_{i,j}} &< |\Delta x_{i,j}| && \text{...posun nastal na hladině významnosti } \alpha.
\end{aligned}
$$

Koeficient spolehlivosti pro testování volíme $u_p = 2$, kde je hladina významnosti $\alpha = 5\%$, což znamená, že posun je prokázan s rizikem 5%.

10.2.2 Určení deformací

V tabulkovém procesoru Microsoft Excel byly spočteny posuny mezi jednotlivými etapami a porovnány se směrodatnou odchylkou posunu . Výpočty jsou popsány v kapitole 10.2.1.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Q	R	S	T	U	V
									k-1								
Číslo b	Etapa	Y[m]	X[m]	Z[m]	my [mm]	mx [mm]	mz [mm]	Datum	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	mΔy [mm]	mΔx [mm]	mΔz [mm]	POSUN Y	POSUN X	POSUN Z
GB001	88	820162,8463	1071621,9602	330,2475	0,45	0,45	0,34	19.12.2022	-0,3	0,0	-0,1	0,59	0,59	0,47	NE	NE	NE
GB001	85	820162,8466	1071621,9602	330,2476	0,38	0,38	0,32	01.12.2022	-0,5	0,1	0,6	0,56	0,55	0,47	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	80	820162,8471	1071621,9601	330,2470	0,41	0,40	0,35	25.10.2022	-1,0	0,4	0,0	0,65	0,63	0,46	MOŽNÁ	NE	NE
GB001	76	820162,8481	1071621,9597	330,2470	0,51	0,49	0,30	30.09.2022	-0,1	0,1	1,0	0,65	0,63	0,48	NE	NE	ANO
GB001	72	820162,8482	1071621,9596	330,2460	0,41	0,40	0,38	31.08.2022	0,5	0,9	1,4	0,56	0,54	0,54	NE	MOŽNÁ	ANO
GB001	67	820162,8477	1071621,9587	330,2446	0,38	0,37	0,39	27.07.2022	-0,1	0,8	0,7	0,65	0,64	0,79	NE	MOŽNÁ	NE
GB001	63	820162,8478	1071621,9579	330,2439	0,53	0,52	0,69	30.06.2022	-0,2	-0,5	-1,8	0,67	0,66	0,81	NE	NE	ANO
GB001	58	820162,8480	1071621,9584	330,2457	0,41	0,41	0,42	26.05.2022	0,1	0,5	-0,3	0,55	0,55	0,56	NE	NE	NE
GB001	53	820162,8479	1071621,9579	330,2460	0,36	0,36	0,37	22.04.2022	0,4	0,0	-0,6	0,54	0,55	0,55	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	49	820162,8475	1071621,9579	330,2466	0,40	0,42	0,41	24.03.2022	-0,2	-0,4	-0,6	0,58	0,60	0,56	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	45	820162,8477	1071621,9583	330,2472	0,42	0,43	0,38	24.02.2022	-0,1	0,2	0,7	0,57	0,57	0,48	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	41	820162,8478	1071621,9581	330,2465	0,38	0,38	0,30	27.01.2022	0,3	-0,7	0,6	0,58	0,59	0,45	NE	MOŽNÁ	MOŽNÁ
GB001	38	820162,8475	1071621,9588	330,2459	0,44	0,45	0,34	06.01.2022	0,1	0,7	-0,6	0,67	0,68	0,52	NE	MOŽNÁ	MOŽNÁ
