

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra speciální geodézie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Monitoring sesuvného území u železniční tratě Čížkovice - Obrnice

Monitoring the sliding area near the railway line Čížkovice - Obrnice

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

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

Praha 2018

Bc. Jolana Mikulecká



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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Mikulecká Jméno: Jolana Osobní číslo: 424022
Zadávající katedra: Katedra speciální geodézie
Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Monitoring sesuvného území u železniční tratě Čížkovice - Obrnice
Název diplomové práce anglicky: Monitoring the sliding area near the railway line Čížkovice - Obrnice
Pokyny pro vypracování:
Praktické zaměření dvou etap pomocí GNSS a totální stanice. Rozbory přesnosti použité měřické metody.
Vyrovnání geodetické sítě dle MNČ. Vyhodnocení posunů sledovaných bodů.

Seznam doporučené literatury:


Urban, R.: Geodetické práce při měření posunů a přetvoření stavebních objektů. 1. vyd. Praha. CTU Publishing House, 2015.
Štroner, M. - Hampacher, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 1. vyd. Praha: CTU Publishing House, 2011. 313 s. ISBN 978-80-01-04900-6.


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

Datum zadání diplomové práce: 21.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2018

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



Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

22.2.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením mého vedoucího diplomové práce a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20. 5. 2018

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat Ing. Janovi Balkovi za zapůjčení GNSS přijímačů a pomoc s výpočty souřadnic GNSS. Prof. Ing. Martin Štronerovi, Ph.D. děkuji za půjčení licence programu PreciPlanner. Dále děkuji mému vedoucímu práce doc. Ing. Rudolfu Urbanovi, Ph.D. za jeho pomoc při zpracování a za dopravu na místo měření. V neposlední řadě chci poděkovat všem svým přátelům a nejvíce své „spolubojovnici“ Bc. Alžbětě Léharové, která mi pomohla s měřením v terénu. Nakonec chci poděkovat svým rodičům za to, že mi umožnili studovat a nikdy nahlas nezapochoybovali o tom, že to bylo špatné rozhodnutí.

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na zpracování a vyhodnocení prostorových posunů čtyř etap měření na sesuvném území poblíž města Třebenice. Pozorované body byly stabilizované na propustcích u železniční tratě Čížkovice – Obrnice a v asfaltovém povrchu silnice třetí třídy číslo III/23756 z Třebenic do Dlažkovic.

Zaměření pozorovaných bodů bylo provedeno polygonovým pořadem realizovaným trojpodstavcovou soustavou. Stanoviska polygonového pořadu byla volena jako volná. Pomocí statické metody GNSS byly změřeny observace na dvou bodech sítě.

Součástí práce byl také rozbor přesnosti před měřením, který byl proveden v programu PrecisPlanner. Dále byl použit program EasyNet pro zpracování naměřených dat a zároveň pro vyrovnání všech etap měření. V závěru byly porovnány posuny sledovaných bodů.

Klíčová slova: sesuv, posun, rozbor přesnosti, etapové měření, GNSS, vyrovnání.

Abstract

This diploma thesis focuses on the processing and evaluation of the spatial displacement of the four measuring stages in the sliding area near the town of Třebenice. The observed points were stabilized at the passes at the railway Čížkovice - Obrnice and in the asphalt surface of the third class road III / 23756 from Třebenice to Dlažkovice.

The measure of the observed points was made by a principal traverse implemented by the three-point-method. The stadia marks of the principal traverse were chosen freely. Using the static GNSS method, observation at two points of the network was measured.

The work also included the precision analysis before the measurements were carried out in the PrecisPlanner program. Additionally, the EasyNet program was used to process and to adjust the four sets of measured data. In the end, the shifts of the observed points were compared.

Klíčová slova: landslide, shift, precision analysis, stage measurement, GNSS, adjustment.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1 Úvod | 8 |
| 2 Geodetický monitoring | 9 |
| 2.1 Svahové pohyby | 10 |
| 2.2 Metody měření posunů | 10 |
| 2.2.1 Prostorová polární metoda..... | 11 |
| 2.2.2 Metoda globálních navigačních satelitních systémů | 12 |
| 3 Sesuvné území – Třebenice | 14 |
| 3.1 Historie území a předešlé měření | 15 |
| 4 Sledované body | 19 |
| 4.1 GEONAS..... | 19 |
| 5 Rozbor přesnosti před měřením | 21 |
| 5.1 Model vyrovnání geodetické sítě..... | 21 |
| 5.2 Příprava souřadnic a měření | 22 |
| 5.3 Výsledek rozboru přesnosti před měřením | 26 |
| 6 Přístroje a pomůcky | 28 |
| 6.1 Přístroje GNSS | 28 |
| 6.2 Totální stanice Trimble S6 | 28 |
| 6.3 Další pomůcky..... | 29 |
| 7 Měření v terénu | 31 |
| 7.1 Nultá a první etapa..... | 31 |
| 7.2 Druhá etapa..... | 31 |
| 7.3 Třetí etapa..... | 32 |
| 8 Zpracování naměřených dat | 33 |
| 8.1 Zpracování GNSS..... | 33 |
| 8.1.1 Výpočet souřadnic v ITRF-2000 | 33 |
| 8.1.2 Převod souřadnic z ITRF2000 do S-JTSK | 34 |
| 8.2 Zpracování měření – EasyNet | 37 |
| 8.2.1 Vyrovnání 0. a 1. etapy..... | 39 |
| 8.2.2 Vyrovnání 2. etapy | 40 |
| 8.2.3 Vyrovnání 3. etapy | 46 |
| 9 Výpočet a vyhodnocení posunů | 49 |
| 10 Závěr | 67 |
| Seznam použitých zdrojů | 68 |
| Seznam obrázků | 70 |
| Seznam tabulek | 71 |
| Seznam příloh | 72 |

1 Úvod

V této diplomové práci je popsáno měření a zpracování čtyř etap geodetického monitoringu sesuvného území a jejich porovnání. Zaměřovaná oblast se nachází v okolí železničního přejezdu na trati Lovosice – Most a silnice třetí třídy III/23756 mezi vesnicí Dlažkovice a městem Třebenice.

Na tomto území probíhá v současné době geologický průzkum Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR a rekonstrukce železniční trati. Oblast je sledována již od roku 1938, kdy se tu projevíly první větší posuny železničního tělesa. Sesuvy tu způsobuje především rozdílnost složení vrstev hornin a působení spodní vody. Data z těchto sledovacích měření, ale není možné porovnávat s měřením rozebraným v této práci. Důvodem je to, že se vztažné a pozorované body z minulosti vlivem sesuvů několikrát změnilo nebo byly úplně zničeny. Až v loňském roce bylo provedeno měření stejné sítě bodů, které se mohou porovnávat s výsledky této práce. Měření bylo provedeno v rámci diplomové práce Ing. Janem Veliškem, který měřil tytéž body v únoru 2017 a v dubnu 2017.

Porovnávají se tedy čtyři etapy měření s odstupem tří, sedmi a pěti měsíců, počítáno od naměření nulté etapy. Pozorované body byly zaměřeny pomocí totální stanice prostorovou polární metodou. Vztažné body byly určeny pomocí družicové GNSS metody (Globální navigační satelitní systémy). GNSS sestavy na měření vztažných bodů byly zapůjčeny Ing. Janem Balkem v Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, který má v této oblasti na starosti geotechnický průzkum.

Po zaměření druhé a třetí etapy bylo provedeno vyrovnání souřadnic pozorovaných bodů a určení jejich směrodatných odchylek. Nakonec byly určeny velikosti polohových a výškových posunů na všech bodech.

Práce je rozdělena do několika kapitol. Každá z nich představuje část řešení problematiky zadání diplomové práce. V prvních kapitolách je vysvětleno, co je geodetický monitoring a jeho účel. Dále je charakterizována lokalita sesuvu, popsán rozbor přesnosti před měřením, údaje o použitých přístrojích a pomůckách. Následuje postup transformace souřadnic z měření GNSS a výpočtů vyrovnání bodů. V závěru práce jsou shrnuty výsledné posuny a jejich interpretace.

2 Geodetický monitoring

Monitoring neboli sledování, je nedílnou součástí inženýrské geodézie. Monitoring je dnes chápán jako soubor činností, zahrnující opakovaná měření a jejich vyhodnocování, jejichž výsledkem jsou údaje o současném stavu místa či objektu. Z těchto výsledků je dále možné předvídat budoucí stav či jeho změnu. Monitoring je dnes používán v různých odvětvích stavebnictví, ale i při důlních činnostech a sledování nestabilních hornin. Základem této činnosti je systematické etapové měření, které je dáno projektem, podle kterého bude činnost vykonávána. Výsledkem prací je potvrzení o případném posunu či přetvoření nebo jejich zamítnutí.

Pro sledování přetváření na povrchu terénu jsou nejčastěji používány geodetické metody, které vyhodnocují relativní nebo absolutní hodnoty posunu, jejich orientaci a časový vývoj. Dále existují geotechnické měření, které se používají v případech již potvrzené nestability, a to z důvodu jejich ekonomické náročnosti.

Geodetická měření mohou být vztažena k místní souřadnicové soustavě nebo ke státním referenčním systémům. Geotechnická měření jsou vždy pouze lokální – vztažená k určitému místu. Proto je nutné geodeticky zaměřit a určit polohu a výšku geotechnických zařízení. Tím lze získat úplné údaje o všech měřených veličinách.

Při zjištění změny polohy kontrolovaných bodů v různých etapách, dochází k posunu. Ten může být určen jako relativní (vztažený k ostatním bodům) nebo absolutní (vztažen k referenčnímu systému).

Monitoring rozdělujeme na aktivní a pasivní. Aktivní monitoring se využívá u míst, kde je nutné měřit v krátkých časových úsecích a apeluje se okamžité zpracování výsledků. U pasivního monitoringu se měření a zpracování dat opakuje s větším časovým odstupem.

Monitoring zemních svahů je zaměřen na zjištění průběhu procesů v hornině, které přispívají k jejich nestabilitě. Dále to jsou časové údaje o jejich vývoji a v neposlední řadě k určení smykových ploch hornin. Z těchto měření se dále určuje, jaké opatření proti sesuvu bude použito (sanační a stabilizační opatření – např. odvodnění, ukotvení, ...).

V této kapitole bylo čerpáno z [4] a [5].

2.1 Svahové pohyby

Sesuv je definován jako jev vznikající účinkem zemské tíže při porušení stability svahů. V České republice se jedná hlavně o případy sesouvání a skalních řícení. Předcházet těmto jevům by se mělo zvláště u stavebních prací (např. výstavba komunikací, železnic a bytových jednotek) a to zajištěním geologického průzkumu a případně i následným sledováním porušeného místa a jeho okolí. Sesuvy, ale mohou být dány i přírodními podmínkami – geologicky, klimaticky a hydrogeologicky. Jedněmi z hlavních činitelů, které porušují stabilitu svahu jsou sklon svahu, změny obsahu vody v půdě, činnost mrazu, zvětrávání hornin a odstranění vegetace.

Svahové pohyby se zpravidla rozdělují podle druhu smykové plochy. Prvním případem jsou sesuvy asekvntní, které vznikají na stejnorodých soudržných zeminách a k pohybu dochází na válcových smykových plochách. Druhým případem jsou sesuvy konsekvntní, u kterých dochází k pohybu po půdních vrstvách. Posledním případem jsou sesuvy insekvntní. U těch dochází k posunu napříč vrstvami. Insekvntní sesuvy jsou zpravidla velmi rozsáhlé a smykové plochy zasahují hluboko do svahu.

Druhý způsob, jak dělit sesuvy je podle mechanismu a rychlosti sesouvání. Tyto možnosti jsou čtyři – ploužení, sesouvání, stékání a řícení. Ploužení je časově dlouhodobý proces, jedná se o pomalý a nezrychlující pohyb půdy. Rozhraní pohybujících se ploch a podloží je málo zřetelné. Sesouvání je zpravidla rychlejší a pohyb půdy je vykonáván po jedné nebo více smykových plochách. Typické pro sesouvání je, že se sesouvaná hmota nasune na původní půdní vrstvu. Stékání je velmi rychlý a často nejničivější sesuv, protože při něm dochází k pohybu velkého množství půdy ve formě vazkých hmot (bláto). Oddělená pohybující se vrstva má viditelnou a ostrou hranici s nepohyblivým podložím. Řícení je náhlý a krátkodobý pohyb hornin na strmých svazích – nejčastěji skalní převisy. [2]

2.2 Metody měření posunů

Geodetických metod k určování posunů je mnoho. Při výběru metody se musí zohledňovat použitelnost, přesnost a časová náročnost měření i zpracování naměřených dat. U měření posunů a deformací na stavebních objektech se většinou polohová a výšková složka určuje dvěma různými metodami. U polohových složek to jsou metody polární, záměrné přímky, polygonové pořady, protínání z úhlů a délek, či metodami fotogrammetrickými. Výškové složky posunů se většinou určují geometrickou nivelací

nebo trigonometricky. Při určování terénních posunů by ale měření polohových a výškových složek zvlášť bylo příliš časově náročné.

V praxi je v dnešní době nejvíce rozšířená prostorová polární metoda či družicová GNSS metoda. Prostorová polární metoda kombinuje klasickou polární metodu s trigonometrickou nivelací. Dále je, čím dál víc používána metoda radarové interferometrie. V tomto případě se zpracovávají radarové snímky, z nichž se dále určují deformace terénu. Metoda se využívá zvlášť na území, kde není velké množství vegetace, která snižuje odrazivost paprsků zpět k radaru a tím znehodnocuje výsledky měření. Radarová interferometrie je ekonomicky nákladná, proto se používá hlavně při zaměření a zpracování dat velkých území – např. tvorba DMT, sledování těžebních oblastí a monitoring seizmicky aktivních oblastí.

V odlučných částí sesuvu jsou používány negeodetické metody – měření pásmovými konvergometry, dilatometry, inklinometry a extenzometry. U těchto metod jsou měřicí přístroje umísťovány do předem připravených vrtů různých hloubek, tak aby bylo možné kontrolovat co nejvíce smykových ploch. Rozmístění vrtů je dáno předešlým sledováním a výsledky matematického modelování. [5], [2]

V této práci byla použita prostorová polární metoda a družicová GNSS metoda.

2.2.1 Prostorová polární metoda

Základní princip výpočtu a její přesnosti vychází z polární metody a trigonometrické nivelace:

$$x_P = x_S + s_{SP} * \sin z * \cos(\alpha_{SO} + \omega_{OP}), \quad (2.1)$$

$$y_P = y_S + s_{SP} * \sin z * \sin(\alpha_{SO} + \omega_{OP}), \quad (2.2)$$

$$z_P = z_S + v_P + s_{SP} * \cos z - v_C, \quad (2.3)$$

kde s_{SP} je měřená šikmá vzdálenost, z je zenitový úhel, v_P je výška přístroje, v_C je výška cíle, ω_{OP} je měřený vodorovný úhel od orientace ke sledovanému bodu, x_P, y_P, z_P jsou souřadnice pozorovaného bodu, x_S, y_S, z_S jsou souřadnice stanoviště a α_{SO} je směrník ze stanoviště na orientační bod.

Přesnost metody je dána přesností naměřených veličin a podkladu. Ve většině případů měření se přesnost podkladu neuvažuje, protože je považována za bezchybnou. Přesnost měřených veličin, což jsou šikmá délka, vodorovný a zenitový úhel je dána vztahy:

$$\sigma_x^2 = \left[(\sin z * \cos(\alpha_{SO} + \omega_{OP}))^2 * \sigma_s^2 + (s_{SP} * \sin z * \sin(\alpha_{SO} + \omega_{OP}))^2 * \left(\sigma_\omega * \frac{\pi}{200} \right)^2 + \left((s_{SP} * \cos z * \cos(\alpha_{SO} + \omega_{OP}))^2 * \left(\sigma_z * \frac{\pi}{200} \right)^2 \right) \right], \quad (2.4)$$

$$\sigma_Y^2 = \left[(\sin z * \sin(\alpha_{SO} + \omega_{OP}))^2 * \sigma_s^2 + (S_{SP} * \sin z * \cos(\alpha_{SO} + \omega_{OP}))^2 * \left(\sigma_\omega * \frac{\pi}{200} \right)^2 + \left((S_{SP} * \cos z * \sin(\alpha_{SO} + \omega_{OP}))^2 * \left(\sigma_z * \frac{\pi}{200} \right)^2 \right) \right], \quad (2.5)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_s^2 * \cos^2 z + \left(s * \sin z * \sigma_z * \frac{\pi}{200} \right)^2. \quad (2.6)$$

Geodetické přístroje mají apriorní přesnost pro měření úhlů a délek danou výrobcem, který testuje přístroje již při jejich výrobě. Ze zkušenosti, ale je nutné si před měřením ověřit tyto přesnosti vlastním testováním. Přesnost metody dále ovlivňují atmosférické podmínky při měření, otřesy v místě měření, volba cílových značek, či zkušenosti měřiče. [5]

2.2.2 Metoda globálních navigačních satelitních systémů

Metoda GNSS je založena na principu určování vzdáleností družice na oběžné dráze Země k přijímači na povrchu Země. Funkční systémy GNSS jsou na světě dva – americký NAVSTAR-GPS a ruský GLONASS. Ve fázi budování jsou evropský Galileo, čínský Beidou, indický IRNSS a japonský QZSS.

Součástí systému dělíme na kosmický, řídicí, uživatelský a podpůrný segment. Kosmický segment tvoří družice obíhající Zemi na několika oběžných drahách skloněných vůči rovníku o 55° - 65° ve vzdálenosti 19 000 – 24 000 km. Družice je dána přesnou polohou v prostoru (efemeridy).

Řídicí segment tvoří monitorovací a řídicí stanice. Přijímají zde signály z družic, které dále zpracovávají – výpočet drah družic a úprava chodu jejich hodin. Uživatelský segment má za úkol zprostředkovat zařízení koncovým uživatelům. Přesnost zařízení závisí na počtu přijímaných frekvencí (jednofrekvenční nebo dvoufrekvenční), na přijímaném signálu (kódové a fázové) a na korekčních údajích. Dále existují pozemní systémy jako je CZEPOS. Tyto systémy poskytují několik možných typů korekcí a distribuuje tyto korekce přímo koncovému uživateli.

Družicí vysílaný signál se dále využívá pro výpočet absolutní nebo relativní polohy přijímače. Absolutní metoda používá pouze jeden přijímač a přesnost určení polohy v reálném čase je pak 3 až 10 m. Relativní metoda využívá minimálně 2 současně měřící přijímače. Přesnost metody je pak v řádech centimetrů.

Princip určení polohy je založen na měření časového intervalu šíření signálu od satelitu k přijímači. Kódové měření je založeno na principu měření transitního času, kdy je známa rychlost šíření signálu a času za který signál dojde od družice k přijímači. Čas přijímače s družicí, ale není zcela synchronizovaný, a proto jsou určovány jen tzv. pseudovzdálenosti. Neznámé tedy nemáme jen souřadnice X, Y a Z, ale i přesný čas přijímače. Pro zpracování

signálu je tedy nutné mít signál z minimálně čtyř satelitů. Souřadnice přijímače se dále počítají jako vyrovnání prostorového protínání délek.

V geodézii se ale obvykle používají přijímače fázové. Vzdálenost je pak určována pomocí nosných vln a fázového doměrku. Jelikož nelze měřit počet celých vlnových délek (ambiguit) je tato metoda vhodná pouze k relativnímu určení polohy. Pro určení absolutní polohy je nutné mít aspoň dva přijímače z nichž jeden stojí na známém stanovisku a druhý přijímač měří podrobné body.

Relativní metody dále rozdělujeme na statickou, rychlou statickou, stop and go, kinematickou a RTK – Real Time Kinematic metody.

- Statická metoda – přesnost 3–5 mm, přijímače měří několik hodin/dní, korekce signálu až při zpracování.
- Rychlá statická metoda – přesnost 5–10 mm, doba observace 10–30 minut, pouze do vyřešení ambiguit.
- Stop and go – přesnost 10–20 mm, přijímač nepřestává měřit ani při přesunu mezi body, na prvním bodě je observace delší kvůli vyřešení ambiguit.
- Kinematická – přesnost 20–30 mm, měření v krátkých časových intervalech, podobné jako Stop and go.
- RTK – přesnost 25–50 mm, korekce zpracovány v systému referenčních stanic v reálném čase a rovnou zaváděny do přijímače.

V této části bylo čerpáno z [5] a [7].

3 Sesuvné území – Třebenice

Svahové deformace jsou problém, který řeší snad každá země světa. V České republice je jednou z nejvíce zasažených oblastí České středohoří. U města Třebenice se nachází sesuvné území o rozloze přibližně 28 ha, a právě etapové zaměření jedné z jeho částí, bylo předmětem této diplomové práce (Obr. 1).

V této oblasti je dlouhodobě sledována aktivita mělké a středně hluboké svahové deformace v jílovitých horninách. Hlavním důvodem dlouhodobého sledování je umístění železniční tratě a komunikace přímo v sesuvném území.

Místo monitoringu je asi 1,3 km jihozápadním směrem od Třebenic a přibližně 0,5 km od vesnice Dlažkovice na svahu kopce Malá koží horka (329 m n. m.). Pozorované body jsou umístěny v povrchu silnice III/23756 a v okolí železniční tratě č. 113 z Lovosic do Mostu, které tuto oblast protínají. Železniční trať byla donedávna uzavřena právě z důvodu nestability terénu. Od dubna 2018 je ale po rozsáhlé rekonstrukci v provozu o víkendech a svátcích.

Sesuv je tu způsoben především rozdílností usazených jílových hornin, které mají sníženou propustnost. Sklon terénu je od 10° a nadmořská výška je od 240 do 285 m. Sesuvné plochy mají tloušťku od 5 do 12 m. U některých z nich byla již v minulosti provedena sanace a stabilizace hornin. [1],[3]



Obr. 1: Mapa lokality Třebenice (zdroj: <http://geoportal.cuzk.cz>)

3.1 Historie území a předešlé měření

Sesouvání svahu u Třebenic je zaznamenáváno již od roku 1938, kdy se na železniční trati objevily znatelné deformace. Údržba železničního tělesa i komunikace byla v té době realizována dosypáním škváry a svah jako takový nebyl ničím zajištěn. Až v roce 1970 byl vypracován inženýrskogeologický průzkum, který měl být podkladem pro projekt sanace železniční tratě.

