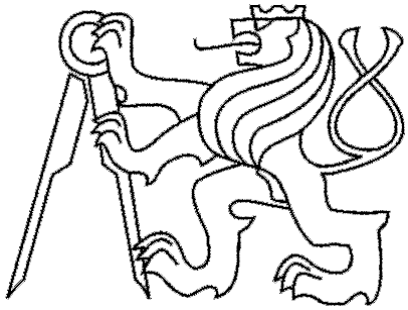
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra speciální geodézie



Určování excentricit hranolových sestav

Determining eccentricity of prism assemblies

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Kristýna Sobolová

2016

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Braun

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Sobolová Jméno: Kristýna Osobní číslo: 381451

Zadávající katedra: Katedra speciální geodézie

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Určování excentricit hranolových sestav

Název diplomové práce anglicky: Determining eccentricity of prism assemblies

Pokyny pro vypracování:
Navrhněte experiment pro určení excentricit geodetických pomůcek - trojnožek, trnů a hranolů. Proveďte testování vybraných trnů a hranolů a analyzujte výsledky.

Seznam doporučené literatury:
[1] Hampacher, M. - Štroner, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 2. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Jaroslav Braun

Datum zadání diplomové práce: 25. 2. 2016 Termín odevzdání diplomové práce: 20. 5. 2016

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".

25. 2. 2016
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, pouze s odborným dohledem vedoucího práce, Ing. Jaroslava Brauna.

Veškeré zdroje, ze kterých bylo při psaní této práce čerpáno, jsou uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební ČVUT v Praze.

V Praze, 22. 5. 2016 Bc. Kristýna Sobolová

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu této práce, Ing. Jaroslavu Braunovi, za cenné připomínky a odborné rady. Dále bych chtěla poděkovat vedoucímu Katedry speciální geodézie, doc. Ing. Martinu Štronerovi, Ph.D., za pomoc, kterou věnoval přípravě a realizaci této práce.

Velké poděkování patří slečně Bc. Lucii Císařové za spolupráci a vzájemnou výpomoc při měření a zpracování a své rodině a přátelům za trpělivost a podporu při celém studiu.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je navrhnout experiment pro určení excentricit geodetických pomůcek (trojnožek, trnů a hranolů), provést testování vybraných trnů a hranolů a analyzovat výsledky. Práce seznamuje s návrhem a ověřením měřické metody, určením měřické sítě, postupem měření a výpočtů a zpracováním těchto dat. Dále jsou zde mimo jiné popsány použité přístroje, pomůcky a softwary – program Precis Planner (k modelování navrhnuté konfigurace sítě a rozboru přesnosti před měřením) a program GNU Gama (k vyrovnání naměřených dat metodou nejmenších čtverců). Práce je doplněna fotografiemi testovaných geodetických pomůcek. Výsledkem diplomové práce jsou grafy pro jednotlivé trny a hranoly, které zobrazují zjištěné velikosti excentricit. V závěru práce jsou shrnuty získané poznatky.

Klíčová slova: excentricita, hranol, trn, vyrovnání, metoda nejmenších čtverců (MNČ).

Abstract

The goal of the diploma thesis is to propose an experiment in order to determine the eccentricity of geodetic accessories (tribrachs, carriers and prisms) and to test and analyse selected carriers and prisms. The work introduces the measurement proposal and its verification, the determination of geodetic network, the processed steps of measurements, calculations and the data processing. Additionally, there is a description of instruments, auxiliary tools and software - Precis Planner (for modelling the geodetic network configuration and the error propagation calculations), GNU Gama (for least squares adjustment method). Together with the text there are pictures of tested instruments. The outputs of this thesis are graphs of each carriers and prism showing the calculated eccentricity magnitude. In conclusion part there is a summary of acquired knowledge.

Key words: eccentricity, prism, carrier, adjustment, least squares method (LSM).

OBSAH

1 ÚVOD 10

2 SOUHRN EXPERIMENTŮ K TESTOVÁNÍ POMŮCEK 12

3 LABORATORNÍ SÍŤ 13

3.1 Orientační body měřické sítě a jejich stabilizace 14

3.2 Stabilizace stanovisek 16

3.3 Stabilizace bodu pro testované příslušenství 16

4 POUŽITÉ PŘÍSTROJE 17

4.1 Trimble S8 High Precision 17

4.2 Trimble S6 High Precision 18

4.3 Referenční hranol Leica RRR 1.5” 18

4.4 Teploměr a barometr 19

5 POUŽITÝ SOFTWARE 20

5.1 Precis Planner 20

5.2 GNU Gama 20

5.2.1 Princip vyrovnání metodou nejmenších čtverců 20

5.2.2 GNU Gama 23

6 NÁVRH MĚŘICKÉ METODY 24

6.1 Určení přesnosti měření 24

6.2 Zaměření sítě a obecné zásady měření 25

6.3 Zpracování měření a vyrovnání sítě 26

6.4 Výpočet aposteriorních směrodatných odchylek z vyrovnání 28

6.5 Modelování sítě a určení počtu opakování měření 28

6.6 Ověření navržené měřické metody 31
7 EXPERIMENTY 33
7.1 Určení upraveného počtu měření na referenční bod 33
7.2 Směrodatná odchylka měření 33
7.3 Testování vybraných trnů 33
7.3.1 Popis vybraných trnů 34
7.3.2 Popis měřického postupu 36
7.3.3 Výpočet naměřených výsledků 37
7.3.4 Kontrolní měření 38
7.4 Testování vybraných hranolů 39
7.4.1 Popis vybraných hranolů 40
7.4.2 Popis měřického postupu 42
7.4.3 Výpočet naměřených výsledků 43
8 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT 45
8.1 Grafy excentricit jednotlivých trnů 45
8.2 Grafy středů jednotlivých hranolů 49
9 ZÁVĚR 51
LITERATURA, ZDROJE 51
SEZNAM PŘÍLOH 54
SEZNAM PŘÍLOH NA PŘILOŽENÉM DVD 55
SEZNAM OBRÁZKŮ 56
SEZNAM GRAFŮ 57
SEZNAM TABULEK 58

PŘÍLOHY 59

1 ÚVOD

V rámci přesných geodetických měřeních jsou při měření posunů a přetvoření používány nucené centrace se speciálními pomůckami. Měří se stejnými přístroji a příslušenstvím (trojnožka, trn, hranol). Jsou používány trojnožky s jedním zalepeným stavěcím šroubem, takže po upevnění a horizontaci je přístroj ve stejné výšce. Na trojnožku se kreslí ryska, která se při utahování srovná s ryskou na hlavě pilíře a tím se zajistí, že je trojnožka utažená stejně jako v minulých měřických etapách. Všechna tato běžně používaná opatření mají za cíl maximálně eliminovat excentricitu pomůcek. Není ovšem známo, jak velká je velikost excentricity a jak velký vliv může mít při měření.

Cílem této práce je určit u vybraného geodetického příslušenství, které Katedra speciální geodézie nabízí, velikost excentricit a polohu středů vůči referenčnímu bodu. Přesnost určení by měla být přibližně $0{,}05\ mm$. Při znalosti velikosti excentricity je možno efektivněji plánovat přesnost měření, vybrat vhodné pomůcky a upravit postup měření pro maximální potlačení vlivu excentricity.

Autorka této práce úzce spolupracovala se slečnou Bc. Lucií Císařovou, návrh sítě, některé výpočty a samotné měření bylo prováděno dohromady. Bylo měřeno ze dvou stanovisek, kdy každá měřila jiným strojem současně z jiného stanoviska. Slečna Císařová ve své diplomové práci zpracovává excentricitu trojnožek a kompletních sad, autorka této práce zpracovává excentricitu trnů a odrazných hranolů.

Všechna měření v rámci této práce probíhala v geodetické sklepní laboratoři B028 Fakulty stavební na Českém vysokém učení technickém v Praze (dále jen „FSv ČVUT“).

V prvním kroku byl navrhnut experiment, kterým bude daná veličina (polohová změna souřadnic měřených pomůcek) určena a rozborem přesnosti před měřením (pomocí modelování sítě) byl určen počet měření. Pro experimentální měření byla vybudována místní laboratorní síť.

Ze dvou stanovisek, která byla pevně stabilizována na pilířích, byl zaměřován referenční bod na nucené centraci metodou protínání z orientovaných směrů, na nucenou centraci se postupně upevňovaly a proměřovaly dané geodetické pomůcky a určené souřadnice byly porovnávány se souřadnicemi referenčního bodu. Referenčním cílem byl hranol Leica RRR 1.5“. Každé měření začínalo určením orientačního posunu z měření na pevné body sítě.

Měření (orientační posuny) bylo vyrovnáno metodou nejmenších čtverců s fixními pevnými body sítě a stanovisky. Poté byly určovány souřadnicové rozdíly souřadnic X a Y a ty byly graficky vyneseny. Výškové změny nebyly sledovány. Měření a zpracování probíhalo v místní soustavě.

Výsledkem práce jsou pro vybrané pomůcky velikosti excentricit a grafické vyjádření polohy středu pomůcky vůči referenčnímu bodu.

2 SOUHRN EXPERIMENTŮ K TESTOVÁNÍ POMŮCEK

Během této práce a práce sl. Císařové byla zjišťována excentricita vybraných geodetických trnů, trojnožek, hranolů a kompletních sad.

Při testování trnů byla použita jedna vybraná referenční trojnožka a postupně byly zaměňovány různé typy trnů, kterými bylo otáčeno do 8 pozic (po 45°), ze kterých pak byla zjištěna excentricita. Bylo měřeno na referenční kulový hranol. Výsledkem je tvar a velikost excentricity pro každý trn.

Během testování trojnožek byla určena poloha středu nucené centrace (referenční bod) a byl vybrán jeden referenční trn, do kterého se vsadil kulový hranol. Trn byl vsazen do každé trojnožky a bylo s ním otáčeno do 4 pozic (po 90°) k určení excentricity. Výsledkem jsou středy měřených trojnožek jako průměr měřených pozic.

Pro testování hranolů byla určena referenční trojnožka a trn a při měření se měnil jen hranol, jehož souřadnice se porovnávaly se souřadnicemi kulového hranolu umístěného též na referenčním trnu. Trnem a hranoly bylo opět otáčeno do 4 pozic (po 90°) a byl určen střed hranolu jako průměr těchto pozic. Výsledné rozdíly charakterizují rozdíly pouze mezi hranoly a ne excentricitu vůči správnému bodu (na celkové poloze se podílí excentricita trojnožky i trnu).

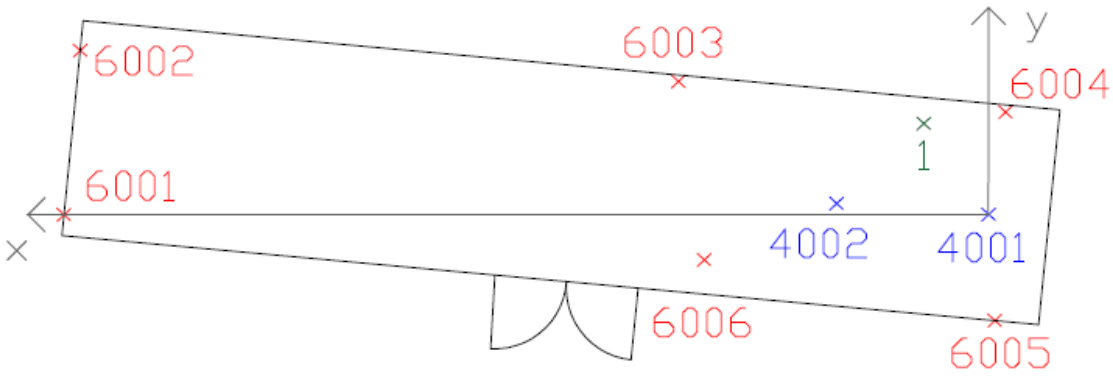
Posledním testováním, které autorka práce se sl. Císařovou prováděla, bylo testování kompletních sad (trojnožka + trn + hranol). V některých případech probíhalo otáčení trnem o 90° a v některých případech to nebylo možné a sada byla zaměřena jen v jedné pozici (jednalo se o trny, kterými nešlo otáček). Excentricita středu kompletní sady byla dána rozdílem od kulového hranolu umístěného na nucené centraci.

3 LABORATORNÍ SÍŤ

Všechna měření probíhala v geodetické laboratoři – místnost č. 028 v suterénu budovy B na FSv ČVUT v Praze. Nachází se zde délková základna s 16 betonovými pilíři s nucenými centracemi v jedné řadě (Obr. 1), interferometrická základna a mnoho dalších přístrojů k měření. V laboratoři je celoročně udržována teplota kolem 20 °C.