GB001	37	820162,8474	1071621,9581	330,2465	0,51	0,51	0,40	21.12.2021	0,0	0,6	-0,3	0,65	0,65	0,57	NE	NE	NE
GB001	36	820162,8474	1071621,9575	330,2468	0,40	0,40	0,41	14.12.2021	0,5	-0,4	0,2	0,54	0,54	0,57	NE	NE	NE
GB001	35	820162,8469	1071621,9579	330,2466	0,36	0,36	0,39	09.12.2021	-0,1	-1,2	0,1	0,63	0,58	0,52	NE	ANO	NE
GB001	33	820162,8470	1071621,9591	330,2465	0,52	0,46	0,34	25.11.2021	-0,1	0,7	-0,9	0,81	0,78	0,77	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	30	820162,8471	1071621,9584	330,2474	0,62	0,63	0,69	06.11.2021	-0,6	-0,5	0,0	0,82	0,84	0,79	NE	NE	NE
GB001	29	820162,8477	1071621,9589	330,2474	0,54	0,55	0,38	29.10.2021	0,7	-1,1	0,4	0,77	0,79	1,05	NE	MOŽNÁ	NE
GB001	28	820162,8470	1071621,9600	330,2470	0,55	0,57	0,98	21.10.2021	1,1	-1,0	-0,7	0,81	1,13	1,15	MOŽNÁ	NE	NE
GB001	27	820162,8459	1071621,9610	330,2477	0,60	0,98	0,60	14.10.2021	0,0	0,0	-6,2	0,74	1,10	0,65	NE	NE	ANO
GB001	26	820162,8459	1071621,9610	330,2539	0,43	0,51	0,24	07.10.2021	0,0	0,2	-0,2	0,86	0,91	0,53	NE	NE	NE
GB001	25	820162,8459	1071621,9608	330,2541	0,75	0,75	0,47	30.09.2021	-0,7	0,7	0,7	0,95	0,96	0,59	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	24	820162,8466	1071621,9601	330,2534	0,59	0,60	0,36	23.09.2021	2,0	-1,6	-0,5	0,81	0,95	0,58	ANO	MOŽNÁ	NE
GB001	23	820162,8446	1071621,9617	330,2539	0,56	0,74	0,45	16.09.2021	-0,2	0,4	0,2	0,84	1,05	0,55	NE	NE	NE
GB001	22	820162,8448	1071621,9613	330,2537	0,62	0,74	0,32	09.09.2021	-0,5	-0,1	0,5	0,88	0,99	0,42	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	21	820162,8453	1071621,9614	330,2532	0,63	0,66	0,27	02.09.2021	-0,1	0,6	0,0	0,82	0,89	0,56	NE	NE	NE
GB001	20	820162,8454	1071621,9608	330,2532	0,52	0,60	0,49	26.08.2021	-0,4	0,7	0,0	1,07	1,08	1,07	NE	NE	NE
GB001	19	820162,8458	1071621,9601	330,2532	0,94	0,90	0,95	19.08.2021	-3,0	2,3	0,5	1,03	1,00	1,02	ANO	ANO	NE
GB001	16	820162,8488	1071621,9578	330,2527	0,43	0,44	0,36	29.07.2021	-0,2	0,8	-0,3	0,62	0,63	0,50	NE	MOŽNÁ	NE
GB001	15	820162,8490	1071621,9570	330,2530	0,44	0,45	0,35	22.07.2021	0,1	0,2	0,6	0,61	0,62	0,51	NE	NE	MOŽNÁ
GB001	14	820162,8489	1071621,9568	330,2524	0,42	0,43	0,37	15.07.2021	1,4	0,4	0,3	0,45	0,63	0,73	ANO	NE	NE
GB001	13	820162,8475	1071621,9564	330,2521	0,15	0,46	0,63	08.07.2021	-0,3	-0,4	-0,4	0,46	0,64	0,70	NE	NE	NE