Průzkum zahrnoval úsek železničního tělesa v km 6,9 až 7,0, což je úsek okolo železničního přejezdu (landslide A – vyznačen na Obr. 4). Smykové plochy byly určeny v hloubce 9 až 12 m. Během prací, ale došlo k velkému sesuvu, které trať vyřadili z provozu. Hodnoty posunů na nově stabilizovaných pevných a kontrolních bodech byly v řádech decimetrů. Důvodem bylo velké zatížení navážky silničního i železničního tělesa a vytrvalý déšť, který zvýšil hladinu podzemní vody.

Po tomto incidentu byly provedeny výrazné sanační práce, které zahrnovaly odtěžení navážky, odvodnění svahu a vyhloubení vrtů pro snížení hladiny podzemních vod. I po těchto úpravách, ale svah nebyl zajištěný, což se projevilo v roce 1981 (Obr. 2 a 3). V okolí železničního přejezdu bylo po opětovném tachymetrickém zaměření zjištěny posuny objektů až několik metrů v porovnání s rokem 1970. Hlavní příčinou bylo nezpevnění podloží pod komunikací. V novém průzkumu byly zaměřeny všechny části sesuvu a vypracován nový projekt.

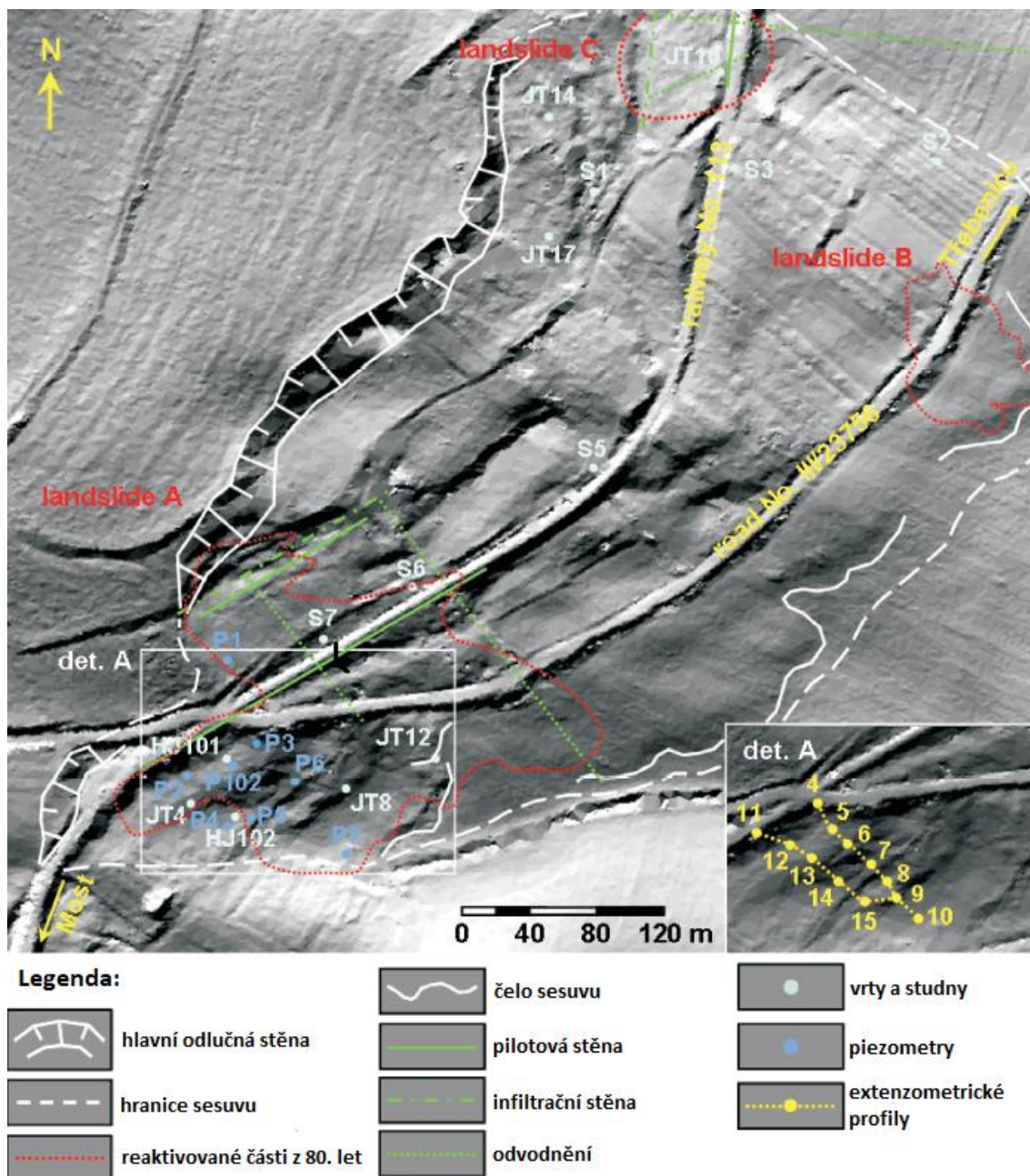


Obr. 2: Přerušování drážního tělesa v úrovni křížení se silnicí (zdroj: Rybář, 1982)



Obr. 3: Deformace na trati (zdroj: Rybář, 1982)

Nová sanace zahrnovala stabilizaci svahu pomocí betonových pilotů, vybudování vsakovací stěny, odvodňovacích kanálů, úpravu terénu pro lepší odvádění povrchové vody a propustků pod železniční tratí (Obr. 4). Betonové piloty jsou v hloubce od 10 do 12 m a zajišťují tak smykové plochy v hloubce od 5 do 6 m. Opomenuty byly starší smykové plochy v hloubce 12 m, které tyto piloty nestabilizují a vybudování trigonometrické sítě pro pravidelnou kontrolu.



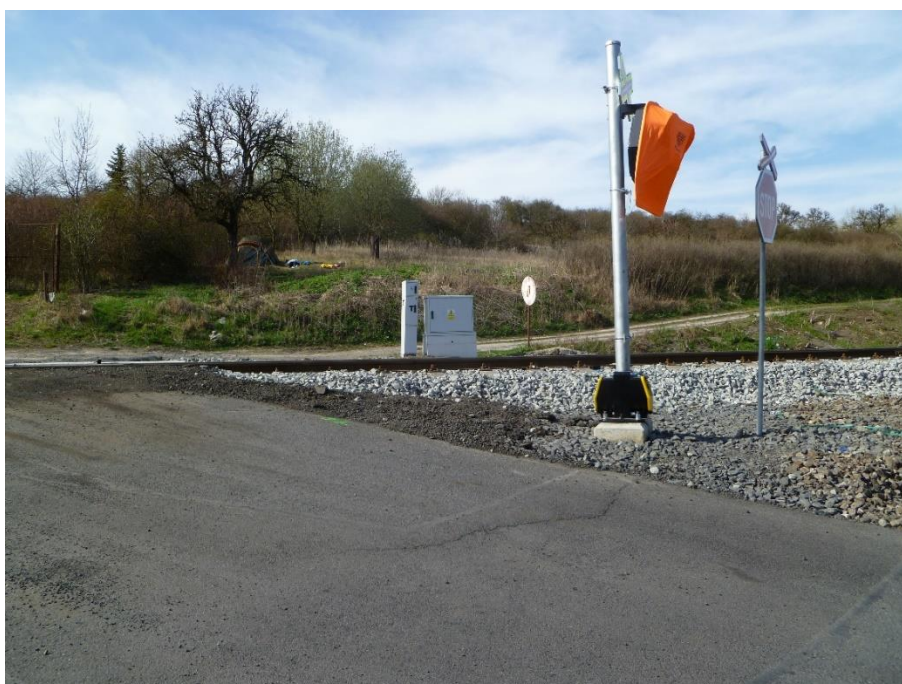
Obr. 4: Opatření proti sesuvu z roku 1982 (zdroj:[1])

V současnosti je v okolí železnice i komunikace prováděno měření na dvou extenzometrických profilech a výsledky jednoznačně ukazují na stálou nestabilitu svahu i když posuny jsou v řádech několika centimetrů za rok. Od roku 2013 jsou prováděny pravidelné etapy trigonometrického měření a následně bylo provedeno i měření železničního svršku pomocí přesné nivelace. Tyto měření jen potvrdili neustálý pohyb sesuvu (Obr. 5 a 6). Největší zjištěný posun měl hodnotu 3 cm (Obr. 5 a 6).

V této kapitole bylo čerpáno z [1] a [3].



Obr. 5: Trhlina na vozovce (2018)



Obr. 6: Trhlina u železničního přejezdu (2018)

4 Sledované body

Monitorovací síť tvoří body stabilizované nástřelnými hřebíky v povrchu komunikace a na propustcích okolo železnice. Pozorovaných podrobných bodů bylo 27 (Obr. 7). V současné době jich je 21, protože v rámci rekonstrukce železnice byly některé body zničeny. Další dva body 5001 a 5002 jsou brány jako fixní, ale pouze v rámci každé etapy. Tyto body jsou určovány metodou GNSS v rámci sítě GEONAS. Zbývající body jsou určovány pouze prostorovou polární metodou. V příloze č. 1 jsou k nahlédnutí místopisy všech existujících bodů.



Obr. 7: Schéma zaměřovaných bodů

4.1 GEONAS

Síť GEONAS (Geodynamical Network of the Academy of Science of the CR) neboli Geodynamická síť GNSS v České republice je součástí infrastruktury CzechGeo.

CzechGeo je souhrnný název pro systém geofyzikálních pozorování provozovaných konsorciem vědeckých ústavů ČR, který je zapojený do celosvětové výměny dat v rámci evropského projektu EPOS (European Plate Observing System), ve které sdílí data s dalšími 17 zeměmi.

Tento systém tvoří stálé observatoře a sítě, které měří seismické, magnetické, gravimetrické, geodynamické a GNSS údaje. Stálé observatoře jsou doplněny stanicemi, které jsou umístěny v zájmových lokalitách a mobilními stanicemi pro opakovaná pozorování a polní experimenty v rámci konkrétních projektů.

Do souboru CzechGeo jsou zapojené tři GNSS sítě. První je již zmiňovaná GEONAS, jejíž provoz má na starost Ústav struktury a mechaniky hornin Akademie věd České republiky. Druhá je PPGNet (Síť permanentních stanic GNSS v Řecku), kterou spravuje Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, dále Geodetická observatoř Pecný a Karlova univerzita, speciálně Fakulta matematicko-fyzikální s katedrou geofyziky v úzké spolupráci se Seismologickou laboratoří Univerzity v Patrasu. Třetí síť je VESOG (Výzkumná a experimentální síť pro observace s GNSS v České republice), která spadá pod správu Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického a Geodetické observatoře Pecný.

Síť GEONAS spadala do kompetence oddělení geodynamiky na Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd ČR. V roce 2012 došlo k jejímu sloučení s oddělením inženýrské geologie.

Oddělení inženýrské geologie se věnuje geologickým a geomorfologickým jevům, jejich kontrolnímu sledování a vyhodnocováním nebezpečnosti těchto jevů. Jedná se hlavně o sledování svahových nestabilit, ale i o určování posunů tektonických desek.

Právě k měření posunů na tektonických zlomech se využívá i síť permanentních stanic GEONAS. Toto sledování je rozděleno na tři hlavní části, a to na oblast Českého masívu, Západních Karpat a Dinárských hor. Dále sem spadají lokální části, které se nachází v jihozápadním Bulharsku, Hornorýnském příkopu v Německu, ve střední a jižní Itálii, v jižním Řecku, v pohoří Ťan-Šan v Kyrgyzstánu či v Hornsundu na Svalbardu (Špicberky).

V této kapitole bylo čerpáno z [9] a [10].

5 Rozbor přesnosti před měřením

Základem každého geodetického měření jsou dané přesnosti, které udávají výslednou přesnost odevzdávaných výsledků. Tyto přesnosti mohou být dány normami nebo smluvně. V rozboru před měřením je důležité zvolit vhodnou měřickou metodu, přístroje a pomůcky. U jednoduchých úloh, kde není nutné použít vyrovnání, lze po zjednodušení výpočetních vztahů určit směrodatné odchylky a počet opakování měření jedné veličiny pomocí zákona hromadění směrodatných odchylek. U komplikovanějších úloh s vyrovnáním (nejčastější je použití metody nejmenších čtverců – MNČ) se vytváří složité modely. K tomu byl vytvořen program PrecisPlanner 3D.

Z přibližných souřadnic bodů se navrhne kombinace měřených veličin a jejich přesnosti. Program pak sám vypočítá přesnosti výsledných souřadnic včetně kovarianční matice, ze které je možné dále vypočítat přesnosti odvozených veličin. Program PrecisPlanner lze spustit v operačním systému Microsoft Windows XP a vyšším a jeho demo verze je volně stažitelná. Pro rozbor v této práci, ale musela být použita úplná verze. Autorem programu je prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D. z katedry speciální geodézie, Fakulty stavební ČVUT v Praze. V kapitole bylo čerpáno z [6] a [16].

5.1 Model vyrovnání geodetické sítě

Obecný model vyrovnání lze popsat pomocí normálních rovnic a je platný pro všechny úlohy s vyrovnáním i bez vyrovnání.

$$\begin{pmatrix} A^T P A & B \\ B^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A^T P l' \\ b \end{pmatrix} = 0, \quad (4.1)$$

kde A je matice plánu experimentu (matice derivací),

P je matice vah,

l' je vektor redukovaných měření,

B je matice linearizovaných podmínek,

b je vektor absolutních členů podmínek,

dx je vektor přírůstků neznámých oproti přibližným hodnotám,

k je vektor korelát.

Vyrovnané neznámé se určí pomocí vztahu:

$$X = x_0 + dx, \quad (4.2)$$

kde x_0 jsou přibližné hodnoty neznámých. Váhy pro nezávislá měření volíme jako

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}, \quad (4.3)$$

kde σ_0 je volená konstanta a σ_i je směrodatná odchylka i -tého měření.

Matice vah P má pro n měření tvar:

$$P = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 \\ 0 & 0 & p_n \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

Jednotlivé prvky matice A mají pro i -té měření l_i j -tou neznámou X_j , což odpovídá sloupcům a řádkům. Jednotlivé prvky pak mají tvar:

$$A_{i,j} = \frac{\partial f_i}{\partial X_j}, \quad (4.5)$$

kde f_i je funkce vyjadřující vztah mezi měřením l_i a určenými souřadnicemi. Matice A je pak pro vyrovnaní vyčíslena pomocí přibližných hodnot neznámých x_0 . Jednotlivé prvky vektoru l' mají tvar:

$$l'_i = (l_i - f_i). \quad (4.6)$$

Jak již bylo řečeno kovarianční matice M popisuje přesnost výsledků vyrovnaní. To je dáno vzorcem:

$$M = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} A^T P A & B \\ B^T & 0 \end{pmatrix}^{-1}. \quad (4.7)$$

Jak je vidět ze vzorce kovarianční matice, není nutné znát konkrétní hodnoty měření, ale pouze přibližné souřadnice bodů, volbu měřených veličin a jejich přesnost.

Model vyrovnaní sítě může být počítána jako volná síť s možností nastavení fixních bodů. Vzorce byly převzaty z [6].

5.2 Příprava souřadnic a měření

Pomocí přibližných souřadnic dvou vztažných bodů pro měření metodou GNSS a podrobných bodů byla vytvořena místní souřadnicová síť s počátkem v bodě 5001. Přibližné souřadnice byly získány z předchozího měření Ing. Jana Veliška. Budoucí stanoviště byly voleny mezi podrobnými body tak, aby bylo možné simulovat měření podrobných bodů alespoň ze dvou stanovisek. Textový soubor se souřadnicemi má formát, jehož ukázka je na obrázcích 6, 7 a 8. Jednotlivé sloupce zleva znamenají – číslo bodu, souřadnice X, Y, Z, směrodatná odchylka centrace, směrodatná odchylka určení výšky cíle

a označení bodu jako volného „a“ nebo fixního „f“. Dále byly vloženy dva pseudobody 5001.1 a 5002.1 se stejnými souřadnicemi jako u bodů 5001 a 5002, ale tyto body byly označeny jako fixní. Přesnost určení centrace a výšky těchto dvou bodů bylo řešeno přes zadání měření provázení a převýšení, které se ale zadávalo až v souboru měření (viz. další odstavec). To bylo provedeno z důvodu určení souřadnic metodou GNSS, kdy přesnost určení těchto bodů je dlouhodobě určována z vyrovnání v síti GEONAS, a to polohově okolo 1,5 mm a výškově 4 mm.

```
5001.0 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 a
5001.1 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 f
5002.0 -267.08300 -288.03100 -9.46800 0.00000 0.00000 a
5002.1 -267.08300 -288.03100 -9.46800 0.00000 0.00000 f
```

Obr. 8: Vstup souřadnic GNSS

```
4004.0 -110.49020 -181.27400 -3.98820 0.00050 0.00050 a
4005.0 -132.38330 -209.52830 -4.64680 0.00050 0.00050 a
4006.0 -189.62670 -255.97960 -5.37570 0.00050 0.00050 a
4007.0 -263.41400 -282.05410 -6.87120 0.00050 0.00050 a
```

Obr. 9: Vstup souřadnic stanovisek

```
5.0 13.97260 -24.58980 -4.22670 0.00100 0.00100 a
6.0 12.89560 -11.82370 -2.39320 0.00100 0.00100 a
7.0 18.94830 -15.76880 -3.23400 0.00100 0.00100 a
8.0 19.25360 -22.00320 -3.96140 0.00100 0.00100 a
```

Obr. 10: Vstup souřadnic podrobných bodů

Druhý textový soubor, který byl nutný k výpočtu přesnosti, obsahoval měřené veličiny a jejich přesnosti. Přesnosti byly dány výběrem totální stanice Trimble S6, která byla k dispozici od vedoucího práce. Tato totální stanice má nominální parametry 0,3 mgon pro úhlovou přesnost a pro délkovou přesnost 1 mm + 1 ppm. Ze zkušenosti víme, že přesnosti udávané výrobcí jsou obvykle lepší, než tomu ve skutečnosti bývá, a navíc zejména přesnost směrů je uvažována na relativně dlouhé záměry. Proto byly do vstupního souboru měření doplněny hodnoty pro úhlové měření 0,5 mgon a pro délky 1 mm (Obr. 11). [8]

```
zu 4015.00 3.00 0.00050
di 4015.00 3.00 0.00050
sd 4015.00 3.00 0.00100
zu 4015.00 4.00 0.00050
di 4015.00 4.00 0.00050
sd 4015.00 4.00 0.00100
```

Obr. 11: Vstup měření

Hodnoty v textovém souboru znamenají (zleva) – zkratka typu měření, číslo stanoviska, číslo podrobného bodu nebo orientace a zvolená přesnost měřené veličiny. Zkratky typu měření jsou pro vodorovný úhel „di“ (direction), pro zenitový úhel „zu“ (zenitový úhel)

a pro šikmou délku „sd“ (slope distance). Na bodech 5001 a 5002 jako stanoviscích byly vytvořeny opět dva pseudobody 5001.1 a 5002.1, ke kterým byly přiřazeny přesnosti centrace a přesnost měření výšky GNSS stanice (Obr. 12). V programu PrecisPlanner tyto přesnosti vyjadřují provázení (přesnost centrace) a přesnost převýšení (přesnost určení výšky cíle). Tyto přesnosti byly vypočteny pomocí vzorců:

$$- \text{ provázení: } S_c = \sqrt{\sigma_{XY}^2 + \sigma_{c-GNSS}^2 + \sigma_{c-hran}^2} = 1,6 \text{ mm}, \quad (4.8)$$

kde $\sigma_{XY} = 1,5 \text{ mm}$ – polohová přesnost určení bodu ze sítě GEONAS při statické metodě,

$\sigma_{c-GNSS} = 0,5 \text{ mm}$ – přesnost centrace GNSS stanice při určování fixního bodu,

$\sigma_{c-hran} = 0,5 \text{ mm}$ – přesnost umístění hranolu na bodě při měření polygonu,

$$- \text{ převýšení: } S_v = \sqrt{\sigma_Z^2 + \sigma_{v-GNSS}^2 + \sigma_{v-hran}^2} = 4,1 \text{ mm}, \quad (4.9)$$

kde $\sigma_Z = 4,0 \text{ mm}$ – výšková přesnost určení bodu pomocí GNSS ze sítě GEONAS

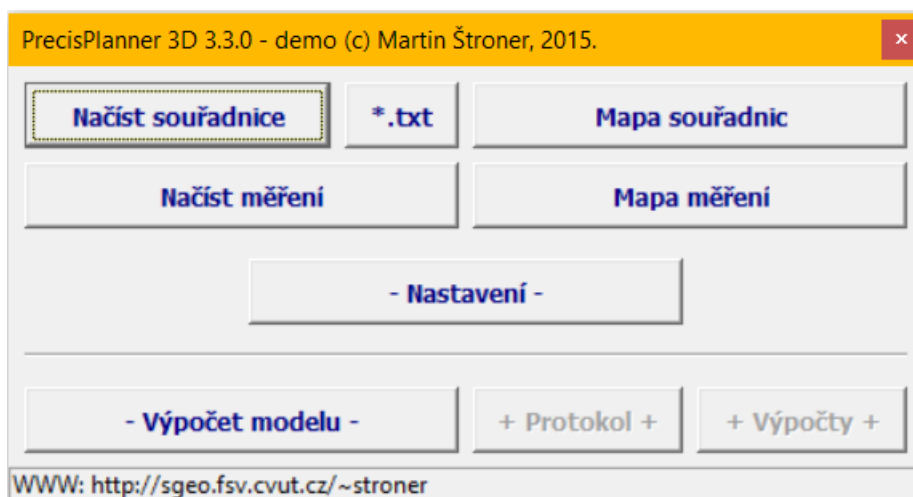
při statické metodě,

$\sigma_{v-GNSS} = 0,5 \text{ mm}$ – přesnost určení výšky GNSS stanice při určování fixního bodu,