Obr. 1: Fotografie laboratoře B 208: a) fotografie směrem od stanoviska 4001, b) fotografie směrem od vstupních dveří

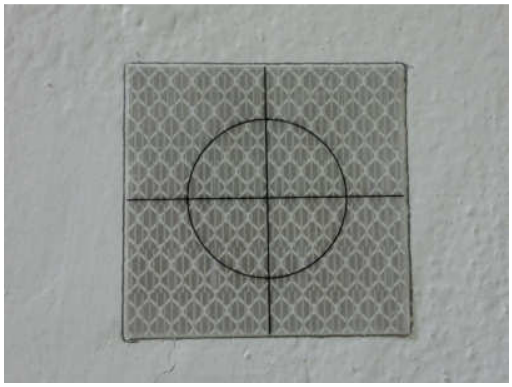
V laboratoři byla provedena stabilizace orientačních bodů sítě odraznými štítky (č. b. 6001 - 6006). Dva pilíře s nucenými centracemi byly využity pro stanoviska (č. b. 4001 a 4002). Na nosníku interferometrické základny byla stabilizována nucená centrace pro testované příslušenství – č. b. 1 (Obr. 2).



Obr. 2: Schéma laboratorní sítě

3.1 Orientační body měřické sítě a jejich stabilizace

Ještě před samotným měřením byla stabilizována síť pevných bodů, jednalo se o šest odrazných štítků (č. bodů 6001- 6006), nalepených na zdi laboratoře (Obr. 3). Štítky jsou čtvercového tvaru o rozměru 6 *cm* x 6 *cm* a jsou nalepeny na zdi laboratoře přibližně ve výšce 2 *m* (Obr. 4).



Obr. 3: Fotografie odrazného štítku bodu měřické sítě

Obr. 4: Fotografie bodů pevné měřické sítě: a) bod 4001, b) bod 4002, c) bod 4003, d) bod 4004, e) bod 4005, f) bod 4006

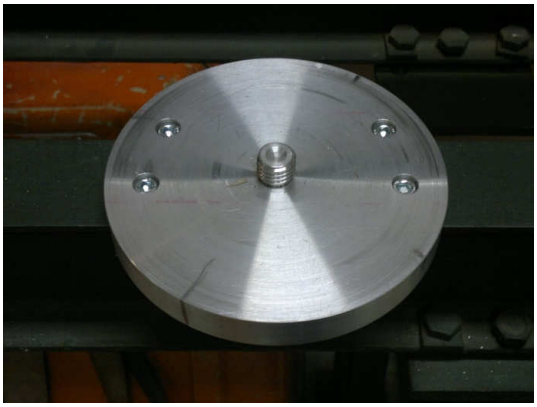
3.2 Stabilizace stanovisek

Stanoviska (body č. 4001 a 4002) byly body nucené centrace na dvou vybraných pilířích délkové základny (Obr. 5). Výška pilíře je $0{,}9\,m$ a velikost čtvercových hlav je $0{,}35\,m$ x $0{,}35\,m$.

Obr. 5: Fotografie stabilizace stanoviska

3.3 Stabilizace bodu pro testované příslušenství

Na bodě č. 1 byly proměřovány všechny pomůcky i samotný referenční kulový hranol, od jehož souřadnic se určovaly výsledné velikosti excentricit. Jedná se o nucenou centraci na interferometrické základně, podobnou jako u stanovisek. Ve středu upínacího šroubu je vysoustružený důlek pro umístění kulového hranolu (Obr. 6).



Obr. 6: Fotografie stabilizace nucené centrace pro testované příslušenství

4 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

Síť i určované body byly měřeny vždy současně ze dvou stanovisek, a to přístroji Trimble S8 High Precision a Trimble S6 High Precision. Jako referenční hranol byl použit velmi přesný kulový hranol Leica Red – Ring Reflector (RRR) 1.5”.

Data byla registrována do paměti přístroje a po měření přímo stáhnuta na USB disk ve formátu s příponou .txt. Všechny přístroje a pomůcky byly zapůjčeny od Katedry speciální geodézie na FSv ČVUT v Praze.

4.1 Trimble S8 High Precision

Tímto přístrojem měřila autorka práce, jednalo se o měření z levého stanoviska, č. 4002 – viz kap. 3. Byla použita totální stanice Trimble S8 High Precision (výrobní číslo: 98111872), (Obr. 7).

Obr. 7: a) Totální stanice Trimble S8 High Precision [1] , b) Totální stanice Trimble S8 High Precision na pilíři

Jedná se o motorizovanou totální stanici pro přesná měření ve stavebnictví a průmyslu, směrodatná odchylka měření vodorovného směru, zenitového úhlu a měřené délky je [1]:

$$\sigma_{\psi} = \sigma_z = 0{,}3\ mgon,$$

$$\sigma_{\mathrm{d}} = 0{,}8\ mm + 1\ ppm.$$

4.2 Trimble S6 High Precision

Přístrojem Trimble S6 High Precision (Obr. 8) bylo měřeno z druhého stanoviska, č. b. 4001 – viz kap. 3. Byla použita totální stanice Trimble S6 High Precision (výrobní číslo: 92120086).

Jedná se o motorizovanou totální stanici pro přesná měření ve stavebnictví a průmyslu, směrodatná odchylka měření vodorovného směru, zenitového úhlu a měřené délky je [1]:

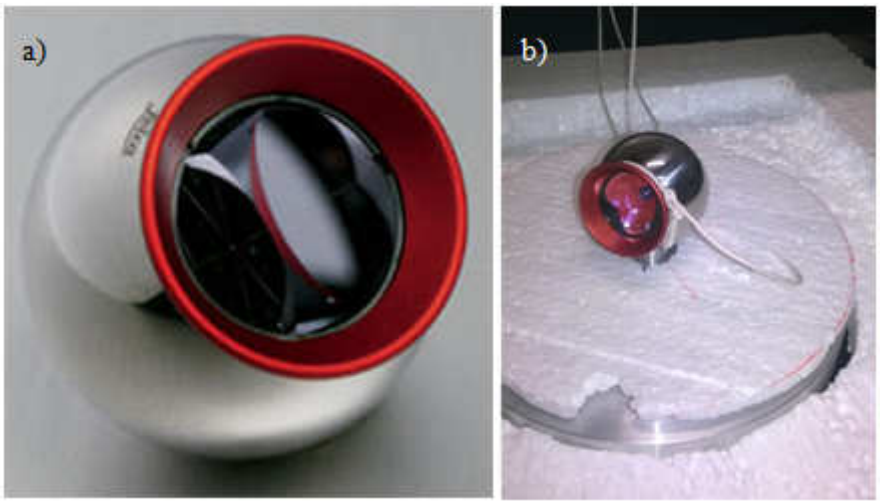
$$\sigma_{\psi} = \sigma_z = 0{,}3\ mgon,$$

$$\sigma_{\mathrm{d}} = 1\ mm + 1\ ppm.$$

Obr. 8: a) Totální stanice Trimble S6 High Precision [1], b) Totální stanice Trimble S6 High Precision na pilíři

4.3 Referenční hranol Leica RRR 1.5”

K určení souřadnic nucené centrace na interferometrické základně a testovaných příslušenství byl jako referenční cíl použit kulový hranol Leica Red – Ring Reflector (RRR) 1.5” (Obr. 9), který je vyroben z kalené ocele a má tvar koule o poloměr $19{,}05\ mm \pm 0{,}0025\ mm$. Jedná se o velmi přesně vyrobenou kouli s přesně osazenými odraznými plochami ($\pm 0{,}003 mm$) a se součtovou konstantou $0{,}000\ mm \pm 0{,}003\ mm$ [2]. Byl použit hranol s výrobním číslem 12318.



Obr. 9: a) Referenční kulový hranol [2], b) Referenční hranol na nucené centraci v laboratoři

4.4 Teploměr a barometr

K měření teploty a tlaku v laboratoři byl použit teploměr GFTH 95 a barometr GPB 2300. Měřené hodnoty byly ukládány přímo do přístroje k určení fyzikálních korekcí.

Obr. 10: a) Barometr GPB 2300, b) Teploměr GFTH 95

5 POUŽITÝ SOFTWARE

5.1 Precis Planner

K určení požadované přesnosti měření byl použit program Precis Planner 3D (verze Precis Planner 3.3), ve kterém byl proveden rozbor přesnosti před měřením pomocí modelování.

Volně dostupný program PrecisPlanner 3D umožňuje na základě přibližných souřadnic definujících konfiguraci měření, výběru měřených veličin a jejich směrodatných odchylek určit přesnost výsledných souřadnic včetně kovarianční matice umožňující další výpočty přesnosti odvozených veličin (např. délky, úhlu apod.) [3]. Kovarianční matice byla použita pro zhodnocení vhodnosti návrhu sítě a určení počtu opakování. Bližší informace lze nalézt v [4].

5.2 GNU Gama

5.2.1 Princip vyrovnání metodou nejmenších čtverců

Měřená data byla vyrovnána softwarem GNU Gama pomocí metody nejmenších čtverců, kdy dochází k minimalizaci sumy čtverců oprav a hledá se nejspolehlivější hodnota neznámých parametrů a jejich směrodatné odchylky. K vyrovnání dochází ve chvíli, kdy máme nadbytečná měření (tzn. Počet měření je větší než nutný počet měření). Můžeme tak sestavit více rovnic, než je neznámých.

Cílem měření bylo určit souřadnice X a Y pomocí měření vodorovných směrů a z těchto souřadnic určit souřadnicové rozdíly. Jedná se tedy o vyrovnání zprostředkujících měření.

Podmínku metody nejmenších čtverců, kdy dochází k minimalizaci sumy čtverců oprav, můžeme matematicky vyjádřit následujícím vzorcem:

$$\Omega = \left[\hat{v}\hat{v}\right] = [pvv] = v^T P\, v = min, \qquad (1)$$

kde: $\hat{v} = v/\sigma \ldots$ tzv. normovaná oprava,

$P \ldots$ váha,

σ… příslušná směrodatná odchylka měření,

v… oprava (rozdíl mezi měřenou a vyrovnanou hodnotou).

Váhy měření jsou čísla, která kvalitativně hodnotí dosažený výsledek měření. Jsou nepřímo úměrná kvadrátu směrodatné odchylky. V tomto případě jsou váhy zadávány pomocí směrodatných odchylek jednotlivých měřených veličin, vstupujících do vyrovnání – jejich výpočet viz dále.

Nejprve dochází k výpočtu vektoru redukovaného měření:

$$l´ = \bar{l}\,(x_0^T) - l, \tag{2}$$

kde: $l´$… vektor redukovaného měření,

$\bar{l}\,(x_0^T)$… měření s přibližnými hodnotami parametrů (apriorní hodnoty x_0 volíme tak, aby se v rovnicích oprav neuplatnily členy druhého a vyšších řádů),

l… měřené veličiny (vektor vstupních hodnot).

Tento výpočet pak vede na soustavu tzv. normálních rovnic, jejichž řešení zapisujeme ve tvaru:

$$dx = -(A^T\,P\,A)^{-1}\,A^T\,P\,l´, \tag{3}$$

kde: dx… přírůstky,

A… matice plánu (matice parciálních derivací funkčních vztahů podle hledaných parametrů),

P… matice vah.

Určení hledaných neznámých parametrů z vyrovnaných přírůstků dle vztahu:

$$x = x_0 + dx. \tag{4}$$

Dále jsou vypočteny opravy a z nich hodnoty vyrovnaných veličin:

$$v = A\,dx + l´, \tag{5}$$

$$\bar{l} = l + v. \tag{6}$$

Kontrolou výpočtu vyrovnání je dvojí výpočet oprav:

$$v^I = A\,dx + l\,, \tag{7}$$

$$v^{II} = \bar{l}(x^T) - l. \tag{8}$$

Jestliže se sobě dva výpočty oprav nerovnají ($v^I \neq v^{II}$), pravděpodobně došlo k chybě v linearizaci, nebo k chybnému připojení přírůstků $x = x_0 + dx$.

Posledním krokem je výpočet charakteristik přesnosti, a to směrodatné odchylky vyrovnaných neznámých parametrů a směrodatné odchylky vyrovnaného měření. Tyto vztahy se určují ze známé apriorní směrodatné odchylky nebo z vypočtené aposteriorní směrodatné odchylky, tzv. směrodatné odchylky jednotkové:

$$\mathrm{s_0} = \sqrt{\frac{\mathrm{v^T\,P\,v}}{\mathrm{n-k}}}, \tag{9}$$

kde: $\mathrm{n-k}$ … počet nadbytečných měření.

Střední chyba vyrovnaných neznámých:

$$s_x = s_0 \sqrt{diag(\,Q)}, \tag{10}$$

kde: Q… kovarianční matice vyrovnaných neznámých:

$$Q = (A^T\,P\,A)^{-1}. \tag{11}$$

Směrodatné odchylky vyrovnaného měření:

$$s_{\bar{l}} = s_0 \sqrt{diag(\,\tilde{Q})}, \tag{12}$$

kde: $\tilde{Q}$… kovarianční matice vyrovnaného měření:

$$\tilde{Q} = A\,(A^T\,P\,A)^{-1}\,A^T. \tag{13}$$

V této kapitole bylo čerpáno ze zdrojů [5], [6] a [7].

5.2.2 GNU Gama

GNU Gama je projekt věnovaný vyrovnání geodetických volných sítí, je napsán v programovacím jazyce C++ a v současnosti podporuje pouze vyrovnání v lokální kartézské soustavě (program Gama-local), vyrovnání v geocentrickém souřadném systému je součástí nové vývojové větve (program Gama-g3) [8].

Projekt je volně šiřitelný, včetně zdrojových kódů, pod licencí GNU General Public Licence (GPL). U zrodu tohoto projektu stál prof. Ing. Aleš Čepek, CSc. Z Katedry geomatiky na FSv ČVUT v Praze [9].