Obr. 45: Ukázka dat v SW Microsoft Excel
Zdroj: autor

Struktura dat je následující:

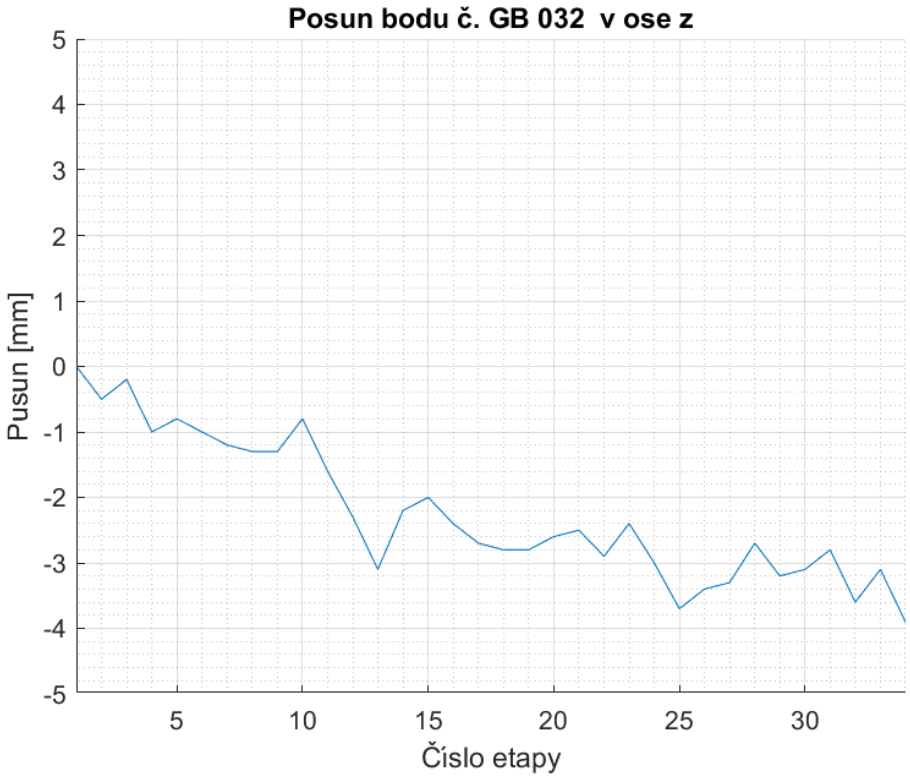
sloupec A ... číslo bodu
sloupec B ... etapa, ve které byl bod měřen
sloupce C,D,E ... souřadnice bodu Y,X,Z v metrech
sloupce F,G,H ... směrodatné ochylky bodu v jednotlivých osách my, mx, mz v milimetrech
sloupec I ... datum měření
sloupce J,K,L ... posun od minulé etapy (rozdíl souřadnic) dy, dx, dz v milimetrech
sloupce Q,R,S ... směrodatná odchylka posunu mΔy, mΔx, mΔz v milimetrech
sloupce T,U,V ... informace, zda je posun prokazatelný

Tabulka s výpočty je součástí *Přílohy 6.1*

10.2.3 Grafické výstupy

Ve výpočetním softwaru Matlab byl vytvořen script na tvorbu grafů, které znázorňují posuny na jednotlivých bodech v průběhu monitoringu. Vytvořený script je přiložen jako *Přílohy 4.1.* Všechny vytvořené grafy jsou součástí *Přílohy 4.2.*

Na *Obr. 46* lze vidět sedání bodu GB032, avšak toto sedání se pohybuje v řádu milimetrů a nepřekračuje varovný stav. Můžeme toto sedání prohlásit za klidový stav.



Obr. 46: Sedání bodu GB032
Zdroj: autor

Dle *Přílohy 4.2* žádný z bodů nepřekračuje hodnoty varovných stavů zobrazených na *Obr. 7.*

Následně jsou posuny znázorněny pomocí programu Vector Diagram. Zde je zobrazena polohová změna souřadnic bodů v čase. Tento soubor je součástí *Přílohy 6.2*

10.3 Porovnání totálních stanic

Při dodržení daného postupu měření, tj. co největší provázanost sítě, lze využít i totální stanici s horší úhlovou přesností. Vyrovnané souřadnice ze softwaru EasyNET a jejich rozdíly jsou uvedeny v *Tabulce 13.* Z tabulky je

patrné, že rozdíl vyrovnaných souřadnic se pohybuje v řádu desetin až jednotek milimetrů. To je zapříčiněno tím, že délková přesnost obou totálních stanic je stejná. Avšak nedoporučoval bych zaměňovat stroje. Je lepší, když je celý projekt měřen jednou totální stanicí.

