

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA SPECIÁLNÍ GEODÉZIE



## URČENÍ PŘESNOSTI AUTOMATICKÉHO CÍLENÍ TOTÁLNÍCH STANIC Z VYROVNÁNÍ PROSTOROVÉ SÍTĚ

Bakalářská práce

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Braun, Ph.D.

Praha 2021

Hana Váchová

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Váchová Jméno: Hana Osobní číslo: 486190

Zadávací katedra: Katedra speciální geodézie

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Určení přesnosti automatického cílení totálních stanic z vyrovnání prostorové sítě

Název bakalářské práce anglicky: Determining the accuracy of automatic targeting by total stations from adjustment of spatial network

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte experimentální postup pro určení směrodatných odchylek automatického cílení totálních stanic pomocí vyrovnání prostorové sítě. Proveďte zaměření místní prostorové geodetické sítě pomocí totálních stanic Trimble S9 a Leica MS60. Zaměření proveďte opakovaně pro možnost porovnání.

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.

[2] ČSN ISO 17123-3: Optika a optické přístroje - Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů - Část 3: Teodolity. Český normalizační institut, Praha, 2005.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Jaroslav Braun, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 17.2.2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 16.5.2021

*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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.*

17.2.2021

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracovala zcela samostatně. Veškerou použitou literaturu jsem uvedla v seznamu zdrojů.

V Praze dne .....

.....

Hana Váchová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jaroslavu Braunovi, Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky, konzultace, trpělivost a odbornou pomoc při měření a zpracování této práce. Poděkování za pomoc při měření patří též Ing. Haně Braunové a Ing. Tomáši Křemenovi, Ph.D.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá návrhem experimentálního postupu, určujícího přesnost automatického cílení totálních stanic z vyrovnání volné prostorové sítě. Do výpočtu vyrovnání byla zahrnuta Förstnerova metoda. Pomocí navrženého postupu byla testována robotická totální stanice Trimble S9 HP a robotická totální stanice Leica Nova MS60. Výstupem jsou směrodatné odchylky měřených vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek.

## **Klíčová slova**

Přesnost

Směrodatná odchylka

Automatické cílení

Totální stanice

Vyrovnání metodou nejmenších čtverců

Förstnerova metoda

## **Abstract**

The Bachelor's thesis deals with the design of an experimental procedure determining the accuracy of automatic targeting of total stations from adjustment of the free spatial network. The Förstner's method was included in the calculation of the adjustment. The Trimble S9 HP robotic total station and the Leica Nova MS 60 robotic total station were tested using the proposed procedure. The output are the standard deviations of the measured horizontal directions, zenith angels and slope lengths.

## **Keywords**

Accuracy

Standard deviation

Automatic targeting

Total station

Least square adjustment

Förstner's method

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Teoretický rámec práce .....	10
2.1	Přesnost měření .....	10
2.1.1	Postupy určování přesnosti měření .....	11
2.2	Automatické cílení.....	13
2.2.1	Princip automatického cílení.....	13
3	Návrh experimentálního řešení .....	15
3.1	Vyrovnaní volné prostorové sítě .....	16
3.1.1	Umístění sítě v prostoru .....	19
3.1.2	Zavedení vah pro měřené hodnoty .....	21
3.1.3	Řešení soustavy normálních rovnic.....	21
3.2	Förstnerova metoda.....	22
3.3	Postup vyhodnocení.....	23
4	Provedení experimentu.....	24
4.1	Použité přístroje a pomůcky .....	24
4.1.1	Totální stanice Trimble S9 HP .....	24
4.1.2	Totální stanice Leica Nova MS60 .....	25
4.1.3	Minihranol GMP101 .....	25
4.1.4	Trn GRT144 .....	26
4.1.5	Trojnožka GDF312 .....	26
4.1.6	Stativ GST120-9.....	26
4.1.7	Teploměr a tlakoměr .....	27
4.2	Lokalita .....	27
4.3	Stabilizace bodů a příprava měření.....	28
4.4	Průběh a postup měření .....	29
4.4.1	První měřicí den .....	29
4.4.2	Druhý měřicí den.....	31
4.5	Zpracování měřených hodnot .....	32
4.6	Výsledné hodnoty určené vyrovnáním .....	33
4.6.1	Trimble S9 HP.....	33
4.6.2	Leica Nova MS60 .....	33
4.6.3	Vývoj velikosti směrodatných odchylek .....	34
4.7	Hodnocení výsledné přesnosti .....	35

4.7.1	Trimble S9 HP.....	35
4.7.2	Leica Nova MS60 .....	36
4.7.3	Porovnání použitých přístrojů.....	36
5	Závěr .....	37
6	Seznam literatury .....	38
7	Seznam tabulek .....	40
8	Seznam obrázků .....	41
9	Seznam elektronických příloh.....	42



# 1 Úvod

V souvislosti s nepřetržitým rychle narůstajícím vývojem techniky a se zvyšujícími se nároky uživatelů na používané vybavení, přicházejí výrobci neustále s novými inovacemi nabízených produktů. Přináší širokou škálu možností a služeb, které usnadňují a zpřesňují vykonávanou práci. Běžně užívaným standardem se v poslední době staly robotické totální stanice, které disponují funkcí automatického cílení. V oboru inženýrské geodézie je však zapotřebí i přes zmiňovaný technologický vývoj, který přináší vysokou přesnost přístrojů, dbát na reálně dosažitelnou kvalitu výsledků a nepokládat požadavek přesnosti měření za předem splněný. Přesné práce a spolehlivost výsledků jsou prioritou tohoto odvětví. Adekvátní je tak, při zpracování a vyhodnocování geodeticky měřených dat, určovat odhady směrodatných odchylek z měření v terénu.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat experimentální postup určení směrodatných odchylek měřených veličin pomocí automatického cílení totálních stanic. Koncepce postupu spočívá v zaměření místní prostorové geodetické sítě a v jejím následném vyrovnání metodou nejmenších čtverců. Výpočet je prováděn iteračně na základě porovnání apriorní a aposteriorní směrodatné odchylky jednotkové. V každém kroku iterace jsou dle Försnerovy metody určeny směrodatné odchylky jednotlivých skupin měření – vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek, které jsou následně označeny za vstupní přesnost v dalším kroku iterace.

Výstupem předkládané práce je přesnost automatického cílení totálních stanic Trimble S9 HP a Leica Nova MS60, určená dle navrženého experimentálního postupu.

## 2 Teoretický rámec práce

Tato kapitola je věnována teoretickému nahlédnutí do zkoumané problematiky. Definovány jsou zde stěžejní termíny hlavního tématu práce, jako je přesnost měření nebo princip automatického cílení.

### 2.1 Přesnost měření

V oblasti inženýrské geodézie je kladen důraz především na velmi přesné práce. Z tohoto důvodu je obzvláště důležité zabývat se přesností a spolehlivostí dosažených výsledků měření. Žádné měření totiž nelze zcela stoprocentně separovat od rušivých vlivů, které na něj působí už jen z principu samotného dění v přírodě. Pomocí přesného přístroje, vhodné metody a zkušeného měřiče lze tyto rušivé vlivy částečně potlačit, nikdy ne však úplně odstranit – každý výsledek měření je tedy zcela nutně poznamenán skutečnou chybou, která má náhodnou a systematickou složku. [1]

Podle ČSN ISO 5725-1: Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření – Část 1: Obecné zásady a definice je přesnost měření charakterizována pomocí termínů „pravdivost“ a „preciznost“. Pravdivost měření je možné popsat jako odchylku pravé (přijaté referenční) hodnoty od výsledku měřených dat. Preciznost lze vyjádřit jako variabilitu výsledků opakovaných měření za stejných podmínek. [2]

Zmiňovaná norma je platná od roku 2018, jejím cílem bylo nahradit dosavadní termíny užívané v souvislosti s přesností výsledků měření [2]. Proto je možné se stále setkat v různých literaturách s odlišnými pojmy zabývajícími se touto problematikou (např. správnost a spolehlivost).