$\sigma_{c-hran} = 0,5 \text{ mm}$ – přesnost výšky hranolu na bodě při měření polygonu.

```
pr 5001.00 5001.10 0.00160
vd 5001.00 5001.10 0.00410
pr 5002.00 5002.10 0.00160
vd 5002.00 5002.10 0.00410
```

Obr. 12: Ukázka zadání přesnosti provázení a převýšení



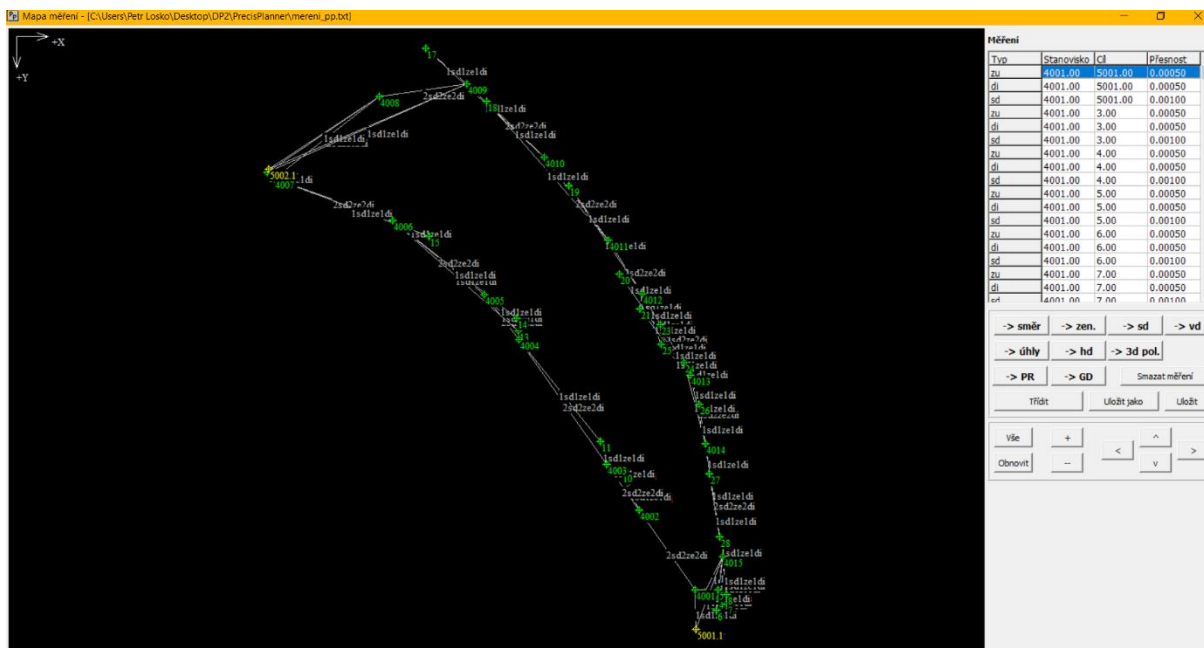
Obr. 13: Hlavní okno programu PrecisPlanner

Hotové textové soubory byly nahrány do programu PreciPlanner přes tlačítka „Načíst souřadnice“ a „Mapa měření“ (Obr. 13). Po použití funkce „Výpočet modelu“ se zpřístupnila funkce „+Protokol+“. Tento protokol obsahuje informace o konfiguraci sítě, vyrovnaných souřadnicích, jejich směrodatných odchylkách a parametrech elips chyb. V dalším kroku výpočtu byla použita funkce „+Výpočty+“ v hlavním okně programu. Tato funkce zobrazila výsledky obsahující čísla bodů, souřadnice a směrodatné odchylky z vytvořeného modelu. V této tabulce je možné vypočítat vodorovnou, šikmou a svislou délku a jejich přesnost určenou výpočtem z kovarianční matice pomocí obecného zákona hromadění směrodatných odchylek. Dále je tu možnost uložení kovarianční matice v textovém souboru k dalším výpočtům.

Program umožňuje i úpravu načtených souřadnic případně přidávání dalších bodů ve funkci „Mapa souřadnic“ (Obr. 14). Soubor měření je možné vytvořit přímo v programu pod funkcí „Mapa měření“ (Obr. 15).



Obr. 14: Ukázka okna „Mapa souřadnic“



Obr. 15: Ukázka okna „Mapa měření“

5.3 Výsledek rozboru přesnosti před měřením

Cílem práce bylo zaznamenat polohové a výškové změny okolo 1 cm. Z výsledných směrodatných odchylek je vidět, že zadaná přesnost měřených veličin je vyhovující, takže zapůjčená totální stanice Trimble S6 splňuje požadavky na měření daných veličin. Jelikož byl domluven větší časový úsek na měření v terénu, bylo nakonec rozhodnuto, že i když by stačilo měřit vše pouze v jedné skupině, budou se na stanovištích měřit vždy dvě skupiny na body orientační a v jedné skupině na body podrobné.

Tabulka 1: Směrodatné odchytky podrobných bodů a stanovisek

| Číslo bodu | s(x)/mm | s(y)/mm | s(z)/mm |
|------------|---------|---------|---------|
| 3 | 1,7 | 1,9 | 3,1 |
| 4 | 1,7 | 1,9 | 3,1 |
| 5 | 1,7 | 1,9 | 3,1 |
| 6 | 1,7 | 1,9 | 3,1 |
| 7 | 1,7 | 1,9 | 3,1 |
| 8 | 1,7 | 1,9 | 3,1 |
| 9 | 2,4 | 2,3 | 3,1 |
| 10 | 2,4 | 2,3 | 3,1 |
| 11 | 2,3 | 2,4 | 3,1 |
| 13 | 2,5 | 2,5 | 3,1 |
| 14 | 2,4 | 2,5 | 3,1 |
| 15 | 2,0 | 1,9 | 3,1 |
| 16 | 1,8 | 1,8 | 3,1 |
| 17 | 2,2 | 1,9 | 3,1 |
| 18 | 2,2 | 2,1 | 3,1 |
| 19 | 2,3 | 2,2 | 3,1 |
| 20 | 2,4 | 2,2 | 3,1 |
| 21 | 2,3 | 2,2 | 3,1 |
| 23 | 2,3 | 2,2 | 3,1 |
| 24 | 2,4 | 2,1 | 3,1 |
| 25 | 2,3 | 2,2 | 3,1 |
| 26 | 2,3 | 2,1 | 3,1 |
| 27 | 2,1 | 2,0 | 3,1 |
| 28 | 1,9 | 2,0 | 3,1 |

| Číslo bodu | s(x)/mm | s(y)/mm | s(z)/mm |
|------------|---------|---------|---------|
| 4001 | 1,5 | 1,7 | 3,0 |
| 4002 | 2,0 | 2,0 | 3,0 |
| 4003 | 2,2 | 2,1 | 3,0 |
| 4004 | 2,2 | 2,2 | 3,0 |
| 4005 | 2,1 | 2,1 | 3,0 |
| 4006 | 1,8 | 1,6 | 3,0 |
| 4007 | 1,6 | 1,6 | 3,0 |
| 4008 | 1,8 | 1,5 | 3,0 |
| 4009 | 1,9 | 1,7 | 3,0 |
| 4010 | 1,8 | 2,0 | 3,0 |
| 4011 | 2,0 | 2,1 | 3,0 |
| 4012 | 2,1 | 2,0 | 3,0 |
| 4013 | 2,2 | 1,9 | 3,0 |
| 4014 | 2,0 | 1,8 | 3,0 |
| 4015 | 1,5 | 1,7 | 3,0 |
| 5001 | 1,5 | 1,5 | 3,0 |
| 5002 | 1,5 | 1,5 | 3,0 |

6 Přístroje a pomůcky

V následující kapitole budou představeny přístroje a pomůcky použité v terénu.

6.1 Přístroje GNSS

Přístroje na měření GNSS observací na bodech 5001 a 5002 byly zapůjčeny z Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie Věd ČR panem Ing. Janem Balkem. GNSS sestava se skládala z externí baterie, stativu, trojnožky, antény a přijímače. Na bodě 5001 byla anténa typu Ashtech (výrobní číslo – ASH700718B 5087) a přijímač Ashtech Z-MAX. Na bodě 5002 byla anténa typu Magellan (výrobní číslo – MAG105645 339020) a přijímač Ashtech Z-MAX. Přesnost GNSS sestav při statických měřeních lze uvažovat 1,5 mm v horizontální složce a 4 mm ve vertikální složce. Tyto přesnosti jsou vypočtené z dlouhodobých vyrovnání v síti GEONAS, kde byly tyto přijímače používány. Po centraci a horizontaci antény byla vždy změřena výška antény nad pozorovaným bodem svinovacím metrem.



Obr. 16: GNSS přijímače na stanoviskách (zleva 5001, 5002)

6.2 Totální stanice Trimble S6

K zaměření sítě byla zvolena totální stanice Trimble S6 – High Precision (výrobní číslo: 92120086), kterou vlastní Katedra speciální geodézie. Totální stanice má úhlovou přesnost 1" (0,3 mgon) a délkovou přesnost na hranol 1 mm + 1ppm. Totální stanice je uživatelsky velmi přívětivá. Má jednoduché ovládání a při měření tohoto typu bylo výhodou použít

některé její funkce – např. automatické prokládání dalekohledu do druhé polohy, či možnost nastavení měření ve více skupinách. [8]



Obr. 17: Totální stanice Trimble S6

6.3 Další pomůcky

K měření byly použity dva hranoly Trimble s konstantou -35 mm a minihranol Leica s konstantou $+17,5$ mm (pro měření přístroji od firmy Leica). Při měření na minihranol Leica byla do přístroje zadávána konstanta $-16,9$ mm.



Obr. 18: Hranol Trimble a minihranol Leica

Minihranol Leica byl použit pro měření na podrobné body sítě a orientace na body 5001 a 5002. Hranoly Trimble byly použity k signalizaci a měření trojpodstavcové soustavy na bodech polygonu. Dále byly využity tři stativy značky Leica.

K měření teploty byl použit rtuťový teploměr a tlak byl změřen pomocí tlakoměru Greisinger GTD1100.



Obr. 19: Rtuťový teploměr a tlakoměr Greisinger GTD1100

7 Měření v terénu

V této kapitole budou popsány pracovní postupy měření v terénu. Ve všech etapách měření byla použita statická metoda na dvou stabilizovaných bodech. Observace v obou etapách probíhala minimálně 24 hodin. Data jsou zpřístupňována pro jednotlivé dny vždy od 0:00 UTC na následujících 24 hodin. V ČR to znamená od 1:00 hodin do 1:00 hodin v listopadu a od 2:00 hodin do 2:00 hodin v dubnu (letní čas).

7.1 Nultá a první etapa

Měření nulté a první etapy bylo převzato z diplomové práce Ing. Jana Velíška. Tyto měření byly vykonány ve dnech 22.2.2017 a 12.4.2017.

7.2 Druhá etapa

Měření druhé etapy proběhlo 3.11.2017 s příjezdem na místo již 2.11.2017 a odjezdem 4.11.2017. V den příjezdu byly nainstalovány GNSS přijímače na body 5001 a 5002 a přibližně ve 23.00 hodin byly tyto přijímače zapnuty. Přijímače byly následně průběžně kontrolovány, zda ukládají data. Dále byla provedena rekognoskace podrobných bodů. Nalezeny byly všechny body sítě, kromě již neexistujícího bodu 1, 2 a 22 (Obr. 7). Ty byly zničeny v době po zaměření nulté etapy.

Dne 3.11.2017 byly zaměřeny podrobné body sítě okolo železniční trati Čížkovice – Obrnice a na komunikaci třetí třídy číslo III/23756 z Třebenic do Dlažkovic. Měření bylo provedeno pomocí trojpodstavcové soustavy a malého hranolu, který byl používán k zaměření podrobných bodů. Dne 3.11.2017 bylo oblačno beze srážek, teplota 10 °C a tlak 994 hPa. Tyto údaje byly nastaveny do totální stanice k přímému výpočtu fyzikálních redukcí délek. Polygonový pořad byl veden jako uzavřený z bodu 5001, přes bod 5002 a zpět na bod 5001. Osnovy směrů byly měřeny ve dvou skupinách na všech stanoviskách. Podrobné body byly měřeny pouze ve dvou polohách dalekohledu, ale pokud to situace dovolila, byly měřeny alespoň ze dvou stanovisek.

Ráno 4.11.2017 v 5.00 hodin byla ukončena observace GNSS přístrojů na bodech 5001 a 5002.

7.3 Třetí etapa

Měření třetí etapy proběhlo dne 13.4.2018 s příjezdem na místo již 12.4.2018 a odjezdem 14.4.2018. V den příjezdu byly nainstalovány GNSS přijímače na body 5001 a 5002 a přibližně ve 23.00 hodin byly tyto přijímače zapnuty. Přijímače byly následně průběžně kontrolovány, zda ukládají data. Dále byla provedena rekognoskace podrobných bodů. Při rekognoskaci bylo zjištěno, že při rekonstrukci železničního svršku byly zničeny body 13, 15 a 16 (Obr. 7). Body nebyly obnovovány a do následného měření nebyly začleněny.

Dne 13.4.2018 bylo provedeno zaměření podrobných bodů sítě okolo železniční trati a na komunikaci. Měření bylo opět provedeno pomocí trojpodstavcové soustavy a malého hranolu, který byl používán k zaměření podrobných bodů. Dne 13.4.2018 vál čerstvý nárazový vítr a bylo oblačno s přeháňkami, teplota 15 °C a tlak 1003 hPa. Tyto údaje byly nastaveny do totální stanice k přímému výpočtu fyzikálních redukci délek. Po ukončení měření byly vyhotoveny místopisy existujících bodů, které jsou součástí příloh.

Ráno 14.4.2018 v 6.00 hodin byla ukončena observace GNSS přístrojů na bodech 5001 a 5002.

8 Zpracování naměřených dat

V následující kapitole je popsán výpočet transformace a vyrovnání naměřených dat tak, aby bylo možné provést porovnání výsledných souřadnic. V první podkapitole je popsán postup transformace souřadnic bodů 5001 a 5002 mezi systémy ITRF-2000 a JTSK. V druhé je popsán postup vyrovnání v programu EasyNet. V kapitole bylo čerpáno z [11], [13] a [15].

8.1 Zpracování GNSS

Jak již bylo řečeno na bodech 5001 a 5002 proběhlo měření statickou GNSS metodou. Tyto body byly v rámci vyrovnání každé etapy považovány za fixní. Nelze o nich ale říci, že by byly stabilní. Jelikož jsou body umístěny v nestabilní oblasti sesuvu, existoval předpoklad, že i u nich se posuny projeví. Proto bylo měření GNSS provedeno v obou etapách a výsledné souřadnice budou také porovnány, zda nevykazují posun. Postup transformace byl v obou etapách shodný.

8.1.1 Výpočet souřadnic v ITRF-2000

Do tohoto výpočtu vstupují tři typy dat. Prvním souborem jsou data naměřené na místě sesuvu u Třebenic a data ostatních stanic GEONAS ve formátu RINEX s parametry přijímačů a antén. Druhým souborem jsou data ze sítě EUREF (Evropský referenční rámec), což je instituce pro správu evropských referenčních systémů také ve formátu RINEX. Poslední soubor se skládá z dat centra CODE (European Centre for Orbit Determination = Evropské centrum pro stanovení oběžné dráhy Země). V rámci těchto dat jsou záznamy o ephemeridách, parametrech orientace Země, opravy hodin satelitů, diferenciální odchylky kódů satelitů a přijímačů a údaje o stavu ionosféry a slapových jevech.

Souřadnice byly vypočteny v programu GPS Bernese v. 5.0. Všechna pozorování měla stejná nastavení a shodný formát vstupujících dat, a to:

- souřadnicový systém ITRF2000,
- úhel odklonu výšky 10° ,
- Quasi-Ionosphere-Free strategy (QIF) o rozlišení fázové nejednoznačnosti,
- tektonický plochý model založený na nulovém stavu rotace NNR-NUVEL1A,
- model atmosféry DRY NIELL pro odhad troposférické korekce,
- soubor výchozího zpracování fázového pozorování ostatních stanic připojených při pozorování,

- trvalé stanice EUREF používané jako reference: BOR1, DRES, GOPE, GRAZ, PENC, POTS, WROC, WTZR.

Síť je řešena jako volná. Vyrovnání bylo vypočteno v programu ADDNEQ2. Následně se síť přetransformovala Helmertovou transformací zpět na souřadnice opěrných stanic.

Výsledkem výpočtu byly souřadnice bodů 5001 a 5002 v souřadnicovém systému ITRF2000. Tento výpočet byl proveden Ing. Balkem.

8.1.2 Převod souřadnic z ITRF2000 do S-JTSK

V tomto kroku bylo nutné využít dva samostatné výpočty. První je transformace z ITRF2000 do ETRF89 a druhá z ETRF89 do S-JTSK. Oba převody jsou značně komplikované, proto byly vypočteny pomocí již hotových aplikací. Převod do ETRF89 byl proveden pomocí aplikace na internetových stránkách EUREF (Obr. 20).

V aplikaci byl nastaven vstupní a výstupní souřadnicový systém a epocha měření. Následně byly doplněny souřadnice bodů v ITRF2000 a spuštěna transformace. Výsledkem je textový soubor s již převedenými souřadnicemi. [11]

The screenshot shows the 'ETRF/ITRF Transformation' web application. The page title is 'ETRF/ITRF Transformation'. Below the title, there is a brief description: 'The following tool allows to transform coordinates (position and velocity) from any ETRFxx to any ITRFyy (or ITRFyy to ETRFxx). In case input and output coordinates are requested at different epochs, then station velocities are mandatory.' There is a link to a 'tutorial'. The interface is divided into sections: 'Input', 'Output', and 'Options'. In the 'Input' section, 'Frame' is set to 'ETRF89' and 'Epoch' is set to '2000'. A text area contains example input data: '# Lines starting by # are treated as comments', '# Fields (in decimal format) should be separated by at least one space', '# --> Example without velocity - StationName(no space character) X[m] Y[m] Z[m] : StationName 4027894.006 307045.600 4919474.910', and '# --> Example with velocity - StationName(no space character) X[m] Y[m] Z[m] VX[m/yr] VY[m/yr] VZ[m/yr] : StationName 4027894.006 307045.600 4919474.910 0.01 0.2 0.03'. The 'Output' section has 'Frame' set to 'ETRF89' and 'Epoch' set to '2000'. The 'Options' section has a checkbox for 'show intermediate steps' and a dropdown for 'Change epoch format: Decimal Year: YYYY.DDD'. A 'Transform' button is located at the bottom of the 'Options' section.

Obr. 20: Aplikace EUREF

Druhou možností je výpočet pomocí zjednodušených transformačních rovnic. Jelikož na území ČR je pouze jeden bod určený v rámci referenčního rámce těchto souřadnicových systémů, a to GOPE (Geodetická observatoř Pecný), může být transformace

vypočtena pouze pomocí posunutí. Transformaci souřadnic v ITRF2000 do ETRF89 na území ČR lze tedy zapsat jako:

$$\begin{aligned} X_{ETRF89}(1989) &= X_{ITRF2000}(T) + 0,174 + 0,01695(T - 1997,0), \\ Y_{ETRF89}(1989) &= Y_{ITRF2000}(T) - 0,088 - 0,0170(T - 1997,0), \\ Z_{ETRF89}(1989) &= Z_{ITRF2000}(T) - 0,132 - 0,0083(T - 1997,0), \end{aligned} \quad (8.1)$$

kde X, Y, Z jsou souřadnice v metrech, hodnoty časových změn jsou v metrech/rok a T je epocha v letech. [12]

Druhá polovina převodu byla provedena v aplikaci EasyTransform (autor Ing. Pavel Trásák, Ph.D.). Tato aplikace nabízí několik typů převodu mezi různými systémy a je volně ke stažení. V hlavním oknu aplikace (Obr. 21) se nastavují vstupní a výstupní parametry (souřadnicový systém a formát souřadnic), dále se volí metoda transformace a načte se předem vytvořený textový soubor s původními souřadnicemi bodů. Po provedení výpočtu se vytvoří přehledná tabulka se všemi výsledky. [13]



Obr. 21: Hlavní okno programu Easy Transform 2.3

Program používá k výpočtu sedmi prvkovou Helmertovu transformaci. Jedná se o lineární konformní podobnostní transformaci s vyrovnáním koeficientů podle metody nejmenších čtverců. Vztah, který vyjadřuje transformaci mezi systémy je:

$$r' = r_0 + q * R * r = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} + q * \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_{ETRS89} \\ y_{ETRS89} \\ z_{ETRS89} \end{bmatrix}, \quad (8.2)$$

$$q = 1 + m, \quad (8.3)$$

kde r_0 je translační vektor určující posun počátku souřadnicové soustavy,

q je změna měřítka,

R je matice rotace,

r je vektor souřadnic bodů v systému ETRS89.

Známy musí být souřadnice v ETRS89 (ETRF89) a sedm parametrů transformace. Parametry tohoto transformačního klíče jsou převzaty z oficiálních webových stránek ČUZK (Tabulka 2). [14]

Tabulka 2: Hodnoty transformačního klíče z ČUZK

| Hodnoty | m [10^{-6} m] | x_0 [m] | y_0 [m] | z_0 [m] | ω_x ['] | ω_y ['] | ω_z ['] |
|---------|------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|
| | -3,5393 | -572,203 | -85,328 | -461934 | 5,248327 | 1,529001 | 4,973117 |

Výsledné souřadnice jsou uvedeny v Tabulka 3 a Tabulka 4, seřazené podle posloupnosti, v níž byly vypočítány.