Tabulka 13: Porovnání vyrovnaných souřadnic bodů měřených totální stanici Leica MS50 a Leica TS15

Číslo	MS50			TS15			Rozdíl souřadnic		
bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	dX [m]	dY [m]	dZ [m]
GB022	1071796,8270	820001,1894	330,3733	1071796,8279	820001,1881	330,3732	-0,0009	0,0013	0,0001
GB024	1071789,0481	820023,5860	329,2682	1071789,0497	820023,5835	329,2671	-0,0016	0,0025	0,0011
GB025	1071766,5247	820043,2586	330,9161	1071766,5245	820043,2566	330,9151	0,0002	0,0020	0,0010
GB026	1071756,8444	820055,1951	331,1550	1071756,8450	820055,1940	331,1544	-0,0006	0,0011	0,0006
GB027	1071748,6296	820066,9357	331,2603	1071748,6305	820066,9351	331,2601	-0,0009	0,0006	0,0002
GB028	1071741,4411	820077,2860	331,3702	1071741,4411	820077,2862	331,3702	0,0000	-0,0002	0,0000
GB029	1071733,7223	820088,3431	331,4139	1071733,7223	820088,3427	331,4139	0,0000	0,0004	0,0000
GB030	1071727,7735	820087,1071	331,3408	1071727,7733	820087,1061	331,3405	0,0002	0,0010	0,0003
GB031	1071716,2109	820096,2849	331,4789	1071716,2106	820096,2854	331,4789	0,0003	-0,0005	0,0000
GB032	1071707,3093	820109,1485	331,4355	1071707,3084	820109,1489	331,4355	0,0009	-0,0004	0,0000
GB033	1071687,8842	820124,9852	329,2280	1071687,8844	820124,9850	329,2277	-0,0002	0,0002	0,0003
GB034	1071682,7141	820129,2323	328,5066	1071682,7150	820129,2327	328,5065	-0,0009	-0,0004	0,0001
GB035	1071674,2684	820136,1745	327,8303	1071674,2690	820136,1747	327,8306	-0,0006	-0,0002	-0,0003
GB036	1071666,0833	820142,9713	327,6739	1071666,0841	820142,9716	327,6745	-0,0008	-0,0003	-0,0006
GB104	1071756,5044	820054,8566	327,8560	1071756,5049	820054,8560	327,8554	-0,0005	0,0006	0,0006
GB105	1071748,3365	820066,5660	327,9871	1071748,3372	820066,5658	327,9872	-0,0007	0,0002	-0,0001
GB106	1071741,0501	820077,0372	328,1408	1071741,0507	820077,0377	328,1407	-0,0006	-0,0005	0,0001
GB108	1071727,3644	820086,8512	327,9877	/	/	/	/	/	/
GB109	1071715,8872	820096,0749	328,1012	1071715,8869	820096,0755	328,1013	0,0003	-0,0006	-0,0001
GB110	1071706,9063	820108,5856	328,0009	1071706,9069	820108,5857	328,0010	-0,0006	-0,0001	-0,0001
GB111	1071687,5740	820124,5915	326,6491	1071687,5746	820124,5918	326,6489	-0,0006	-0,0003	0,0002

11 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat geodetické práce při monitoringu pilotové stěny, následné zpracování a vyhodnocení výsledků etapového měření této stěny. Geodetickým měřením deformací pilotové stěny v Plzni bylo změřeno 94 etap.

K měření deformací byla použita totální stanice Leica Nova MS50, pro kterou byly vypočteny rozbory přesnosti před měřením. Z rozborů přesnosti před měřením vyšlo, že je dostatečné měření v jedné skupině. Očekávaná souřadnicová směrodatná odchylka nepřekračovala požadovanou souřadnicovou směrodatnou odchylku, která byla δ_{xy}= 2mm. Měření však probíhala ve třech skupinách.