#### PŘESNÁ DEFINICE TERMÍNŮ DLE ČSN ISO 5725-1

##### **přesnost** (*accuracy*)

„Těsnost shody mezi výsledkem zkoušky a přijatou referenční hodnotou.“ [2]

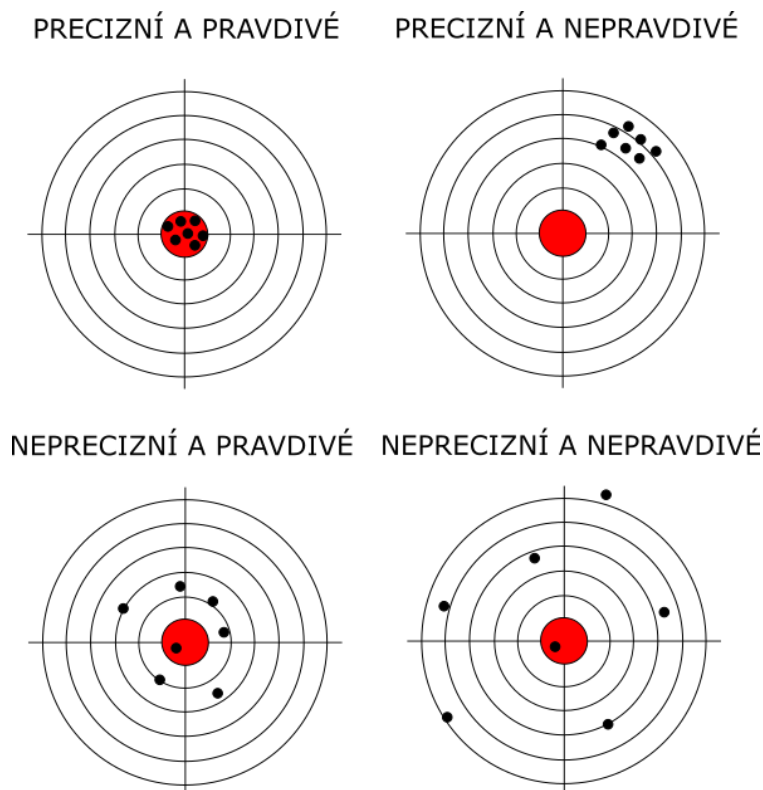
##### **pravdivost; správnost** (*trueness*)

„Těsnost shody mezi průměrnou hodnotou získanou z velké řady výsledků zkoušek a přijatou referenční hodnotou.“ [2]

##### **preciznost** (*precision*)

„Těsnost shody mezi nezávislými výsledky zkoušek získanými za předem specifikovaných podmínek.“ [2]

Co je pravdivé a precizní je často vysvětlováno schématickým zákresem střelby na terč (obr. 1).



Obrázek 1 – Schématický zákres pravdivých a precizních výsledků měření [vlastní zpracování]

### 2.1.1 Postupy určování přesnosti měření

Klíčovým faktorem pro získání požadovaných výsledků je přesnost používaného přístroje. Nejspolehlivější odhady jsou získávány přímo z měření v terénních podmínkách. Způsobů, kterými se dají testovat směrodatné odchylky měřených veličin, je více. Některé jsou nastíněny níže.

#### POSTUP DLE ČSN ISO 17123

ČSN ISO 17123: Optika a optické přístroje – Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů je rozdělena do 7 částí. V souvislosti s touto prací je podstatná Část 3: Teodolity [3] a Část 4: Elektrooptické dálkoměry [4]. V obou částech normy jsou uvedeny polní postupy, které určují úhlovou, respektive délkovou přesnost zvoleného přístroje a posuzují vhodnost jeho použití pro daný úkol. Vyhodnocení lze provést za pomoci kompletního či zjednodušeného testu.

Zjednodušený test poskytuje pouze přibližný odhad dosažené přesnosti přístroje. Kompletní test je doplněn o statistické vyhodnocení výsledků – např. zda je určená směrodatná odchylka měřených veličin menší než výrobcem udávaná přesnost. [3, 4]

Testováním úhlové přesnosti dle ČSN ISO 17123-3 se zabývá např. bakalářská práce „Testování úhlové přesnosti totálních stanic Trimble M3“. Autor ve své práci zkouší 12 teoreticky stejných přístrojů a vyhodnocuje, které přístroje jsou lepší a vhodnější pro přesná měření [5].

## EXPERIMENTÁLNÍ POSTUPY

Experimentálními postupy určování a hodnocení přesnosti měření se ve svých závěrečných pracích zabývalo hned několik autorů.

V rámci bakalářské práce „Testování přesnosti automatického cílení totálních stanic Trimble S6 a S8“ [6] je navržen způsob určování přesnosti měřených vodorovných směrů s využitím automatického cílení. Jedná se o postup, při kterém dochází k zaměření geodetické mikrosítě a k následnému iteračnímu vyrovnání měřených hodnot na základě hledání rovnosti apriorní a aposteriorní směrodatné odchylky jednotkové pomocí změn vah měření. Autorka ve své práci též provádí experiment, při němž porovnává přesnost automatického cílení s manuálním.

Cílem diplomových prací „Určování excentricit hranolových sestav“ [7] a „Experimentální testování soustřednosti geodetického příslušenství“ [8] je určení velikosti excentricit geodetických pomůcek, tedy stanovení velikosti tohoto vlivu na přesnost měření. Hodnota výstřednosti je v pracích vyjádřena jako souřadnicový rozdíl mezi pozorovaným a referenčním bodem. Dále jsou navržena doporučení pro minimalizaci vlivu těchto chyb.

Diplomová práce „Porovnání automatického a manuálního cílení ve zkušební síti dvojicí přístrojů (Trimble S3)“ [9] se zabývá srovnáním jednotlivých metod cílení na různé hranoly a testováním přesnosti automatického cílení pro dvojici přístrojů stejného typu. Výsledky jsou určeny na základě měřených směrů a délek ve zkušební síti s vyrovnáním metodou nejmenších čtverců.

Souhrnná metodika zpracování a určování velmi přesných geodetických měření, která jsou představována hodnotami ze zaměření prostorových mikrosítí, je navržena a popsána v disertační práci „Simulace, modelování a statistické zpracování geodetických měření“ [10]. Celý postup se skládá z několika dílčích kroků (od nahrání surových dat po celkové vyhodnocení), které vytváří automatizovaný softwarový nástroj ke komplexnímu zpracování naměřených dat s důrazem na přesnost vyrovnaných veličin.

## 2.2 Automatické cílení

Schopnost automatického cílení se v dnešní době stává téměř nepostradatelnou technologií ve všech oblastech geodetického měření. Přístroje disponující automatickým cílením nabízí výrazné zvýšení ekonomičnosti měření a ovládají tak geodetický trh.

Automatické cílení je používáno ve dvou režimech. Jedním z nich je kontinuální měření a druhým je metoda „zastav a zacil“ (stop and go), která byla využita při této práci.

Celý proces spočívá v principu řízení přístroje, které realizuje přesné nasměrování osy dalekohledu na zvolený cíl. Postup lze rozdělit do tří kroků: hrubé vyhledávání, identifikace cíle a přesné zacílení. [11]

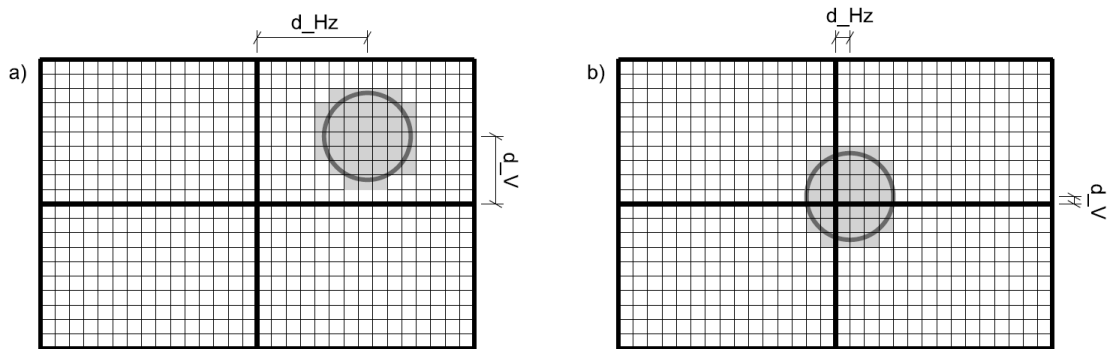
### 2.2.1 Princip automatického cílení

V prvním kroku je potřeba přístroj přibližně nasměrovat na odrazný hranol, tzn. hrubě zacílit. Systém totální stanice obvykle vysílá infračervený laserový paprsek, který se odrazí od hranolu a jeho výsledná stopa je zachycena na senzoru přístroje. Optická osa dalekohledu při tom opisuje spirálu kolem definovaného zorného pole tak dlouho, dokud snímač nenalezne nejsilněji odražený signál nebo dokud naopak nevyhodnotí, že se v jeho zorném poli žádný odrazný hranol nevyskytuje. [12]

V druhém kroku je v důsledku zamezení záměny cíle s jiným cílem či s dalšími reflexními prvky prováděna identifikace hranolu pomocí párování a vysílání signálu (aktivní mód) nebo pomocí počáteční identifikace nevhodných cílů (pasivní mód). [11]

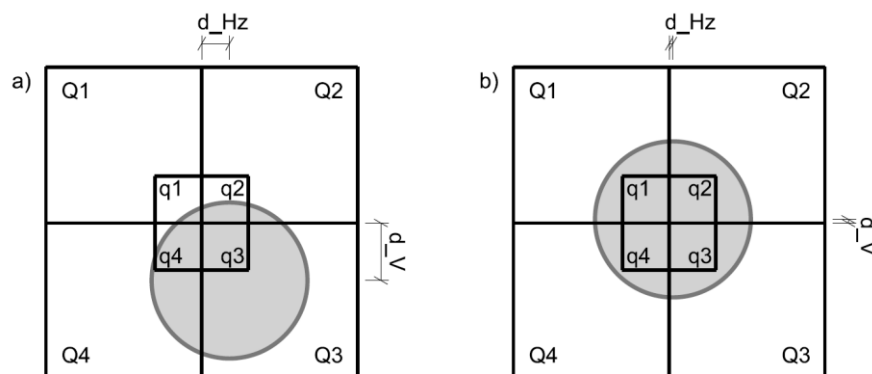
V posledním kroku je na základě metody zpracování digitálního obrazu provedeno přesné docílení. To znamená, že dochází k co nejpřesnějšímu natočení dalekohledu na střed odrazného hranolu a následně je provedeno odečtení měřených hodnot.