Tabulka 3: Souřadnice bodu 5001

| 2. etapa - bod 5001 | | | |
|---------------------|--------------|-------------|--------------|
| Souřadnicový systém | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| ITRF2000 | 3947541,4658 | 982539,4855 | 4896384,2498 |
| ETRF89 | 3947542,0055 | 982539,0620 | 4896383,8648 |
| S-JTSK | 996603,1752 | 768269,1957 | 267,7380 |
| 3. etapa - bod 5001 | | | |
| Souřadnicový systém | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| ITRF2000 | 3947541,4787 | 982539,5211 | 4896384,2710 |
| ETRF89 | 3947542,0259 | 982539,0903 | 4896383,8808 |
| S-JTSK | 996603,1887 | 768269,1748 | 267,7673 |

Tabulka 4: Souřadnice bodu 5002

| 2. etapa - bod 5002 | | | |
|---------------------|--------------|-------------|--------------|
| Souřadnicový systém | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| ITRF2000 | 3947247,3841 | 982720,9941 | 4896571,2816 |
| ETRF89 | 3947247,9239 | 982720,5706 | 4896570,8966 |
| S-JTSK | 996336,1192 | 767981,1583 | 258,2753 |
| 3. etapa - bod 5002 | | | |
| Souřadnicový systém | X [m] | Y [m] | Z [m] |
| ITRF2000 | 3947247,3664 | 982721,0128 | 4896571,3006 |
| ETRF89 | 3947247,9136 | 982720,5820 | 4896570,9104 |
| S-JTSK | 996336,1069 | 767981,1429 | 258,2813 |

8.2 Zpracování měření – EasyNet

Program EasyNet byl vytvořen na fakultě stavební panem Ing. Pavlem Třasákem, Ph.D. Program je ke stažení v demo verzi, která umožňuje vyrovnaní sítě o 7 bodech a 200 záznamů měření. Program je podporován na všech operačních systémech Windows od verze XP a vyšší. Pro zpracování měření v této práci bylo nutné použít kompletní verzi programu, která je nainstalována na fakultním počítači.

Tento program byl zvolen z důvodu lehké a intuitivní obsluhy, ale také z důvodu podávání spolehlivých výsledků. I když výpočet probíhá automaticky je nutné při zadávání přesností měření mít odborné znalosti a zkušenosti s vyrovnáním. Program sám je určen na vyrovnávání geodetických prostorových sítí s možnou volbou typu vyrovnání. Síť je možné vyrovnávat s různým počtem fixních bodů a různé volbě doplňkových měření.

Naměřená data musí mít formát .asc, který je shodný s formátem .mapa2 nebo formát .mtx, což je interní formát programu EasyNet. Data z terénu byly vyexportovány přímo z totální stanice v terénu a mají formát .asc. Další soubor, který se načítá do programu je textový soubor se souřadnicemi a výškami fixních bodů sítě, který byl vytvořen z transformovaných souřadnic z měření GNSS do systému JTSK.

V samotném programu lze nastavit hodnoty kritérií pro vyhledání hrubých chyb v měřených datech pro usnadnění jejich odstranění, vyhledání měřických skupin a kontrolu hodnot měřených v první a druhé poloze dalekohledu i mezi skupinami. Data ovšem nejsou nijak průměrována pouze kontrolována dle nastavených kritérií. Proto do samotného vyrovnání vstupují všechna data samostatně a jejich počet není zmenšován průměrováním skupin nebo dvojic měření.

Dalším krokem k výpočtu vyrovnání je provedení analýzy měření. Ta má za úkol určit hodnoty apriorních směrodatných odchylek hlavních měřených veličin. Analýza přesnosti má dvě možnosti výpočtu, a to určení vnitřní nebo vnější přesnosti sítě. Třetí možností je nastavení přesností samotným uživatelem.

Po nastavení apriorních směrodatných odchylek je možné přikročit k nastavení vyrovnání sítě. Zde lze nastavit hladinu významnosti, se kterou budou vyrovnávané veličiny vylučovány z vyrovnání, metodu robustního vyrovnání, počet iterací a další. V neposlední řadě se nesmí zapomenout nastavit výpočet matematické redukce délek.

Po nastavení všech aspektů vyrovnání je vhodné uložit veškeré nastavení a veličiny do projektu. Program je nastavený tak, že vytvoří soubor s příponou .pen a v něm zůstanou nejen veškeré provedené nastavení, ale i vstupní data všech nahraných měřených veličin i souřadnic bodů.

Následným vyrovnáním sítě je vytvořen linearizovaný model geodetické sítě. Při výpočtu dochází ke dvěma iteračním výpočtům, a to robustní metodě a metodě nejmenších čtverců. Jejich výsledkem je označení odlehlých hodnot, které jsou z vyrovnání vyloučeny. Odlehlé hodnoty jsou určovány pomocí velikosti oprav měření. Pokud se usoudí, že velikost opravy neprokazuje hrubou chybu, může se ručně nastavit benevolentnější směrodatná odchylka a tím pádem nebude měření v dalším provedeném vyrovnání vyloučeno.

Vyrovnané souřadnice bodů jsou zobrazeny v samostatné tabulce. V záložce se základními informacemi o vyrovnání jsou uváděny další údaje o úspěšnosti výpočtu např. počty vyloučených měření či hodnota aposteriorní směrodatné odchylky. Dále je možné vyexportovat protokol o vyrovnání a kresbu sítě i s elipsami chyb na bodech ve vhodném měřítku. Výkres mapy sítě lze uložit ve formátu .jpeg nebo .dxf, který se dá dále upravovat v rýsovacích programech typu CAD. [15]

8.2.1 Vyrovnání 0. a 1. etapy

Souřadnice z měření nulté etapy byly převzaty z diplomové práce Ing. Jana Velíška. Souřadnice bodů jsou k nahlédnutí v tabulkách 5 a 6 i s jejich vypočtenými směrodatnými odchylkami. Fixní body 5001 a 5002 byly považovány za bezchybné. Proto nejsou uvedeny v následujících tabulkách - jejich směrodatné odchylky nulové. [17]

Tabulka 5: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 0. etapy

| Číslo bodu | X [m] | Y [m] | Z [m] | σ_x [mm] | σ_y [mm] | σ_z [mm] |
|------------|-------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 996612,9234 | 768258,3835 | 265,5875 | 0,4 | 0,8 | 0,2 |
| 2 | 996604,0621 | 768245,7853 | 265,3116 | 0,6 | 1,0 | 0,2 |
| 3 | 996608,7092 | 768245,8517 | 264,4849 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 4 | 996617,0318 | 768249,7081 | 264,1564 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 5 | 996617,1742 | 768244,5948 | 263,5206 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 6 | 996616,0976 | 768257,3619 | 265,3536 | 0,4 | 0,7 | 0,1 |
| 7 | 996622,1492 | 768253,4166 | 264,5133 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 8 | 996622,4528 | 768247,1790 | 263,7856 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 9 | 996558,4557 | 768174,0016 | 263,1576 | 1,0 | 1,0 | 0,2 |
| 10 | 996556,5659 | 768171,0866 | 263,0854 | 1,0 | 1,0 | 0,3 |
| 11 | 996543,2186 | 768151,7627 | 262,7107 | 1,1 | 1,1 | 0,3 |
| 12 | 996526,0520 | 768131,3748 | 262,9915 | 1,2 | 1,3 | 0,3 |
| 13 | 996492,1579 | 768082,7296 | 262,0882 | 1,2 | 1,3 | 0,3 |
| 14 | 996491,1273 | 768074,6968 | 260,4966 | 1,3 | 1,2 | 0,3 |
| 15 | 996436,2800 | 768023,4882 | 260,4498 | 1,2 | 1,1 | 0,3 |
| 16 | 996335,0338 | 767983,3305 | 258,7186 | 1,1 | 0,9 | 0,3 |
| 17 | 996434,5518 | 767905,9707 | 244,9326 | 1,5 | 1,2 | 0,4 |
| 18 | 996472,2198 | 767939,0375 | 245,6841 | 1,3 | 1,2 | 0,3 |
| 19 | 996523,4678 | 767991,9414 | 247,0582 | 1,4 | 1,3 | 0,4 |
| 20 | 996555,2805 | 768047,1375 | 248,9682 | 1,3 | 1,3 | 0,3 |
| 21 | 996568,2393 | 768068,7799 | 250,0092 | 1,4 | 1,2 | 0,4 |
| 23 | 996580,7954 | 768078,7840 | 249,7653 | 1,4 | 1,3 | 0,3 |
| 24 | 996595,6021 | 768102,1118 | 250,6874 | 1,3 | 1,2 | 0,3 |
| 25 | 996581,2023 | 768090,6840 | 250,5767 | 1,5 | 1,0 | 0,3 |
| 26 | 996605,0946 | 768128,5790 | 252,5861 | 1,2 | 1,2 | 0,3 |
| 27 | 996611,6278 | 768171,9155 | 256,3329 | 1,1 | 1,2 | 0,3 |
| 28 | 996617,9150 | 768211,5623 | 260,1606 | 0,7 | 1,2 | 0,3 |

Tabulka 6: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 1. etapy

| Číslo bodu | X [m] | Y [m] | Z [m] | σ_x [mm] | σ_y [mm] | σ_z [mm] |
|------------|-------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3 | 996608,7101 | 768245,8620 | 264,4838 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 4 | 996617,0310 | 768249,7187 | 264,1558 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 5 | 996617,1736 | 768244,6042 | 263,5193 | 0,4 | 0,7 | 0,2 |
| 6 | 996616,0966 | 768257,3703 | 265,3528 | 0,4 | 0,8 | 0,3 |
| 7 | 996622,1493 | 768253,4252 | 264,5120 | 0,5 | 0,8 | 0,3 |
| 8 | 996622,4546 | 768247,1908 | 263,7846 | 0,5 | 0,8 | 0,3 |
| 9 | 996558,4559 | 768174,0082 | 263,1571 | 1,1 | 1,2 | 0,4 |
| 10 | 996556,5681 | 768171,1003 | 263,0840 | 1,1 | 1,1 | 0,4 |
| 11 | 996543,2214 | 768151,7771 | 262,7095 | 1,2 | 1,7 | 0,4 |
| 13 | 996492,1552 | 768082,7438 | 262,0884 | 1,3 | 1,7 | 0,5 |
| 14 | 996491,1248 | 768074,7125 | 260,4960 | 1,3 | 1,7 | 0,5 |
| 15 | 996436,2737 | 768023,4985 | 260,4500 | 1,4 | 1,3 | 0,5 |
| 16 | 996335,0324 | 767983,3381 | 258,7189 | 0,9 | 1,0 | 0,5 |
| 17 | 996434,5580 | 767905,9782 | 244,9313 | 1,1 | 1,2 | 0,6 |
| 18 | 996472,2246 | 767939,0496 | 245,6832 | 1,3 | 1,4 | 0,5 |
| 19 | 996523,4680 | 767991,9562 | 247,0583 | 1,4 | 1,5 | 0,5 |
| 20 | 996555,2809 | 768047,1534 | 248,9670 | 1,5 | 1,3 | 0,5 |
| 21 | 996568,2377 | 768068,7920 | 250,0079 | 1,4 | 1,4 | 0,4 |
| 23 | 996580,7935 | 768078,7974 | 249,7646 | 1,5 | 1,4 | 0,5 |
| 24 | 996595,6011 | 768102,1260 | 250,6861 | 1,4 | 1,4 | 0,5 |
| 25 | 996581,2017 | 768090,6991 | 250,5760 | 1,5 | 1,3 | 0,5 |
| 26 | 996605,0934 | 768128,5900 | 252,5878 | 1,3 | 1,3 | 0,4 |
| 27 | 996611,6274 | 768171,9259 | 256,3309 | 1,0 | 1,2 | 0,4 |
| 28 | 996617,9165 | 768211,5738 | 260,1595 | 0,7 | 1,2 | 0,3 |

8.2.2 Vyrovnání 2. etapy

Po spuštění programu byl načten vstupní soubor naměřených veličin ve formátu .asc. Veličiny byly automaticky seřazeny podle jednotlivých stanovisek a příslušných měřických skupin. Seznam souřadnic byl načten z textového souboru. V seznamu souřadnic byly označeny body 5001 a 5002 jako fixní. Aby program zpracoval všechny měřené veličiny byly v záložce „Nastavení-Kontrola“ (Obr. 22) nastaveny hodnoty mezních rozdílů pro vodorovné směry 0,01 gon, zenitové úhly 0,01 gon a šikmé délky 0,05 m. Jelikož měření bylo předem opravené o omyly a hrubé chyby vzniklé při měření v terénu nebylo nutné nahrané měřené veličiny v programu už opravovat.

The screenshot shows a software window titled "Nastavení - Kontrola" with a yellow header bar. The window contains several sections of settings, each with a title and a list of parameters with input fields:

- Mezní rozdíly měřených veličin**
 - Rozdíl poloh dalekohledu**
 - Vodorovný směr [gon]: 0.01000
 - Zenitový úhel [gon]: 0.01000
 - Šikmá délka [m]: 0.0500
 - Rozdíl mezi body sítě**
 - Šikmá délka [m]: 0.1000
 - Směrník [gon]: 0.05000
 - Převýšení [m]: 0.1000
 - Svislé provažování [m]: 0.1000
- Rozdíl skupin**
 - Vodorovný směr [gon]: 0.01000
 - Zenitový úhel [gon]: 0.01000
 - Šikmá délka [m]: 0.0500
- Rozdíl protisměrných hodnot**
 - Vodorovný směr [gon]: 0.01000
 - Zenitový úhel [gon]: 0.01000
 - Šikmá délka [m]: 0.0500
- Maximální hodnoty měřených veličin**
 - Šikmá délka [m]: 2000.0000
 - Výška stanoviska [m]: 2.0000
 - Výška cíle [m]: 2.0000
 - Převýšení [m]: 100.0000

At the bottom right, there are two buttons: "Vložit [Ent]" and "Ukončit [Esc]".

Obr. 22: Okno nastavení - Kontrola

Dále byly nastaveny parametry pro redukcí délek na nulovou hladinu a byl zadán měřítkový koeficient pro redukcí do kartografického zobrazení (Obr. 23).

The screenshot shows a software window titled "Nastavení - Redukce délek" with a yellow header bar. The window contains the following settings:

- Redukce z nadmořské výšky**
 - Poloměr referenční koule [m]: 6380000
- Typ výškové hladiny**
 - Nulová hladina
 - Střední hladina geodetické sítě (minimální redukce)
 - Hladina v nadmořské výšce [m]: 500.0000
- Redukce do kartografického zobrazení**
 - Měřítkový koeficient: 0.99991974

At the bottom, there are two buttons: "Vložit [Ent]" and "Ukončit [Esc]".

Obr. 23: Nastavení redukce délek

Následně byla spuštěna funkce „Analýza sítě“. Tato funkce má za úkol vypočítat apriorní směrodatné odchylky měřených veličin jejichž pomocí se dále budou určovat váhy měření vstupujících do vyrovnání. V nastavení „Apriorní analýzy sítě“ byla zvolena přesnost pro vodorovný směr 1,5 mgon, pro zenitový směr 2,5 mgon a 1,5 mm pro šikmé délky (Obr. 24).

Apriorní analýza sítě

Směrodatná odchylka měřené veličiny

1. Vnitřní přesnost sítě

Vodorovný směr [mgon]: 0.030
Zenitový úhel [mgon]: 0.160
Šikmá délka [mm]: 0.36

2. Vnější přesnost sítě

Vodorovný směr [mgon]:
Zenitový úhel [mgon]: 0.926
Šikmá délka [mm]: 0.52

3. Zadaná přesnost sítě

Vodorovný směr [mgon]: 1.500
Zenitový úhel [mgon]: 2.500
Šikmá délka [mm]: 1.50

Apriorní jednotková směrodatná odchylka

1

Vložit [Ent] Ukončit [Esc]

Obr. 24: Nastavení apriorní analýzy sítě

V záložce „Nastavení-Vyrovnání“ byla nastavena hladina významnosti na hodnotu 0,01 (1 procento), z důvodu případného vyloučení opravdu chybného měření a metodu robustního odhadu Huber, která je stabilní i při velkém počtu vyloučených měření. Dále byly upraveny směrodatné odchylky měřených veličin vstupujících do vyrovnání (Obr. 25).

Nastavení - Vyrovnání sítě

Vyloučení odlehlých hodnot

Hladina významnosti: 0.01
Metoda robustního odhadu: Huber

Analyzované veličiny

Vodorovný směr Šikmá délka (doplňek)
 Zenitový úhel Směrník
 Šikmá délka Převýšení
 Svislé provažování

Ukončení iteračního vyrovnání

Maximální počet iterací: 50
Maximální změna robustní váhy: 0.001
Maximální změna souřadnice bodu [mm]: 0.010

Směrodatná odchylka měřené veličiny

Vodorovný směr [mgon]: 1.500
Zenitový úhel [mgon]: 2.500
Šikmá délka [mm]: 1.50

Směrodatná odchylka doplňkové veličiny

Šikmá délka [mm]: 2.00
Směrník [mgon]: 0.500
Převýšení [mm]: 1.00
Svislé provažování [mm]: 1.00

Apriorní jednotková směrodatná odchylka

1

Vložit [Ent] Ukončit [Esc]

Obr. 25: Nastavení vyrovnání sítě

Nakonec bylo provedeno samotné vyrovnání sítě. V okně vyrovnání se automaticky objeví seznam vyrovnaných souřadnic všech bodů. V záložce „Sít'-Informace“ bylo zjištěno, že nebylo vyloučeno žádné měření a hodnota aposteriorní směrodatné odchylky 0,786. Jelikož v ideálním případě by měl být poměr apriorní a aposteriorní odchylky 1:1, bylo po konzultaci s vedoucím práce uznáno za vyhovující. (Obr. 26).

| Základní informace o vyrovnání sítě | | | |
|-------------------------------------|---------------|---|--------------|
| Vyloučení odlehlých hodnot | | Vyrovnání sítě | |
| Metoda robustního odhadu: | Huber | Apriorní jednotková směrodatná odchylka: | 1.000 |
| Hladina významnosti: | 0.01 | Aposterioerní jednotková směrodatná odchylka: | 0.786 |
| Počet vyloučených odlehlých hodnot: | 0/270 [0.000] | Počet fixních bodů: | 2 |
| Vodorovný směr: | 0/90 [0.000] | Počet vyrovnaných bodů: | 34 |
| Zenitový úhel: | 0/90 [0.000] | Počet vyrovnaných orientačních posunů: | 10 |
| Šikmá délka: | 0/90 [0.000] | Počet vyrovnaných měření: | 270 |
| Šikmá délka (doplňk): | - | Vodorovný směr: | 90 |
| Směrník: | - | Zenitový úhel: | 90 |
| Převýšení: | - | Šikmá délka: | 90 |
| Svislé provažování: | - | Šikmá délka (doplňk): | 0 |
| | | Směrník: | 0 |
| | | Převýšení: | 0 |
| | | Svislé provažování (X + Y): | 0 (0) |
| | | Počet nadbytečných měření: | 158 |

Obr. 26: Informační okno o vyrovnání 2. etapy

V přílohách práce je k nahlédnutí protokol o vyrovnání. Výkres elips chyb jednotlivých bodů je na Obr. 27.

V tabulce 7 jsou k nahlédnutí vyrovnané souřadnice bodů i s příslušnými směrodatnými odchylkami. Stejně jako u převzatých vyrovnání od Ing. Velíška, i v této práci byly zadané fixní body 5001 a 5002 považovány ve vyrovnání za bezchybné, proto nejsou uvedeny v následujících tabulkách.

Zadané přesnosti vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek byly zvoleny větší, než byla přesnost přístroje použitého při měření. Důvodem byla absence přesnosti určení bodů GNSS metodou při vyrovnání. Z výsledků vyrovnání je vidět, že se hodnoty směrodatných odchylek souřadnic pohybují okolo 3 mm, tedy splňují přesnost rozboru před měření. Stejně tomu je i u vyrovnání 3. etapy měření.

Tabulka 7: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 2. etapy

| Číslo bodu | X [m] | Y [m] | Z [m] | σ_x [mm] | σ_y [mm] | σ_z [mm] |
|------------|-------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3 | 996608,6891 | 768245,8609 | 264,4977 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| 4 | 996617,0133 | 768249,7133 | 264,1645 | 0,5 | 0,7 | 0,7 |
| 5 | 996617,1559 | 768244,6016 | 263,5285 | 0,5 | 0,7 | 0,6 |
| 6 | 996616,0754 | 768257,3692 | 265,3660 | 0,6 | 0,8 | 0,7 |
| 7 | 996622,1357 | 768253,4236 | 264,5205 | 0,6 | 0,8 | 0,7 |
| 8 | 996622,4398 | 768247,1857 | 263,7930 | 0,6 | 0,8 | 0,7 |
| 9 | 996558,4379 | 768174,0097 | 263,1665 | 1,3 | 1,1 | 1,4 |
| 10 | 996556,5457 | 768171,0978 | 263,0950 | 1,3 | 1,1 | 1,4 |
| 11 | 996543,2020 | 768151,7683 | 262,7187 | 1,5 | 1,0 | 1,2 |
| 13 | 996492,1480 | 768082,7310 | 262,0836 | 1,3 | 1,2 | 1,3 |
| 14 | 996491,1160 | 768074,6996 | 260,5055 | 1,5 | 1,2 | 1,3 |
| 15 | 996436,2689 | 768023,4864 | 260,4417 | 1,6 | 1,6 | 2,1 |
| 16 | 996335,0304 | 767983,3187 | 258,7173 | 1,6 | 1,9 | 2,9 |
| 17 | 996434,5531 | 767905,9713 | 244,9332 | 1,1 | 1,2 | 1,4 |
| 18 | 996472,2224 | 767939,0375 | 245,6848 | 1,2 | 1,1 | 1,5 |
| 19 | 996523,4663 | 767991,9446 | 247,0594 | 1,3 | 1,2 | 1,5 |
| 20 | 996555,2758 | 768047,1432 | 248,9734 | 1,3 | 1,2 | 1,4 |
| 21 | 996568,2313 | 768068,7861 | 250,0143 | 1,3 | 1,1 | 1,5 |
| 23 | 996580,7963 | 768078,7858 | 249,7636 | 1,4 | 1,1 | 1,5 |
| 24 | 996595,5989 | 768102,1134 | 250,6846 | 1,3 | 1,1 | 1,2 |
| 25 | 996581,1962 | 768090,6886 | 250,5825 | 1,4 | 1,1 | 1,4 |
| 26 | 996605,0865 | 768128,5880 | 252,5855 | 1,2 | 1,1 | 1,2 |
| 27 | 996611,6188 | 768171,9200 | 256,3361 | 1,3 | 1,1 | 1,5 |
| 28 | 996617,9016 | 768211,5697 | 260,1694 | 0,8 | 1,1 | 0,8 |

8.2.3 Vyrovnání 3. etapy

Postup vyrovnání třetí etapy probíhalo stejným způsobem jako vyrovnání etapy druhé. I v tomto výpočtu vyrovnání nebylo vyloučeno ani jedno měření. Aposteriorní odchylka má hodnotu 0,929 (Obr. 28). V přílohách je opět k nahlédnutí protokol o vyrovnání. Výkres elips chyb na jednotlivých bodech je na Obr. 29. Seznam vyrovnaných souřadnic a směrodatných odchylek je v tabulce č. 8.