Jako experiment byla stěna zaměřena i totální stanicí Leica Nova TS15, která má horší úhlovou přesnost. Díky tomuto experimetu bylo dokázáno, že přesné geodetické práce lze měřit i přístrojem s horší úhlovou přesností. Musí být však zaručena velká provázanost geodetické sítě a musí být měřeno velké množství nadbytečných veličin, které vstupují do vyrovnání. Rozdíly mezi vyrovnanými souřadnicemi měřenými oběma přístroji jsou maximálně *2 mm*. Takto podobné výsledky jsou dány stejnou přesností měření délek obou přístrojů a velkým počtem nadbytečných veličin.

Měřená data byla vyrovnána ve dvou softwarech, oba vyrovnávají pomocí robusní metody. Jedná se o softwary EasyNET a Neptan/GPS. Síť byla vyrovnána jako volná s následnou Helmertovou transformací na identické body. Vyrovnané hodnoty ze SW Neptan/GPS neodpovídají rozborům přesnosti před měřením. Vzhledem k tomu, že bylo vyrovnání přebráno, není možné v této práci analyzovat, proč k tomuto jevu dochází. Hodnoty ze SW EasyNET odpovídají rozborům přesnosti před měřením. Vzhledem k velkému počtu etap byly pro ilustraci zpracování přebrány vyrovnané etapy ze SW Neptan/GPS. Tato práce se nemá primárně zabývat porovnáním vyrovnávacích softwarů. Nicméně tato skutečnost byla zjištěna a následně byl tento jev z části analyzován. Samotnou analýzu obou softwarů bych doporučil jako téma samostatné diplomové práce. Výsledné rozdíly souřadnic z obou softwarů pro vyrovnání jsou v řádu milimetrů, největší rozdíl je na bodě GB022, a to *5 mm*.

Ze souřadnic vyrovnaných z každé etapy byly vypočteny posuny mezi jednotlivými etapami a také prokazatelnost těchto posunů. V rámci celého monitoringu pozorované stěny byla maximální hodnota posunu ve vodorovném směru *2,5 mm* a maximální hodnota posunu ve svislém směru *1,6 mm*. Oba tyto posuny byly pozorovány na bodě GB109. V SW Matlab byl vytvořen skript pro vytváření grafů. Grafické výstupy, které zobrazují posuny bodů GB022-GB037 a GB102-GB111, jsou součástí přílohy.

Ačkoliv se ukázalo, že lze využít jiné přístroje i softwary, je vhodné z hlediska eliminace systematických chyb využívat po celou dobu stejné.

Seznam obrázků

1 Stavební jáma 11
2 Schéma uspořádání pilot: a) piloty převrtávané, b) tangenciální a c) volně stojící 12
3 Záporové pažení 13
4 Mikrozáporové pažení 13
5 Realizace tryskové injektáže 14

6 Schéma posloupnosti varovných stavů 20
7 Hodnoty varovných stavů 20

8 Prostorová polární metoda 22
9 Prostorové protínání z úhlů 23
10 Průseková fotogrametrie 24
11 Příklad trhlinoměru 25
12 Příklad pásmového extenzometru 26
13 Schéma měřické setavy inklinometru 26
14 Schéma dynamometru 27

15 Lokalita stavby 28
16 Lokalita stavby 28
17 Pilotová stěna ve stavební jámě, stav ke dni 10. března 2023 . . 29
18 Uzel Plzeň, 5. stavba - Lobzy-Koterov 30
19 I/20 Plzeň, Jasmínová-Jateční 31
20 Bodové pole monitoringu 32
a Pilíř č.1005 32
b Body GB025 a GB103 32

21 Leica Nova MS50 34
22 Leica Viva TS15 5” 35
23 Použité hranoly 36
a Hranol Sokkia 36
b Hranol Sinning 36
24 Stativ Nedo s rychlosvorkami 36
25 Greisinger GFTB200 37
26 PrecisPlanner 3D 3.3.1 37
27 EasyNET 3.5.1 38
28 Vector Diagram 1.23 38
29 Neptan/GPS 39
30 Notepad++ 39

31 LaTeX 40

32 Postavení přístrojů ve stavební jámě 48
a Postavení přístroje MS50 ve stavební jámě 48
b Autor DP s přístrojem TS15 48
33 Ukázka prohlížení a kontroly měřených dat 49
34 Nově stabilizovaný bod GB108 50