Přístroje od výrobce Leica jsou vybaveny CCD (Charge-coupled device) nebo CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) obrazovými senzory. Navracená světelná stopa je zachycena na obrazovém poli, poté je její střed převeden na pravoúhlé souřadnice a následně je vypočtena odchylka středu této stopy od centra snímacího senzoru (obr. 2). Na základě vypočtené odchylky je dalekohled přetočen tak, aby osa dalekohledu byla co nejbližší středu odrazného hranolu. Tento postup docilování je prováděn do té doby, než je dříve zmiňovaná odchylka menší než výrobcem stanovená tolerance. V takovém případě již nedochází k pohybu přístroje a rozdíl z nedokonalého docílení je přičten k měřeným hodnotám na úhломěrných stupnicích. [11, 12]



Obrázek 2 – Laserová stopa na obrazovém senzoru: a) stopa po hrubém zacílení, b) stopa po přesném zacílení [11]

V přístrojích od firmy Trimble je senzor tvořen čtyřmi světlocitlivými detektory (jedná se o tzv. kvadrantové detektory). V případě, že navracená světelná stopa nedopadá na všechny čtyři části senzoru, přístroj se snaží najít pozici, ve které by stopa na tyto čtyři části dopadala. Poté je pro každý kvadrant vyhodnocena přijímaná intenzita světelné stopy a následně je určena odchylka středu této stopy od osy dalekohledu přístroje. Přesné cílení na střed hranolu nastává v okamžiku stejných intenzit ve všech čtyřech kvadrantech čipu (obr. 3). Zbytková chyba od středu stopy je přičtena k měřeným hodnotám na úhlo-  
měrných stupnicích stejně jako v předchozím případě. [11]



Obrázek 3 – Laserová stopa na kvadrantovém detektoru: a) stopa po hrubém zacílení, b) stopa po přesném zacílení [11]

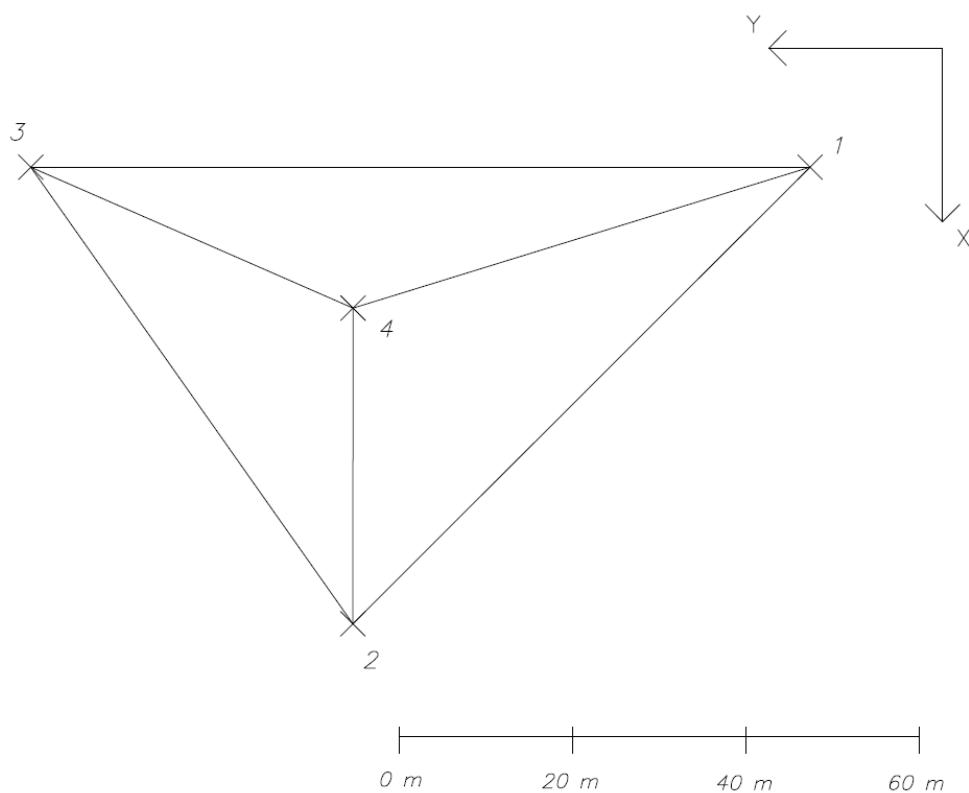
### 3 Návrh experimentálního řešení

Cílem této práce je návrh experimentálního řešení určování směrodatných odchylek měřených veličin pomocí automatického cílení totálních stanic z vyrovnání prostorové geodetické sítě. Tato kapitola je věnována podrobnému popisu navržené metody.

Nejspolehlivější odhady přesnosti měřených veličin je optimální určovat z reálného měření v terénu, tedy ze zaměření geodetické sítě s větším počtem nadbytečných měření a z následného vyrovnání sítě metodou nejmenších čtverců. Aplikováním metody nejmenších čtverců však získáváme jen aposteriorní odhad přesnosti kompletní sítě jako celku – dochází ke vzájemnému sloučení všech vlivů. [1]

V důsledku této skutečnosti je v předkládané práci do výpočtu vyrovnání zahrnuta tzv. Förstnerova metoda odhadu variačních komponent. Umožňuje určit odhady směrodatných odchylek různých skupin měření zvlášť (v tomto konkrétním případě odhad přesnosti měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů). [13]

Pro účely experimentu tak byla navržena geodetická síť o čtyřech bodech ve tvaru trojúhelníku s jedním centrálním bodem uprostřed (obr. 4).



Obrázek 4 – Schéma sítě [vlastní zpracování]

V navržené síti lze z každého stanoviska zaměřit osnovu vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek na ostatní body sítě. To znamená, že celkový počet měřených veličin při zaměření celé sítě v jedné skupině čítá 36 hodnot – 12 vodorovných směrů, 12 zenitových úhlů a 12 šikmých délek. Celkový počet neznámých veličin činí 16 hodnot – 4 souřadnice X, 4 souřadnice Y, 4 souřadnice Z a 4 orientační posuny. Počtu nadbytečných měření tedy odpovídá

$$36 - 16 = 20 \quad (1)$$

hodnot a měřená data je třeba vyrovnat.

V předkládané práci byla síť zaměřována ve 3 a v 15 skupinách. Do vyrovnání pak vstupovaly výsledné hodnoty každé skupiny samostatně. To znamená, že pro 3 měřené skupiny celkový počet měřených veličin čítá 108 hodnot a počet nadbytečných měření je následně roven 92. V případě 15 měřených skupin činí celkový počet měření 540 hodnot a počtu nadbytečných měření odpovídá 524 hodnot.

**Tabulka 1 – Počet měření, neznámých a nadbytečných měření podle počtu skupin**

Počet skupin	Počet Měření	Počet Neznámých	Počet nadbytečných měření
1	36	16	20
3	108	16	92
15	540	16	524

### 3.1 Vyrovnání volné prostorové sítě

Základem navrženého postupu určení směrodatných odchylek automatického cílení je aplikace iteračního vyrovnání volné prostorové sítě metodou nejmenších čtverců. Princip výpočtu vyrovnání je pro konkrétní situaci navržené sítě popsán v této kapitole. Veškeré vzorce a vztahy byly čerpány z publikace „Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii“ [1] a z disertační práce Ing. Pavla Třasáka [10].

Podmínkou metody nejmenších čtverců je

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v} = \min, \quad (2)$$

kde  $\mathbf{v}$  je vektor oprav a  $\mathbf{P}$  je váhová matice měřených veličin. Při vyrovnání tedy dochází k minimalizaci sumy kvadrátů oprav měření. Opravy  $\mathbf{v}$  jsou definovány jako rozdíl vektoru vyrovnaných hodnot měřených veličin  $\bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x})$  a vektoru hodnot přímo měřených veličin  $\mathbf{l}$ . Obecně lze zapsat rovnici oprav jako:

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}) - \mathbf{l}. \quad (3)$$



Měřenými veličinami jsou šikmá délka  $sd$ , vodorovný směr  $\varphi$  a zenitový úhel  $\zeta$ .  
Vektor měření:

$$\mathbf{l} = (\mathbf{l}_{sd} \ \mathbf{l}_{\varphi} \ \mathbf{l}_{\zeta})^T, \quad (4)$$

kde

$$\mathbf{l}_{sd} = (sd_1 \ sd_2 \ \dots \ sd_m)^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{l}_{\varphi} = (\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_m)^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{l}_{\zeta} = (\zeta_1 \ \zeta_2 \ \dots \ \zeta_m)^T. \quad (7)$$

Kde  $m$  značí počet měřených šikmých délek, respektive měřených vodorovných směrů nebo měřených zenitových úhlů.

