

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA SPECIÁLNÍ GEODÉZIE



**TESTOVÁNÍ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK MĚŘENÍ
TOTÁLNÍCH STANIC S AUTOMATICKÝM CÍLENÍM
V RÁMCI GEODETICKÉ MIKROSÍTĚ**

**Testing standard deviations of total station measurements with automatic
targeting within a geodetic micronetwork**

Diplomová práce

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Inženýrská geodézie

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

Praha 2023

Bc. Hana Váchová

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Váchová</u>	Jméno: <u>Hana</u>	Osobní číslo: <u>486190</u>
Zadávající katedra: <u>Katedra speciální geodézie</u>		
Studijní program: <u>N0732A260020 - Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor/specializace: <u>36T0GKIG - Inženýrská geodézie</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Testování směrodatných odchylek měření totálních stanic s automatickým cílením v rámci geodetické mikrosítě</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Testing standard deviations of total station measurements with automatic targeting within a geodetic micronetwork</u>	
Pokyny pro vypracování: Navrhněte a realizujte postup pro určení směrodatných odchylek měření totálních stanic (vodorovné směry, zenitové úhly a šikmé délky) s využitím automatického cílení. K testování využijte geodetickou mikrosítě s nucenými centracemi na betonových pilířích. Měřický test proveďte alespoň se dvěma různými totálními stanicemi. Výstupem bude metodika měření a výpočetní skript pro obecné použití.	
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. [3] Koch, K.-R.: Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Model. Springer-Verlag Berlin, 1999. 333 s. ISBN 3-540-65257-4	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Jaroslav Braun, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>23.02.2023</u> Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>22.05.2023</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
<u>Y</u> Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>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“.</i>	
<u>23.2.2023</u> Datum převzetí zadání	<u>/</u> Podpis studenta(ky)

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Hana Váchová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Bc. Jaroslavu Braunovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, konzultace a odbornou pomoc při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat mým kolegům z geodetické společnosti Riges s.r.o. za poskytnutou pomoc při měření a zapůjčení potřebných přístrojů. Mé poděkování patří také rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a testováním experimentálního postupu, určujícího přesnost měření totálních stanic s využitím automatického cílení. Podstatou navrženého postupu je zaměření geodetické mikrosítě a následné vyhodnocení naměřených dat pomocí vytvořeného softwarového nástroje. Výpočet pracuje na principu vyrovnání metodou nejmenších čtverců s aplikováním Förstnerovy metody odhadu variačních komponent. Výpočet je navíc obohacen o možnost určení velikosti zbytkových chyb součtových konstant odrazných hranolů. Pomocí navrženého postupu byla testována robotická totální stanice Leica Nova TS60 a robotická totální stanice Leica Nova MS50.

Výstupem práce je komplexní metodika pro určení směrodatných odchylek měřených veličin totálních stanic s využitím automatického cílení.

Klíčová slova

Přesnost měření

Směrodatná odchylka

Součtová konstanta

Automatické cílení

Totální stanice

Metoda nejmenších čtverců

Förstnerova metoda

Abstract

The thesis deals with the design and testing of an experimental method, determining the accuracy of measuring total stations using automatic targeting. The principle of the proposed method is the geodetic micro-network targeting and subsequent evaluation of measured data using the created software tool. The calculation works on the principle of least squares adjustment with application of Förstner method of estimation of variational components. In addition, the calculation is enriched by the possibility of determination of the residual errors of the prism constants. The robotic total station Leica Nova TS60 and the robotic total station Leica Nova MS50 were tested using the proposed method.

The output of the thesis is a complex methodology for determination of standard deviations of measured values of total stations using automatic targeting.

Keywords

Measurement accuracy

Standard deviation

Prism constant

Automatic targeting

Total station

The method of least squares

Förstner's method

Obsah

Úvod.....	9
1 Základní terminologie	10
1.1 Přesnost měření	10
1.1.1 Přesnost měření totálních stanic	11
1.1.2 Metody určování přesnosti měřených veličin.....	12
1.1.2.1 Postup dle ČSN ISO 17123	12
1.1.2.2 Experimentální postupy.....	13
1.2 Automatické cílení	14
1.2.1 Princip automatického cílení	14
1.2.1.1 Hrubé vyhledávání cíle.....	14
1.2.1.2 Identifikace cíle	15
1.2.1.3 Přesné zacílení	15
1.3 Metody vyrovnání měření	17
1.4 Förstnerova metoda odhadu variačních komponent	17
2 Návrh experimentu	19
2.1 Zaměření geodetické mikrosítě	19
2.1.1 Volba mikrosítě.....	19
2.1.2 Navržený postup měření	19
2.2 Zpracování – matematická formulace výpočtu	21
2.2.1 Předzpracování dat.....	22
2.2.2 Vyrovnání volné prostorové sítě.....	23
2.2.2.1 Umístění sítě v prostoru.....	26
2.2.2.2 Váhování měřených hodnot.....	28
2.2.2.3 Sestavení a řešení soustavy normálních rovnic	28
2.2.3 Uplatnění Förstnerovy metody	29
2.2.4 Definování vzdálenosti udávající rozměr mikrosítě	30
2.3 Postup vyhodnocení	32
2.3.1 Princip fungování vytvořené aplikace	33
3 Testování navrženého experimentu	34
3.1 Použité přístroje a pomůcky	34
3.1.1 Totální stanice Leica Nova TS60.....	34
3.1.2 Multistanice Leica Nova MS50	35
3.1.3 Ostatní pomůcky	35