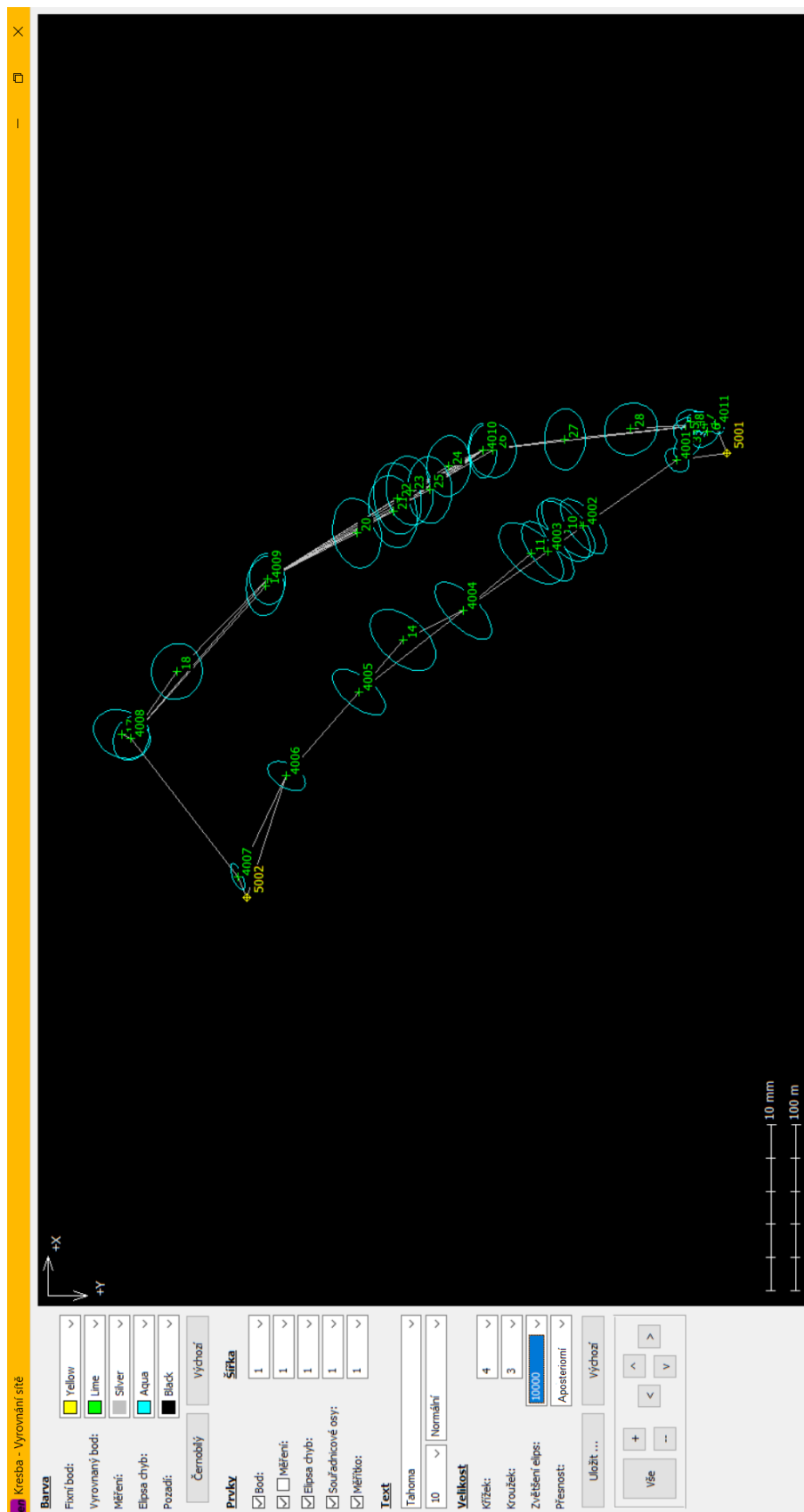
Z porovnání vypočtených směrodatných odchylek bodů ze všech etap je zjevné, že u 0. a 1. etapy jsou směrodatné odchylky menší než u vyrovnání 2. a 3. etapy. K měření všech etap byl použit stejný přístroj, ale podmínky při měření byly jiné, což může výslednou přesnost ovlivnit. Dalším důvodem je nejspíš volba apriorní přesnosti měřených veličin vstupující do vyrovnání. I tak jsou u všech etap splněny přesnosti dané rozbořem před měření.

| Základní informace o vyrovnání sítě | | | |
|-------------------------------------|---------------|--|--------------|
| Vyloučení odlehlých hodnot | | Vyrovnání sítě | |
| Metoda robustního odhadu: | Huber | Apriorní jednotková směrodatná odchylka: | 1.000 |
| Hladina významnosti: | 0.01 | Aposteriorní jednotková směrodatná odchylka: | 0.929 |
| Počet vyloučených odlehlých hodnot: | 0/270 [0.000] | Počet fixních bodů: | 2 |
| Vodorovný směr: | 0/90 [0.000] | Počet vyrovnaných bodů: | 33 |
| Zenitový úhel: | 0/90 [0.000] | Počet vyrovnaných orientačních posunů: | 11 |
| Šikmá délka: | 0/90 [0.000] | Počet vyrovnaných měření: | 270 |
| Šikmá délka (doplňek): | - | Vodorovný směr: | 90 |
| Směrník: | - | Zenitový úhel: | 90 |
| Převýšení: | - | Šikmá délka: | 90 |
| Svislé provažování: | - | Šikmá délka (doplňek): | 0 |
| | | Směrník: | 0 |
| | | Převýšení: | 0 |
| | | Svislé provažování (X + Y): | 0 (0) |
| | | Počet nadbytečných měření: | 160 |

Obr. 28: Informační okno o vyrovnání 3. etapy

Tabulka 8: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 3. etapy

| Číslo bodu | X [m] | Y [m] | Z [m] | σ_x [mm] | σ_y [mm] | σ_z [mm] |
|------------|-------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3 | 996608,6997 | 768245,8383 | 264,5049 | 0,9 | 0,8 | 0,6 |
| 4 | 996617,0238 | 768249,6958 | 264,1725 | 0,7 | 0,8 | 0,6 |
| 5 | 996617,1658 | 768244,5814 | 263,5365 | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| 6 | 996616,0833 | 768257,3475 | 265,3705 | 0,9 | 0,8 | 0,5 |
| 7 | 996622,1438 | 768253,4031 | 264,5285 | 0,6 | 0,8 | 0,6 |
| 8 | 996622,4459 | 768247,1632 | 263,8015 | 0,6 | 0,7 | 0,6 |
| 9 | 996558,4446 | 768173,9874 | 263,1732 | 1,6 | 1,5 | 1,4 |
| 10 | 996556,5549 | 768171,0754 | 263,1001 | 1,7 | 1,5 | 1,4 |
| 11 | 996543,2071 | 768151,7490 | 262,7258 | 1,7 | 1,8 | 1,4 |
| 14 | 996491,1190 | 768074,6811 | 260,5082 | 1,7 | 1,8 | 1,9 |
| 17 | 996434,5453 | 767905,9539 | 244,9379 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| 18 | 996472,2152 | 767939,0220 | 245,6896 | 1,6 | 1,4 | 2,2 |
| 19 | 996523,4578 | 767991,9281 | 247,0687 | 1,7 | 1,1 | 1,9 |
| 20 | 996555,2715 | 768047,1255 | 248,9799 | 1,9 | 1,4 | 2,5 |
| 21 | 996568,2306 | 768068,7681 | 250,0214 | 2,0 | 1,4 | 2,5 |
| 23 | 996580,7961 | 768078,7665 | 249,7684 | 1,9 | 1,3 | 2,4 |
| 24 | 996595,5992 | 768102,0939 | 250,6885 | 1,7 | 1,2 | 1,9 |
| 25 | 996581,1968 | 768090,6681 | 250,5886 | 1,9 | 1,2 | 2,2 |
| 26 | 996605,0884 | 768128,5662 | 252,5958 | 1,5 | 1,3 | 1,8 |
| 27 | 996611,6199 | 768171,8995 | 256,3429 | 1,7 | 1,1 | 2,1 |
| 28 | 996617,9100 | 768211,5483 | 260,1797 | 1,5 | 1,5 | 1,9 |



Obr. 29: Chybové elipsy bodů z 3. etapy

9 Výpočet a vyhodnocení posunů

V následující kapitole jsou popsány a zhodnoceny výsledky všech provedených mezi etapových porovnání. Porovnány byly kombinace všech naměřených etap, kdy souřadnicové posuny jsou počítány jako rozdíl nulté etapy a etap následujících, případně byl rozdíl vztažen k etapě dříve naměřené.

Jako první byly porovnány vypočtené souřadnice bodů 5001 a 5002 (Tabulka 9 a Tabulka 10). Z nich je zřejmé, že posuny opravdu probíhají i na těchto bodech, které byly použity jako fixní. Největší zaznamenaný výškový nárůst na bodě 5001 je 2,93 cm v období mezi listopadem 2017 a dubnem 2018. I v poloze byly zaznamenány posuny přesahující 2 cm. Na bodě 5002 je největší posun ve směru osy y 2,01 cm.

Tabulka 9: Souřadnicové rozdíly na bodě 5001

| Souřadnice | 0. etapa [m] | 1. etapa [m] | 2. etapa [m] | 3. etapa [m] | $\Delta 0-1$ [mm] | $\Delta 0-2$ [mm] | $\Delta 0-3$ [mm] | $\Delta 1-2$ [mm] | $\Delta 1-3$ [mm] | $\Delta 2-3$ [mm] |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| X5001 | 996603,1960 | 996603,2010 | 996603,1752 | 996603,1887 | -5,0 | +20,8 | +7,3 | +25,8 | +12,3 | -13,5 |
| Y5001 | 768269,1860 | 768269,1940 | 768269,1957 | 768269,1748 | -8,0 | -9,7 | +11,2 | -1,7 | +19,2 | +20,9 |
| Z5001 | 267,7400 | 267,7460 | 267,7380 | 267,7673 | -6,0 | +2,0 | -27,3 | +8,0 | -21,3 | -29,3 |

Tabulka 10: Souřadnicové rozdíly na bodě 5002

| Souřadnice | 0. etapa [m] | 1. etapa [m] | 2. etapa [m] | 3. etapa [m] | $\Delta 0-1$ [mm] | $\Delta 0-2$ [mm] | $\Delta 0-3$ [mm] | $\Delta 1-2$ [mm] | $\Delta 1-3$ [mm] | $\Delta 2-3$ [mm] |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| X5002 | 996336,1190 | 996336,1180 | 996336,1192 | 996336,1069 | 1,0 | -0,2 | 12,1 | -1,2 | 11,1 | 12,3 |
| Y5002 | 767981,1570 | 767981,1630 | 767981,1583 | 767981,1429 | -6,0 | -1,3 | 14,1 | 4,7 | 20,1 | 15,4 |
| Z5002 | 258,2800 | 258,2780 | 258,2753 | 258,2813 | 2,0 | 4,7 | -1,3 | 2,7 | -3,3 | -6,0 |

Následně bylo přistoupeno k výpočtu rozdílů sledovaných podrobných bodů. Jako první byla ze směrodatných odchylek vypočtena polohová odchylka každého bodu (9.1):

$$\sigma_P = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (9.1)$$

kde σ_x je směrodatná odchylka v ose x a σ_y je směrodatná odchylka v ose y. Směrodatné odchylky byly vypočtené pro všechny body pro každou etapu zvlášť. Z důvodu zahrnutí přesnosti fixních bodů, které byly určovány pomocí GNSS metodou byla do výpočtu směrodatné odchylky zahrnuta i přesnost určení centrace bodu (9.2):

$$\sigma_{Pgns} = \sqrt{\sigma_P^2 + \left(\frac{S_c}{\sqrt{2}}\right)^2}, \quad (9.2)$$

kde S_c je vypočtená přesnost centrace (viz.4.8).

Výsledná směrodatná odchylka pro posun v poloze pro dvě etapy byl vypočten jako jejich kvadratický součet (9.3):

$$\sigma_{XY} = \sqrt{\sigma_{Pgns(n)}^2 + \sigma_{Pgns(n+1)}^2}, \quad (9.3)$$

kde $\sigma_{Pgns(n)}$ je polohová odchylka bodu určená v první porovnávané etapě a $\sigma_{Pgns(n+1)}$ je polohová odchylka bodu určená v druhé porovnávané etapě. Mezní směrodatná odchylka pro posouzení posunu v poloze bodu byla následně vypočtena jako (9.4):

$$\Delta_{Mez_{XY}} = u_p * \sigma_{XY}, \quad (9.4)$$

kde u_p je koeficient spolehlivosti.

Koeficient spolehlivosti je hodnota, jejímž zavedení do výpočtu vytváříme interval spolehlivosti s pravděpodobností 95%, že testovaná hodnota bude patřit do tohoto intervalu. Byla zvolena hodnota koeficientu 2 z důvodu určení mezní odchylky pro jednorozměrnou veličinu - posun.

Po výpočtu mezi-etapových souřadnicových rozdílů byly absolutní hodnoty těchto rozdílů porovnány s příslušnými mezními směrodatnými odchylkami. Pokud polohový rozdíl překročil mezní směrodatnou odchylku, došlo k posunu s pravděpodobností 95%.

Následně byla ze směrodatných odchylek obdobně vypočtena výšková odchylka každého bodu. Výšková odchylka byla vypočtena jako (9.5):

$$\sigma_V = \sigma_Z, \quad (9.5)$$

kde σ_Z je směrodatná odchylka v ose z.

Směrodatné odchylky byly vypočtené pro všechny body v obou etapách. Z důvodu zahrnutí přesnosti fixních bodů, které byly určovány pomocí GNSS metody byla do výpočtu směrodatné odchylky zahrnuta i přesnost určení výšky bodů (9.6).

$$\sigma_{Vgnss} = \sqrt{\sigma_V^2 + \left(\frac{S_v}{\sqrt{2}}\right)^2}, \quad (9.6)$$

kde S_v je vypočtená přesnost určení výšky (viz.4.9). Výsledná směrodatná odchylka pro posun ve výšce pro dvě etapy byl vypočten jako jejich kvadratický součet (9.7):

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{Vgnss(n)}^2 + \sigma_{Vgnss(n+1)}^2}, \quad (9.7)$$

kde $\sigma_{Vgnss(n)}$ je výšková odchylka bodu určená v první porovnávané etapě a $\sigma_{Vgnss(n+1)}$ je výšková odchylka bodu určená v druhé porovnávané etapě.

Mezní směrodatná odchylka pro posouzení posunu ve výšce bodu byla následně vypočtena jako (9.8):

$$\Delta_{MezZ} = u_p * \sigma_Z, \quad (9.8)$$

kde u_p je koeficient spolehlivosti.

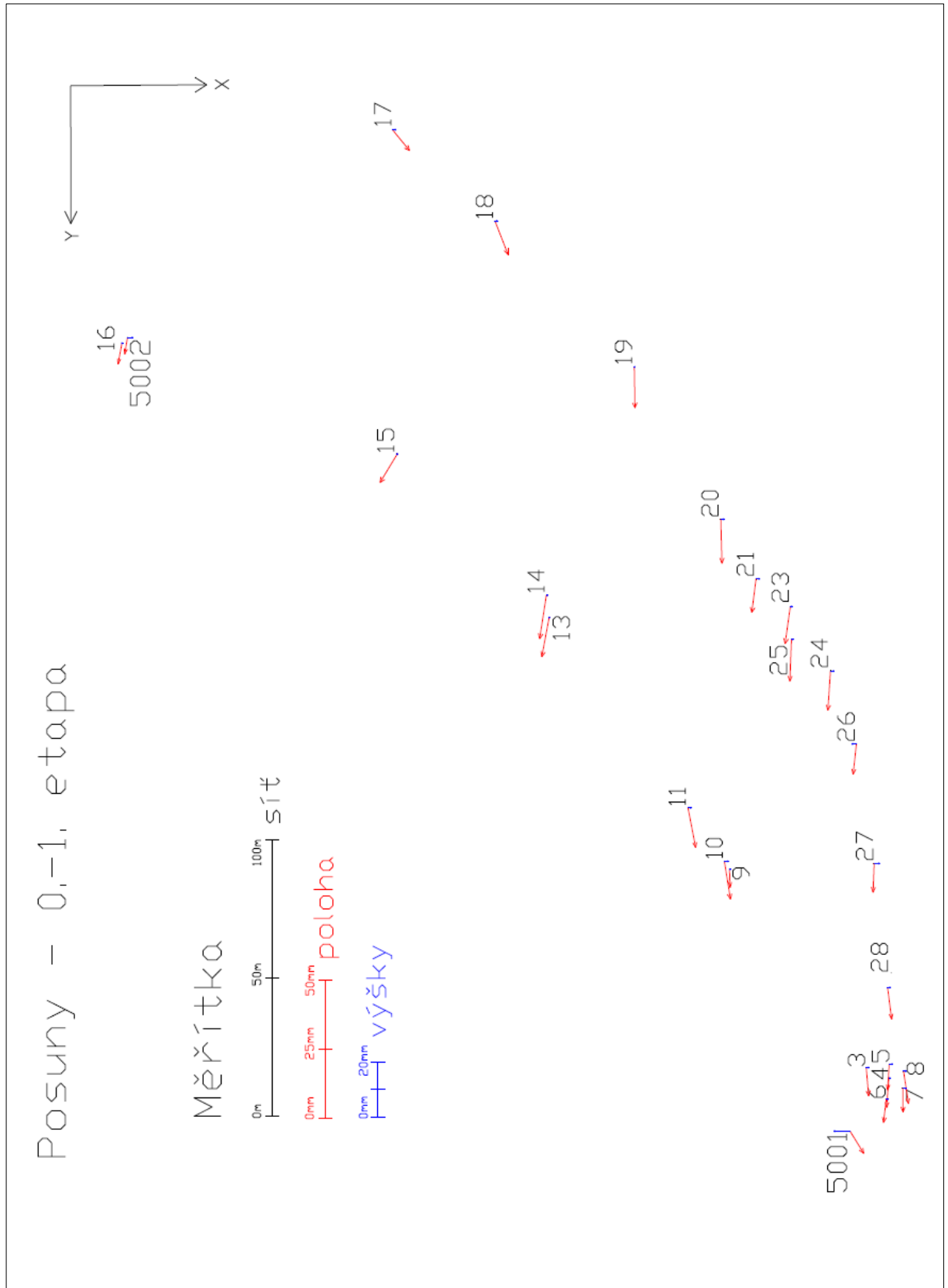
I zde byla zvolena hodnota koeficientu 2 a to z důvodu určení mezní odchylky pro jednorozměrnou veličinu.

Po výpočtu mezi etapových výškových rozdílů byly absolutní hodnoty těchto rozdílů porovnány s příslušnými mezními směrodatnými odchylkami. Pokud výškový rozdíl překročil mezní směrodatnou odchylku tak s 95% pravděpodobností došlo k posunu.

Porovnání a zhodnocení polohových a výškových posunů na pozorovaných bodech jsou uvedeny společně v šesti tabulkách, jež každá obsahuje porovnání jedné z kombinací etap (tabulky 11 až 16). Ke každému porovnání byl vyhotoven i výkres s grafickým vyznačením posunů (Obr. 30 až Obr. 35) s grafickým měřítkem pro situaci a pro posuny.