Neznámými veličinami jsou všechny souřadnice bodů sítě a orientační posuny osnov vodorovných směrů měřených na všech bodech sítě. Vektor neznámých:

$$\mathbf{X} = (X_1 \ X_2 \ \dots \ X_4 \ Y_1 \ \dots \ Y_4 \ Z_1 \ \dots \ Z_4 \ op_1 \ \dots \ op_4)^T. \quad (8)$$

Vztahy zprostředkující funkční závislost mezi měřeními a neznámými veličinami lze vyjádřit jako:

$$sd_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}, \quad (9)$$

$$\varphi_{ij} = \arctan\left(\frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i}\right) - op_i + o_K, \quad (10)$$

$$\zeta_{ij} = \arccos\left(\frac{Z_j - Z_i}{\sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}}\right), \quad (11)$$

kde  $i$  značí stanovisko,  $j$  cíl,  $op_i$  orientační posun na příslušném stanovisku a  $o_K$  opravu do správného kvadrantu.

Z výše uvedených vzorců (9), (10), (11) je patrné, že vztahy mezi měřeními veličinami a neznámými veličinami nejsou lineární. Proto je třeba provést jejich linearizaci. To lze učinit rozvojem funkcí v Taylorovu řadu s omezením na členy pouze prvního řádu:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{dx}, \quad (12)$$

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}_0) + \frac{\partial \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \cdot \mathbf{dx} - \mathbf{l}. \quad (13)$$

Pokud zavedeme substituci:

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}, \quad (14)$$

$$\mathbf{l}' = \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{l}, \quad (15)$$

lze psát rovnici oprav jako:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{l}', \quad (16)$$

kde  $\mathbf{x}_0$  je vektor přibližných hodnot neznámých veličin,  $\mathbf{dx}$  je vektor přírůstků přibližných hodnot neznámých veličin,  $\mathbf{l}'$  je vektor redukovaných měření,  $\bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}_0)$  je vektor měřených veličin určených dosazením přibližných hodnot neznámých veličin do funkčních vztahů (9), (10), (11) a  $\mathbf{A}$  je matice parciálních derivací jednotlivých funkcí měřených veličin podle jednotlivých neznámých. Matice  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{sd} \\ \mathbf{A}_\varphi \\ \mathbf{A}_\zeta \end{bmatrix}, \quad (17)$$

kde

$$\mathbf{A}_{sd} = \begin{bmatrix} \frac{\partial sd_1}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial X_4} & \frac{\partial sd_1}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial Y_4} & \frac{\partial sd_1}{\partial Z_1} & \frac{\partial sd_1}{\partial Z_4} & \frac{\partial sd_1}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial op_4} \\ \frac{\partial sd_2}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial X_4} & \frac{\partial sd_2}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial Y_4} & \frac{\partial sd_2}{\partial Z_1} & \frac{\partial sd_2}{\partial Z_4} & \frac{\partial sd_2}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial op_4} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial sd_m}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_m}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial X_4} & \frac{\partial sd_m}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial Y_4} & \frac{\partial sd_m}{\partial Z_1} & \frac{\partial sd_m}{\partial Z_4} & \frac{\partial sd_m}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial op_4} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

podobně pro  $\mathbf{A}_\varphi$  a  $\mathbf{A}_\zeta$ . Nenulové derivace mají tvar:

- Pro šikmou délku

$$\frac{\partial sd_{ij}}{\partial X_i} = -\frac{\Delta X_{ij}}{sd_{ij}}, \quad \frac{\partial sd_{ij}}{\partial X_j} = \frac{\Delta X_{ij}}{sd_{ij}}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial sd_{ij}}{\partial Y_i} = -\frac{\Delta Y_{ij}}{sd_{ij}}, \quad \frac{\partial sd_{ij}}{\partial Y_j} = \frac{\Delta Y_{ij}}{sd_{ij}}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial sd_{ij}}{\partial Z_i} = -\frac{\Delta Z_{ij}}{sd_{ij}}, \quad \frac{\partial sd_{ij}}{\partial Z_j} = \frac{\Delta Z_{ij}}{sd_{ij}}. \quad (21)$$

- Pro vodorovný směr

$$\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial X_i} = \frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial X_j} = -\frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial Y_i} = -\frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial Y_j} = \frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad (23)$$

$$\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial \rho_i} = -1. \quad (24)$$

- Pro zenitový úhel

$$\frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial X_i} = -\frac{\Delta X_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial X_j} = \frac{\Delta X_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Y_i} = -\frac{\Delta Y_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Y_j} = \frac{\Delta Y_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Z_i} = \frac{d_{ij}}{s d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Z_j} = -\frac{d_{ij}}{s d_{ij}^2}. \quad (27)$$

Kde  $\Delta X_{ij}$ ,  $\Delta Y_{ij}$ ,  $\Delta Z_{ij}$  jsou souřadnicové rozdíly i-tého stanoviska a j-tého cíle,  $s d_{ij}$  je šikmá délka mezi i-tým stanoviskem a j-tým cílem,  $d_{ij}$  je vodorovná délka mezi i-tým stanoviskem a j-tým cílem.

Při tvorbě všech matic a vektorů je nutné dodržovat stále stejné pořadí po sobě jdoucích měřených hodnot (v tomto případě jsou do matic a vektorů nejprve vkládány všechny šikmé délky, následně všechny vodorovné směry a na závěr všechny zenitové úhly). Stále stejné pořadí je třeba dodržovat i v případě neznámých veličin (nejprve všechny x-ové souřadnice, poté všechny y-ové souřadnice, následně všechny z-ové souřadnice a na konec všechny orientační posuny).

### 3.1.1 Umístění sítě v prostoru

Protože je síť řešena jako volná síť – všechny souřadnice jsou považovány za neznámé, a síť tak není ukotvena v prostoru – je nutno do výpočtu zavést určité podmínky, které umístění sítě v prostoru jednoznačně definují (pro prostorovou síť jsou potřeba 4 podmínky).

V předkládané práci byla do výpočtu dodána podmínka Bod a směrník. Tato metoda doplňuje podmínky pro neznámé ve tvaru jednoho neměnného bodu a jednoho neměnného směrníku.

- Podmínka pro neměnný bod:

$$X_i - X_{i(x_0)} = 0, \quad (28)$$

$$Y_i - Y_{i(x_0)} = 0, \quad (29)$$

$$Z_i - Z_{i(x_0)} = 0. \quad (30)$$

Po linearizaci:

$$(X_{i(x_0)} + dX_i) - X_{i(x_0)} = 0, \quad (31)$$

$$(Y_{i(x_0)} + dY_i) - Y_{i(x_0)} = 0, \quad (32)$$

$$(Z_{i(x_0)} + dZ_i) - Z_{i(x_0)} = 0, \quad (33)$$

- Podmínka pro neměnný směrník:

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij(x_0)} = 0, \quad (34)$$

Po linearizaci:

$$\sigma_{ij(x_0)} + \frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2} dX_i - \frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2} dY_i - \frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2} dX_j + \frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2} dY_j - \sigma_{ij(x_0)} = 0. \quad (35)$$

Kde  $X_i, Y_i, Z_i$  jsou souřadnice pevného bodu,  $X_{i(x_0)}, Y_{i(x_0)}, Z_{i(x_0)}$  jsou jejich přibližné hodnoty a  $\sigma_{ij}$  je směrník z  $i$ -tého stanoviska na  $j$ -tý cíl,  $\sigma_{ij(x_0)}$  je jeho přibližná hodnota.

V této práci byl jako pevný bod stanoven bod č. 1 a neměnný směrník byl zvolen z bodu č. 1 na bod č. 3. Důvodem výběru uvedené kombinace byla nejdelší vzdálenost mezi těmito body. Matice linearizovaných podmínek  $\mathbf{B}$  (matice parciálních derivací jednotlivých podmínek podle jednotlivých neznámých) pro případ fixovaného bodu č. 1 a fixovaného směrníku  $\sigma_{13}$ :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\Delta Y_{13}}{d_{13}^2} & 0 & \frac{-\Delta Y_{13}}{d_{13}^2} & 0 & \frac{-\Delta X_{13}}{d_{13}^2} & 0 & \frac{\Delta X_{13}}{d_{13}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (36)$$

### 3.1.2 Zavedení vah pro měřené hodnoty

Veličiny vstupující do vyrovnání jsou charakterizovány s rozdílnou přesností. To je ve výpočtu uváženo zaváděním vah pro hodnoty měřených veličin. Váha jednotlivých měření je dána:

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}, \quad (37)$$

kde  $\sigma_0$  je apriorní jednotková střední chyba (směrodatná odchylka měření o váze rovné jedna) – v tomto případě volená konstanta  $\sigma_0 = 1$ . A  $\sigma_i$  je apriorní směrodatná odchylka měřené veličiny (tj. apriorní směrodatná odchylka měřené šikmé délky  $\sigma_{sd}$ , apriorní směrodatná odchylka měřeného vodorovného směru  $\sigma_\varphi$ , apriorní směrodatná odchylka měřeného zenitového úhlu  $\sigma_\zeta$ ). Na základě takto určených vah měření lze sestavit diagonální váhovou matici  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{sd_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{sd_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{\zeta_m} \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Apriorní (vstupní) hodnoty směrodatných odchylek měřených veličin byly zvoleny na základě odhadů přesnosti měřených veličin, udávaných výrobcem použitého přístroje. Úhlová směrodatná odchylka je pro oba použité přístroje deklarována hodnotou 0,3 mgon. Přesnost měřených délek je výrobcem udávána ve tvaru 1 mm + 2 ppm (Trimble), respektive 1 mm + 1,5 ppm (Leica). Vzhledem ke skutečnosti, že se v celé síti pohybovaly záměry vzdálené do 100 m, apriorní přesnost měřených šikmých délek byla vyjádřena jedním číslem, a to 1,2 mm.