K vyrovnání sítě v této práci byl použit program Gama-local (verze Gama-local 1.7.09), který funguje pod operačním systémem Linux i Windows. Spouští se pomocí příkazového řádku. Vstupní skript byl psán v Poznámkovém bloku, ve formálu s příponou .xml. Výstup byl ve formátu s příponou .txt.

Vstupní soubor do programu GNU Gama obsahuje popis, čísla a souřadnice známých bodů (body sítě a stanoviska), čísla určovaných bodů, měření z jednotlivých stanovisek na určované body – druh veličiny (vodorovný směr označen jako „dir“), číslo bodu, měřená hodnota a směrodatná odchylka měřené hodnoty (označeno jako „stdev“).

Výstupní skript z programu GNU Gama obsahuje popis, základní parametry vyrovnání (počet měřených veličin, počet souřadnic, směrodatnou aposteriorní a apriorní odchylku), vyrovnané souřadnice i se směrodatnými odchylkami, orientační posuny ze všech stanovisek, směrodatné odchylky a parametry elips chyb, vyrovnaná pozorování, opravu a analýzu pozorování, odlehlá pozorování a ověření normálního rozdělení homogenizovaných oprav.

6 NÁVRH MĚŘICKÉ METODY

6.1 Určení přesnosti měření

Prvním krokem byl výběr funkce měření a cílení. Oba přístroje mají funkci AutoLock, kdy přístroj sám automaticky vyhledá a zaměří střed hranolu. Součástí experimentu bylo tedy zjištění přesnosti této funkce a její porovnání s přesností ručního cílení.

Experiment byl proveden z pilířů laboratorní základny. Postavení přístrojů a cíle odpovídalo pozdějšímu testovacímu měření. Počet opakování měření na referenční hranol byl zvolen 51.

Počet opakovaného měření byl stanoven na základě úvahy o hodnotě směrodatné odchylky výběrové směrodatné odchylky měřeného parametru (s_s). Základní podmínka byla zvolena tak, že směrodatná odchylka (s_s) smí nabývat maximálně 10% hodnoty směrodatné odchylky s:

$$s_s = \frac{s}{\sqrt{2\,(n-1)}} = 0{,}1 \cdot s \rightarrow n = 51, \tag{14}$$

kde: $s\ldots$ výběrová směrodatná odchylka,

$n\ldots$ počet měření.

Nejprve bylo testováno ruční cílení. Z každého stanoviska byl hranol zaměřen 51x v obou polohách dalekohledu. Při měření první skupiny byl hranol natáčen přesně (tak, aby měřič v dalekohledu viděl symetricky kruh obvod hranolu a kruh na nitkovém kříži). Před každou další skupinou figurant natočil přibližně hranol znovu na měřiče, při natáčení střídal ruce (kvůli paměti velikosti úhlu, o který hranol natáčel). Měření probíhalo tak, že nejprve bylo zaměřeno z jednoho stanoviska všech 51 skupin a pak stejný počet skupin ze stanoviska druhého.

Druhou testovanou metodou bylo automatické měření pomocí funkce Autolock.. Nejprve byl hranol přesně natočen figurantem a poté byla spuštěna funkce Autolock. Mezi každou skupinou byl hranol opětovně natáčen k přístroji (opět se střídaly ruce při otáčení hranolem mezi 51 skupinami).. Stejně jako při

prvním experimentu bylo měřeno z každého stanoviska v 51 skupinách, nejprve z jednoho a pak z druhého stanoviska.

Z těchto dat byla vypočtena výběrová směrodatná odchylka s dle vzorce:

$$s = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}}, \tag{15}$$

kde: $v\ldots$ oprava od průměru,

$n-1\ldots$ počet nadbytečných měření.

Vypočtené velikosti výběrových směrodatných odchylek, které charakterizují přesnost cílení obou strojů a měřičů – viz Tab. 1.

Tab. 1: Výběrové směrodatné odchylky měření z testu porovnání metod cílení

	ruční cílení		automatické cílení	
	Trimble S6	Trimble S8	Trimble S6	Trimble S8
vodorovný směr $s_{Hz}\ [mgon]$	0,68	0,97	0,70	0,51
zenitový úhel $s_Z\ [mgon]$	0,92	1,07	0,54	0,46
šikmá délka $s_{Sd}\ [mm]$	0,3	0,2	0,2	0,2

Z výše uvedených výsledků je patrné, že přesnost měření vodorovných směrů u obou metod je sice rozdílná, ale u obou metod je vyhovující plánovanému experimentu. Časová náročnost byla také obdobná pro obě metody cílení. Z tohoto důvodu byla vybrána metoda, která byla pro měřičky příjemnější a intuitivnější. Všechna další měření tak probíhala s natáčením hranolu, kdy se figurant snažil natočit hranol co nejpřesněji a ručním cílením. Funkce Autolock nebyla během měření už dále využívána.

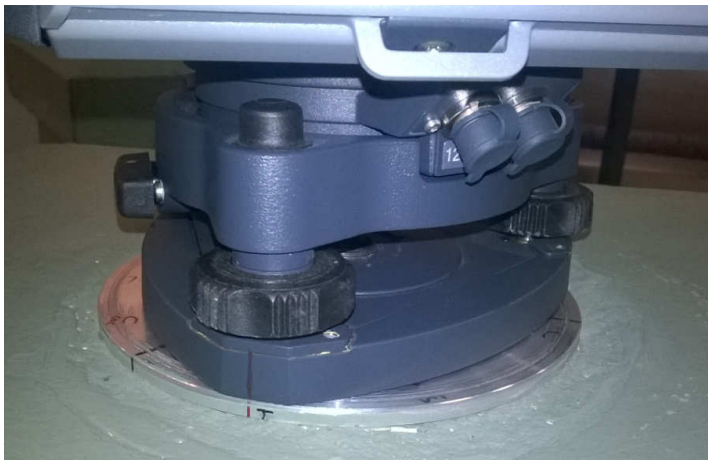
Více – viz Elektron. příloha č. 1: Zápisník z měření k porovnání metod a výpočet směrodatných odchylek.

6.2 Zaměření sítě a obecné zásady měření

Dne 20. 4. 2015 došlo k zaměření pevných bodů sítě. Bylo měřeno přístrojem Trimble S6 ze stanoviska 4001 a zároveň přístrojem Trimble S8 ze stanoviska 4002. Z obou stanovisek se paralelně zaměřila osnova na orientační body sítě (č. b. 6001 -

6006). Bylo měřeno v 10ti skupinách – měřena byla šikmá délka, zenitový úhel a vodorovný směr, v každé skupině nejprve I. poloha na všechny body a pak II. poloha.

Během určení sítě byly dodržovány stejné zásady jako při dalších měřeních. Byla měřena teplota a tlak. Trojnožka byla při každém měření utažena stejně, to bylo zajištěno ryskou na hlavě pilíře a na stavěcím šroubu přístroje – viz Obr. 11.



Obr. 11: Utažení trojnožky na rysku

6.3 Zpracování měření a vyrovnání sítě

U naměřených dat došlo ke kontrole úplnosti a správnosti naměřených dat a k výpočtu zápisníku – zprůměrování vodorovného směru ze dvou poloh, oprava zenitového úhlu o indexovou chybu a zprůměrování šikmé délky. Z deseti skupin byly vypočteny průměry měřených veličin na každý bod a byly určeny výběrové směrodatné odchylky (rovnice 15). Z dvanácti směrodatných odchylek pro jednu veličinu (6 bodů, 2 přístroje) byla určena průměrná směrodatná odchylka, která vstupovala do programu GNU Gama jako přesnost měřených veličin při vyrovnání měřické sítě:

$$s_{Hz} = 0{,}7\ mgon,$$

$$s_z = 0{,}9\ mgon,$$

$$s_{Sd} = 1{,}0\ mm.$$

Výběrová směrodatná odchylka šikmé délky z opakování s_{Sd} byla vypočtena jako velmi malá hodnota ($\sim 0{,}1\ mm$), ale vzhledem k známé přesnosti přístroje nebyla tato hodnota vypovídající a bylo tak počítáno s hodnotou výše uvedenou.

Více – viz Elektron. příloha č. 2: Zápisník z měření měřické sítě a výpočet směrodatných odchylek z opakování a z vyrovnání.

Vyrovnání sítě proběhlo pomocí metody nejmenších čtverců v programu GNU Gama – popis viz kap. 5.2.2. Do programu vstupují zprůměrované měřené hodnoty (vodorovný směr, zenitový úhel a šikmá délka) a souřadnice stanovisek v místní soustavě: 4001 $[5000{,}000;\ 1000{,}000;\ 100{,}000]$, 6001 $[5000 + d_{4001-4002};\ 1000;\ 100 + dh_{4001-4002}]$ = $[5024{,}613;\ 1000{,}000;\ 101{,}098]$, schéma sítě viz Obr. 2. Počet vodorovných směrů byl 120, počet zenitových úhlů 120, počet šikmých délek 120. Počet neznámých byl 44 (souřadnice osmi bodů a dva orientační posuny v deseti skupinách), počet nadbytečných měření byl 320.

Po vyrovnání byla porovnána dosažená aposteriorní směrodatná odchylka ($\sigma_{aposter}$) s mezní aposteriorní směrodatnou odchylkou ($\sigma_{aposter_M}$) vypočtenou dle vzorce:

Po vyrovnání byla porovnána dosažená aposteriorní směrodatná odchylka ($\sigma_{aposter}$) s mezní aposteriorní směrodatnou odchylkou ($\sigma_{aposter_M}$) vypočtenou dle vzorce:

$$\sigma_{aposter_M} = \sigma_{apriori}\left(1 + \sqrt{\frac{2}{n´}}\right), \tag{16}$$

kde: $\sigma_{apriori}$… volená apriorní směrodatná odchylka (v tomto případě $\sigma_{apriori} = 1$),

$n´$… počet nadbytečných měření.

Po prvním vyrovnání (bez vylučování odlehlých hodnot) byla hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 0{,}96$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter_M} = 1{,}08$. Jelikož platí vztah:

$$\sigma_{aposter} \leq \sigma_{aposter_M} \tag{17}$$

a zároveň všechny opravy splňují vztah:

$$v_i \leq u \,.\, s\,, \tag{18}$$

kde: v_i… oprava pro i-tý vodorovný směr, zenitový úhel či délku,

u… koeficient spolehlivosti ($u = 2{,}5$),

s … výběrová směrodatná odchylka určena z opakování pro směr či délku - jejich výpočet a hodnoty viz vzorec výše (15) a kap. 6.3.

Nedošlo k vylučování žádných měření a vyrovnané souřadnice bodů č. 6001 – 6006, 4001 a 4002 byly použity při každém dalším měření pro určení orientačního posunu a jako souřadnice stanovisek.

Více – viz Elektron. příloha č. 3: Vstupní a výstupní skript do GNU Gama k vyrovnání měřické sítě.

6.4 Výpočet aposteriorních směrodatných odchylek z vyrovnání

Z protokolu vyrovnání byly převzaty opravy měřených veličin a byl proveden výpočet výběrových směrodatných odchylek dle (15). Výsledné odchylky byly použity pro další výpočty a měření - vstupovaly jako přesnosti vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek do všech následujících vyrovnání v GNU Gama a do modelování sítě v Precis Planneru. Byly vypočteny tyto hodnoty:

$$s_{Hz} = 0{,}6\ mgon,$$

$$s_z = 0{,}9\ mgon,$$

$$s_{Sd} = 1{,}0\ mm.$$

6.5 Modelování sítě a určení počtu opakování měření

K modelování sítě byl použit software Precis Planer – jeho popis viz kap. 5.1. Do programu vstupují souřadnice bodů měřické sítě (č. b. 6001 – 6006) a souřadnice stanovisek (č. b. 4001 a 4002) – tyto souřadnice byly vypočteny z vyrovnání měření sítě – viz kap. 6.3. Zároveň k jednotlivým bodům vstupuje směrodatná souřadnicová odchylka daných souřadnic (m_{xy}), která byla vypočtena softwarem GNU Gama

a pohybuje se v rozmezí $0{,}1\ mm - 0{,}2\ mm$, tato směrodatná souřadnicová odchylka je uvedena jen u bodů měřické sítě, u stanovisek je její hodnota zadána jako $0{,}0\ mm$. Také byly nahrány souřadnice určovaného bodu (č. b. 1), které byly určeny z délkového protínání v softwaru Groma (při zaměření sítě byl zaměřen z obou stanovisek i určovaný bod, na který se umístil referenční hranol).

V grafickém prostředí softwaru se přidávají měření – bylo sem vložené měření vodorovných směrů na všechny body měřické sítě a na určovaný bod z obou stanovisek. Jako přesnosti měřeného vodorovného směru zde vstupovala směrodatná odchylka určena z oprav z vyrovnání – viz kap 6.4.