3.2	Lokalita	36
3.2.1	Tvar a rozměr mikrosítě.....	36
3.3	Postup měření.....	39
3.4	Zpracování měřených hodnot.....	39
3.4.1	Příprava dat	39
3.4.2	Vyrovnaní naměřených dat.....	41
3.5	Výsledné hodnoty určené vyrovnaním.....	42
3.5.1	Leica Nova TS60	42
3.5.2	Leica Nova MS50	43
3.6	Analýza dosažených výsledků	45
3.6.1	Porovnání výsledných hodnot s hodnotami udávanými výrobcí.....	45
3.6.1.1	Přesnost měřených veličin – Leica Nova TS60.....	45
3.6.1.2	Přesnost měřených veličin – Leica Nova MS50.....	46
3.6.1.3	Velikost součtových konstant.....	47
4	Výsledná metodika	48
	Závěr	50
	Seznam literatury	51
	Seznam tabulek	53
	Seznam obrázků.....	54
	Seznam elektronických příloh	55

Úvod

Inženýrská geodézie se řadí do pole disciplín, jejichž prioritou je získat kvalitní a spolehlivé výsledky vysoce přesným měřením. Svým nárokem na přesnost se měření v oblasti inženýrské geodézie od běžně vykonávaných geodetických činností, kterými mohou být například mapování či činnosti spojené s evidencí dat v katastru nemovitostí, velmi liší. Proto je v této oblasti geodézie i přes prudký technologický vývoj měřicí techniky a jejích nepřetržitých inovací, které v sobě přinášejí značné zpřesnění a usnadnění vykonávaných služeb, nutné při plánování měření brát ohled na reálně dosažitelnou přesnost používaného přístroje.

Dnes se již naprosto běžně užívaným standardem stala funkce automatického cílení, kterou disponují robotické totální stanice. Funkce automatického cílení odstraňuje chyby měřiče při manuálním cílení, a napomáhá k získání přesnějších výsledků. Žádné měření však není bezchybné, a proto je při využívání této funkce potřeba mít na paměti, že i automatické cílení může mít své nedostatky, a jeho přesnost je třeba ověřovat.

Přesnost robotických totálních stanic je obvykle udávána dle technické normy ISO 17123: Část 3 [1] a Část 4 [2]. Zároveň bývá takto definovaná přesnost ověřována v akreditovaných kalibračních laboratořích. Postup určení směrodatných odchylek měřených veličin dle této normy však nezahrnuje žádnou zmínku o aplikaci a vyhodnocování přesnosti automatického cílení. Tato situace tak přináší potřebu navrhnout novou metodu určení přesnosti automatického cílení totálních stanic.

Cílem této diplomové práce je navrhnout komplexní metodiku pro určení odhadů směrodatných odchylek měřených veličin totálních stanic s využitím automatického cílení. Jinými slovy, snahou je cílovým uživatelům navrhnout způsob, kterým mohou určit přesnost měření vodorovného směru, zenitového úhlu a šikmé délky své totální stanice.

Podstatou navrženého postupu je zaměření geodetické mikrosítě (sítě o malých rozměrech s délkami záměr do cca 150 m) a následné vyhodnocení naměřených dat pomocí vytvořeného softwarového nástroje, který pracuje na principu vyrovnání metodou nejmenších čtverců s aplikováním Förstnerovy metody odhadu variačních komponent. Výpočet je navíc obohacen o možnost určení velikosti zbytkových chyb součtových konstant hranolů umístěných na jednotlivých bodech sítě. Postup testování a vyhodnocení vznikl ve spolupráci s připravovanou disertační prací Ing. Bc. H. Braunové.

Navržená metodika byla testována totální stanicí Leica Nova TS60 a totální stanicí Leica Nova MS50.

1 Základní terminologie

1.1 Přesnost měření

Přesnost měření je v oblasti inženýrské geodézie často užívaným termínem. Při vykonávání geodetických činností, které jsou závislé na spolehlivém a kvalitním určení výsledků, a při kterých je zapotřebí provádět rozbor přesnosti měření, je znalost reálně dosažitelných směrodatných odchylek měřených veličin obzvlášť důležitá. Takovými činnostmi může být například měření a sledování posunů a přetvoření různých stavebních konstrukcí nebo měření v odvětví průmyslu a strojírenství.

Samotný pojem „přesnost“ však z hlediska jeho významu není snadné definovat. Určité nesrovnalosti přináší překlady z anglického jazyka. Význam slova přesnost (*accuracy*) měření někdy bývá zaměňován s významem slova preciznost (*precision*) měření. Nicméně tento pojem je k termínu přesnost měření blízce vázán.

Podle technické normy ISO 5725-1: Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření – Část 1: Obecné zásady a definice [3] je přesnost měření popisována ve vztahu k pojmům pravdivost a preciznost. Pravdivost měření je možné charakterizovat jako odchylku přijaté referenční hodnoty od výsledku měřených dat. Preciznost lze popsat jako variabilitu výsledků opakovaných měření za stejných podmínek.