Tabulka 11: Porovnání posunů mezi 0. a 1. etapou

| Číslo bodu | σ_{XY} [mm] | Δ_{MezXY} [mm] | ΔXY [mm] | Posun v poloze | σ_Z [mm] | Δ_{MezZ} [mm] | ΔZ [mm] | Posun ve výšce |
|------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 3 | 2,0 | 3,9 | 10,3 | ANO | 4,1 | 8,2 | 1,1 | NE |
| 4 | 2,0 | 4,0 | 10,6 | ANO | 4,1 | 8,2 | 0,6 | NE |
| 5 | 2,0 | 4,0 | 9,4 | ANO | 4,1 | 8,2 | 1,3 | NE |
| 6 | 2,0 | 4,0 | 8,5 | ANO | 4,1 | 8,2 | 0,8 | NE |
| 7 | 2,0 | 4,0 | 8,6 | ANO | 4,1 | 8,2 | 1,3 | NE |
| 8 | 2,0 | 4,0 | 11,9 | ANO | 4,1 | 8,2 | 1,0 | NE |
| 9 | 2,7 | 5,3 | 6,6 | ANO | 4,1 | 8,2 | 0,5 | NE |
| 10 | 2,7 | 5,4 | 13,9 | ANO | 4,1 | 8,2 | 1,4 | NE |
| 11 | 3,0 | 6,1 | 14,7 | ANO | 4,1 | 8,3 | 1,2 | NE |
| 13 | 3,2 | 6,4 | 14,5 | ANO | 4,1 | 8,3 | -0,2 | NE |
| 14 | 3,2 | 6,4 | 15,9 | ANO | 4,1 | 8,3 | 0,6 | NE |
| 15 | 3,0 | 6,0 | 12,1 | ANO | 4,1 | 8,3 | -0,2 | NE |
| 16 | 2,5 | 5,0 | 7,7 | ANO | 4,1 | 8,3 | -0,3 | NE |
| 17 | 3,0 | 5,9 | 9,7 | ANO | 4,2 | 8,3 | 1,3 | NE |
| 18 | 3,1 | 6,1 | 13,0 | ANO | 4,1 | 8,3 | 0,9 | NE |
| 19 | 3,2 | 6,4 | 14,8 | ANO | 4,1 | 8,3 | -0,1 | NE |
| 20 | 3,1 | 6,2 | 15,9 | ANO | 4,1 | 8,3 | 1,2 | NE |
| 21 | 3,2 | 6,3 | 12,2 | ANO | 4,1 | 8,3 | 1,3 | NE |
| 23 | 3,2 | 6,5 | 13,5 | ANO | 4,1 | 8,3 | 0,7 | NE |
| 24 | 3,1 | 6,2 | 14,2 | ANO | 4,1 | 8,3 | 1,3 | NE |
| 25 | 3,1 | 6,3 | 15,1 | ANO | 4,1 | 8,3 | 0,7 | NE |
| 26 | 3,0 | 6,0 | 11,1 | ANO | 4,1 | 8,3 | -1,7 | NE |
| 27 | 2,8 | 5,5 | 10,4 | ANO | 4,1 | 8,3 | 2,0 | NE |
| 28 | 2,5 | 5,0 | 11,6 | ANO | 4,1 | 8,2 | 1,1 | NE |



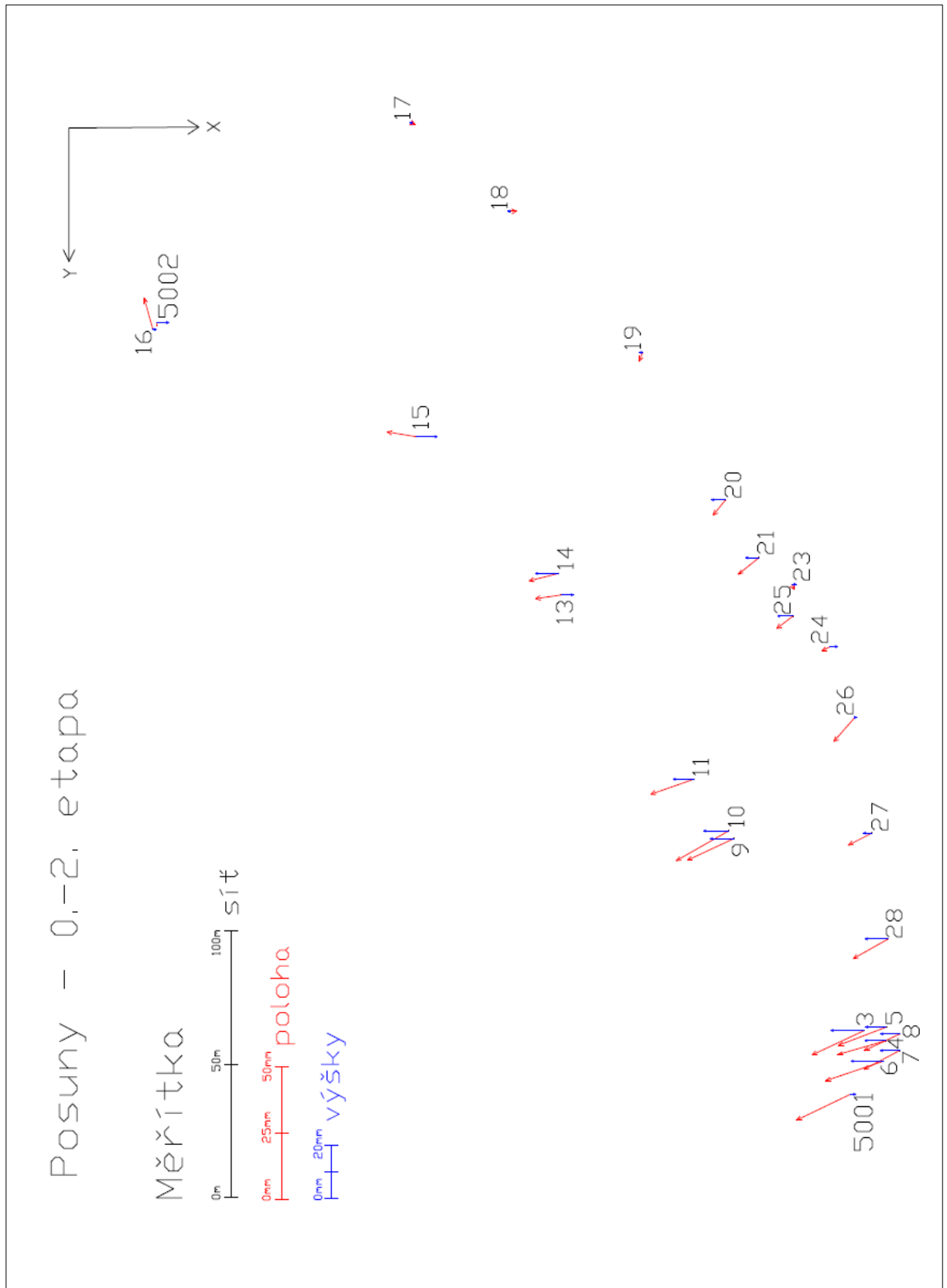
Obr. 30: Posuny bodů – 0. a 1. etapa

V prvním porovnání etapy nulté a první (únor až duben 2017) je zřejmé, že polohové posuny překračují dvojnásobně vypočtené mezní odchylky. V případě výšek je zaznamenán jejich mírný pokles. Nemůžeme ale tvrdit, že jde o posun.

Tabulka 12: Porovnání posunů mezi 0. a 2. etapou

| Číslo bodu | σ_{XY} [mm] | Δ_{MezXY} [mm] | ΔXY [mm] | Posun v poloze | σ_Z [mm] | Δ_{MezZ} [mm] | ΔZ [mm] | Posun ve výšce |
|------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 3 | 1,9 | 3,9 | 22,1 | ANO | 4,1 | 8,3 | -12,8 | ANO |
| 4 | 2,0 | 4,0 | 19,2 | ANO | 4,2 | 8,3 | -8,1 | NE |
| 5 | 2,0 | 4,0 | 19,5 | ANO | 4,1 | 8,3 | -7,9 | NE |
| 6 | 2,1 | 4,1 | 23,4 | ANO | 4,2 | 8,3 | -12,4 | ANO |
| 7 | 2,1 | 4,1 | 15,2 | ANO | 4,2 | 8,3 | -7,2 | NE |
| 8 | 2,0 | 4,1 | 14,6 | ANO | 4,2 | 8,3 | -7,4 | NE |
| 9 | 2,7 | 5,5 | 19,6 | ANO | 4,3 | 8,7 | -8,9 | ANO |
| 10 | 2,8 | 5,5 | 23,1 | ANO | 4,3 | 8,6 | -9,6 | ANO |
| 11 | 2,9 | 5,8 | 17,5 | ANO | 4,3 | 8,6 | -8,0 | NE |
| 13 | 3,0 | 5,9 | 10,0 | ANO | 4,3 | 8,6 | 4,6 | NE |
| 14 | 3,1 | 6,1 | 11,6 | ANO | 4,3 | 8,6 | -8,9 | ANO |
| 15 | 3,2 | 6,4 | 11,2 | ANO | 4,6 | 9,2 | 8,1 | NE |
| 16 | 3,3 | 6,5 | 12,3 | ANO | 5,1 | 10,1 | 1,3 | NE |
| 17 | 2,9 | 5,9 | 1,4 | NE | 4,3 | 8,7 | -0,6 | NE |
| 18 | 2,9 | 5,8 | 2,6 | NE | 4,4 | 8,8 | -0,7 | NE |
| 19 | 3,1 | 6,2 | 3,5 | NE | 4,4 | 8,8 | -1,2 | NE |
| 20 | 3,0 | 6,0 | 7,4 | ANO | 4,3 | 8,7 | -5,2 | NE |
| 21 | 3,0 | 6,0 | 10,1 | ANO | 4,4 | 8,7 | -5,1 | NE |
| 23 | 3,1 | 6,1 | 2,0 | NE | 4,4 | 8,8 | 1,7 | NE |
| 24 | 2,9 | 5,8 | 3,6 | NE | 4,3 | 8,6 | 2,8 | NE |
| 25 | 3,0 | 6,0 | 7,6 | ANO | 4,4 | 8,7 | -5,8 | NE |
| 26 | 2,8 | 5,7 | 12,1 | ANO | 4,3 | 8,6 | 0,6 | NE |
| 27 | 2,8 | 5,6 | 10,1 | ANO | 4,4 | 8,7 | -3,2 | NE |
| 28 | 2,5 | 5,0 | 15,3 | ANO | 4,2 | 8,4 | -8,8 | ANO |

V porovnání etapy nulté a druhé (únor až listopad 2017) byly zaznamenány posuny polohové i výškové, a to obzvlášť v bezprostřední blízkosti železničního tělesa. Tyto posuny měly hodnoty okolo 2 cm v poloze a do 1 cm ve výšce. Polohový posun nebyl potvrzen u bodů 18, 19, 23 a 24, které jsou stabilizované ve vozovce nástrelným hřebíkem nejdál od železničního tělesa. Naopak výškový posun byl potvrzen na bodech 3, 6, 9, 10, 14 a 28, které jsou železnici blízké. Obecně lze v u tohoto porovnání říci, že výšky mírně rostou.

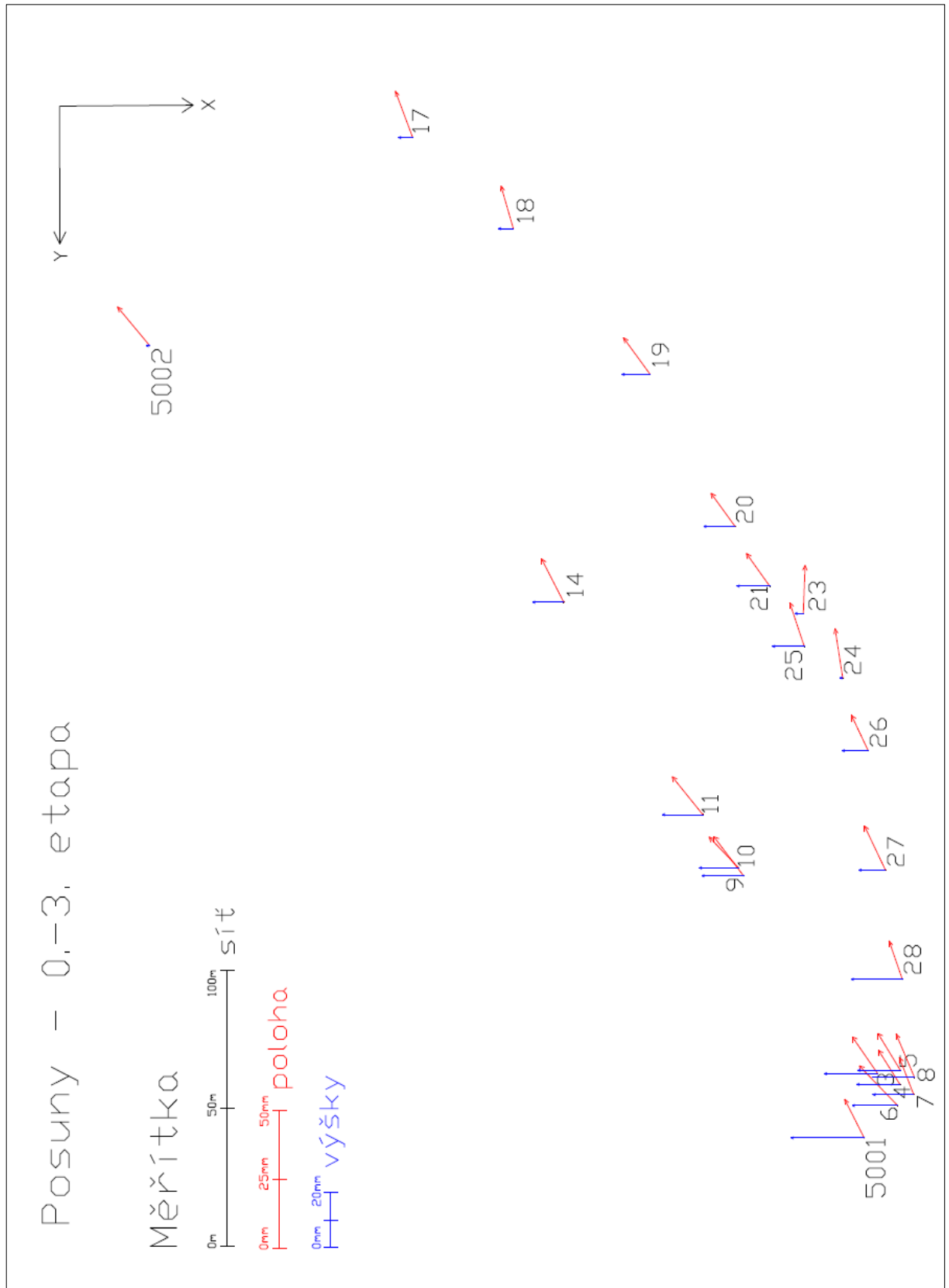


Obr. 31: Posuny bodů - 0. a 2. etapa

Tabulka 13: Porovnání posunů mezi 0. a 3. etapou

| Číslo bodu | σ_{XY} [mm] | Δ_{MezXY} [mm] | ΔXY [mm] | Posun v poloze | σ_Z [mm] | Δ_{MezZ} [mm] | ΔZ [mm] | Posun ve výšce |
|------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 3 | 2,1 | 4,3 | 16,4 | ANO | 4,1 | 8,3 | -20,0 | ANO |
| 4 | 2,1 | 4,1 | 14,7 | ANO | 4,1 | 8,3 | -16,1 | ANO |
| 5 | 2,1 | 4,1 | 15,8 | ANO | 4,2 | 8,3 | -15,9 | ANO |
| 6 | 2,2 | 4,3 | 20,3 | ANO | 4,1 | 8,3 | -16,9 | ANO |
| 7 | 2,0 | 4,1 | 14,5 | ANO | 4,1 | 8,3 | -15,2 | ANO |
| 8 | 2,0 | 4,1 | 17,2 | ANO | 4,2 | 8,3 | -15,9 | ANO |
| 9 | 3,1 | 6,2 | 18,0 | ANO | 4,3 | 8,7 | -15,6 | ANO |
| 10 | 3,1 | 6,2 | 15,7 | ANO | 4,3 | 8,7 | -14,7 | ANO |
| 11 | 3,3 | 6,7 | 17,9 | ANO | 4,4 | 8,7 | -15,1 | ANO |
| 14 | 3,5 | 6,9 | 17,8 | ANO | 4,5 | 9,0 | -11,6 | ANO |
| 17 | 3,2 | 6,5 | 18,0 | ANO | 4,5 | 9,0 | -5,3 | NE |
| 18 | 3,2 | 6,4 | 16,2 | ANO | 4,7 | 9,4 | -5,5 | NE |
| 19 | 3,2 | 6,3 | 16,6 | ANO | 4,5 | 9,1 | -10,5 | ANO |
| 20 | 3,4 | 6,8 | 15,0 | ANO | 4,8 | 9,7 | -11,7 | ANO |
| 21 | 3,5 | 6,9 | 14,7 | ANO | 4,8 | 9,7 | -12,2 | ANO |
| 23 | 3,4 | 6,8 | 17,5 | ANO | 4,7 | 9,5 | -3,1 | NE |
| 24 | 3,2 | 6,3 | 18,1 | ANO | 4,5 | 9,1 | -1,1 | NE |
| 25 | 3,3 | 6,6 | 16,8 | ANO | 4,7 | 9,3 | -11,9 | ANO |
| 26 | 3,1 | 6,2 | 14,2 | ANO | 4,5 | 9,0 | -9,7 | ANO |
| 27 | 3,0 | 6,1 | 17,8 | ANO | 4,6 | 9,2 | -10,0 | ANO |
| 28 | 2,9 | 5,9 | 14,9 | ANO | 4,5 | 9,1 | -19,1 | ANO |

V porovnání nulté a třetí etapy (únor 2017 a duben 2018) již je vidět, že z dlouhodobého hlediska můžeme opět tvrdit, že nastal polohový posun průměrně okolo 2 cm. Výškově oblast opět stoupá přibližně o 1,5 cm.

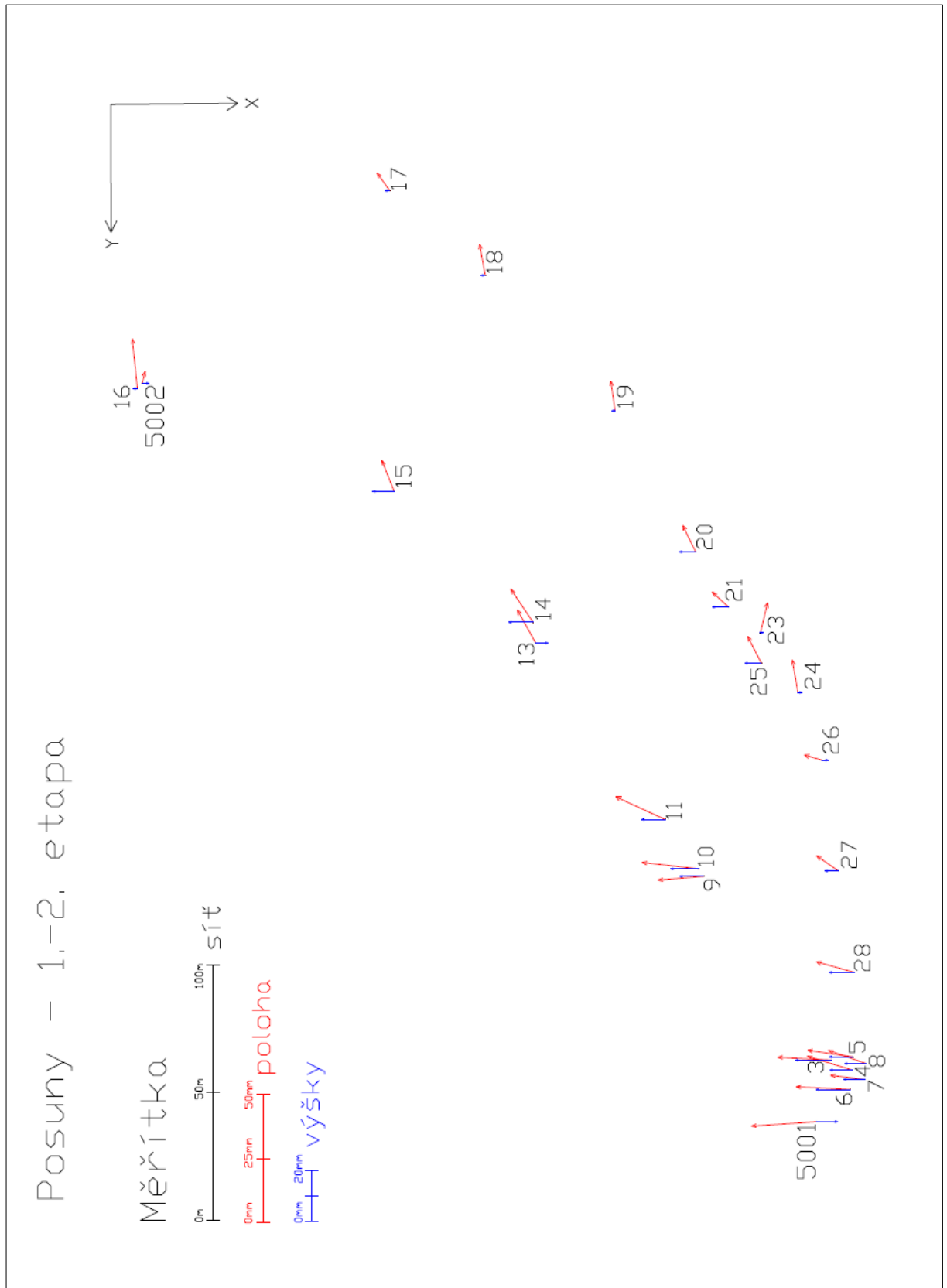


Obr. 32: Posuny bodů – 0. a 3. etapa

Tabulka 14: Porovnání posunů mezi 1. a 2. etapou

| Číslo bodu | σ_{XY} [mm] | Δ_{MezXY} [mm] | ΔXY [mm] | Posun v poloze | σ_Z [mm] | Δ_{MezZ} [mm] | ΔZ [mm] | Posun ve výšce |
|------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 3 | 2,0 | 3,9 | 21,0 | ANO | 4,1 | 8,3 | -13,9 | ANO |
| 4 | 2,0 | 4,0 | 18,5 | ANO | 4,2 | 8,3 | -8,7 | ANO |
| 5 | 2,0 | 4,0 | 17,9 | ANO | 4,2 | 8,3 | -9,2 | ANO |
| 6 | 2,1 | 4,2 | 21,2 | ANO | 4,2 | 8,3 | -13,2 | ANO |
| 7 | 2,1 | 4,2 | 13,7 | ANO | 4,2 | 8,3 | -8,5 | ANO |
| 8 | 2,1 | 4,1 | 15,7 | ANO | 4,2 | 8,3 | -8,4 | ANO |
| 9 | 2,8 | 5,7 | 18,1 | ANO | 4,3 | 8,7 | -9,4 | ANO |
| 10 | 2,8 | 5,7 | 22,5 | ANO | 4,3 | 8,7 | -11,0 | ANO |
| 11 | 3,2 | 6,4 | 21,3 | ANO | 4,3 | 8,6 | -9,2 | ANO |
| 13 | 3,2 | 6,4 | 14,7 | ANO | 4,3 | 8,7 | 4,8 | NE |
| 14 | 3,3 | 6,6 | 15,6 | ANO | 4,3 | 8,6 | -9,5 | ANO |
| 15 | 3,4 | 6,7 | 13,0 | ANO | 4,6 | 9,3 | 8,3 | NE |
| 16 | 3,2 | 6,4 | 19,5 | ANO | 5,1 | 10,1 | 1,6 | NE |
| 17 | 2,8 | 5,6 | 8,5 | ANO | 4,4 | 8,7 | -1,9 | NE |
| 18 | 2,9 | 5,9 | 12,3 | ANO | 4,4 | 8,8 | -1,6 | NE |
| 19 | 3,2 | 6,3 | 11,7 | ANO | 4,4 | 8,8 | -1,1 | NE |
| 20 | 3,1 | 6,1 | 11,4 | ANO | 4,3 | 8,7 | -6,4 | NE |
| 21 | 3,0 | 6,1 | 8,7 | ANO | 4,4 | 8,7 | -6,4 | NE |
| 23 | 3,2 | 6,4 | 11,9 | ANO | 4,4 | 8,8 | 1,0 | NE |
| 24 | 3,0 | 6,1 | 12,8 | ANO | 4,3 | 8,6 | 1,5 | NE |
| 25 | 3,1 | 6,2 | 11,9 | ANO | 4,4 | 8,7 | -6,5 | NE |
| 26 | 2,9 | 5,8 | 7,2 | ANO | 4,3 | 8,6 | 2,3 | NE |
| 27 | 2,8 | 5,6 | 10,4 | ANO | 4,4 | 8,7 | -5,2 | NE |
| 28 | 2,5 | 5,0 | 15,5 | ANO | 4,2 | 8,4 | -9,9 | ANO |

Ve čtvrtém porovnání etapy první a druhé (duben a listopad 2017) jsou polohové posuny opět okolo 2 cm. Výškové posuny jsou potvrzeny pouze v bezprostřední blízkosti okolo železnice.