Bylo provedeno modelování více variant sítě. Kombinovaly se možnosti, kdy byly stanoviska a orientační body vždy zadány jako fixní (mají vždy stejné souřadnice a z měření na síť se určuje jen pouze orientační posun), nebo stanoviska byla volná (z měření na fixní body sítě se protínáním zpět určují nejprve souřadnice stanoviska a poté orientační posun). Zároveň se zde kombinoval různý počet měření na měřickou síť a na určovaný referenční bod. Varianta, která byla vybrána, je popsána níže. Při modelování byl uvažován referenční bod dvakrát (označován jako 1 a 2) se stejnými souřadnicemi, aby model přesně vystihoval situaci, kdy se určují souřadnicové rozdíly mezi těmito dvěma body.

Více – viz Příloha č. 1: Vstupní souřadnice do Precis Planeru k modelování sítě a Elektron. příloha č. 4: Schéma měřické sítě, Kompletní vstupní a výstupní data do Precis Planeru.Výsledkem modelování je kovarianční matice souřadnic dvakrát určeného referenčního bodu (1 a 2). Z této kovarianční matice (M_X), která popisuje přesnost určení souřadnic X, Y, Z určovaných bodů, se pomocí zákona hromadění směrodatných odchylek vypočetla směrodatná odchylka rozdílu mezi body 1 a 2 ($\sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}, \sigma_{\Delta Z}$) dle následujících vztahů:

$$(\sigma_{\Delta X} \quad \sigma_{\Delta Y} \quad \sigma_{\Delta Z}) = \sqrt{diag\ (M_\Delta)}, \tag{19}$$

$$M_\Delta = F^T \,.\, M_X \,.F\ , \tag{20}$$

kde: $M_\Delta \ldots$ kovarinační matice rozdílu souřadnic,

$F \ldots$ matice parciálních derivace funkčních vztahů,

$M_X \ldots$ kovarianční matice souřadnic.

$$M_\Delta = \begin{pmatrix} \sigma_{\Delta X}^2 & cov_{\Delta X,\Delta Y} & cov_{\Delta X,\Delta Z} \\ cov_{\Delta Y,\Delta X} & \sigma_{\Delta Y}^2 & cov_{\Delta Y,\Delta Z} \\ cov_{\Delta Z,\Delta X} & cov_{\Delta Z,\Delta Y} & \sigma_{\Delta Z}^2 \end{pmatrix}, \tag{21}$$

kde: $\sigma_\Delta \ldots$ směrodatná odchylka rozdílu mezi body 1 a 2,

$cov_{\Delta i,\Delta i} \ldots$ kovariance (závislost) mezi souřadnicovými rozdíly.

$$F = \begin{pmatrix} \frac{\delta\Delta X}{\delta X_1} & \frac{\delta\Delta Y}{\delta X_1} & \frac{\delta\Delta Z}{\delta X_1} \\ \frac{\delta\Delta X}{\delta Y_1} & \frac{\delta\Delta Y}{\delta Y_1} & \frac{\delta\Delta Z}{\delta Y_1} \\ \frac{\delta\Delta X}{\delta Z_1} & \frac{\delta\Delta Y}{\delta Z_1} & \frac{\delta\Delta Z}{\delta Z_1} \\ \frac{\delta\Delta X}{\delta X_2} & \frac{\delta\Delta Y}{\delta X_2} & \frac{\delta\Delta Z}{\delta X_2} \\ \frac{\delta\Delta X}{\delta Y_2} & \frac{\delta\Delta Y}{\delta Y_2} & \frac{\delta\Delta Z}{\delta Y_2} \\ \frac{\delta\Delta X}{\delta Z_2} & \frac{\delta\Delta Y}{\delta Z_2} & \frac{\delta\Delta Z}{\delta Z_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{22}$$

kde: $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z \ldots$ souřadnicové rozdíly mezi body 1 a 2,

$X_i, Y_i, Z_i \ldots$ souřadnice i- tého bodu.

$$M_X = \begin{pmatrix} \sigma_{X_1}^2 & cov_{X_1,Y_1} & cov_{X_1,Z_1} & cov_{X_1,X_2} & cov_{X_1,Y_2} & cov_{X_1,Z_2} \\ cov_{Y_1,Y_1} & \sigma_{Y_1}^2 & cov_{Y_1,Z_1} & cov_{Y_1,X_2} & cov_{Y_1,Y_2} & cov_{Y_1,Z_2} \\ cov_{Z_1,X_1} & cov_{Z_1,Y_1} & \sigma_{Z_1}^2 & cov_{Z_1,X_2} & cov_{Z_1,Y_2} & cov_{Z_1,Z_2} \\ cov_{X_2,X_1} & cov_{X_2,Y_1} & cov_{X_2,Z_1} & \sigma_{X_2}^2 & cov_{X_2,Y_2} & cov_{X_2,Z_2} \\ cov_{Y_2,X_1} & cov_{Y_2,Y_1} & cov_{Y_2,Z_1} & cov_{Y_2,X_2} & \sigma_{Y_2}^2 & cov_{Y_2,Z_2} \\ cov_{Z_2,X_1} & cov_{Z_2,Y_1} & cov_{Z_2,Z_1} & cov_{Z_2,X_2} & cov_{Z_2,Y_2} & \sigma_{Z_2}^2 \end{pmatrix}, \tag{23}$$

kde: $\sigma_i \ldots$ směrodatná odchylka souřadnic i-tého bodu,

$cov_{i,k} \ldots$ kovariance mezi souřadnicemi i-tého a k-tého bodu.

Tyto vztahy, kdy z kovarianční matice souřadnic došlo přes zákon hromadění směrodatných odchylek k výpočtu směrodatných odchylek souřadnicových rozdílů, probíhaly v software Matlab – více viz Elektron. příloha č. 5: Vstupní skript do Matlabu k výpočtu směrodatných odchylek souřadnicových rozdílů z kovarinačních matic souřadnic. Výsledky z různých kombinací shrnuje Tab. 2.

Tab. 2: Tabulka směrodatných odchylek souřadnicových rozdílů

druh souřadnic stanovisek a bodů sítě	počet skupin měření osnovy (určení sítě)	počet skupin na určovaný referenční bod	směrodatná odchylka souřadnicových rozdílů		
			$\sigma_{\Delta X}$ $[mm]$	$\sigma_{\Delta Y}$ $[mm]$	$\sigma_{\Delta Z}$ $[mm]$
fixní	1	1	0,048	0,055	0,042
		3	0,036	0,041	0,024
		5	0,033	0,038	0,019
		10	0,030	0,035	0,014
	3	1	0,044	0,051	0,042
		3	0,031	0,036	0,024
		5	0,028	0,032	0,019
		10	0,025	0,028	0,014
volný	1	1	0,129	0,146	0,051
		3	0,126	0,142	0,037
		5	0,125	0,141	0,033
		10	0,124	0,140	0,031
	3	1	0,123	0,139	0,045
		3	0,119	0,135	0,029
		5	0,118	0,134	0,025
		10	0,118	0,133	0,021

Závěrem z modelování je to, že aby bylo docíleno požadované přesnosti $0{,}05\,mm$, je nutné zadávat všechna stanoviska a body měřické sítě jako fixní, osnovu na měřickou síť stačí měřit pouze v jedné skupině a na určovaný bod ve dvou skupinách (kvůli kontrole, v principu by stačilo v jedné skupině). V takto navržené metodě (fixní stanoviska a body sítě, osnova na měřickou síť v jedné skupině, na určovaný bod ve dvou skupinách) jsou hodnoty směrodatných odchylek souřadnicových rozdílů rovny velikostem: $\sigma_{\Delta X} = 0{,}039\,mm$ a $\sigma_{\Delta Y} = 0{,}045\,mm$.

6.6 Ověření navržené měřické metody

Dne 12. 11. 2015 došlo k ověření navržené metody. Byla měřena v jedné skupině osnova směrů na body pevné sítě a ve dvou skupinách na určovaný bod, signalizovaný referenčním hranolem, umístěném na nucené centraci. Toto celé měření bylo opakováno pětkrát nezávisle (vždy došlo k nové horizontaci, k novému nastavení stanoviska a k novému natáčení hranolu).

Měřené vodorovné směry byly zkontrolovány (úplnost a správnost), zprůměrovány obě polohy a nahrány do GNU Gama jako vstupní data. Jejich přesnost byla charakterizována pomocí výběrové směrodatné odchylky vypočtené z oprav z vyrovnání dříve zaměření sítě – viz výše ($s_{Hz} = 0{,}6\ mgon$).

Po prvním vyrovnání (bez vylučování odlehlých hodnot) byla hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 1{,}12$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky rovna dle vzorce (16) $\sigma_{aposter_M} = 1{,}21$. Jelikož platí vztah (17), nedošlo k vylučování žádných hodnot.

Porovnání dvakrát zaměřené sítě proběhlo pomocí souřadnicových rozdílů. K tomu, aby mohly být takto porovnány souřadnice, musely být souřadnice ve stejném souřadnicovém systému, čehož bylo docíleno shodnostní transformací tak, že byl zvolen jeden pevný bod (č. b. 4001) a jeden pevný směr, do kterého byla vložena osa (osa X do bodu č. 6001).

Tab. 3: Souřadnicové rozdíly mezi souřadnicemi dvakrát zaměřené sítě

č.b.	1. zaměření (20. 4. 2015)		2. zaměření (12. 11. 2015)		souřadnicové rozdíly	
	$X\ [m]$	$Y\ [m]$	$X\ [m]$	$Y\ [m]$	$dX\ [mm]$	$dY\ [mm]$
4001	4999,99950	1000,00000	4999,99950	1000,00000	0,00	0,00
4002	5004,07388	1000,37196	5004,07344	1000,37198	0,44	-0,02
6001	5024,61350	1000,00000	5024,61347	1000,00000	0,03	0,00
6002	5024,20174	1004,46021	5024,20171	1004,46020	0,03	0,01
6003	5008,25743	1003,64706	5008,25694	1003,64694	0,49	0,12
6004	4999,58249	1002,79441	4999,58229	1002,79428	0,20	0,13
6005	4999,83025	997,48843	4999,82999	997,48846	0,26	-0,03
6006	5007,55036	998,82524	5007,54981	998,82528	0,55	-0,04

Velikost souřadnicových rozdílů nepřekračovala mezní rozdíly určené ze směrodatných odchylek vyrovnaných souřadnic, Tím byla ověřena stabilita sítě pevných bodů. Do všech dalších výpočtů vstupovaly souřadnice bodů, které byly určeny z prvního zaměření a vyrovnání.

Více – viz Elektron. příloha č. 6: Zápisník z ověřovacího měření měřické sítě, Elektron. příloha č. 7: Vstupní a výstupní skript k vyrovnání do GNU Gama.

7 EXPERIMENTY

7.1 Určení upraveného počtu měření na referenční bod

V rámci modelování sítě (viz kap. 6.5) byl určen počet opakování: osnovu na měřickou síť stačí měřit pouze v jedné skupině a na určovaný bod ve dvou skupinách Nakonec ale bylo vždy na referenční bod měřeno víckrát, a to v pěti skupinách na začátku měření (po měření na pevné body sítě) a i na konci, kdy byl referenční bod opět zaměřen v pěti skupinách a byla zaměřena podruhé i osnova měřické sítě kvůli kontrole. Důvodem navýšení počtu skupin měření na referenční bod bylo získání nadbytečných měření, ze kterých dojde k výpočtu výběrové směrodatné odchylky a z nich i průměrné směrodatné odchylky z výběrových směrodatných odchylek - viz následující kap. 7.2.

7.2 Směrodatná odchylka měření

V rámci této práce a práce slečny Bc. Lucie Císařové bylo prováděno testování trnů, trojnožek, hranolů a kompletních sad – viz kap. 2. Během těchto experimentů byl vždy zaměřován kulový referenční hranol pětkrát na začátku měření a pětkrát na konci. Z každých těchto pěti měření byla určena výběrová směrodatná odchylka dle (15) pro souřadnici X (σ_{RRR_Xi}) a Y (σ_{RRR_Yi}). Z nich byla vypočtena směrodatná polohová odchylka (σ_{RRR_Pi}) pro každou pětici měření dle vzorce:

$$\sigma_{RRR_Pi} = \sqrt{{\sigma_{RRR_Xi}}^2 + {\sigma_{RRR_Yi}}^2}\,. \tag{24}$$

Z těchto hodnot byla určena průměrná polohová směrodatná odchylka ze směrodatných odchylek (σ_{RRR_p}) dle vzorce:

$$\sigma_{RRR_P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_{RRR_Pi}^2}{n}}, \tag{25}$$

kde: $\sigma_{RRR_Pi}\ldots$ polohová směrodatná odchylka i-té pětice měření,

$n\ldots$ počet měření pětic na referenční hranol ($n = 10$).

Hodnota průměrné polohové směrodatné odchylky je $\sigma_{RRR_P} = 0{,}032\ mm$. Cílem této práce bylo měřit polohové změny s přesností vyjádřenou polohovou odchylkou $\sigma_P \leq 0{,}05\ mm$, což bylo splněno.

Více – viz Příloha č. 2: Výpočty jednotlivých polohových výběrových směrodatných odchylek a průměrné polohové směrodatné odchylky z výběrových směrodatných odchylek.