Výše uvedená norma je platná od roku 2018, jedním z jejích cílů bylo nahradit dosavadní nesprávně užívané termíny v souvislosti s přesností výsledků měření [3]. Navzdory tomu je však stále možné se v některých literaturách setkat s různými pojmy vzta-hujícími se k výše uvedeným termínům (například spolehlivost a správnost).

DOSLOVNÁ DEFINICE TERMÍNŮ DLE ČSN ISO 5725-1

přesnost (*accuracy*)

„Těsnost shody mezi výsledkem zkoušky a přijatou referenční hodnotou.“ [3]

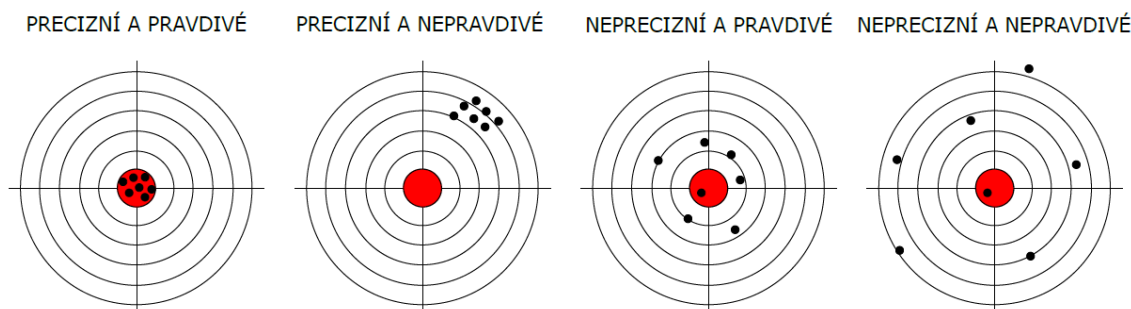
pravdivost; správnost (*trueness*)

„Těsnost shody mezi průměrnou hodnotou získanou z velké řady výsledků zkoušek a přijatou referenční hodnotou.“ [3]

preciznost (*precision*)

„Těsnost shody mezi nezávislými výsledky zkoušek získanými za předem specifikovaných podmínek.“ [3]

Nejsnazším příkladem na vysvětlení, co je pravdivé a co precizní, je schématický zákres střelby na terč (Obr. 1). [4]



Obrázek 1: Schématický zákres pravdivých a precizních výsledků měření [4]

1.1.1 Přesnost měření totálních stanic

Klíčovým faktorem pro získání požadovaných výsledků je přesnost používaného přístroje. Přesnost totálních stanic je charakterizována směrodatnou odchylkou měření směru ve dvou polohách σ_φ (dle ČSN ISO 17123-3 [1]) a směrodatnou odchylkou jednou měřené délky σ_d (dle ČSN ISO 17123-4 [2]). Směrodatná odchylka měření délky bývá udávána ve tvaru:

$$\sigma_d = A + B \cdot ppm, \quad (1)$$

kde A představuje konstantní složku přesnosti dálkoměru v milimetrech, člen B je násobek ppm (parts per milion), což vyjadřuje proměnou složku přesnosti dálkoměru v závislosti na měřené vzdálenosti. Pokud bychom měli totální stanici se směrodatnou odchylkou měření délky:

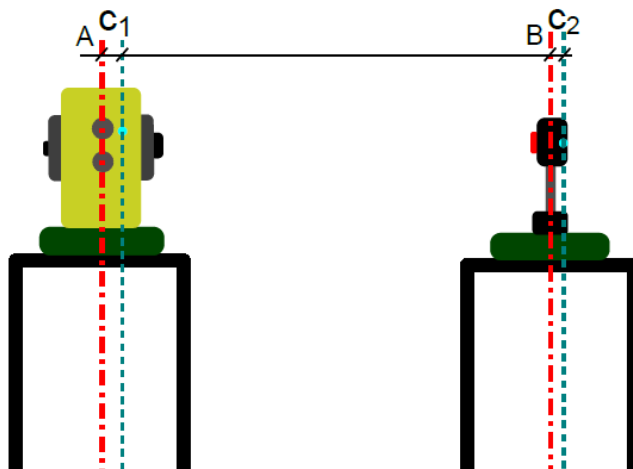
$$\sigma_d = 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}, \quad (2)$$

znamená to, že přesnost dálkoměru je 1 milimetr + 1 milimetr na každý měřený kilometr.

Všechny elektrooptické dálkoměry jsou zatíženy množstvím chyb. Ve své podstatě se jedná o součet chyb náhodných, systematických a dalšího šumu. Mezi nejvýraznější vady lze zařadit chybu součtové konstanty, chybu z určení modulační frekvence, chybu z excentricity pomůcek, chybu z proměnlivosti atmosférických podmínek a podobně. [5]

Chyba součtové konstanty je systematická chyba, jenž je zapříčiněna neshodností technologického centra dálkoměru s vertikální osou použitého přístroje, dále též netotožností svislé osy cíle s místem, kde dochází k reálnému odrazu signálu a na závěr dráhou, kterou urazí signál navíc uvnitř hranolu. Velikost této chyby je pro jednu konkrétní totální

stanici a jeden konkrétní odrazný hranol konstantní. [6] Situace, ke které dochází pod vlivem zmíněné vady je zjednodušeně nastíněna na Obr. 2.