35 Huberův robusní odhad 55
36 Nastevení parametrů pro vyrovnání pro Leica MS50 56
37 Základní informace o vyrovnání pro Leica MS50 57
38 Nastavení parametrů pro transformaci sítě pro Leica MS50 . . . 57
39 Základní informace o transformaci sítě pro Leica MS50 58
40 Základní informace o výpočtu sítě pro etapu 92 59
a Základní informace o vyrovnaní etapy 92 pro Leica MS50 59
b Základní informace o transformaci etapy 92 pro Leica MS50 59
41 Nastavení parametrů pro vyrovnání pro Leica TS15 60
42 Základní informace o vyrovnání pro Leica TS15 60
43 Základní informace o transformaci sítě pro Leica TS15 61
44 Nastavení parametrů pro vyrovnání 63
45 Ukázka dat v SW Microsoft Excel 69
46 Sedání bodu GB032 70

Seznam tabulek

1 Souřadnice bodů základní vytyčovací sítě stavby 32

2 Očekávané směrodatné odchylky souřadnic jednotlivých bodů pro Leica MS50 . . 44
3 Očekávané směrodatné odchylky souřadnic jednotlivých bodů pro Leica TS15 . . 45
4 Očekávané směrodatné odchylky souřadnicové v jednotlivých skupinách 46
5 Očekávané parametry elips pro měření ve třech skupinách 47

6 Vyrovnané souřadnice bodů z etapy 91pomocí EasyNET měřené Leica MS50 . . 59
7 Vyrovnané souřadnice bodů pomocí EasyNET měřené Leica TS15 62
8 Vyrovnané souřadnice bodů z etapy 91 pomocí Neptan/GPS měřené Leica MS50 64
9 Rozbory přesnosti po měření, porovnání očekávaných a dosažených směrodatných odchylek pro Leica MS50 65
10 Rozbory přesnosti po měření, porovnání očekávaných a dosažených směrodatných odchylek pro Leica TS15 66
11 Rozdíly souřadnic dosažených softwary EasyNET a Neptan/GPS v etapě 91 . . 67
12 Rozdíly mezi posuny bodů vyrovnaných v SW EasyNET a Neptan/GPS 68
13 Porovnání vyrovnaných souřadnic bodů měřených totální stanici Leica MS50 a Leica TS15 71

Použité zdroje

[1] Zakládání staveb. *Technologie*. Dostupné na: https://www.zakladani.cz/cs/vyrobni-program/technologie.

[2] ČSN 73 0405. *Měření posunů stavebních objektů*, 1997. Český normalizační institut.

[3] GEOtest a.s. *Projektová dokumentace - Projekt geotechnického monitoringu- Uzel Plzeň 5.stavba*, 2020.

[4] Rudolf URBAN. *Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů*. CTU Publishing House, Praha, 2015. ISNB 978-80-01-05786-5.

[5] Geologie VSB. *Geotechnický monitoring*. Dostupné na: http://geologie.vsb.cz/svadef/text/6_monitoring.htm.

[6] Martin PECUCH. *Po stopách historie města*. Dostupné na: https://www.plzen.eu/o-meste/historie/po-stopach-historie.

[7] SŽDC. *Uzel Plzeň, 5. stavba - Lobzy-Koterov*. Dostupné na: https://docplayer.cz/199830294-Uzel-plzen-5-stavba-lobzy-koterov.html.

[8] ŘSD. *Tunelový zárodek na plánované stavbě I/20 Plzeň, Jasmínová – Jateční*. Dostupné na: https://apdos.roadmedia.cz/Upload/Stavby/192/infoletak_s20-jasminova-jatecni.pdf?t=2022-10-10\%2022:25:33.268.

[9] *Leica NOVA MS50*. Dostupné na: https://www.gefos-leica.cz/ftp/Totalni_stanice/NOVA/Leica_Nova_MS50_letak_CZ.pdf.