7.3 Testování vybraných trnů

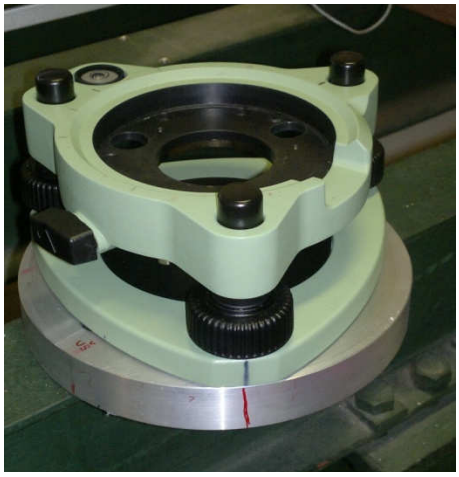
7.3.1 Popis vybraných trnů

Prvním krokem byl výběr trnů k testování, byly zvoleny takové, do kterých je možné vsadit kulový hranol a kterými lze otáčet kolem své svislé osy. Bylo vybráno 6 trnů – viz Tab. 4.

Tab. 4: Soupis testovaných trnů

Leica GZR 3 - nová verze (značen jako "světlejší")
Leica GZR 3 - stará verze (značen jako "tmavší")
Topcon (č. 1)
Topcon (č. 2)
Topcon (č. 6)
Sokkisha AP41

Zároveň byla vybrána referenční trojnožka (typ trojnožky: Leica GDF321-2), která byla použita pro testování všech trnů. Trojnožka byla utahována při všech měřeních stejně (zajištěno pomocí rysky na hlavě nucené centrace a na trojnožce), viz Obr. 12. Vybrané trny – viz Obr. 13.

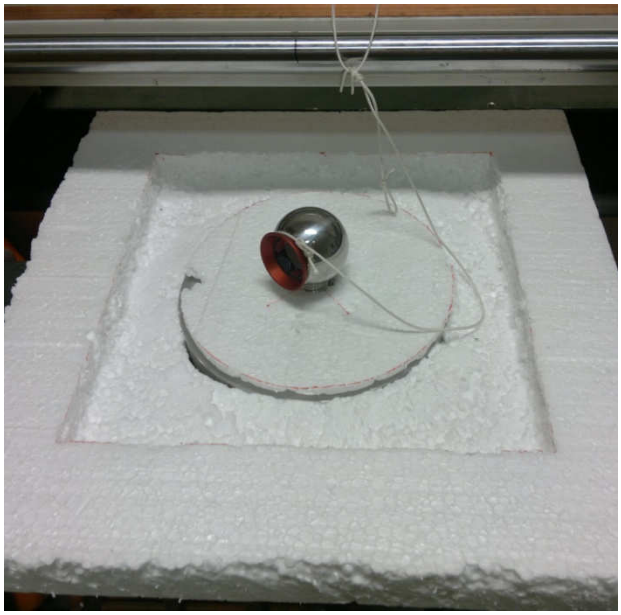


Obr. 12: Referenční trojnožka k testování trnů Leica GDF321-2

Obr. 13: Testované trny: a) Leica GZR3 „světlejší“, b) Leica GZR3 „tmavší", c) Topcon, d) Sokkisha AP41

7.3.2 Popis měřického postupu

Testování trnů proběhlo 26. 11. 2015. Na počátku testovacího měření byla zaměřena osnova na měřickou síť (v jedné skupině) a na nucenou centraci, jejíž souřadnice byly brány jako referenční pro porovnání (během tohoto prvního testování hranolů pouze ve dvou skupinách, ve všech dalších testováních bylo naměřeno vždy pět skupin). Referenčním cílem byl hranol Lecia RRR 1,5”, který byl umísťován centricky na nucenou centraci a vždy nápisem „Leica“ nahoru, viz Obr. 14.



Obr. 14: Referenční cíl pro testování hranolů

Poté byla na nucenou centraci připevněna testovaná trojnožka. Byla provedena přesná horizontace pomocí trnu s trubicovou libelou a pomocí jiného trnu s trubicovou libelou byla horizontace zkontrolována. Horizontace se během testování různých trnů neměnila.

Každý trn byl vsazen tak, aby pojistka zapadla do vybrání trojnožky nebo nápis zespoda trnu směřoval do vybrání trojnožky – podle typu trnu (důvodem bylo to, aby při ověřovacím měření byl trn umístěn do trojnožky stejným směrem). Na trn byl umístěn referenční hranol.

Každým trnem bylo otáčeno do osmi pozic po 45°, ze kterých pak byla zjištěna excentricita. Směrování do pozic bylo zajištěno tak, že na trojnožku byly nakresleny rysky po 45° a zároveň byla jedna ryska na každém trnu, která se postupně ztotožňovala s ryskou na trojnožce. Otáčení proběhlo po směru hodinových ručiček.

Bylo měřeno z obou stanovisek (č. b. 4001 a 4002) ve dvou skupinách na každou pozici trnu. Ze stanovisek bylo měřeno na jednu pozici ihned po sobě a poté došlo k otočení trnu a měření další pozice. Hranol natáčel co nejpřesněji figurant ručně.

Obr. 15: Zaměřování vybraného trnu s kulovým hranolem

Po zaměření všech testovaných trnů bylo znova měřeno na nucenou centraci pro kontrolu, zda nedošlo ke změně orientace. Zároveň byla zaměřena osnova na měřickou síť.

7.3.3 Výpočet naměřených výsledků

Nejprve došlo ke kontrole úplnosti a správnosti naměřených dat a k výpočtu zápisníku: zprůměrování vodorovného směru ze dvou poloh, oprava zenitového úhlu o indexovou chybu a zprůměrování šikmé délky. Zápisník z měření – viz Elektronická příloha č. 8: Zápisník z prvního měření k testování trnů.

Do programu GNU Gama (jeho popis – viz kap. 5.2.2.) vstupovaly pouze měřené vodorovné směry. Souřadnice bodů měřické sítě (č. b. 6001 – 6006) a stanovisek (č. b. 4001 – 4002) byly zadány jako fixní, hodnoty byly vypočteny dříve z vyrovnání měřické sítě – viz kap. 6.3. Vyrovnávány byly orientační posuny na stanoviscích.

Po vyrovnání byla dosažená aposteriorní směrodatná odchylka ($\sigma_{aposter}$) porovnána s mezní aposteriorní směrodatnou odchylkou ($\sigma_{aposter_M}$) dle vzorce (16). Po prvním vyrovnání (bez vylučování odlehlých hodnot) byla hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 1{,}92$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky byla rovna hodnotě $\sigma_{aposter_M} = 1{,}13$.

Protože neplatí (17) – aposteriorní směrodatná odchylka je větší než mezní aposteriorní směrodatná odchylka, došlo k vylučování odlehlých měření.

Vylučování odlehlých měření probíhalo tak, že měřením s největšími opravami byla mnohonásobně navýšena směrodatná odchylka a došlo k novému výpočtu. Ve chvíli, kdy i po novém vyrovnání zůstala velikost oprav u těchto měřených směrů vysoká, bylo dané měření považováno za odlehlé a došlo k jeho úplnému vyloučení z dalších výpočtů. V tomto případě byla tímto způsobem vyloučena 4 měření (jednalo se o měření obou dvou skupin ze stanoviska 4001 na body 6004 a 6005, které byly velmi blízko stanovisku a cílilo se na ně obtížněji).

Po vylučování odlehlých hodnot a novém vyrovnání byla hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 1{,}10$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter_M} = 1{,}13$. Jelikož platí vztah nerovnosti (17), nedošlo k dalšímu vylučování a vypočtené souřadnice poloh trnů vstupují do dalších výpočtů. Více – viz Elektron. příloha č. 9: Vstupní a výstupní soubor k vyrovnání do GNU Gama pro první testování trnů.

Výstupem z vyrovnání jsou souřadnice osmi pozic pro každý určovaný trn a souřadnice referenčního hranolu. Pro další grafické zpracování byl určen střed trnu (průměr z osmi pozic) a souřadnicový rozdíl mezi referenčním hranolem a každou pozicí trnu. Souřadnicovým rozdílem byla určena úplná excentricita, na které

se projevuje vliv trnu a trojnožky. Proto byla provedena redukce (střed trnu byl posunut na nulové souřadnice) a je uvažován pouze tvar excentricity trnu.

Výsledkem je tvar a velikost excentricity pro každý trn. Více – viz Příloha č. 3: Tabulka zpracovaných výsledků z měření trnů a Příloha č. 4: Grafy excentricit jednotlivých trnů.

7.3.4 Kontrolní měření

Dne 3. 12. 2015 proběhlo kontrolní zaměření. Postup byl stejný jako u prvního testování trnů, pouze s rozdílem, že na referenční hranol bylo na začátku měření, i na jeho konci, měřeno v pěti skupinách.

Úprava vstupních dat a vyrovnání proběhlo stejným způsobem. Po vyrovnání byla dosažená aposteriorní směrodatná odchylka ($\sigma_{aposter}$) porovnána s mezní aposteriorní směrodatnou odchylkou ($\sigma_{aposter_M}$) dle (16). Po prvním vyrovnání (bez vylučování odlehlých hodnot) byla hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 1{,}87$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter_M} = 1{,}12$. Díky tomu, že neplatí vztah (17) – aposteriorní směrodatná odchylka je větší než mezní aposteriorní směrodatná odchylka, došlo k vylučování odlehlých měření, postup vylučování odlehlých měření byl stejný jako u prvního testování trnů – viz výše.

Po vylučování odlehlých hodnot (vyloučena 4 měření) a novém výpočtu byla hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 1{,}07$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter_M} = 1{,}12$. Jelikož platí vztah nerovnosti (17), nedošlo k dalšímu vylučování a vypočtené souřadnice poloh trnů vstupují do dalších výpočtů. Více – viz Elektron. příloha č. 10: Vstupní a výstupní soubor k vyrovnání do GNU Gama pro ověřovací měření trnů.

Výsledkem je opět tvar a velikost excentricity pro každý trn, a to pomocí rozdílu vypočtených souřadnic jednotlivých pozic trnu a průměrných souřadnic referenčního hranolu. Více – viz Příloha č. 5: Tabulka zpracovaných výsledků z kontrolního měření trnů a Příloha č. 6: Grafy excentricit jednotlivých trnů z kontrolního měření. Dále došlo k porovnání výsledků z obou testů trnů, které byly

vyneseny do jednoho grafu – viz kap. 8.1. Více – viz Příloha č. 7: Tabulka porovnání výsledků dvojího testování trnů.

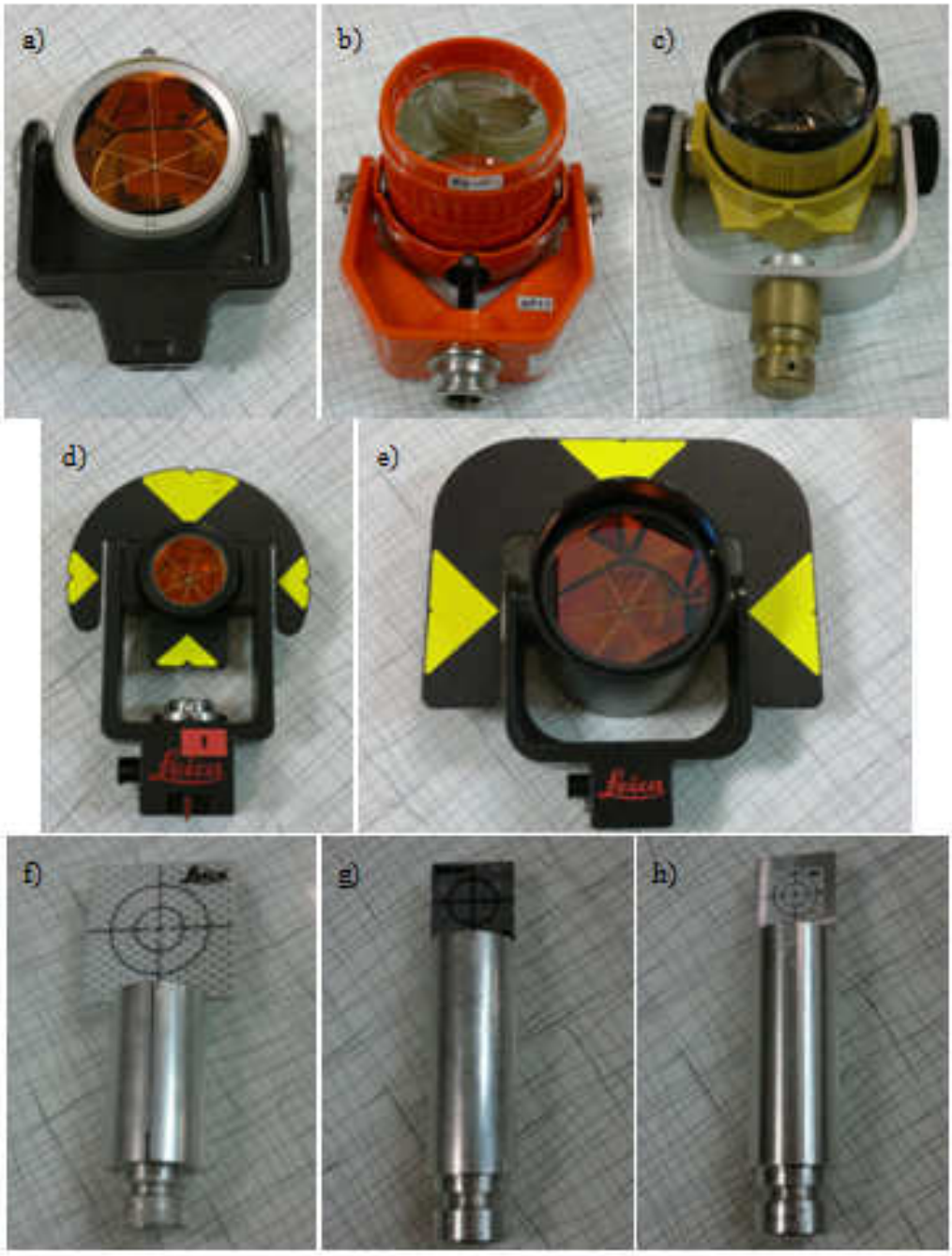
7.4 Testování vybraných hranolů

7.4.1 Popis vybraných hranolů

Nejprve došlo k výběru odrazných cílů pro testování, byly testovány jak klasické odrazné hranoly, tak válcové terče s odraznými štítky. Zároveň byla vybrána referenční trojnožka (typ trojnožky: Leica GDF321-2), která byla použita pro testování všech hranolů, a referenční trn – viz Tab. 5.