### 3.1.3 Řešení soustavy normálních rovnic

Určovaný vektor přírůstků vyrovnaných neznámých  $\mathbf{dx}$  je následně možné vyjádřit pomocí soustavy normálních rovnic (systému nezávislých lineárních rovnic) ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{dx} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}' \\ \mathbf{b} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (39)$$

kde  $\mathbf{k}$  je pomocný vektor Lagrangeových koeficientů (korelát),  $\mathbf{0}$  je nulová matice o příslušných rozměrech a  $\mathbf{b}$  je vektor absolutních členů linearizovaných podmínek neznámých veličin.

Vyrovnané souřadnice bodů sítě a orientační posuny  $\bar{x}$  jsou určeny součtem příbližných hodnot neznámých veličin  $x_0$  s přírůstky neznámých veličin  $dx$  určených ze vztahu (39)

$$\bar{x} = x_0 + dx. \quad (40)$$

Jejich směrodatné odchylky jsou dány vztahem:

$$M_{\bar{x}} = s_0^2 [\bar{Q}_{xx}], \quad (41)$$

kde  $s_0$  je a posteriori směrodatná odchylka jednotková. Lze ji zapsat jako:

$$s_0 = \sqrt{\frac{v^T \cdot P \cdot v}{n - u + p}}, \quad (42)$$

kde  $n$  je počet měření,  $u$  je počet neznámých a  $p$  je počet podmínek umístění do prostoru ( $p = 4$ ). A  $\bar{Q}_{xx}$  je část matice:

$$N^{-1} = \begin{bmatrix} A^T P A & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{xx} & \bar{Q}_{kx}^T \\ \bar{Q}_{kx} & \bar{Q}_{kk} \end{bmatrix}. \quad (43)$$

Vzhledem k linearizaci rovnic pozorování je nutné výpočet vyrovnání provést iteračně. To znamená, že vyrovnané hodnoty neznámých veličin se položí rovny za přibližné hodnoty a celé vyrovnání je provedeno znovu.

V předkládané práci byla použita Förstnerova metoda, při níž v každém kroku iterace dochází ke změně směrodatných odchylek jednotlivých skupin měření (šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů) vstupujících do výpočtu váhové matice. Tento postup je aplikován do té doby, než se a posteriori směrodatná odchylka jednotková  $s_0$ , určená po vyrovnání podle vztahu (42), dostatečně přiblíží apriorní směrodatné odchylce jednotkové  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = 1 \approx s_0. \quad (44)$$

## 3.2 Förstnerova metoda

Princip Förstnerovy metody spočívá ve výpočtu jednotkové a posteriori chyby vyrovnání, která však necharakterizuje síť jako celek, nýbrž je přiřazena jednotlivým skupinám měření zvlášť (mimo a posteriori směrodatné odchylky vyrovnání  $s_0$ , je tedy určena i a posteriori směrodatná odchylka pro šikmé délky  $s_0^{sd}$ , pro vodorovné směry  $s_0^\varphi$  a pro zenitové úhly  $s_0^\zeta$ ).

Po vyrovnání volné prostorové sítě metodou nejmenších čtverců je vypočítána tzv. redundantní matice  $R$ :

$$R = I - A \bar{Q}_{xx} A^T P, \quad (45)$$

kde  $I$  je jednotková matice. Součet prvků na diagonále redundantní matice odpovídá celkovému počtu nadbytečných měření v síti, a každý prvek je tak možné považovat za příspěvek konkrétního měření. Na základě toho lze vyčíslit skutečnost, jak k počtu nadbytečných měření přispívají výše definované skupiny měření.

Pomocí těchto příspěvků  $r$  je možné vypočítat aposteriorní odhady směrodatných odchylek konkrétních skupin měření – odhad přesnosti měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů:

$$s_0^{sd} = \sqrt{\frac{\sum (vv)_{sd}}{r_{sd}}}, \quad s_0^\varphi = \sqrt{\frac{\sum (vv)_\varphi}{r_\varphi}}, \quad s_0^\zeta = \sqrt{\frac{\sum (vv)_\zeta}{r_\zeta}}. \quad (46)$$

Vypočítané odhady se použijí jako apriorní přesnost vstupující do vyrovnání a výpočet se provede znovu, jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1.3. [13]

### 3.3 Postup vyhodnocení

Výsledné odhady přesnosti měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů, určené z iteračního vyrovnání volné sítě metodou nejmenších čtverců, lze hodnotit na základě vícenásobného zaměření sítě. Taktéž může být porovnávána jejich velikost se směrodatnými odchylkami měřených veličin udávanými výrobcí přístrojů.

## 4 Provedení experimentu

V této kapitole je podrobně popsán průběh realizace navrženého experimentu. Jeho podnětem bylo určení přesnosti automatického cílení totálních stanic z vyrovnání geodetické prostorové sítě metodou nejmenších čtverců. Za účelem porovnání výsledné přesnosti různých typů přístrojů byly testovány dvě robotické totální stanice.

### 4.1 Použité přístroje a pomůcky

K měření byly využity přístroje a pomůcky zapůjčené na katedře speciální geodézie Fakulty stavební ČVUT v Praze. Jednalo se o robotickou totální stanici Trimble S9 HP, robotickou totální stanici Leica Nova MS60, 4 odrazné hranoly, 4 trny, 4 trojnožky a 4 stativy od výrobce Leica. Použit byl též digitální teploměr a tlakoměr. Specifika použitých přístrojů a pomůcek jsou uvedena níže.

#### 4.1.1 Totální stanice Trimble S9 HP

Přesnost automatického cílení byla určována robotickou totální stanicí Trimble S9 HP (Obr. 5). Je to jedna z nejvýkonnějších totálních stanic dostupných na českém trhu. Speciálně se hodí na inženýrské aplikace, kde je zapotřebí vysoká přesnost a spolehlivost měření. [14]



Obrázek 5 – Totální stanice Trimble S9 HP [14]



## TECHNICKÉ PARAMETRY PŘÍSTROJE [14]

Úhlová přesnost (směrodatná odchylka dle DIN 18723)	1 " (0.3 mgon)
Měření vzdálenosti (hranol standard)	1 mm + 2 ppm

### 4.1.2 Totální stanice Leica Nova MS60

Druhým testovaným přístrojem byla robotická totální stanice Leica Nova MS60 (Obr. 6). Jedná se o rychlou všestrannou multistanici, jež jako klasická robotická totální stanice umožňuje plně automatické měření, které je navíc velmi přesné, a zároveň zvládá zakázky na 3D laserové skenování. [15]



Obrázek 6 – Totální stanice Leica Nova MS60 [16]

## TECHNICKÉ PARAMETRY PŘÍSTROJE [15]

Úhlová přesnost	1 " (0.3 mgon)
Měření vzdálenosti	1 mm + 1.5 ppm

### 4.1.3 Minihranol GMP101

Jako cílové značky byly použity 4 minihranoly GMP101 od společnosti Leica, které jsou často využívány při přesných měřických pracích na kratší vzdálenosti. Konstanta hranolu činí +17,5 mm. Dosah měření délek je do 2000 m a centrační přesnost 1 mm. [17]

#### 4.1.4 Trn GRT144

Všechny použité hranoly byly nasazeny na trny GRT144 od výrobce Leica. Na každém stanovisku tak vznikla souprava trn + hranol (Obr. 7).



Obrázek 7 – Souprava hranol a trn [vlastní zpracování]

#### 4.1.5 Trojnožka GDF312

Při testování přesnosti automatického cílení byly použity 4 trojnožky GDF312 od společnosti Leica. Všechny byly před začátkem měření na stativě pečlivě urovnané a následně již zůstaly neměnné. Během proměřování sítě do nich byly usazovány trny s hranolem nebo přístroj.

#### 4.1.6 Stativ GST120-9

Ke stabilizaci bodů sítě byly použity klasické těžké dřevěné stativy GST120-9 od společnosti Leica (Obr. 8).



Obrázek 8 – Dřevěný stativ Leica [18]

## 4.1.7 Teploměr a tlakoměr

Okolní teplota a tlak vzduchu byly v průběhu experimentu měřeny pomocí digitálního tlakoměru a teploměru (Obr. 9).