Obrázek 2: Ilustrační zakres chyby součtové konstanty [vlastní zpracování]

1.1.2 Metody určování přesnosti měřených veličin

Jak již bylo zmíněno, přesnost totálních stanic je výrobcí běžně udávána dle technických norem řady ISO 17123: Část 3 [1], Část 4 [2]. Zároveň bývá takto definovaná přesnost ověřována v akreditovaných kalibračních laboratořích.

1.1.2.1 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. Všechny části (s výjimkou první, která obsahuje teorii) se zabývají testováním a vyhodnocováním přesnosti různých typů geodetických přístrojů a pomůcek. Jedná se o terénní postupy, které byly navrženy pro okamžité použití bez potřeby speciálního příslušenství. V souvislosti s předkládanou prací je podstatná Část 3: „Teodolity“ [1] a Část 4: „Elektrooptické dálkoměry“ [2].

Část 3 definuje polní postup, podle kterého si uživatel může otestovat, jaké úhlové přesnosti měření ve dvou polohách dalekohledu dosahuje jeho totální stanice a zda je její použití vhodné pro danou geodetickou činnost. Určení velikosti směrodatné odchylky vodorovného směru a zenitového úhlu je v normě rozděleno do 2 samostatných testů. Vyhodnocení lze provést ve zjednodušené či kompletní formě. Rozdíl je v potřebném počtu měřených sérií (pro zjednodušený test stačí 1, pro kompletní test jsou vyžadovány 4 série), kompletní test je navíc doplněn o statistické vyhodnocení výsledků. [1]

Část 4 definuje terénní postup pro ověření, zda přesnost použitého dálkoměru splňuje povolené odchylky přesnosti dle technické normy ISO 4463-1 [7] ve zjednodušeném

testu. Kompletní test přináší postup pro stanovení směrodatné odchylky jednou měřené délky a velikosti součtové konstanty. [2]

Postup určení směrodatných odchylek měřených veličin dle této normy však nezahrnuje žádnou zmínku o aplikaci a vyhodnocování přesnosti automatického cílení. Nejspolehlivější odhady přesnosti měřených veličin totálních stanic využívajících automatického cílení je tedy ideální získat z vlastního měření v terénních podmínkách, nejlépe z geodetické mikrosítě s větším počtem nadbytečných měření.

1.1.2.2 Experimentální postupy

Různými experimentálními postupy určování přesnosti totálních stanic se v minulosti zabývalo již několik autorů ve svých závěrečných pracích nebo v odborných článkách. Některé metody jsou nastíněny níže.

V bakalářské práci „Testování přesnosti automatického cílení totálních stanic Trimble S6 a S8“ [8] byl navržen experiment pro porovnání přesnosti manuálního a automatického cílení v závislosti na délce záměr (1,8-100 m). Z výsledků vyplývá, že automatické cílení vykazuje přesnější výsledky než cílení manuální napříč všem testovaným délkám (vyjma nejkratší vzdálenosti: 1,8 m). Autorka ve své práci také navrhla způsob určování přesnosti měřených vodorovných směrů s využitím automatického cílení.

Cílem bakalářské práce „Testování úhlové přesnosti automatického cílení totálních stanic“ [9] bylo testování automatického a manuálního cílení vybraných totálních stanic na 4 různé typy odrazných hranolů. Z výsledků vyplývá, že je automatické cílení přesnější než manuální cílení bez ohledu na typ použitého hranolu, přesnost automatického cílení je pro všechny hranoly stejná.

Cílem diplomové práce „Porovnání automatického a manuálního cílení ve zkušební síti dvojicí přístrojů (Trimble S3)“ [10] bylo testování přesnosti automatického a manuálního cílení dvojicí totálních stanic. Autor práce se mimo jiné zabýval dosažitelnou přesností měření při použití všesměrného hranolu od výrobce Leica. Z výsledků vyplývá, že přesnost automatického a manuálního cílení je srovnatelná, a že při měření na všesměrné hranoly je přesnost výsledku částečně ovlivněna natočením hranolu.

V disertační práci „Simulace, modelování a statistické zpracování geodetických měření“ [11] byl navržen komplexní postup zpracování velmi přesných geodetických měření (terestricky zaměřených prostorových sítí). Navržené řešení se skládá z několika dílčích kroků, které vytváří automatizovaný softwarový nástroj k souhrnnému zpracování a vyhodnocení naměřených dat s důrazem na vysokou přesnost inženýrských měření.

1.2 Automatické cílení

Automatické cílení totální stanicí je v dnešní době již standardně používanou a rozšířenou funkcí při vykonávání většiny geodetických činností (např. zaměření skutečného provedení, vytyčování, provádění geodetického monitoringu, mapování atd.). Přístroje vybavené automatickým cílením umožňují rychlejší a efektivnější sběr dat, a navíc napomáhají ke zlepšení kvality výsledků měření.