Tab. 5: Soupis testovaných hranolů v kombinaci s použitým trnem a trojnožkou

typ hranolu	typ trojnožky	typ trnu
Topcon (1)	Leica GDF321-2	Topcon (2)
Topcon (2)		
Topcon (3)		
Sokkisha		
Válcový terč (1) 6x6 Leica		
Válcový terč (2) 6x6 Leica		
Válcový terč (3) 6x6 Leica		
Válcový terč (4) 6x6 Leica		
Válcový terč (5) 6x6 Leica		
Válcový terč (6) 6x6 Leica		
Válcový terč (1) 3x3 Sokkia RS30N		
Válcový terč (2) 3x3 Sokkia RS30N		
Válcový terč (3) 3x3 Sokkia RS30N		
Válcový terč (4) 3x3 Sokkia RS30N		
Válcový terč (5) 3x3 Sokkia RS30N		
Válcový terč (6) 3x3 Sokkia RS30N		
Válcový terč (7) 2x2 Leica		
Leica GMP 101 (1)		Leica GZR 3 ("světlejší")
Leica GMP 101 (2)		
Leica GMP 101 (3)		
Leica GMP 101 (4)		
Leica GMP 101 (5)		
Leica GPR 121 (1A)		
Leica GPR 121 (2A)		
Leica GPR 121 (3A)		
Leica GPH1P (strojírenský)		



Obr. 16: Testované hranoly: a) strojírenský hranol Leica GPH1P, b) hranol Sokkisha, c) hranol Topcon, d) hranol Leica GMP 101, e), hranol Leica GPR 121, f) válcový terč 6x6 Leica, g) válcový terč 3x3 Sokkia RS30N, h) válcový terč 2x2 Leica

7.4.2 Popis měřického postupu

Testování hranolů proběhlo ve dvou dnech – 16. 2. 2016 a 17. 2. 2016. Samotný postup byl velmi obdobný jako u testování trnů – nejprve byla zaměřena osnova na měřickou síť (v jedné skupině) a na nucenou centraci (v pěti skupinách), kde byl umístěn referenční hranol Lecia RRR 1,5”.

Na nucenou centraci byla připevněna vybraná trojnožka (viz Tab. 5), byla provedena přesná horizontace pomocí trnu s trubicovou libelou a pomocí jiného trnu s trubicovou libelou byla horizontace zkontrolována. Horizontace se během testování různých hranolů neměnila.

Dále byl do trojnožky vsazen vybraný trn a referenční kulový hranol, který byl zaměřen ve dvou skupinách z obou stanovisek (č. 4001 a 4002). Ze stanovisek bylo měřeno na kulový hranol hned po sobě. Ve stejné pozici trnu, ve které byl měřen referenční hranol, byly proměřeny všechny vybrané hranoly (opět ve dvou skupinách z obou dvou stanovisek). Po zaměření 3-5ti hranolů byla provedena kontrola pomocí zaměření referenčního kulového hranolu (umístěného na stejném trnu a trojnožce), pro zachycení případné změny polohy způsobené výměnami hranolů na trnu a ověření orientace přístrojů.

Teprve ve chvíli, kdy byly zaměřeny všechny testované hranoly v první pozici trnu, bylo trnem otočeno o 90° (poloha označena ryskou na trnu i trojnožce) a v této poloze byl opět zaměřen referenční kulový hranol a všechny testované hranoly. Trnem tak bylo otáčeno do čtyř pozic po 90° (otáčení probíhalo po směru hodinových ručiček), ze kterých pak byla zjištěna excentricita a průměrem těchto pozic i rozdíl polohy středu hranolu vůči referenčnímu hranolu.

Po zaměření všech testovaných hranolů bylo znova měřeno na nucenou centraci pro kontrolu, zda nedošlo ke změně orientace (v pěti skupinách). Zároveň byla zaměřena osnova na měřickou síť (v jedné skupině).

Obr. 17: Testování hranolů: a) zaměření referenčního hranolu na vybrané trojnožce a trnu, b) zaměření testovaného hranolu

7.4.3 Výpočet naměřených výsledků

Jelikož byly hranoly testovány ve dvou dnech (důvodem bylo velké množství testovaných kusů), probíhalo vyrovnání orientačních posunů z měření na hranoly pro oba dva dny zvlášť.

Výpočet probíhal obdobně jako při zpracování testování trnů. Zápisníky z měření – viz Elektron. příloha č. 11: Zápisník z měření k testování hranolů, část 1 a Elektron. příloha č. 12: Zápisník z měření k testování hranolů, část 2.

Vyrovnání proběhlo opět metodou nejmenších čtverců v software GNU Gama, kam vstupovaly zprůměrované měřené vodorovné směry a souřadnice bodů měřické sítě (č. b. 6001 – 6006, zadány jako fixní) a stanovisek (č. b. 4001 – 4002, též zadány jako fixní).

V případě měřených dat z prvního dne byla po vyrovnání dosažená aposteriorní směrodatná odchylka ($\sigma_{aposter}$) porovnána s mezní aposteriorní směrodatnou odchylkou ($\sigma_{aposter_M}$) dle (16). Po prvním vyrovnání (bez vylučování odlehlých hodnot) byla hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 0{,}93$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter_M} =$

1,10. Jelikož platí vztah (17) – aposteriorní směrodatná odchylka je menší než mezní aposteriorní směrodatná odchylka, nedošlo k vylučování odlehlých měření a vypočtené souřadnice vstupují do dalších výpočtů a grafického zpracování. Více – viz Elektron. příloha č. 13: Vstupní a výstupní soubor k vyrovnání do GNU Gama pro měření hranolů – část 1.

V případě měření z druhého dne byla po prvním vyrovnání (bez vylučování odlehlých měření) hodnota aposteriorní směrodatné odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter} = 1{,}06$ a hodnota mezní aposteriorní odchylky rovna hodnotě $\sigma_{aposter_M} = 1{,}12$. Jelikož platí vztah (17) – aposteriorní směrodatná odchylka je menší než mezní aposteriorní směrodatná odchylka, nedošlo k vylučování odlehlých měření a vypočtené souřadnice vstupují do dalších výpočtů a grafického zpracování. Více – viz Elektron. příloha č. 14: Vstupní a výstupní soubor k vyrovnání do GNU Gama pro měření hranolů – část 2.

Výstupem z výpočtu jsou souřadnice čtyř pozic pro každý testovaný hranol a souřadnice referenčního kulového hranolu, umístěného ve stejných pozicích na stejném trnu jako testované hranoly. Pro další grafické zpracování byl určen střed hranolu (průměr ze čtyř pozic) a souřadnicový rozdíl mezi referenčním hranolem a testovanými hranoly.

Výsledky charakterizují rozdíly pouze mezi hranoly (rozdíl od referenčního hranolu), ale ne excentricitu jen samotného hranolu (na celkové poloze se podílí excentricita trojnožky i trnu).

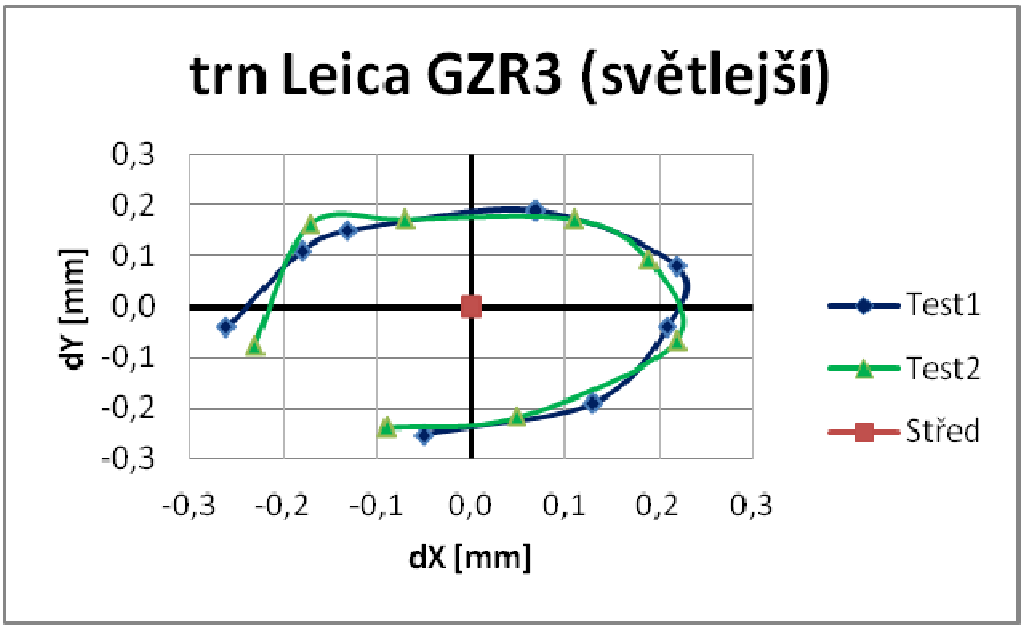
Výsledkem je tvar a velikost excentricity pro každý hranol. Více – viz Příloha č. 8: Tabulka zpracovaných výsledků z měření hranolů a Příloha č. 9: Grafy excentricit jednotlivých hranolů.

8 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

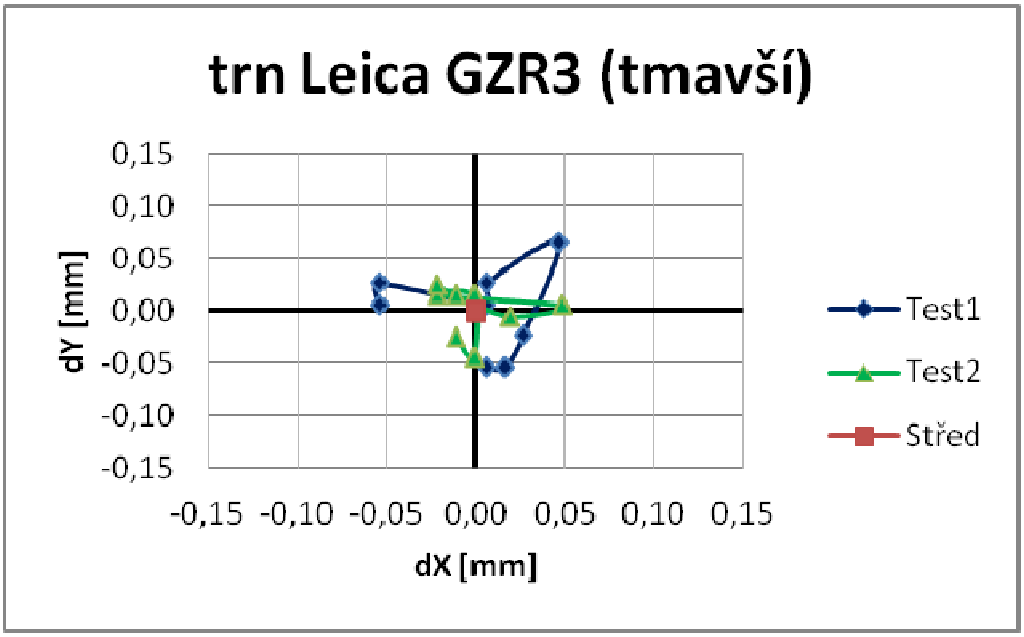
8.1 Grafy excentricit jednotlivých trnů

Výstupem z vyrovnání měření pro testování trnů byly souřadnice osmi pozic pro každý určovaný trn a souřadnice referenčního hranolu, umístěného přímo na nucené centraci. Pro další grafické zpracování byl tedy určen střed trnu (průměr z osmi pozic) a souřadnicové rozdíly mezi referenčním hranolem a každou pozicí trnu. Souřadnicovým rozdílem byla určena úplná excentricita, na které se projevuje vliv trnu a trojnožky. Proto byla provedena redukce (střed trnu byl posunut na nulové souřadnice) a je uvažován pouze tvar excentricity trnu. Stejný postup byl proveden i u kontrolního měření.