[10] *Leica Viva TS15 Datasheet*. Dostupné na: https://www.gefos-leica.cz/ftp/Monitoring/TS15_DAT_en.pdf.

[11] Martin ŠTRONER. *Projekt PrecisPlanner 3D*. Dostupné na: https://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/PPlanner/index.html.

[12] Martin ŠTRONER a Pavel TŘESÁK. *EasyNET*. Dostupné na: http://adjustsolutions.cz/easynet/.

[13] Hilmar SCHÜßLER. Vermessungstechnische erfassung und cad-modellierung der historischen kirche „surb hakop“ in armenien. Diplomová práce, Technische Fachhochschule Berlin, 2008. Dostupné na: https://manualzz.com/doc/4319031/pdf-datei---beuth-hochschule-f\%C3\%BCr-technik-berlin.

[14] Martin ŠTRONER a Miroslav HAMPACHER. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. Česká technika- nakladatelství ČVUT, Praha. ISNB 978-80-01-05843-5.

[15] Huber P.J. *Robust statistics*. John Wiley & Sons, New York, 1981. ISNB 0-471-41805-6.

[16] Martin ŠTRONER. *Měření posunů a přetvoření stavebních objektů*. Dostupné na: https://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/IGH/index.html.

Seznam přílohy

Příloha 0.1 zápisník z měření ve formátu **.gsi* pro Leica MS50 (pouze elektronicky)
Příloha 0.2 zápisník z měření ve formátu **.gsi* pro Leica TS15 (pouze elektronicky)
Příloha 1.1 vstup do SW PrecisPlanner3D- přibližné souřadnice (pouze elektronicky)
Příloha 1.2 vstup do SW PrecisPlanner3D- mapa měření Leica MS50 (pouze elektronicky)
Příloha 1.3 vstup do SW PrecisPlanner3D- mapa měření Leica TS15 (pouze elektronicky)
Příloha 1.4 výstup ze SW PrecisPlanner3D- protokol rozborů před měřením pro MS50
Příloha 1.5 výstup ze SW PrecisPlanner3D- protokol rozborů před měřením pro TS15 (pouze elektronicky)
Příloha 2.1 vstup do SW EasyNET- přibližné souřadnice (pouze elektronicky)
Příloha 2.2 vstup do SW EasyNET- zápisník měření MAPA2 pro MS50 (pouze elektronicky)
Příloha 2.3 vstup do SW EasyNET- zápisník měření MAPA2 pro TS15 (pouze elektronicky)
Příloha 2.4 protokol o vyrovnání EasyNET pro MS50
Příloha 2.5 protokol o vyrovnání EasyNET pro TS15 (pouze elektronicky)
Příloha 2.6 protokol o transformaci souřadnic v SW EasyNET pro MS50
Příloha 2.7 protokol o transformaci souřadnic v SW EasyNET pro TS15 (pouze elektronicky)
Příloha 2.8 projekt ze SW Easynet ve formátu **.pen* pro MS50 (pouze elektronicky)
Příloha 2.9 projekt ze SW Easynet ve formátu **.pen* pro TS15 (pouze elektronicky)
Příloha 3.1 vstup do SW Neptan/GPS - zápisník měření, redukovaná data ve formátu **.beo* (pouze elektronicky)
Příloha 3.2 protokol vyrovnání ze SW Neptan/GPS
Příloha 3.3 soubor BETPOL.OUT ze SW Neptan/GPS - přibližné souřadnice (pouze elektronicky)
Příloha 4.1 skript ze SW Matlab na vytvoření grafů ve formátu **.m* (pouze elektronicky)
Příloha 4.2 grafy posunů jednotlivých bodů GB022-GB037 a GB102-GB111
Příloha 5.1 dosažené elipsy chyb vyrovnaných souřadnic měřených Leica MS50
Příloha 5.2 dosažené elipsy chyb vyrovnaných souřadnic měřených Leica TS15
Příloha 6.1 soubor ve formátu **.xlsx* s výpočtem posunů jednotlivých bodů
Příloha 6.2 polohové posuny na jednotlivých bodech vytvořené v SW Vector Diagram 1.23