1.2.1 Princip automatického cílení

Jedná se o zcela automatický pohyb přístroje, při kterém dochází k přesnému nasměrování osy dalekohledu na zvolený cíl. Celý proces můžeme rozčlenit na 3 fáze: hrubé vyhledávání, identifikace cíle a přesné zacílení. [12]

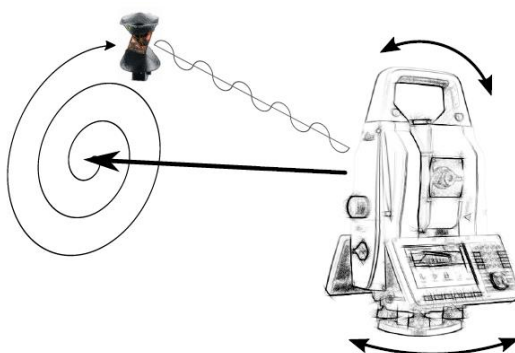
Automatické cílení lze obecně použít ve dvou pracovních režimech měření: v režimu zastav a zacil (stop and go) a v režimu kontinuálního měření [12]. V předkládané práci a obecně při přesném určování polohy bodu je běžně využíván první zmíněný režim.

U automatického cílení je dále možné rozlišit systém fungování na případ, kdy dochází ke vzájemné komunikaci přístroje a cíle – takovému stavu říkáme měření v aktivním módu, a na případ, kdy k vzájemné komunikaci nedochází (signál vysílá pouze totální stanice, nikoli cíl) – takovému stavu říkáme měření v pasivním módu. [13]

1.2.1.1 Hrubé vyhledávání cíle

V první fázi automatického cílení je provedeno hrubé vyhledání cíle. Při tomto úkonu dochází k přibližnému natočení osy dalekohledu totální stanice do takové polohy, aby byl zvolený cíl v zorném poli, které později využívá proces jemného cílení.

Děje se tak buď pomocí spirálovitého pohybu, při kterém osa dalekohledu opisuje kolem svého zorného pole spirálu, dokud snímač nezachytí signál odražený od hranolu (Obr. 3). [12]



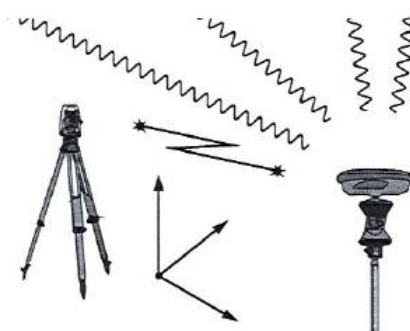
Obrázek 3: Spirálové vyhledávání cíle [vlastní zpracování]

Častějším způsobem je metoda vějířovitého vyhledávání, při kterém se totální stanice otáčí kolem své svislé osy, dokud nenalezne rovinu, v níž se nachází odrazný hranol a následně naklápěním dalekohledu detekuje přesnější umístění cíle (Obr. 4). [12]



Obrázek 4: Vějířovité vyhledávání cíle [12]

Poslední možností je využití GNSS (Global Navigation Satellite System). Tato technika vyhledávání vyžaduje aktivní cíl vybavený přijímačem GNSS. Princip spočívá v natočení se totální stanice na aktuálně vysílanou polohu cíle (Obr. 5). [12]



Obrázek 5: GNSS vyhledávání cíle [12]

1.2.1.2 Identifikace cíle

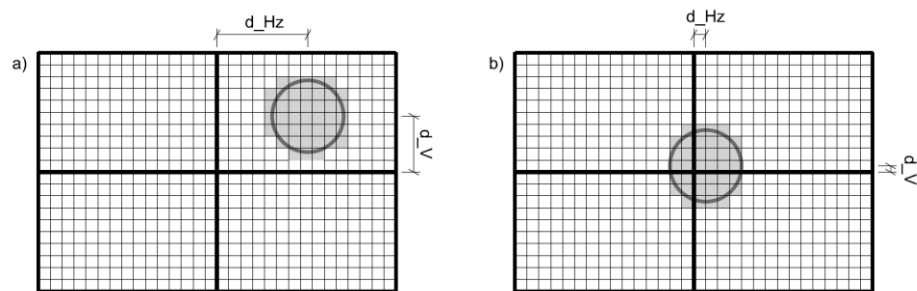
Identifikace cíle je prováděna za účelem zamezení možných chyb způsobených především mylným sledováním jiného hranolu nebo jiných rušivých předmětů (reflexních prvků jako jsou například dopravní značky). Aby k takové situaci nedocházelo, lze provést počáteční identifikaci nevhodných cílů, a naučit tak totální stanici, které cíle nemá při měření uvažovat (pasivní mód). Identifikaci cíle lze taktéž provést pomocí vysílání signálu odrazným hranolem či jiným zařízením fungujícím na obdobné bázi (např. tzv. AutoPole od firmy Leica) a jeho následným párováním s totální stanicí (tato technika tak vyžaduje aktivní cíl). [12]

1.2.1.3 Přesné zacílení

Poslední fází automatického cílení je proces přesného zacílení: osa dalekohledu je co nejlépe natočena na střed odrazného hranolu, a poté je provedeno odečtení měřených hodnot. Děje se tak na základě vyslání elektromagnetického signálu totální stanicí