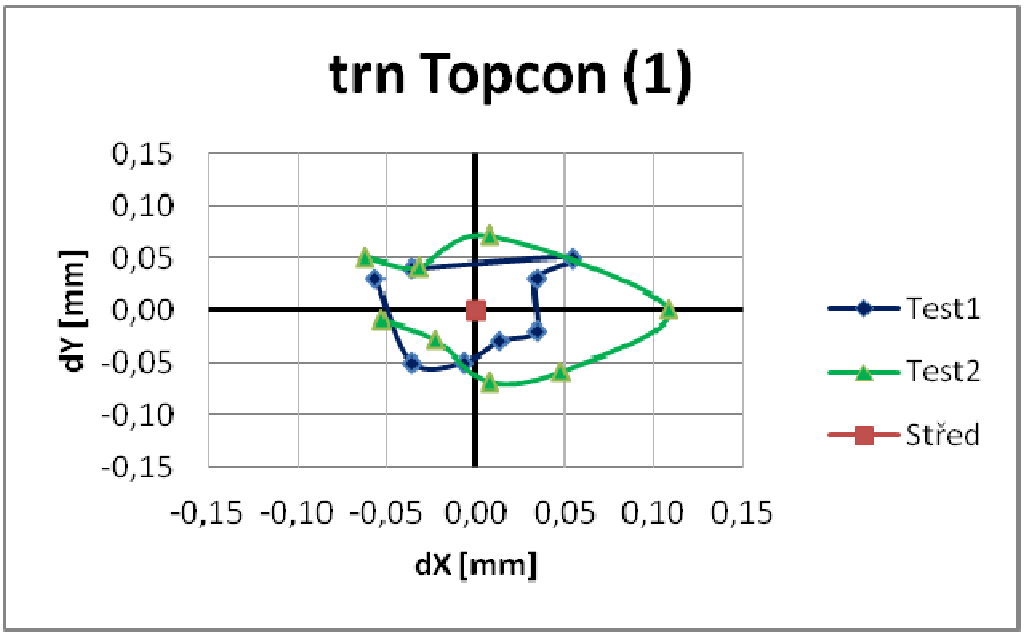
Grafy č. 1 - 6 ukazují velikost a tvar excentricity pro konkrétní trny, a to pomocí rozdílu vypočtených souřadnic jednotlivých pozic trnu a průměrných souřadnic referenčního hranolu. Do grafů byly vyneseny oba testy trnů.



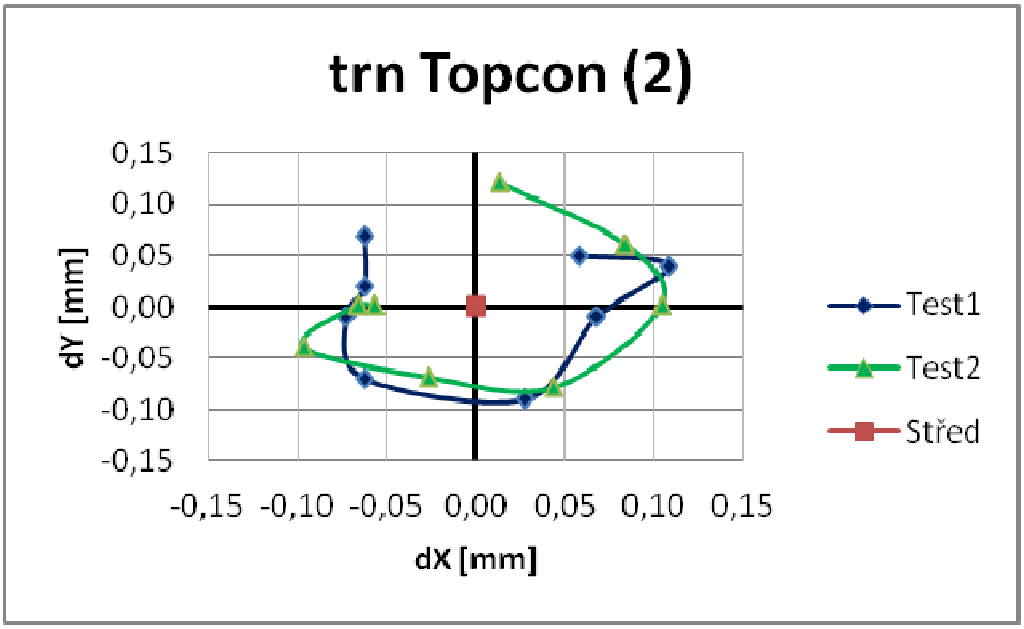
Graf 1: Excentricita trnu Leica GZR 3 (světlejší)



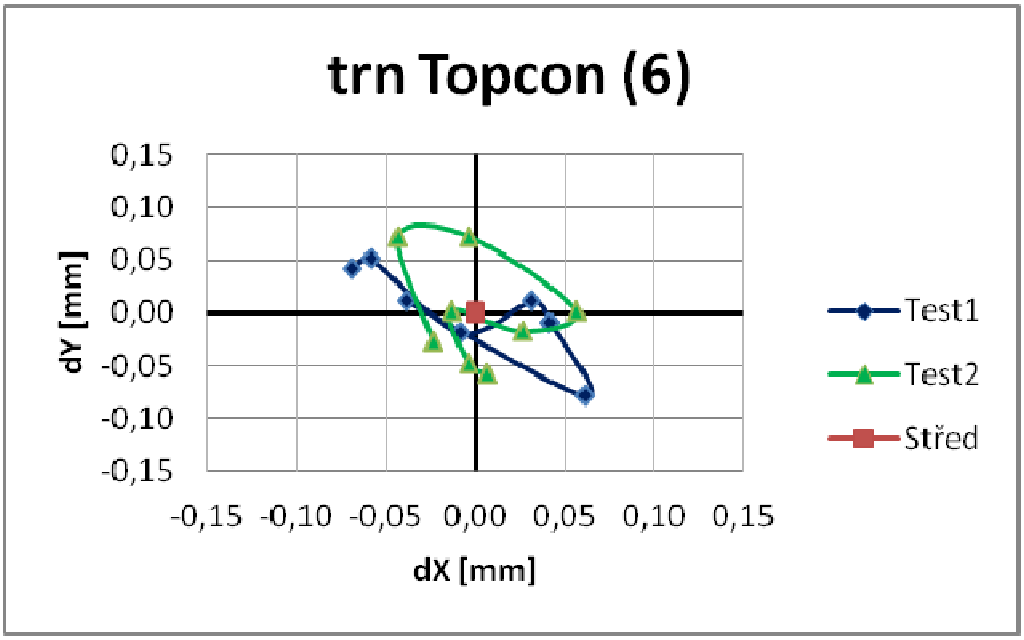
Graf 2: Excentricit trnu Leica GZR 3 (tmavší)



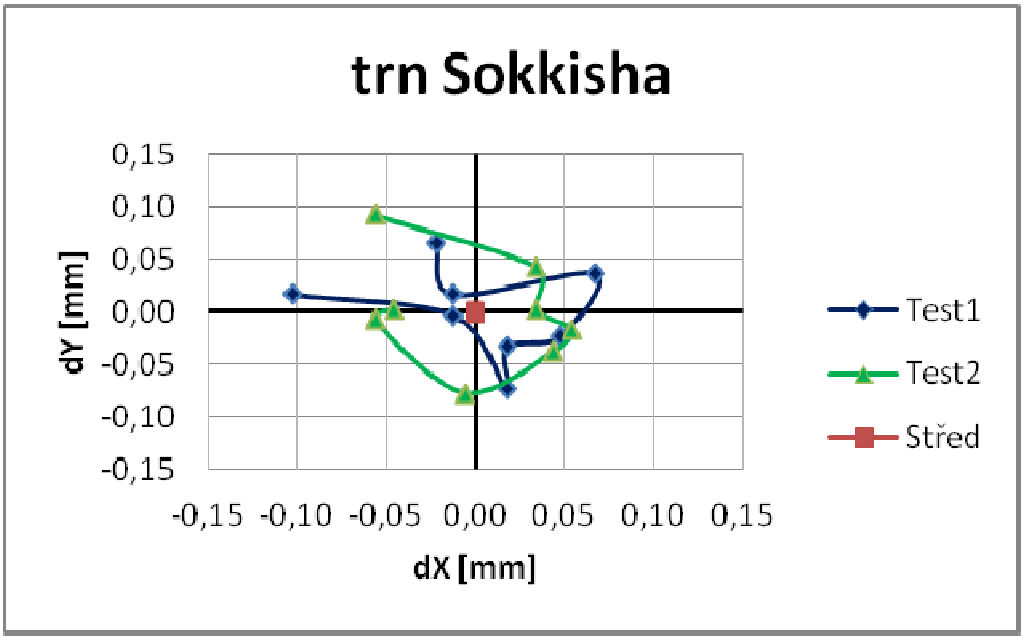
Graf 3: Excentricita trnu Topcon (1)



Graf 4: Excentricita trnu Topcon (2)



Graf 5: Excentricita trnu Topcon (6)



Graf 6: Excentricita trnu Sokkisha

Většina testovaných trnů má excentricitu malou ($\sim 0{,}1\ mm$), která je při měření relativně zanedbatelná. Pouze v případě trnu Leica GRZ3 („světlejší“) je velikost excentricity větší ($\sim 0{,}2\ mm$) – důvodem je pravděpodobně mechanické poškození trnu (např. pádem). Rozdíly mezi testem 1 a testem 2 se pohybují řádově do $0{,}05\ mm$, což je samotná přesnost určení souřadnic a nejedná se tedy o změnu excentricity trnu.

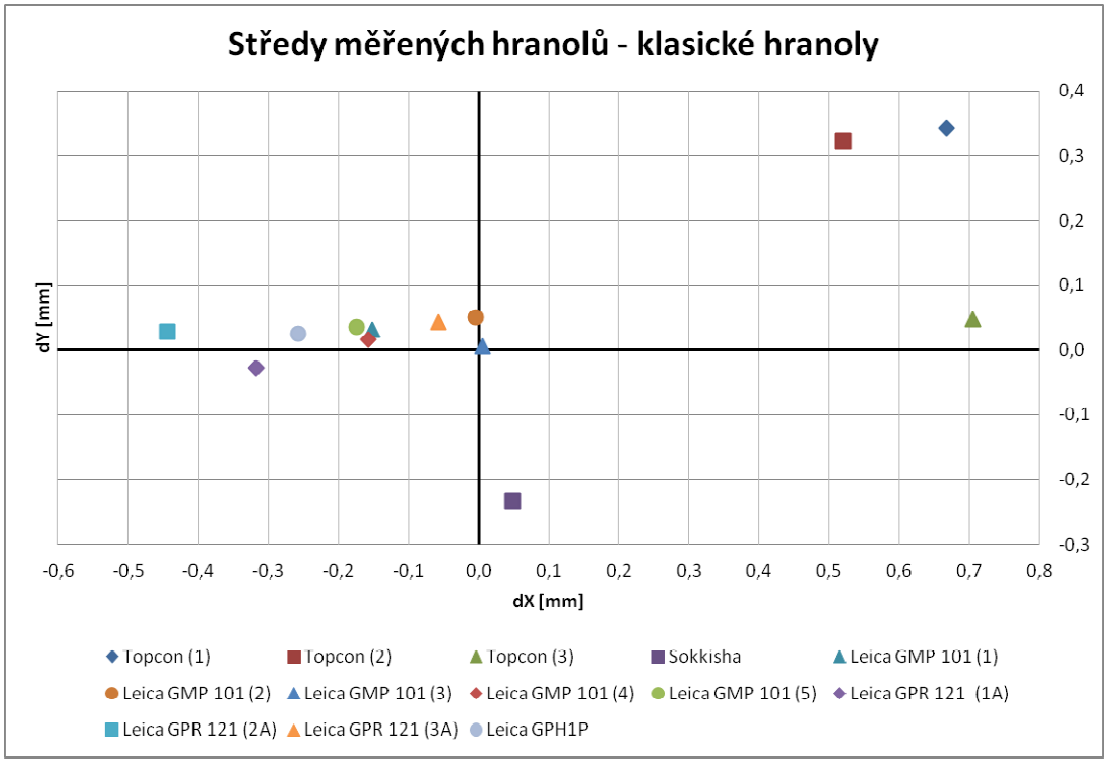
Více – viz Příloha č. 3: Tabulka zpracovaných výsledků z měření trnů, Příloha č. 4: Grafy excentricit jednotlivých trnů, Příloha č. 5: Tabulka zpracovaných výsledků z kontrolního měření trnů, Příloha č. 6: Grafy excentricit jednotlivých trnů z kontrolního měření a Příloha č. 7: Tabulka porovnání výsledků dvojího testování trnů.