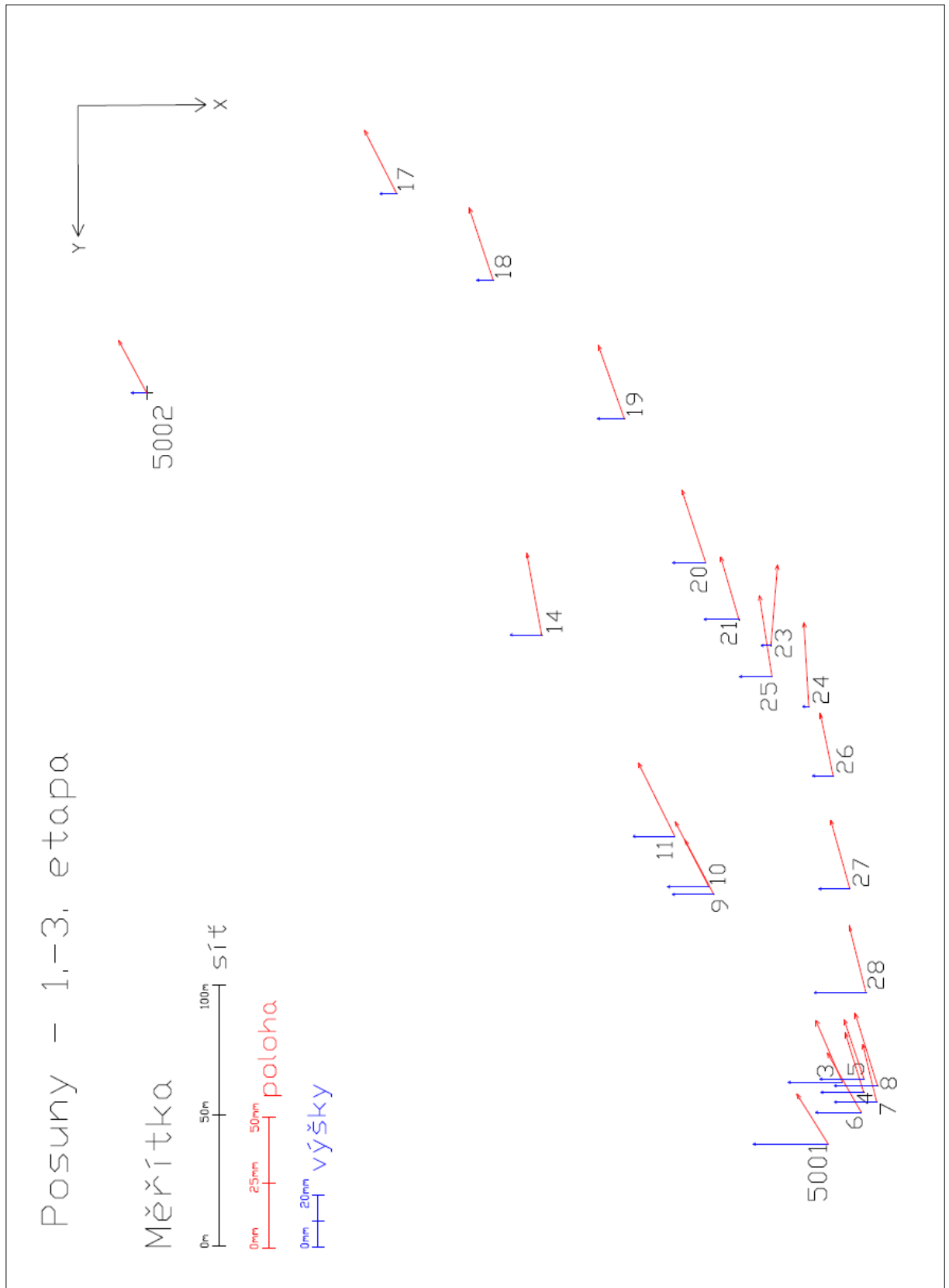


Obr. 33: Posuny bodů - 1. a 2. etapa

Tabulka 15: Porovnání posunů mezi 1. a 3. etapou

| Číslo bodu | σ_{XY} [mm] | Δ_{MezXY} [mm] | ΔXY [mm] | Posun v poloze | σ_Z [mm] | Δ_{MezZ} [mm] | ΔZ [mm] | Posun ve výšce |
|------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 3 | 2,1 | 4,3 | 25,9 | ANO | 4,1 | 8,3 | -21,1 | ANO |
| 4 | 2,1 | 4,2 | 24,0 | ANO | 4,1 | 8,3 | -16,7 | ANO |
| 5 | 2,1 | 4,1 | 24,1 | ANO | 4,2 | 8,3 | -17,2 | ANO |
| 6 | 2,2 | 4,3 | 26,4 | ANO | 4,1 | 8,3 | -17,7 | ANO |
| 7 | 2,1 | 4,1 | 22,8 | ANO | 4,1 | 8,3 | -16,5 | ANO |
| 8 | 2,1 | 4,2 | 28,9 | ANO | 4,2 | 8,3 | -16,9 | ANO |
| 9 | 3,2 | 6,3 | 23,7 | ANO | 4,3 | 8,7 | -16,1 | ANO |
| 10 | 3,2 | 6,4 | 28,2 | ANO | 4,3 | 8,7 | -16,1 | ANO |
| 11 | 3,6 | 7,2 | 31,5 | ANO | 4,4 | 8,7 | -16,3 | ANO |
| 14 | 3,7 | 7,3 | 31,9 | ANO | 4,5 | 9,1 | -12,2 | ANO |
| 17 | 3,1 | 6,2 | 27,4 | ANO | 4,5 | 9,0 | -6,6 | NE |
| 18 | 3,2 | 6,5 | 29,2 | ANO | 4,7 | 9,4 | -6,4 | NE |
| 19 | 3,3 | 6,5 | 29,9 | ANO | 4,6 | 9,1 | -10,4 | ANO |
| 20 | 3,5 | 6,9 | 29,4 | ANO | 4,8 | 9,7 | -12,9 | ANO |
| 21 | 3,5 | 7,0 | 24,9 | ANO | 4,8 | 9,7 | -13,5 | ANO |
| 23 | 3,5 | 7,0 | 31,0 | ANO | 4,8 | 9,5 | -3,8 | NE |
| 24 | 3,3 | 6,6 | 32,2 | ANO | 4,6 | 9,1 | -2,4 | NE |
| 25 | 3,4 | 6,8 | 31,4 | ANO | 4,7 | 9,4 | -12,6 | ANO |
| 26 | 3,2 | 6,3 | 24,3 | ANO | 4,5 | 9,0 | -8,0 | NE |
| 27 | 3,1 | 6,1 | 27,4 | ANO | 4,6 | 9,3 | -12,0 | ANO |
| 28 | 3,0 | 5,9 | 26,3 | ANO | 4,5 | 9,1 | -20,2 | ANO |

V pátém porovnání (duben 2017 až duben 2018) byly zjištěny největší polohové posuny a to okolo 3 cm. Výškové posuny byly potvrzeny na většině bodů a jejich hodnota byla okolo 1,5 cm.

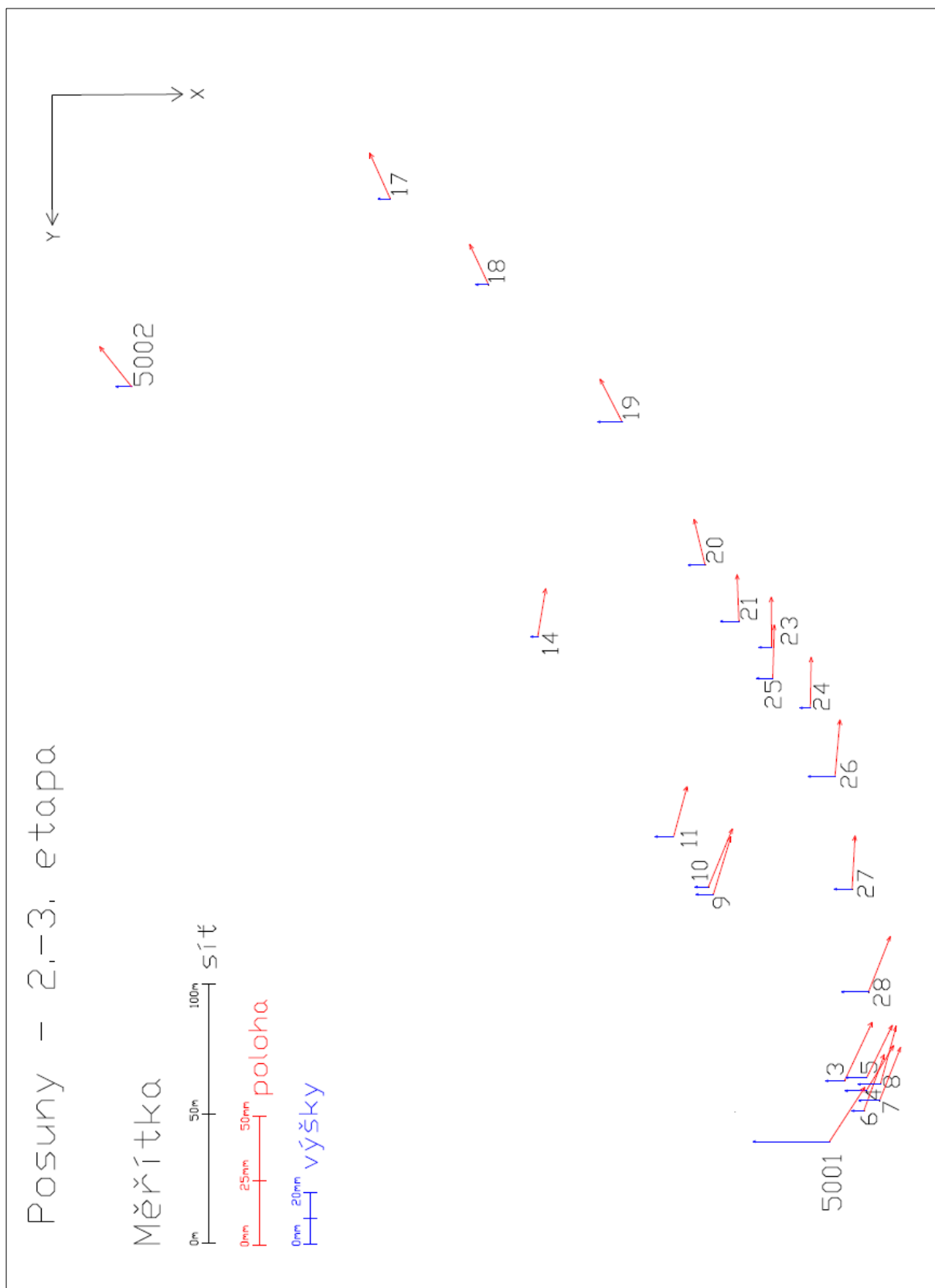


Obr. 34: Posuny bodů - 1. a 3. etapa

Tabulka 16: Porovnání posunů mezi 2. a 3. etapou

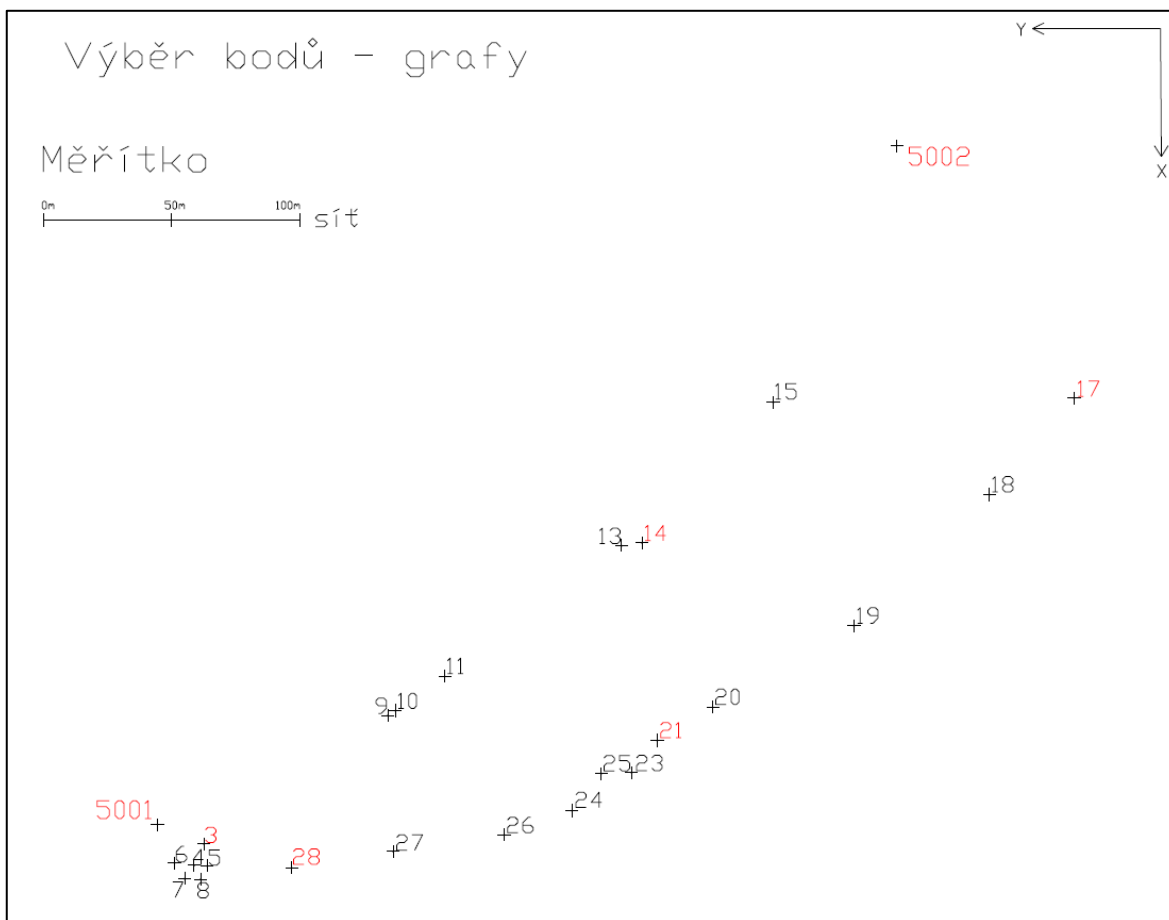
| Číslo bodu | σ_{XY} [mm] | $\Delta_{Mez_{XY}}$ [mm] | ΔXY [mm] | Posun v poloze | σ_Z [mm] | Δ_{Mez_Z} [mm] | ΔZ [mm] | Posun ve výšce |
|------------|--------------------|--------------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------|
| 3 | 2,1 | 4,3 | 25,0 | ANO | 4,2 | 8,4 | -7,2 | NE |
| 4 | 2,1 | 4,2 | 20,4 | ANO | 4,2 | 8,4 | -8,0 | NE |
| 5 | 2,1 | 4,1 | 22,5 | ANO | 4,2 | 8,4 | -8,0 | NE |
| 6 | 2,2 | 4,4 | 23,1 | ANO | 4,2 | 8,4 | -4,5 | NE |
| 7 | 2,1 | 4,2 | 22,0 | ANO | 4,2 | 8,4 | -8,0 | NE |
| 8 | 2,1 | 4,2 | 23,3 | ANO | 4,2 | 8,4 | -8,5 | ANO |
| 9 | 3,2 | 6,5 | 23,3 | ANO | 4,5 | 9,1 | -6,7 | NE |
| 10 | 3,2 | 6,5 | 24,2 | ANO | 4,5 | 9,1 | -5,1 | NE |
| 11 | 3,5 | 7,0 | 20,0 | ANO | 4,5 | 9,0 | -7,1 | NE |
| 14 | 3,5 | 7,1 | 18,7 | ANO | 4,7 | 9,4 | -2,7 | NE |
| 17 | 3,1 | 6,1 | 19,1 | ANO | 4,7 | 9,4 | -4,7 | NE |
| 18 | 3,1 | 6,2 | 17,1 | ANO | 4,9 | 9,8 | -4,8 | NE |
| 19 | 3,1 | 6,2 | 18,6 | ANO | 4,8 | 9,5 | -9,3 | NE |
| 20 | 3,3 | 6,7 | 18,2 | ANO | 5,0 | 10,0 | -6,5 | NE |
| 21 | 3,4 | 6,7 | 18,0 | ANO | 5,0 | 10,1 | -7,1 | NE |
| 23 | 3,4 | 6,7 | 19,3 | ANO | 5,0 | 10,0 | -4,8 | NE |
| 24 | 3,1 | 6,2 | 19,5 | ANO | 4,7 | 9,4 | -3,9 | NE |
| 25 | 3,3 | 6,6 | 20,5 | ANO | 4,9 | 9,7 | -6,1 | NE |
| 26 | 3,0 | 6,0 | 21,9 | ANO | 4,6 | 9,3 | -10,3 | ANO |
| 27 | 3,1 | 6,2 | 20,5 | ANO | 4,8 | 9,7 | -6,8 | NE |
| 28 | 2,9 | 5,9 | 23,0 | ANO | 4,6 | 9,2 | -10,3 | ANO |

V posledním porovnání druhé a třetí etapy (listopad 2017 a duben 2018) byly polohové posuny na všech bodech okolo 2 cm. Výškové posuny nebyly na většině bodech prokázány a u bodů, jejichž výškové rozdíly překročili mezní směrodatnou odchylku, překračovaly tuto hodnotu maximálně o několik desetin milimetru.

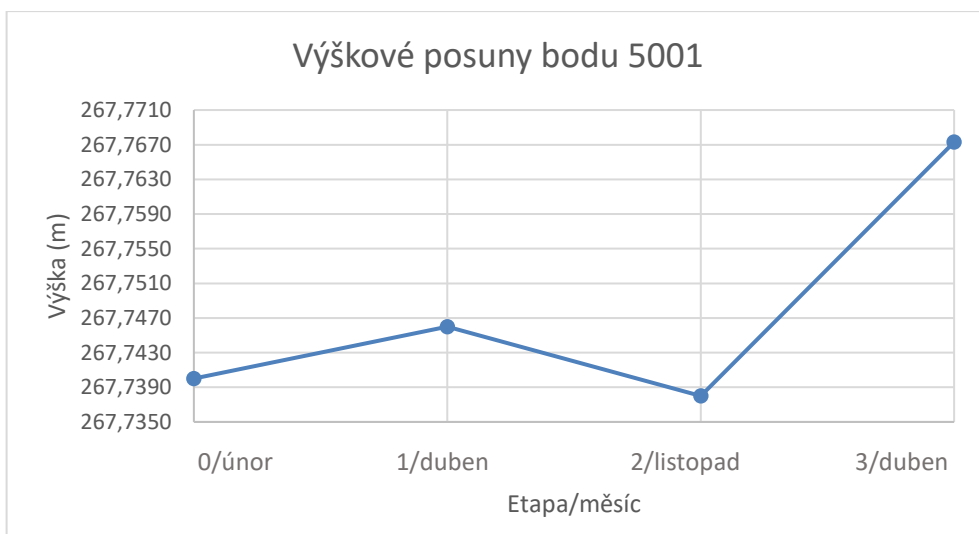


Obr. 35: Posuny bodů – 2. a 3. etapa

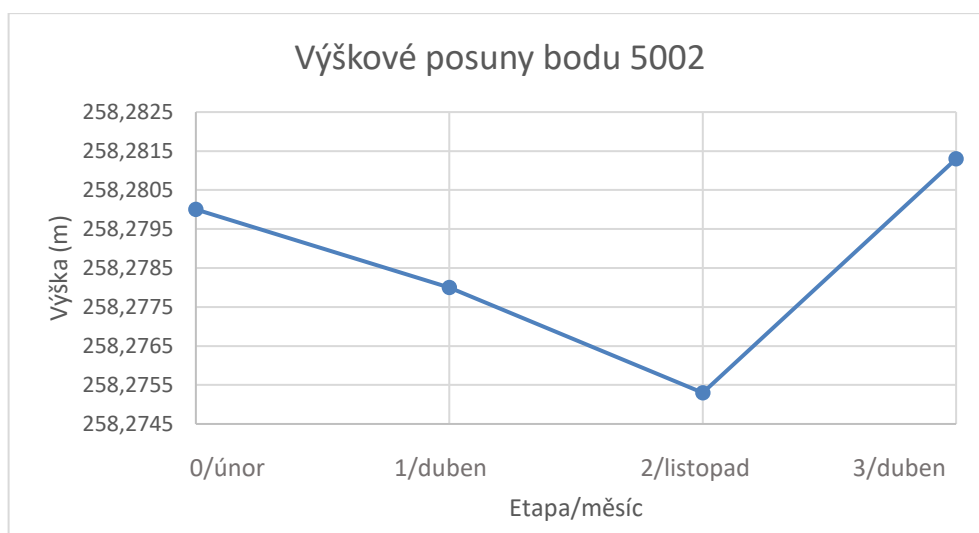
Pro zajímavost byly vytvořeny grafy souřadnicových posunů ve směru osy X, Y a Z pro body číslo 3, 14, 17, 21, 28, 5001 a 5002. Tyto body byly vybrány rovnoměrně po celém území v rámci monitorovací sítě (Obr. 36).