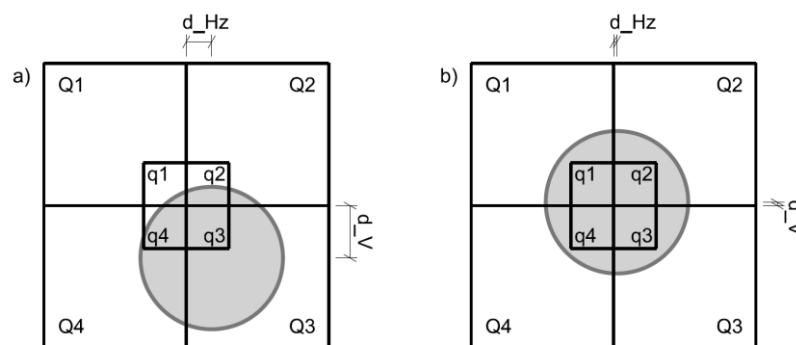
k odraznému hranolu a následném vyhodnocení navrácené stopy, která dopadá na obrazový senzor (využívají přístroje Leica, Topcon) nebo na kvadrantový detektor (využívají přístroje Trimble). [13]

V případě, že jsou přístroje vybaveny obrazovými senzory, proces přesného docílení spočívá v převedení středu navrácené světelné stopy na pravoúhlé souřadnice a jejich následném porovnání se středem snímacího senzoru (Obr. 6, část a). Podle vypočítané odchylky je dalekohled pootočen tak, aby jeho osa směřovala co nejlépe do středu hranolu. Tento proces porovnávání středu navráceného signálu se středem obrazového senzoru a následné pootáčení dalekohledu je opakován do té doby, než je dříve zmíněná odchylka menší než výrobcem stanovená hodnota. V takové situaci (Obr. 6, část b) již nedochází k pohybu přístroje, ale rozdíl z nedokonalého docílení je přičten k měřeným hodnotám na úhломěrných stupnicích. [12], [13]



Obrázek 6: Stopa na obrazovém senzoru: a) po hrubém zacílení, b) po přesném zacílení [13]

Pokud jsou přístroje vybaveny kvadrantovým detektorem (senzorem tvořeným čtyřmi světlocitlivými detektory), proces přesného cílení probíhá následovně. Přístroj hledá pozici, ve které by navrácená světelná stopa dopadala na všechny čtyři části senzoru (do všech kvadrantů). Poté je pro každý kvadrant vyhodnocena přijímaná intenzita světelné stopy, a následně je určena odchylka středu této stopy od osy dalekohledu přístroje (Obr. 7, část a). Přesné cílení na střed hranolu nastává v okamžiku stejných intenzit ve všech čtyřech kvadrantech čipu (Obr. 7, část b). Zbytková chyba od středu stopy je přičtena k měřeným hodnotám na úhломěrných stupnicích. [12], [13]



Obrázek 7: Stopa na kvadrantovém detektoru: a) po hrubém zacílení, b) po přesném zacílení [13]

1.3 Metody vyrovnání měření

Žádné měření nelze izolovat od rušivých vlivů, které mají v podobě různých chyb negativní dopad na výsledek měření. Naší snahou je tak zvyšovat spolehlivost výsledků zejména vhodnou volbou přístroje, volbou měřické metody, pečlivou prací, opakováním měření a vhodným zacházením s měřickým příslušenstvím. Pokud však opakujeme měření neznámé veličiny, dostáváme vlivem měřických chyb odlišné hodnoty výsledku, a konečné řešení tak není jednoznačné. V takovém případě hovoříme o tzv. nadbytečném počtu měření, který je potřeba zohlednit ve výpočtu. Nejlepším způsobem určení jednoznačného a spolehlivého výsledku měření je metoda vyrovnání. [14]

Metod vyrovnání existuje mnoho. Vedle aritmetického či váženého průměru je v geodézii jednoznačně nejvyužívanější tzv. Metoda nejmenších čtverců (MNČ), která při splnění daných podmínek poskytuje minimální směrodatnou odchylku odhadu neznámých veličin. Jinými slovy při vyrovnání MNČ dochází k aproximaci měřených dat tak, aby součet čtverců vzdáleností mezi měřenými a vyrovnanými hodnotami byl minimální. Požadavkem pro správné použití MNČ je to, aby se měřená data chovala jako náhodný výběr z normálního rozdělení pravděpodobnosti. [14], [15]

Využití ostatních metod již v geodézii není tak časté. Za zmínku stojí takové, které se řadí do skupiny metod robustního odhadu. Robustní metody se využívají především k vyhledání hrubých chyb v souboru měření. Na rozdíl od MNČ sice nedávají tak kvalitní výsledky, ale fungují i při mírném nesplnění požadavku na normální rozdělení chyb (tedy za přítomnosti odlehlých měření). V geodézii jsou využitelné tzv. M-odhady (Huberův m-odhad, L_1 norma), LMS-odhad, metoda RANSAC a některé další. [14], [15]

1.4 Förstnerova metoda odhadu variačních komponent

Obecně je po každém výpočtu důležité vyhodnotit dosaženou kvalitu výsledku a přesnost vstupních hodnot. Při výpočtu vyrovnání MNČ takové kontroly spočívají v hodnocení velikosti tzv. aposteriorní směrodatné odchylky jednotkové. Aplikací MNČ na naměřená data však dochází ke sloučení všech vlivů, a výsledná aposteriorní směrodatná odchylka tak charakterizuje pouze globální kvalitu výsledku vyrovnání. Vliv konkrétních skupin měření na přesnost výsledku je tak nutno určit dodatečně. [14]