8.2 Grafy středů jednotlivých hranolů

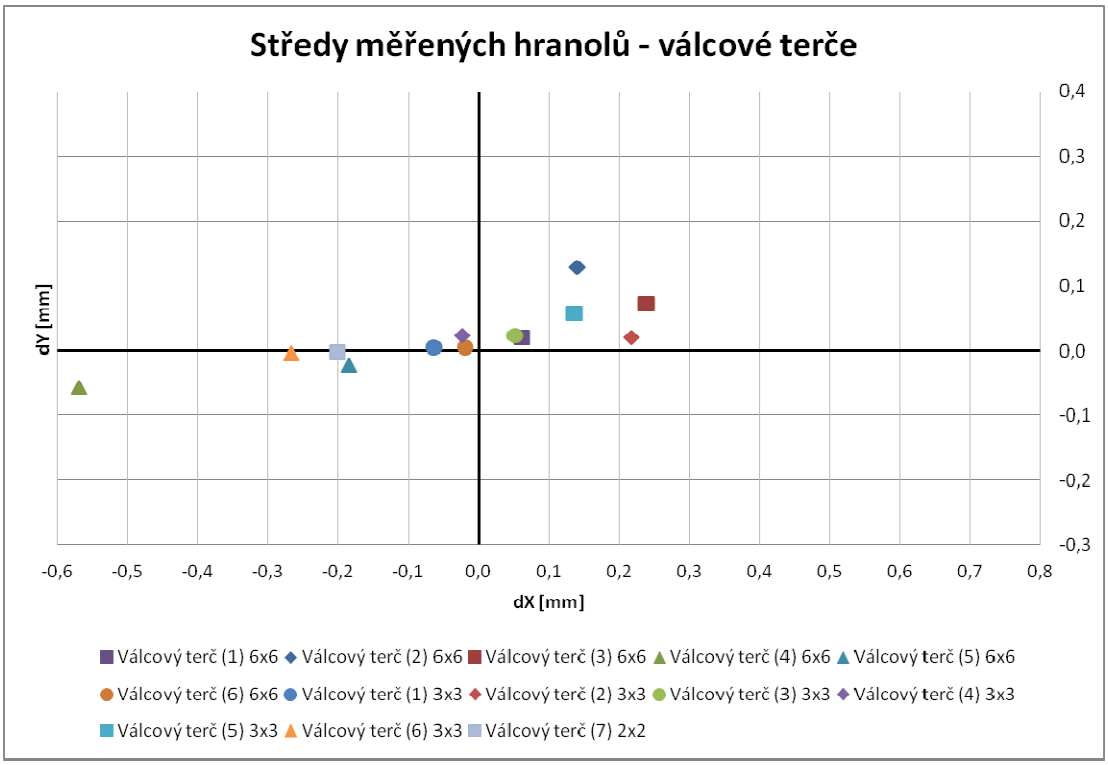
Výstupem z vyrovnání měření pro testování hranolů byly souřadnice čtyř pozic pro každý testovaný hranol a souřadnice referenčního kulového hranolu, umístěného ve stejných pozicích na stejném trnu jako testovaný hranol. Pro další grafické zpracování byl určen střed hranolu (průměr ze čtyř pozic) a souřadnicové rozdíly mezi referenčním hranolem a testovanými hranoly. Souřadnice referenčního kulového hranolu byly určeny průměrem ze všech měření na tento hranol v příslušné pozici.

Výsledné rozdíly charakterizují rozdíly pouze mezi hranoly (rozdíl testovaného hranolu od referenčního hranolu), ale ne excentricitu jen samotného testovaného hranolu (na celkové poloze se podílí excentricita trojnožky i trnu).

Grafy č. 7 - 8 ukazují rozdíl středů (průměru ze čtyř měřených pozic) testovaných hranolů vůči referenčnímu hranolu. Kvůli velkému množství testovaných hranolů jsou zvlášť do grafu vyneseny středy klasických hranolů a středy válcových terčů s foliemi.



Graf 7: Středy měřených hranolů - klasické hranoly



Graf 8: Středy měřených hranolů - válcové terče

Rozdíl středů hranolů vůči referenčnímu hranolu se pohybuje v rozmezí $-0{,}5\ mm$ až $0{,}7\ mm$. Jedná o nezanedbatelnou velikost, a proto u přesných prací je třeba s touto chybou dopředu počítat a měřickým postupem se jí vyvarovat. Pro stejné typy hranolů byla zjištěna rozdílná excentricita. Nelze tedy libovolně zaměňovat „stejné“ hranoly. U válcových terčů se projevuje excentricita v rozmezí $-0{,}3\ mm$ až $0{,}3\ mm$ (kromě terče č. 4) a projevuje se u nich menší rozptyl než u hranolů.

Více – viz Příloha č. 8: Tabulka zpracovaných výsledků z měření hranolů a Příloha č. 9: Grafy excentricit jednotlivých hranolů.

9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo určit u vybraného geodetického příslušenství, které Katedra speciální geodézie vlastní, velikost excentricit a polohu středů vůči referenčnímu bodu. V rámci práce byly testovány vybrané trny a hranoly.

V rámci diplomové práce byl navrhnut experiment, kterým byla daná veličina (polohová změna souřadnic měřených pomůcek) určena a rozborem přesnosti před měřením (pomocí modelování sítě) byl určen počet opakování měření. Pro potřeby měření byla vybudována místní laboratorní síť. Během experimentů bylo měřeno souběžně ze dvou stanovisek na nucených centracích na určovaný bod, kde byla také využívána nucená centrace. Pro výpočet souřadnic určovaného bodu byla použita metoda protínání z orientovaných směrů. Na nucenou centraci se postupně upevňovaly a byly proměřovány zkoušené geodetické pomůcky. Vypočtené souřadnice pomůcek byly porovnávány se souřadnicemi referenčního bodu, který byl představován referenčním kulovým hranolem Leica RRR 1.5“. Výškové změny sledovány nebyly. Výsledkem práce jsou pro vybrané pomůcky velikosti excentricit a grafické vyjádření polohy vůči referenčnímu bodu.

Přesnost měření je dána průměrnou polohovou směrodatnou odchylkou $\sigma_{RRR_P} = 0{,}032\ mm$. Cílem této práce bylo měřit dané prostorové změny s přesností vyjádřenou polohovou odchylkou $\sigma_P \leq 0{,}05\ mm$, což bylo splněno.

U trnů, testovaných v rámci této práce, je velikost excentricity relativně zanedbatelná (do $0{,}1\ mm$). Pouze u trnu Leica GZR3 byla zjištěna excentricita s poloměrem $0{,}2\ mm$, což je nezanedbatelná hodnota, která může velmi znehodnotí výsledky přesného měření.

U hranolů, které byly testovány v rámci této práce, je posun středu hranolu vůči referenčnímu hranolu nezanedbatelný ($až\ 0{,}7\ mm$). U stejných typů hranolů byly zjištěny rozdílné excentricity. V případě záměny dvou hranolů je rozdíl měřené délky třeba až $1{,}0\ mm$.

U válcových terčů s odraznými foliemi byl zjištěn vzájemný rozdíl až $0{,}8\ mm$. I u těchto přesně vyrobených cílů se excentricita projevuje nezanedbatelnou velikostí.

Zjištěné velikosti excentricit by se uplatnily zejména v malých sítích. Jejich vliv by se se vzrůstající délkou záměry zmenšoval. Experiment ukázal, že pro přesné práce je vhodné zjišťovat velikost excentricity u použitých pomůcek. Při znalosti skutečných excentricit je možno efektivněji plánovat přesnost měření, vybrat vhodné pomůcky a upravit postup měření pro maximální potlačení vlivu excentricity.

Zároveň se stále doporučuje dodržovat běžně používaná pravidla, která mají za cíl maximálně eliminovat excentricitu pomůcek. V rámci přesných geodetických měřeních je třeba při měření posunů a přetvoření používat nucené centrace se speciálními pomůckami. Doporučuje se měřit se stejnými přístroji a příslušenstvím (trojnožka, trn, hranol) a používat trojnožky s jedním zalepeným stavěcím šroubem, takže po upevnění a horizontaci je přístroj ve stejné výšce. Zvykem je, že se na trojnožku kreslí ryska, která se při utahování srovná s ryskou na hlavě centrace a tím se zajistí, že je trojnožka utažená stejně jako v minulých měřických etapách.

LITERATURA, ZDROJE

[1] Trimble [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.trimble.com

[2] Leica [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.leica-geosystems.us/

[3] Štroner, M.: Projekt PrecisPlanner 3D [online]. [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/PPlanner/

[4] Štroner, M.: Vývoj softwaru na plánování přesnosti geodetických měření PrecisPlanner 3D. Stavební obzor. 2010, roč. 19, č. 3, s. 92-95. ISSN 1210-4027

[5] Hampacher, M. – Radouch V.: Teorie chyb a vyrovnávací počet. 3. přeprav. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 164 s. ISBN 80-010-1327-8.

[6] 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.

[7] Viletová, Z.: Porovnání vybraných geodetických programu pro vyrovnání geodetických sítí. 2006. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[8] GNU Gama [online]. [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: http://geo.fsv.cvut.cz/gwiki/GNU_Gama

[9] Pytel, J. - Čepek, A.: GNU Gama - package for adjustment of geodetic free network (Projekt vyrovnání geodetických sítí GNU Gama). In: GIS Ostrava 2004. VŠB TU Ostrava, 2004. [online]. [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2004/Sbornik/Referaty/pytel1.htm

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Vstupní souřadnice do Precis Planeru k modelování sítě

Příloha č. 2: Výpočty polohových jednotlivých výběrových směrodatných odchylek a průměrné polohové směrodatné odchylky z výběrových směrodatných odchylek

Příloha č. 3: Tabulka zpracovaných výsledků z měření trnů

Příloha č. 4: Grafy excentricit jednotlivých trnů

Příloha č. 5: Tabulka zpracovaných výsledků z kontrolního měření trnů

Příloha č. 6: Grafy excentricit jednotlivých trnů z kontrolního měření

Příloha č. 7: Tabulka porovnání výsledků dvojího testování trnů

Příloha č. 8: Tabulka zpracovaných výsledků z měření hranolů

Příloha č. 9: Grafy excentricit jednotlivých hranolů

SEZNAM PŘÍLOH NA PŘILOŽENÉM DVD

Elektron. příloha č. 1: Zápisník z měření k porovnání metod a výpočet směrodatných odchylek

Elektron. příloha č. 2: Zápisník z měření měřické sítě a výpočet směrodatných odchylek z opakování a z vyrovnání

Elektron. příloha č. 3: Vstupní a výstupní skript do GNU Gamy k vyrovnání měřické sítě

Elektron. příloha č. 4: Schéma měřické sítě

Elektron. příloha č. 5: Vstupní skript do Matlabu k výpočtu směrodatných odchylek souřadnicových rozdílů z kovarinačních matic souřadnic

Elektron. příloha č. 6: Zápisník z ověřovacího měření měřické sítě

Elektron. příloha č. 7: Vstupní a výstupní skript k vyrovnání do GNU Gamy pro ověřovací měření měřické sítě

Elektron. příloha č. 8: Zápisník z prvního měření k testování trnů a z ověřovacího měření

Elektron. příloha č. 9: Vstupní a výstupní skript k vyrovnání do GNU Gamy pro první testování trnů

Elektron. příloha č. 10: Vstupní a výstupní skript k vyrovnání do GNU Gamy pro ověřovací měření trnů.

Elektron. příloha č. 11: Zápisník z měření k testování hranolů – část 1

Elektron. příloha č. 12: Zápisník z měření k testování hranolů – část 2

Elektron. příloha č. 13: Vstupní a výstupní soubor k vyrovnání do GNU Gamy pro měření hranolů – část 1

Elektron. příloha č. 14: Vstupní a výstupní soubor k vyrovnání do GNU Gamy pro měření hranolů – část 2

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Fotografie laboratoře B 208 13

Obr. 2: Schéma laboratorní sítě 14

Obr. 3: Fotografie odrazného štítku bodu měřické sítě 14

Obr. 4: Fotografie bodů pevné měřické sítě 15

Obr. 5: Fotografie stabilizace stanoviska 16

Obr. 6: Fotografie stabilizace nucené centrace pro testované příslušenství 16

Obr. 7: Totální stanice Trimble S8 High Precision 17

Obr. 8: Totální stanice Trimble S6 High Precision 18

Obr. 9: Referenční kulový hranol 19

Obr. 10: a) Barometr GPB 2300, b) Teploměr GFTH 95 19

Obr. 11: Utažení trojnožky na rysku 26

Obr. 12: Referenční trojnožka k testování trnů Leica GDF321-2 35

Obr. 13: Testované trny 35

Obr. 14: Referenční cíl pro testování hranolů 36

Obr. 15: Zaměřování vybraného trnu s kulovým hranolem 37

Obr. 16: Testované hranoly 41

Obr. 17: Testování hranolů 43

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Excentricita trnu Leica GZR 3 (světlejší) 45

Graf 2: Excentricit trnu Leica GZR 3 (tmavší) 46

Graf 3: Excentricita trnu Topcon (1) 46

Graf 4: Excentricita trnu Topcon (2) 47

Graf 5: Excentricita trnu Topcon (6) 47

Graf 6: Excentricita trnu Sokkisha 48

Graf 7: Středy měřených hranolů - klasické hranoly 49

Graf 8: Středy měřených hranolů - válcové terče 50

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Výběrové směrodatné odchylky měření z testu porovnání metod cílení..... 25

Tab. 2: Tabulka směrodatných odchylek souřadnicových rozdílů..... 31

Tab. 3: Souřadnicové rozdíly mezi souřadnicemi dvakrát zaměřené sítě..... 32

Tab. 4: Soupis testovaných trnů..... 34

Tab. 5: Soupis testovaných hranolů v kombinaci s použitým trnem a trojnožkou 40