Obrázek 9 – Teploměr a tlakoměr [vlastní zpracování]

## 4.2 Lokalita

Pro dosažení optimálních výsledků měření bylo nutné zvolit vhodné místo pro vybudování navržené sítě a následné uskutečnění experimentu. Zapotřebí bylo prostředí s minimálním vlivem rušivých elementů na měření a zároveň taková lokalita, která poskytovala viditelnost mezi všemi body v navržené síti. Vzdálenost bodů se pohybovala v rozmezí přibližně 35 až 90 m. Pro naše účely byla využita malá oblast v lese nedaleko od výukové chaty Fakulty stavební ČVUT v Praze, v Mariánské u Jáchymova.



Obrázek 10 – Lokalita měření [19]

### 4.3 Stabilizace bodů a příprava měření

Vhodné rozmístění bodů bylo zvoleno po rekognoskaci terénu. Navržená síť tvořila trojúhelník s jedním bodem uprostřed (Obr. 11). Stabilizace bodů byla zprostředkována stativy, které byly za účelem minimalizování pohybu přístroje během měření postaveny na kolíky zatlučené v zemi (Obr. 12). Na stativy byly umístěny trojnožky, které byly následně pomocí totální stanice důsledně urovnány. Před začátkem měření byly všechny použité přístroje a pomůcky přibližně hodinu temperovány.



Obrázek 11 – Vytvořená síť bodů [vlastní zpracování]



Obrázek 12 – Postavení stativu [vlastní zpracování]

## 4.4 Průběh a postup měření

Měření bylo provedeno ve dvou dnech: 8. 9. a 9. 9. 2020.

Pro správné zavedení fyzikálních korekcí byly do obou použitých přístrojů pravidelně zadávány hodnoty okolní teploty a tlaku vzduchu určované v průběhu měření. Všechna měřená data byla v obou přístrojích ukládána do zakázek vytvořených zvlášť pro oba měřicí dny.

### 4.4.1 První měřicí den

První den bylo měřeno od 15.00 do 22.00 hod. Nejprve byla použita robotická totální stanice Trimble S9 HP. Měření bylo zahájeno na bodě 4001 a poté byl přístroj přemístěn postupně na body 4002, 4003 a 4004. Na každém stanovišti byla změřena osnova vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek na ostatní body sítě v 16 skupinách. Po dokončení měření na všech stanovištích byla celá síť proměřena ještě pětkrát ve 4 skupinách. Poté byl přístroj vyměněn za robotickou totální stanicí Leica Nova MS60 a na každém stanovišti byly změřeny vodorovné směry, zenitové úhly na ostatní body sítě v 15 skupinách.



Obrázek 13 – TS Trimble S9 HP na bodě č. 4003 [vlastní zpracování]

Při měření totální stanicí Trimble S9 HP byla vždy změřena jedna skupina navíc, která byla ze zpracování výsledků vyloučena. Z předešlých zkušeností byla totiž zaznamenána jistá nesrovnalost mezi naměřenými hodnotami z první skupiny a hodnotami z ostatních skupin.

Během měření byl přístroj vyjímán pouze z trojnožky a zaměňován za hranol s trnem a naopak. Při vkládání soupravy hranolu s trnem do trojnožky byl kladen důraz na orientaci trnu kvůli eliminaci chyb zapříčiněných excentricitou pomůcek. Jejimi vlivy na měření se zabývá autorka diplomové práce [7].



Obrázek 14 – Odrazný hranol na bodě č. 4001 [vlastní zpracování]

Při použití obou přístrojů bylo využito automatického cílení – funkce autolock. Jedná se o takový způsob měření, kdy je třeba přístroj v první skupině nejprve postupně nasměrovat na jednotlivé odrazné hranoly, respektive měřené body, přiřadit jim číslo a nechat je změřit. Přístroj si tak zapamatuje polohu bodů a dále již měří sám – nejprve v první a následně v druhé poloze dalekohledu (více o principu měření pomocí automatického cílení je uvedeno v kapitole 2.2).

#### 4.4.2 Druhý měřicí den

Druhý den bylo proměření sítě opakováno. Měřeno bylo po dobu 6 hodin, a to v čase od 14.00 do 20.00 hod. Tentokrát byla nejprve použita robotická totální stanice Leica Nova MS60. Opětovně byla ze všech stanovisek změřena osnova vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek na ostatní body sítě v 15 skupinách a následně ještě pětkrát ve 3 skupinách (podobně jako předešlý den s přístrojem Trimble S9 HP). Poté byl přístroj vyměněn za robotickou totální stanici Trimble S9 HP, se kterou byla na závěr změřena osnova dříve zmiňovaných veličin na ostatní body sítě v 16 skupinách (podobně jako předešlý den s přístrojem Leica Nova MS 60).



Obrázek 15 – TS Leica Nova MS60 na bodě č. 4003 [vlastní zpracování]

## 4.5 Zpracování měřených hodnot

Sít byla během dvou dnů zaměřena celkem 7krát oběma přístroji (5krát ve 3 skupinách, 2krát v 15 skupinách na každém stanovisku). Naměřená data byla exportována do souborů v textovém formátu a následně zpracována v programu Microsoft Office Excel.

Vypočítány byly průměrné hodnoty vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek ze souborů měření v 15 skupinách a ve 3 skupinách. Poté byly určeny opravy od průměrů, výběrové směrodatné odchylky a směrodatné odchylky průměrných hodnot. Všechna data byla vypočítána zvlášť pro hodnoty měřené v první poloze dalekohledu, v druhé poloze dalekohledu a pro průměry z obou poloh dalekohledu.

Dále byly určeny výsledné hodnoty měřených veličin pro každou skupinu samostatně. Tyto hodnoty se staly vstupními daty do výpočtu vyrovnání. Maximální rozptyl mezi jednotlivými hodnotami měřenými v 15 skupinách je uveden v tab. 2.

Tabulka 2 – Maximální rozptyly mezi jednotlivými měřeními skupinami

	Šikmá délka [mm]	Vodorovný směr [mgon]	Zenitový úhel [mgon]
TRIMBLE S9 HP	0,80	3,15	1,12
LEICA NOVA MS60	0,65	1,57	0,76

Výrazný rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou vodorovného směru u přístroje Trimble S9 HP je následkem měřených dat na bodě č. 4002 při posledním zaměření sítě. Příčina odchylek mezi jednotlivými skupinami není známá (možný je mírný pohyb přístroje na stanovisku vlivem eventuálních vibrací stativu – větší rozdíly mezi měřenými hodnotami vodorovného směru byly na tomto bodě v průběhu druhého dne zaznamenány i při ostatních zaměření sítě). Při zpracování reálné zakázky by pro získání optimálních výsledků bylo na místě takto odlehlá data z výpočtu vyloučit. Obecně se však velikost rozdílů mezi měřenými hodnotami pohybovala v jednotkách grádových vteřin a méně než 1 mm. Veškerá naměřená data a jejich zpracování jsou k dispozici v připojených elektronických přílohách 5-8.

Nutno bylo též určit přibližné hodnoty souřadnic bodů sítě v místním souřadnicovém systému. Počátek soustavy byl zvolen v bodě č. 4001 a kladný směr osy Y byl vložen do spojnice bodů č. 4001 a č. 4003. Výpočet souřadnic byl taktéž proveden v programu Microsoft Office Excel.



## 4.6 Výsledné hodnoty určené vyrovnáním

Všechna naměřená data byla vyrovnána v programu MATLAB podle uvedeného postupu v kapitole 3.1 a 3.2. Kód s výpočtem je k bakalářské práci připojen formou elektronické přílohy 9.

### 4.6.1 Trimble S9 HP

V tab. 3 jsou uvedeny vyrovnané směrodatné odchylky měřených veličin pomocí automatického cílení totální stanice Trimble S9 HP.

Tabulka 3 – Směrodatné odchylky měřených veličin – Trimble S9 HP

TRIMBLE S9 HP				
Počet skupin	Šikmá délka $s_0^{sd}$ [mm]	Vodorovný směr $s_0^{\varphi}$ [mgon]	Zenitový úhel $s_0^z$ [mgon]	Měřicí den
3	0,26	0,39	0,76	1
3	0,25	0,20	0,64	1
3	0,21	0,36	0,53	1
3	0,27	0,27	0,45	1
3	0,26	0,27	0,49	1
15	0,24	0,33	0,72	1
15	0,26	0,59	0,48	2

Z výsledků vyplývá, že vypočítaná přesnost šikmých délek je pro všechna zaměření sítě konstantní. Pohybuje se v rozmezí 0,21 mm až 0,27 mm.

Směrodatné odchylky vodorovného směru s výjimkou poslední hodnoty taktéž nejsou výrazně rozptýleny – jejich hodnoty se pohybují v rozpětí 0,20 mgon až 0,39 mgon. Hodnota 0,59 mgon ostatním hodnotám neodpovídá v důsledku naměřených dat na bodě č. 4002, na která již bylo poukazováno v kapitole 4.2.

Největší rozdílnost mezi přesnostmi určenými z jednotlivých zaměření sítě byla shledána ve skupině zenitových úhlů. Hodnoty směrodatných odchylek se pohybují v rozmezí 0,45 mgon až 0,76 mgon.

### 4.6.2 Leica Nova MS60

V tab. 4 jsou uvedeny vyrovnané směrodatné odchylky měřených veličin pomocí automatického cílení totální stanice Leica Nova MS60.