Způsobů, jak takové odhady variačních komponent určit, je více. V předkládané práci byla použita Förstnerova metoda [16], jejíž použití je snadné a výpočetně

nenáročné. Zmíněná metoda vychází z definice výběrové směrodatné odchylky. Princip spočívá v určení příspěvků nadbytečných měření libovolné části měření v síti, které lze následně použít k výpočtu směrodatných odchylek různých skupin měření (pro terestricky měřenou síť ve 3D se jedná o skupinu vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek). Vzhledem k tomu, že je výpočet vyrovnání, a tudíž i výpočet odhadů variačních komponent prováděn iteračně, dochází na základě nově určených odhadů variačních komponent v každém kroku iterace ke změně apriorních směrodatných odchylek měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů, které se uplatňují při výpočtu váhové matice. Tato skutečnost přináší hlavní výhodu zmiňované metody a tou je odstranění vlivu lidského faktoru na výsledky vyrovnání při volbě apriorní přesnosti měřených veličin na počátku výpočtu. [17]

2 Návrh experimentu

Výstupem této práce je stanovení metodiky pro určení směrodatných odchylek měřených veličin totálních stanic s využitím automatického cílení a stanovení metodiky pro určení zbytkových chyb součtových konstant odrazných hranolů. Podstatou navrhovaného experimentálního postupu je zaměření geodetické mikrosítě a následná aplikace iteračního vyrovnání na naměřená data, jakožto vyrovnání volné prostorové sítě metodou nejmenších čtverců s určením odhadů variačních komponent Förstnerovou metodou. K vyhodnocení naměřených dat byla navržena jednoduchá aplikace.

Jedním ze závěrů metodiky je stanovení potřebného počtu bodů a jejich konfigurace v geodetické mikrosíti k získání spolehlivých odhadů přesnosti měřených veličin. Proto bylo v rámci experimentu navrženo vyhodnocovat měřená data s využitím 4-6 bodů v síti v různých konfiguracích.

2.1 Zaměření geodetické mikrosítě

Vzhledem k tomu, že řešení tohoto experimentálního návrhu spočívá v získávání velmi přesných měření, je nutné při pořizování dat (zaměřování geodetických sítí) striktně dodržovat následující požadavky a postup měření.

2.1.1 Volba mikrosítě

Pro účely experimentálního postupu určení přesnosti totálních stanic byla navržena venkovní geodetická mikrosít' o 6 bodech tak, aby byla zajištěna vzájemná viditelnost mezi všemi body. Délky záměr by neměly překročit 150 m a převýšení mezi jednotlivými body sítě by se mělo pohybovat v řádu jednotek metrů.

Pro dosažení maximální stability bodů a ve snaze zamezit výskytu možných chyb, vzniklých pohybem podloží či například kroucením stativu, byla zvolena mikrosít' s body stabilizovanými betonovými pilíři a s nucenou centrací.

2.1.2 Navržený postup měření

Před začátkem měření je nezbytné použité přístroje a pomůcky nechat alespoň hodinu temperovat na okolní teplotu vzduchu. Totální stanici je navíc podle studie [18] doporučeno uvést do provozní teploty provedením cca 30 sérií měření (postačí např. na 2 body sítě), během nichž dochází k ustálení odečítaných hodnot. Dále musí být na každém

pilíři našroubována a pečlivě urovnána trojnožka, do které je později vkládána totální stanice nebo souprava trn s hranolem. Tato souprava musí být k dispozici na každém bodě sítě, aby nedocházelo k jejich vzájemným záměnám mezi pilíři (zapotřebí je tedy 6 trojnožek, 6 trnů a 6 hranolů). Při vkládání soupravy trn + hranol do trojnožky je nutné, aby byl kladen důraz na stále stejnou orientaci trnu v trojnožce kvůli eliminaci chyb zapříčiněných excentricitou pomůcek. Jejimi vlivy na měření se zabývala autorka diplomové práce [19]. Také je vhodné zvolit 6 hranolů stejného typu, aby různé typy nebo velikosti hranolů nenarušovaly homogenitu sítě.

Sít' musí být následně proměřena ze všech pilířů. Měření může být zahájeno na libovolném bodě sítě, na němž je umístěna totální stanice. Na ostatní body je třeba do trojnožek vložit cílové terče a pečlivě je nasměrovat na totální stanici. Ze stanoviska je nutno změřit osnovu vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek na ostatní body sítě v 5 skupinách. Poté je možné přesunout přístroj na další bod, správně natočit hranoly a provést opětovné měření. Tímto způsobem by mělo být provedeno měření na všech bodech sítě.

V průběhu měření je potřeba určovat okolní teplotu a tlak vzduchu: naměřené hodnoty by měly být za účelem zavedení správných fyzikálních korekcí pravidelně zadávány do totální stanice.

Aby bylo měření mezi stanovisky vzájemně nezávislé, je nutné jej na každém bodě provádět ve vlastní soustavě souřadnic. Na každém stanovisku je doporučeno nastavit pouze orientaci s nulovým vodorovným směrem mimo sít' bodů (nulové směry na ostatní body sítě jsou ve výpočtu problematické). V souvislosti s tímto postupem je taktéž na každém stanovisku vhodné přiřazovat cílovým bodům odlišná čísla (jinak bude totální stanice znepokojena různou polohou stejných bodů v prostoru).