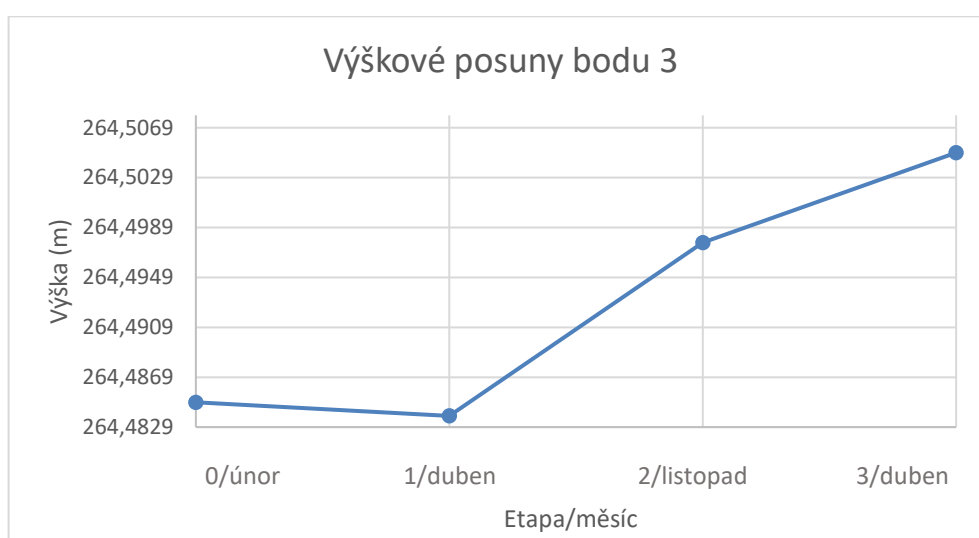
Obr. 36: Výběr bodů – grafy



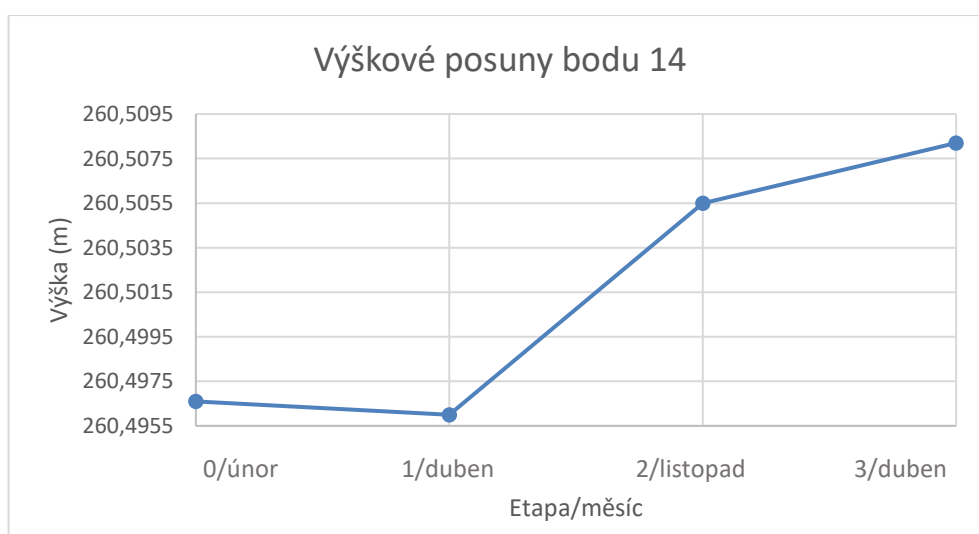
Obr. 37: Graf vývoje výšky na bodě 5001



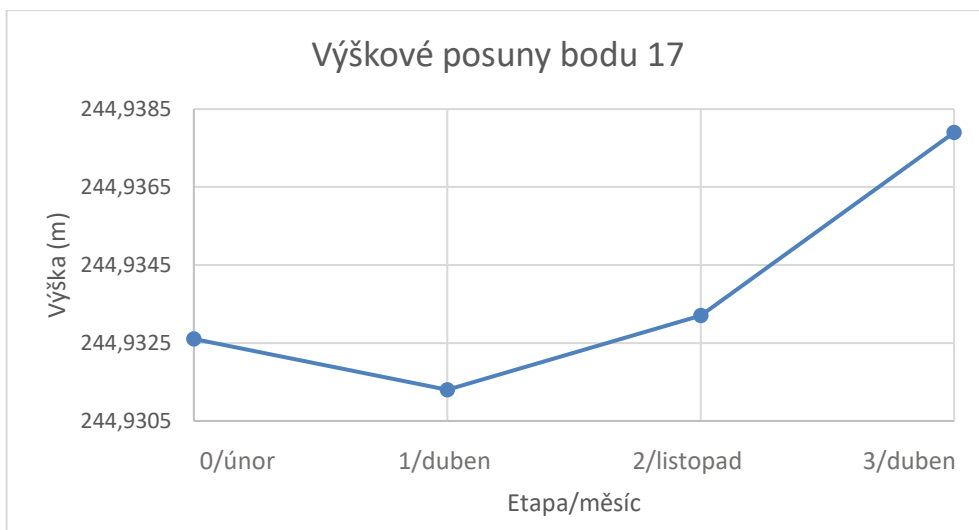
Obr. 38: Graf vývoje výšky na bodě 5002



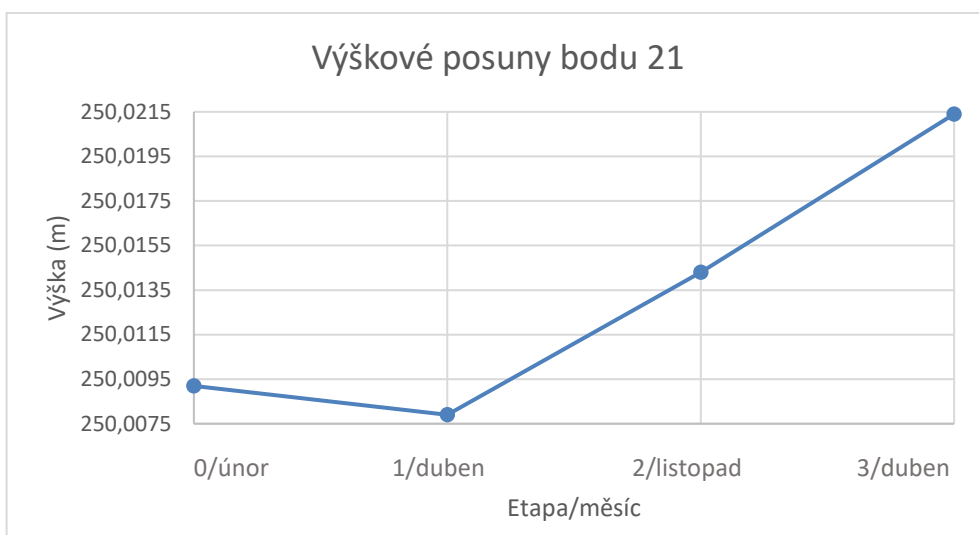
Obr. 39: Graf vývoje výšky na bodě 3



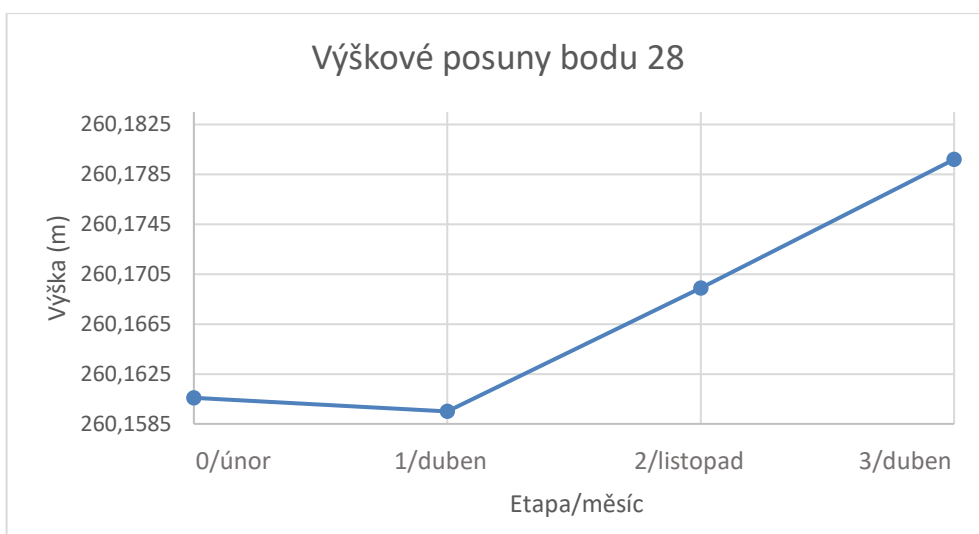
Obr. 40: Graf vývoje výšky na bodě 14



Obr. 41: Graf vývoje výšky na bodě 17



Obr. 42: Graf vývoje na bodě 21



Obr. 43: Graf vývoje výšky na bodě 28

Z těchto grafů (Obr. 37 až Obr. 43) lze vidět, že v období mezi únorem a dubnem mají výšky klesající tendenci pouze u bodu 5001 roste. V období dubna až listopadu výšky klesají pouze na bodech 5001 a 5002. V posledním období listopadu až dubna výšky rostou na všech bodech. Je možné, že zafixování souřadnic 5001 a 5002 při vyrovnání do jisté míry ovlivní posuny ostatních bodů. Jak je ale vidět v porovnání období duben-listopad, oba fixované body jsou klesající a ostatní výšky bodů přesto rostou. Z toho lze usoudit, že míra ovlivnění výpočtu souřadnic a výšek nefixovaných bodů není tak velká.

Další grafy pro porovnání vývoje ve směru osy X a Y jsou k nahlédnutí v příloze č. 2.

Polohové posuny byly až na pár výjimek potvrzeny v každém etapovém porovnání. Jejich hodnoty dosahují na některých bodech i více než 3 cm.

Obecně lze říci, že v rozmezí tří až pěti měsíců nedochází k výrazným výškovým posunům obzvlášť pokud jde o zimní období. V delších časových porovnání jsou potvrzeny výškové posuny maximálně do 2 cm. Zajímavé je, že z dlouhodobého hlediska výšky určených bodů rostou. I když je obecně známo, že je na jaře půda nadzvedávána stoupáním hladiny podzemní vody, která přes léto zase klesá, v případě výsledků této práce výšky rostou i v letních měsících. Tento jev by bylo dobré konzultovat s odborníkem na geologii obzvlášť z důvodu probíhajících stavebních prací okolo železnice a kontroly funkčnosti starých odvodňovacích zařízení v lokalitě.

10 Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo navázat na geodetický monitoring poblíž města Třebenice, v místě křížení železniční tratě Čížkovice – Obrnice s komunikací třetí třídy III/23756. V rámci práce byly tedy zaměřeny dvě etapy, které se po zpracování porovnávaly se dvěma převzatými etapami.

Samotnému měření předcházela rozbor přesnosti před měření, který ověřil přesnost vybraných metod a přístrojů. Rozbor byl vypočten pomocí programu PrecisPlanner. Výsledkem tohoto rozboru byly očekávané směrodatné odchylky souřadnic všech bodů.

Měření etap proběhlo v únoru, dubnu a listopadu roku 2017 a v dubnu roku 2018.

Všechny etapy byly měřeny trojpodstavcovou metodou z volných stanovisek. Polygonové pořady byly připojeny na body 5001 a 5002, na kterých byla v každé etapě měřena 24 hodinová observace statickou metodou GNSS.

Měření GNSS bylo zpracováno pomocí programu GPS Bernese v. 5.0 (výpočet souřadnic bodů v systému ITRF2000), dále transformační aplikací EUREF (transformace do systému ETRF89) a programem EasyTransform 2.3 do systému JTSK. Měření z totální stanice bylo zpracováno a vyrovnáno v programu EasyNet.

Z výsledných vyrovnaných souřadnic byly vypočteny souřadnicové rozdíly mezi etapami. Dále z vypočtených aposteriorních směrodatných odchylek souřadnic jednotlivých bodů byly vypočteny mezní směrodatné odchylky, se kterými byly porovnávány souřadnicové rozdíly. Sledovaných bodů bylo v nulté etapě 27, ale v důsledku stavebních prací okolo železnice bylo v 6 bodů zničeno.

Byly porovnávány všechny kombinace naměřených etap. Ve všech porovnáních byl potvrzen posun v poloze. Výškový posun byl potvrzen jen u porovnání jejichž etapy byly měřeny s odstupem více než pět měsíců.

Největší polohový i výškový posun byl zaznamenán v porovnání první a třetí etapy. Na bodě 24 má polohový posun hodnotu 3,22 cm, což je téměř pětkrát víc, než je jeho mezní směrodatná odchylka. Největší výškový posun byl zaznamenán na bodě 3 a má hodnotu 2,11 cm. Je tedy asi třikrát větší než jeho mezní směrodatná odchylka.

Ve všech porovnáních, kromě jednoho (porovnání 0. a 1. etapy), bylo prokázáno, že dochází ke stoupání místo ke klesání lokality. Tento jev by bylo dobré konzultovat s geologem. Z dosažených výsledků lze prohlásit, že území okolo železniční tratě a komunikace je stále nestabilní.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Balek, Jan, Marek, Tomáš, Kadlečík, Pavel. Historický a současný vývoj sesuvného území u Třebenic. Zprávy o geologických výzkumech. 2015, roč. 2014, podzim, s. 51-54. ISSN 0514-8057.
- [2] ZÁRUBA, Quido a Vojtěch MENCL. Inženýrská geologie. 3. dopl. vyd. Praha: Academia, 1974.
- [3] RYBÁŘ, J. (1983): Zpráva o podrobném inženýrskogeologickém výzkumu sesuvů u Třebenic na železniční trati Čížkovice–Obrnice. – Úst. geol. geotechn. ČSAV. Praha.
- [4] Ph.D., Ing. Jaroslav Braun. Diplomová práce – Geodetický monitoring sesuvného území. Bedihošť, 2011.
- [5] URBAN, Rudolf. Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05786-5.
- [6] PrecisPlanner 3D v3.1.0. [cit. 25.04.2018]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/PPlanner/Navod_PPanner_v3.1.pdf
- [7] Úvod do GNSS, Ing. Pavel Tesař, 2007 [online]. Dostupné z: <http://ftp://athena.fsv.cvut.cz/EMEG/uvodGNSS.pdf>
- [8] Technický popis totální stanice Trimble S6 [cit. 25.04.2018]. Dostupné z: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-218010/022543-098L-CZE_TrimbleS6_DS_0613_LR.pdf
- [9] Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR [online]. Copyright © 2012-2018 ÚSMH AV ČR, v.v.i. [cit.16.05.2018]. Dostupné z: <https://www.irsm.cas.cz>
- [10] Datový portál CzechGeo. [online]. Copyright 2011 - 2018 [cit.16.05.2018] Dostupné z: <http://www.czechgeo.cz/>
- [11] EUREF Permanent GNSS Network. EUREF Permanent GNSS Network [online]. Copyright © Copyright 2016 [cit. 16.05.2018]. Dostupné z: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/index.php

- [12] KOSTELECKÝ, Jan, Jaroslav KLOKOČNÍK a Jakub KOSTELECKÝ. Kosmická geodézie. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04059-1.
- [13] Easy Transform | Adjust Solutions. Adjust Solutions | Komplexní zpracování geodetických měření [online]. Copyright © 2016 [cit. 16.05.2018]. Dostupné z: <http://adjustsolutions.cz/easytransform/euref>
- [14] ČÚZK - Nová realizace systému ETRS89 v ČR. ČÚZK - Úvod [online]. Copyright © [cit.16.05.2018]. Dostupné z: <https://www.cuzk.cz/Zememerictvi/Geodeticke-zaklady-na-uzemi-CR/GNSS/Nova-realizace-systemu-ETRS89-v-CR.aspx>
- [15] EasyNET | Adjust Solutions. Adjust Solutions | Komplexní zpracování geodetických měření [online]. Copyright © 2016 [cit. 16.05.2018]. Dostupné z: <http://adjustsolutions.cz/easynet/>
- [16] HAMPACHER, Miroslav a Martin ŠTRONER. Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04900-6.
- [17] Ing. Jan Velíšek. Diplomová práce – Monitoring železniční tratě Čížkovice – Obrnice. Praha, 2017.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1: Mapa lokality Třeбенice (zdroj: http://geoportal.cuzk.cz) | 14 |
| Obr. 2: Přerušování drážního tělesa v úrovni křížení se silnicí (zdroj: Rybář, 1982) | 15 |
| Obr. 3: Deformace na trati (zdroj: Rybář, 1982) | 16 |
| Obr. 4: Opatření proti sesuvu z roku 1982 (zdroj:[1]) | 17 |
| Obr. 5: Trhlina na vozovce (2018)..... | 18 |
| Obr. 6: Trhlina u železničního přejezdu (2018)..... | 18 |
| Obr. 7: Schéma zaměřovaných bodů | 19 |
| Obr. 8: Vstup souřadnic GNSS | 23 |
| Obr. 9: Vstup souřadnic stanovisek | 23 |
| Obr. 10: Vstup souřadnic podrobných bodů | 23 |
| Obr. 11: Vstup měření | 23 |
| Obr. 12: Ukázka zadání přesnosti provázení a převýšení | 24 |
| Obr. 13: Hlavní okno programu PrecisPlanner | 24 |
| Obr. 14: Ukázka okna „Mapa souřadnic“ | 25 |
| Obr. 15: Ukázka okna „Mapa měření“ | 26 |
| Obr. 16: GNSS přijímače na stanoviskách (zleva 5001, 5002) | 28 |
| Obr. 17: Totální stanice Trimble S6 | 29 |
| Obr. 18: Hranol Trimble a minihranol Leica | 29 |
| Obr. 19: Rtuťový teploměr a tlakoměr Greisinger GTD1100 | 30 |
| Obr. 20: Aplikace EUREF | 34 |
| Obr. 21: Hlavní okno programu Easy Transform 2.3 | 35 |
| Obr. 22: Okno nastavení - Kontrola..... | 41 |
| Obr. 23: Nastavení redukce délek | 41 |
| Obr. 24: Nastavení apriorní analýzy sítě | 42 |
| Obr. 25: Nastavení vyrovnání sítě | 42 |
| Obr. 26: Informační okno o vyrovnání 2. etapy | 43 |
| Obr. 27: Chybové elipsy bodů z 2. etapy..... | 44 |
| Obr. 28: Informační okno o vyrovnání 3. etapy | 46 |
| Obr. 29: Chybové elipsy bodů z 3. etapy..... | 48 |
| Obr. 30: Posuny bodů – 0. a 1. etapa | 52 |
| Obr. 31: Posuny bodů – 0. a 2. etapa | 54 |
| Obr. 32: Posuny bodů – 0. a 3. etapa | 56 |

| | |
|---|----|
| Obr. 33: Posuny bodů – 1. a 2. etapa | 58 |
| Obr. 34: Posuny bodů – 1. a 3. etapa | 60 |
| Obr. 35: Posuny bodů – 2. a 3. etapa | 62 |
| Obr. 36: Výběr bodů – grafy..... | 63 |
| Obr. 37: Graf vývoje výšky na bodě 5001 | 63 |
| Obr. 38: Graf vývoje výšky na bodě 5002..... | 64 |
| Obr. 39: Graf vývoje výšky na bodě 3 | 64 |
| Obr. 40: Graf vývoje výšky na bodě 14..... | 64 |
| Obr. 41: Graf vývoje výšky na bodě 17..... | 65 |
| Obr. 42: Graf vývoje na bodě 21 | 65 |
| Obr. 43: Graf vývoje výšky na bodě 28..... | 65 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Směrodatné odchylky podrobných bodů a stanovisek | 27 |
| Tabulka 2: Hodnoty transformačního klíče z ČUZK..... | 36 |
| Tabulka 3: Souřadnice bodu 5001 | 36 |
| Tabulka 4: Souřadnice bodu 5002 | 37 |
| Tabulka 5: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 0. etapy | 39 |
| Tabulka 6: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 1. etapy | 40 |
| Tabulka 7: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 2. etapy | 45 |
| Tabulka 8: Vyrovnané souřadnice a směrodatné odchylky 3. etapy | 47 |
| Tabulka 9: Souřadnicové rozdíly na bodě 5001 | 49 |
| Tabulka 10: Souřadnicové rozdíly na bodě 5002 | 49 |
| Tabulka 11: Porovnání posunů mezi 0. a 1. etapou | 51 |
| Tabulka 12: Porovnání posunů mezi 0. a 2. etapou | 53 |
| Tabulka 13: Porovnání posunů mezi 0. a 3. etapou | 55 |
| Tabulka 14: Porovnání posunů mezi 1. a 2. etapou | 57 |
| Tabulka 15: Porovnání posunů mezi 1. a 3. etapou | 59 |
| Tabulka 16: Porovnání posunů mezi 2. a 3. etapou | 61 |

Seznam příloh

Tištěné přílohy:

1. Příloha č. 1: Místopisy bodů
2. Příloha č. 2: Vývojové grafy vybraných bodů
3. Příloha č. 3: Protokol o výpočtu 2. a 3. etapy vyrovnání z programu EasyNet

Digitální přílohy na CD:

1. Původní měřená data z TS pro obě etapy (mereni_list17.asc, mereni_dub18.txt)
2. Vstupy a výstupy z rozboru přesnosti před měřením (body_PP.txt, mereni_PP.txt, kovar_matice_PP.txt, sour_smer_odchylky_PP.txt, protokol_PP.txt)
3. Vstupy a výstupy z vyrovnání v programu EasyNet (projekt_list17.pen, protokol_list17.txt, projekt_dub18.pen, protokol_dub18.txt)
4. Diplomová práce (dp_mikulecka.pdf)