Tabulka 4 – Směrodatné odchyly měřených veličin – Leica Nova MS60

LEICA NOVA MS60				
Počet skupin	Šikmá délka $s_0^{sd}$ [mm]	Vodorovný směr $s_0^{\varphi}$ [mgon]	Zenitový úhel $s_0^{\zeta}$ [mgon]	Měřicí den
3	0,16	0,14	0,79	2
3	0,21	0,14	0,81	2
3	0,20	0,16	1,04	2
3	0,17	0,11	0,99	2
3	0,15	0,12	1,04	2
15	0,25	0,28	0,72	2
15	0,09	0,16	0,85	1

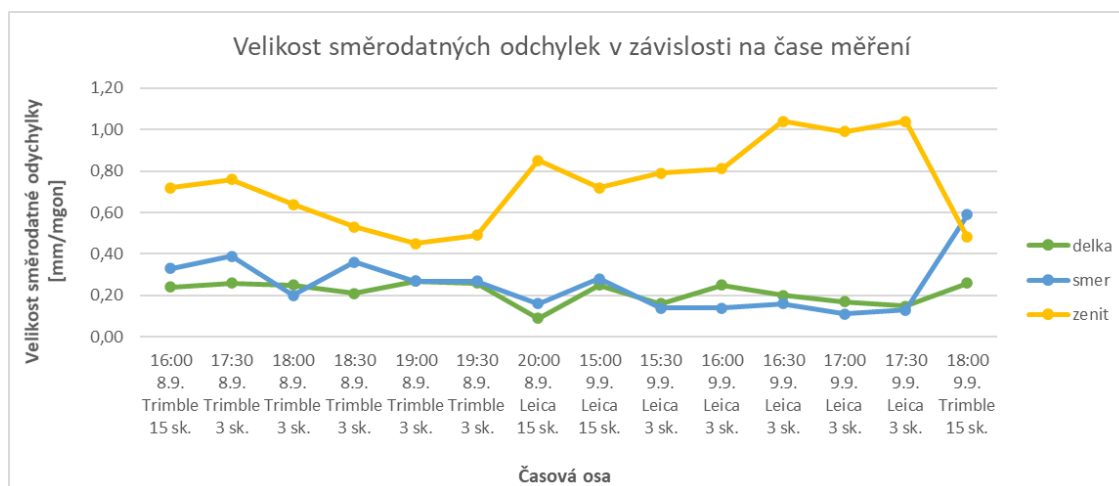
Směrodatné odchyly šikmých délek se pohybují v rozpětí 0,09 mm až 0,25 mm. Nejmenší hodnota 0,09 mm je od ostatních výsledků mírně odlehlá, jinak jsou hodnoty rozptýleny rovnoměrně.

Podobně je tomu tak i u vodorovných směrů. Směrodatné odchyly si navzájem silně odpovídají až na hodnotu 0,28 mgon, která ostatní převyšuje.

Stejně jako u přístroje Trimble S9 HP byl největší nesoulad mezi jednotlivými hodnotami shledán u zenitových úhlů. Nejmenší směrodatná odchyly činí 0,72 mgon a největší 1,04 mgon.

### 4.6.3 Vývoj velikosti směrodatných odchylek

Na obr. 16 je vizualizovaná vypočítaná přesnost totálních stanic z jednotlivých zaměření sítě v reálném časovém sledu.



Obrázek 16 – Velikost směrodatných odchylek v závislosti na čase [vlastní zpracování]

Z obr. 16 je zřejmé, že velikost směrodatných odchylek šikmých délek v průběhu obou měřicích dní drží relativně konstantní trend. Podobně je tomu tak i u směrodatných

odchylek vodorovných směrů, jejich velikost postupně dokonce mírně klesá (s výjimkou hodnoty získané z posledního proměření sítě).

Z křivky znázorňující vývoj směrodatné odchylky zenitových úhlů je patrné, že velikost odchylky závisí na použitém přístroji. Podle výsledků z prvního dne, při použití přístroje Trimble S9 HP, hodnoty klesají. Při použití přístroje Leica Nova MS60 směrodatná odchylka zenitového úhlu vzroste a stoupá i na základě výsledků získaných v průběhu druhého dne až do opětovného použití přístroje Trimble S9 HP.

Roli ve velikosti směrodatných odchylek též hrají počty měřených skupin na jednotlivých stanoviscích. Obecně si navzájem lépe odpovídají výsledky ze 3 měřených skupin, což je zcela logické.

## 4.7 Hodnocení výsledné přesnosti

Výsledná přesnost měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů byla pro oba typy přístrojů určena jako průměrná směrodatná odchylka z vypočítaných hodnot, charakterizující všechny zaměření sítě (viz. tab. 3 a tab. 4)

$$s_{sd} = \sqrt{\frac{\sum (s_0^{sd})^2}{7}}, \quad s_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum (s_0^{\varphi})^2}{7}}, \quad s_{\zeta} = \sqrt{\frac{\sum (s_0^{\zeta})^2}{7}}. \quad (47)$$

### 4.7.1 Trimble S9 HP

V tab. 5 jsou výsledné hodnoty experimentu dle (47) pro přístroj Trimble S9 HP porovnány s přesností udávanou výrobcem tohoto přístroje.

**Tabulka 5 – Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem – Trimble S9 HP [14]**

TRIMBLE S9 HP			
	Šikmá délka [mm]	Vodorovný směr [mgon]	Zenitový úhel [mgon]
Deklarovaná přesnost	1,20	0,30	0,30
Přesnost z vyrovnání	<b>0,25</b>	<b>0,36</b>	<b>0,59</b>
Rozdíl	-0,95	0,06	0,29

Ze srovnání je patrné, že hodnota směrodatné odchylky šikmé délky, určená navrženým postupem, výrazně převyšuje přesnost deklarovanou výrobcem. Přesnost vodorovného směru je téměř srovnatelná a směrodatná odchylka zenitového úhlu naopak přesnosti udávanou výrobcem nedosahuje.

## 4.7.2 Leica Nova MS60

Výsledné hodnoty charakterizující přesnost totální stanice Leica Nova MS60 jsou uvedeny v tab. 6.

Tabulka 6 – Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem – Leica Nova MS60 [15]

LEICA NOVA MS60			
	Šikmá délka [mm]	Vodorovný směr [mgon]	Zenitový úhel [mgon]
Deklarovaná přesnost	1,20	0,30	0,30
Přesnost z vyrovnání	<b>0,18</b>	<b>0,17</b>	<b>0,90</b>
Rozdíl	-1,02	-0,13	0,60

Z vypočtených hodnot je zřejmé, že směrodatné odchylky šikmé délky a vodorovného směru splňují, ba dokonce navyšují přesnost deklarovanou výrobcem přístroje. Směrodatná odchylka měřeného zenitového úhlu, stejně jako v předchozím případě u přístroje Trimble S9 HP, nedosahuje přesnosti udávané výrobcem.

## 4.7.3 Porovnání použitých přístrojů

Pokud bychom chtěli z hlediska dosažené přesnosti porovnat oba použité přístroje, nelze určit jednoznačně lepší přístroj. Z výsledných směrodatných odchylek měřených veličin plyne, že šikmé délky a vodorovné směry jsou přesněji měřeny totální stanicí Leica Nova MS60. Naopak směrodatné odchylky měřených zenitových úhlů vyšly lépe z dat měřenými totální stanicí Trimble S9 HP.

## 5 Závěr

Výstupem předkládané bakalářské práce je návrh a realizace experimentálního postupu, kterým lze určit přesnost měřených veličin pomocí automatického cílení totálních stanic.

Řešení spočívá v iteračním vyrovnání měřených hodnot, získaných zaměřením místní prostorové geodetické sítě, metodou nejmenších čtverců. V každém kroku iterace jsou na základě tzv. Förstnerovy metody odhadu variačních komponent, která poskytuje odhad přesnosti konkrétní skupiny měření, vypočítány směrodatné odchylky měřených veličin. Tyto odhady jsou následně označeny jako původní přesnost měřených veličin a vyrovnání je opakováno. Konec výpočtu nastává v okamžiku, kdy se velikost aposteriorní směrodatné odchylky jednotkové dostatečně přiblíží hodnotě apriorní směrodatné odchylky jednotkové (hodnoty jsou si přibližně rovny).

Navrženým postupem byla v rámci této práce testována data naměřená totálními stanicemi Trimble S9 HP a Leica Nova MS60. Výsledkem jsou průměrné směrodatné odchylky měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů ze 7 opakovaných zaměření sítě, viz. tab. 5 a tab. 6.

Z dosažených výsledků plyne, že velikost směrodatné odchylky zenitových úhlů pro oba typy přístrojů nedosahuje přesnosti deklarované oběma výrobci. Naopak výsledné směrodatné odchylky měřených šikmých délek v obou případech mnohonásobně převyšují přesnost deklarovanou výrobcem. Je nutné si však uvědomit, že rozměr a homogenita sítě, mohou mít za následek, že se v měřených délkách v dostatečné míře neprojeví složka systematických chyb. U vodorovných směrů přesnost dosažená totální stanicí Leica Nova MS60 převyšuje přesnost udávanou výrobcem a v případě totální stanice Trimble S9 HP jí odpovídá.

Vzhledem k tomu, že byla k testování navrženého experimentu použita měřená data ze dvou dní, do výsledných směrodatných odchylek vstupuje vliv proměnlivosti a náhodnosti počasí nebo např. přesnost urovnání přístrojů a pomůcek na stanovisku. Jedná se tak o robustní odhad přesnosti výsledku.

Závěrem lze tedy potvrdit myšlenku, že při požadavcích na vysokou přesnost měření a zpracování výsledků, je nutné při rozborech přesnosti brát v potaz reálně dosažitelnou přesnost použitého přístroje a nespoléhat se na údaje, které jsou udávány výrobcem.

## 6 Seznam literatury

- [1] HAMPACHER, Miroslav – ŠTRONER, Martin. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. České vysoké učení technické v Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT (CTU), 2011, 312 s. ISBN 978-80-01-04900-6.
- [2] ČSN ISO 5725-1: *Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření – Část 1: Obecné zásady a definice*. Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [3] ČSN ISO 17123-3: *Optika a optické přístroje – Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Část 3: Teodolity*. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Praha, 2005.
- [4] ČSN ISO 17123-4: *Optika a optické přístroje – Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Část 4: Elektrooptické dálkoměry*. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Praha, 2005.
- [5] KÚDELA, Petr. *Testování úhlové přesnosti totálních stanic Trimble M3*. Praha, 2017. Bakalářská práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [6] FLÁDROVÁ, Hana. *Testování přesnosti automatického cílení totálních stanic Trimble S6 a S8*. Praha, 2016. Bakalářská práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [7] SOBOLOVÁ, Kristýna. *Určení excentricit hranolových sestav*. Praha, 2016. Diplomová práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [8] CÍSAŘOVÁ, Lucie. *Experimentální testování soustřednosti geodetického příslušenství*. 2016. Diplomová práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [9] PYŠEK, Jaroslav. *Porovnání automatického a manuálního cílení ve zkušební síti dvojicí přístrojů (Trimble S3)*. Praha, 2016. Diplomová práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [10] TŘASÁK, Pavel. *Simulace, modelování a statistické zpracování geodetických měření*. Praha, 2013. Disertační práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [11] BRAUN, J.; BRAUNOVÁ, H. *Automatické cílení totálních stanic na krátké vzdálenosti* In: Geodézie ve stavebnictví a průmyslu 2021. Český svaz geodetů a kartografů, o.s., 2021.

- [12] DOBROVOLNÝ, Pavel. *Testování využití automatického cílení pro určování posunů a přetvoření vodních děl*. Praha, 2013. Diplomová práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [13] BRAUNOVÁ, H.; MICHAL, O.; ŠTRONER, M.; BRAUN, J. *Určení přesnosti geodetických měření z vyrovnání kombinované sítě* In: *Geodézie ve stavebnictví a průmyslu 2020*. Český svaz geodetů a kartografů, o.s., 2020. p. 38-43. ISBN 978-80-02-02898-7.
- [14] *Trimble S9/S9 HP: DATASHEET* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: [https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-04/022516-155F\\_TrimbleS9\\_DS\\_A4\\_0419\\_LR\\_0.pdf](https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-04/022516-155F_TrimbleS9_DS_A4_0419_LR_0.pdf)
- [15] *Leica Nova MS60: Technické specifikace* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/data/original/totalni-stanice/leica-nova-ms60-ds-933430-0220-cs-lr.pdf>
- [16] *GEFOS Leica: MS60 multistanice* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/geodeticke-pristroje/totalni-stanice/ms60-multistanice>
- [17] *Geoserver.cz: minihranol GMP101* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: [https://www.geoserver.cz/stativy-vytycky-centrace/minihranoly-a-stit-ky/gmp101\\_professional\\_minihranol\\_vhodny\\_pro\\_presna\\_mereni\\_na\\_kratsi\\_vzdalenosti\\_-gmp101\\_professional\\_\\_\\_minihranol\\_vhodny\\_pro\\_presna\\_mereni\\_na\\_kratsi\\_vzdalenosti\\_](https://www.geoserver.cz/stativy-vytycky-centrace/minihranoly-a-stit-ky/gmp101_professional_minihranol_vhodny_pro_presna_mereni_na_kratsi_vzdalenosti_-gmp101_professional___minihranol_vhodny_pro_presna_mereni_na_kratsi_vzdalenosti_)
- [18] *GEFOS Leica: Stativ GST120-9* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: [https://www.gefos-leica.cz/e-shop/prislusenstvi-stavebnich-mericich-pristroju/stativy/leica-gst120-9-tezky-dreveny-stativ-se-srouby-bukove-drevo\\_\\_\\_667301](https://www.gefos-leica.cz/e-shop/prislusenstvi-stavebnich-mericich-pristroju/stativy/leica-gst120-9-tezky-dreveny-stativ-se-srouby-bukove-drevo___667301)
- [19] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://mapy.cz>

## 7 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Počet měření, neznámých a nadbytečných měření podle počtu skupin.....	16
Tabulka 2 – Maximální rozptyly mezi jednotlivými měřenými skupinami .....	32
Tabulka 3 – Směrodatné odchytky měřených veličin – Trimble S9 HP .....	33
Tabulka 4 – Směrodatné odchytky měřených veličin – Leica Nova MS60 .....	34
Tabulka 5 – Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem – Trimble S9 HP [14].....	35
Tabulka 6 – Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem – Leica Nova MS60 [15] .....	36



## 8 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Schématický zakres pravdivých a prezicních výsledků měření [vlastní zpracování].....	11
Obrázek 2 – Laserová stopa na obrazovém senzoru: a) stopa po hrubém zacílení, b) stopa po přesném zacílení [11] .....	14
Obrázek 3 – Laserová stopa na kvadrantovém detektoru: a) stopa po hrubém zacílení, b) stopa po přesném zacílení [11] .....	14
Obrázek 4 – Schéma sítě [vlastní zpracování].....	15
Obrázek 5 – Totální stanice Trimble S9 HP [14] .....	24
Obrázek 6 – Totální stanice Leica Nova MS60 [16] .....	25
Obrázek 7 – Souprava hranol a trn [vlastní zpracování] .....	26
Obrázek 8 – Dřevěný stativ Leica [18].....	26
Obrázek 9 – Teploměr a tlakoměr [vlastní zpracování] .....	27
Obrázek 10 – Lokalita měření [19].....	27
Obrázek 11 – Vytvořená síť bodů [vlastní zpracování].....	28
Obrázek 12 – Postavení stativu [vlastní zpracování].....	28
Obrázek 13 – TS Trimble S9 HP na bodě č. 4003 [vlastní zpracování].....	29
Obrázek 14 – Odrazný hranol na bodě č. 4001 [vlastní zpracování].....	30
Obrázek 15 – TS Leica Nova MS60 na bodě č. 4003 [vlastní zpracování].....	31
Obrázek 16 – Velikost směrodatných odchylek v závislosti na čase [vlastní zpracování] .....	34

## 9 Seznam elektronických příloh

**Příloha 1 200908\_SIT\_S9.txt**

- surová data, den první, TS Trimble S9 HP

**Příloha 2 200908\_SIT\_MS60.txt**

- surová data, den první, TS Leica Nova MS60

**Příloha 3 200909\_SIT\_S9.txt**

- surová data, den druhý, TS Trimble S9 HP

**Příloha 4 200909\_SIT\_MS60.txt**

- surová data, den druhý, TS Leica Nova MS60

**Příloha 5 zpracovani\_200908\_SIT\_S9.xlsx**

- zpracování měřených hodnot z prvního dne, TS Trimble S9 HP

**Příloha 6 zpracovani\_200908\_SIT\_MS60.xlsx**

- zpracování měřených hodnot z prvního dne, TS Leica Nova MS60

**Příloha 7 zpracovani\_200909\_SIT\_S9.xlsx**

- zpracování měřených hodnot z druhého dne, TS Trimble S9 HP

**Příloha 8 zpracovani\_200909\_SIT\_MS60.xlsx**

- zpracování měřených hodnot z druhého dne, TS Leica Nova MS60

**Příloha 9 kod\_vyrovnani\_MNC\_volna\_3D\_sit.m**

- kód s výpočtem vyrovnání volné prostorové geodetické sítě

**Příloha 10 vstup\_vyrovnani\_200908\_SIT\_S9.txt**

- měřená data vstupující do výpočtu vyrovnání, den první, TS Trimble S9

**Příloha 11 vstup\_vyrovnani\_200908\_SIT\_MS60.txt**

- měřená data vstupující do výpočtu vyrovnání, den první, TS Leica Nova MS60

**Příloha 12 vstup\_vyrovnani\_200909\_SIT\_S9.txt**

- měřená data vstupující do výpočtu vyrovnání, den druhý, TS Trimble S9

**Příloha 13 vstup\_vyrovnani\_200909\_SIT\_MS60.txt**

- měřená data vstupující do výpočtu vyrovnání, den druhý, TS Leica Nova MS60