Protože bylo zjištěno, že nepřesnosti do výsledků vyrovnání přináší i ne zcela identická výška přístroje a cílového hranolu s trnem, která je při jejich zaměňování v trojnožkách obecně předpokládána (a pro využití navrženého postupu i vyžadována), bylo navrženo ve výpočtu všechna stanoviska uvažovat jako volná. Formálně pak v síti vznikne celkem 12 bodů: 6 stanovisek a 6 cílů, které jsou fyzicky totožné, prakticky však dojde k jejich vyrovnání zvlášť (vzhledem k tomu, že podstatou experimentu je určení přesnosti měřených veličin a nikoli určení souřadnic bodů, nemusí nás zdvojnásobení počtu bodů v síti znepokojovat). Postup měření s touto úpravou zůstává zachován. Při měření je potřeba do totální stanice zadávat výšku přístroje i všech cílů jako nulovou hodnotu.

Za účelem použití navrženého postupu vyhodnocení dat (vyvinuté aplikace) je při číslování bodů nutné dodržet jednoduchý a logický systém. Systém číslování bodů je následující: body je obecně třeba číslovat vždy od čísla 1 až do jejich celkového počtu v síti (zde 6, respektive 12). Aby byl splněn požadavek na nezávislé číslování, a aby byla uvážena myšlenka odlišit ve výpočtu stanoviška a cíle, je vhodné na bodě číslo 1 označovat cílové body sítě (představující body 2-6) pod čísly 108-112, na stanovišku číslo 2 zas 207, 209-212 atd. Celý princip je shrnut v Tab. 1.

Tabulka 1: Návrh na číslování bodů v síti

číslo stanoviška	čísla cílů					
	1	2	3	4	5	6
1	-	108	109	110	111	112
2	207	-	209	210	211	212
3	307	308	-	310	311	312
4	407	408	409	-	411	412
5	507	508	509	510	-	512
6	607	608	609	610	611	-

Posledním doporučeným krokem (nikoli nezbytným) v navrženém postupu měření je určení vzdálenosti udávající rozměr sítě mezi 2 body. Ideálním přístrojem pro tento úkol může být např. vysoce přesný laser tracker. Vzhledem k tomu, že takový přístroj není snadné zajistit, byl pro naše účely navržen postup stanovení této vzdálenosti měřením vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek z vhodně zvolených volných stanovišek (alespoň 3) na 2 body sítě. Z naměřených hodnot a z převýšení mezi oběma body lze vypočítat přímou vzdálenost mezi zvolenými body. Takto určená vzdálenost má vyšší přesnost než délky měřené totální stanicí v rámci zaměření sítě. Při testování navrženého postupu byla navíc použita totální stanice dosahující nejlepší délkové přesnosti na českém trhu.

2.2 Zpracování – matematická formulace výpočtu

Vzhledem k návaznosti diplomové práce na mou bakalářskou práci [4] byl základ matematické formulace vyrovnání převzat z již zmíněné práce. Na základě podnětu z připravované disertační práce Ing. Bc. H. Braunové byl výpočet navíc obohacen o možnost určení velikosti zbytkových chyb součtových konstant hranolů umístěných na jednotlivých bodech sítě. V souvislosti s tímto záměrem byla do výpočtu dodána možnost stanovit rozměr sítě pomocí „přesně“ určené vzdálenosti mezi 2 body sítě.

Pro navržený postup měření a vyhodnocení je princip výpočtu vyrovnání popsán v této kapitole. Použité matematické vztahy byly získány z publikace [14] a z disertační práce [11].

2.2.1 Předzpracování dat

Před samotným vyrovnáním naměřených dat je potřeba měřené hodnoty upravit do požadované podoby. Úpravu lze rozdělit do 2 kroků: v první fázi je potřeba zpracovat hodnoty měřené v první a v druhé poloze dalekohledu do výsledné hodnoty (skupiny měření).

- Pro šikmou délku

$$sd_{ij} = \frac{sd_{ij}^I + sd_{ij}^{II}}{2}. \quad (3)$$

- Pro vodorovný směr

$$\varphi_{ij} = \frac{\varphi_{ij}^I + (\varphi_{ij}^{II} \pm 200^g)}{2}. \quad (4)$$

- Pro zenitový úhel

$$z_{ij}^* = z_{ij}^I + \frac{400^g - (z_{ij}^I + z_{ij}^{II})}{2}. \quad (5)$$

Kde sd_{ij}^I a sd_{ij}^{II} , φ_{ij}^I a φ_{ij}^{II} , z_{ij}^I a z_{ij}^{II} jsou hodnoty šikmé délky, vodorovného směru a zenitového úhlu měřené mezi i-tým stanovištěm a j-tým cílem v první a v druhé poloze dalekohledu.

V druhém kroku je potřeba zenitový úhel opravit o vliv sbíhavosti tížnic, to znamená ze zakřivení zemského povrchu (Obr. 8). Korektní použití níže uvedených vztahů na úpravu měřených dat je podmíněno dodržením navrženého postupu měření a taktéž rozměrem a velikostí sítě (délky záměr by neměly přesáhnout 150 m a převýšení mezi body sítě by mělo dosahovat maximálně hodnot v jednotkách metrů).

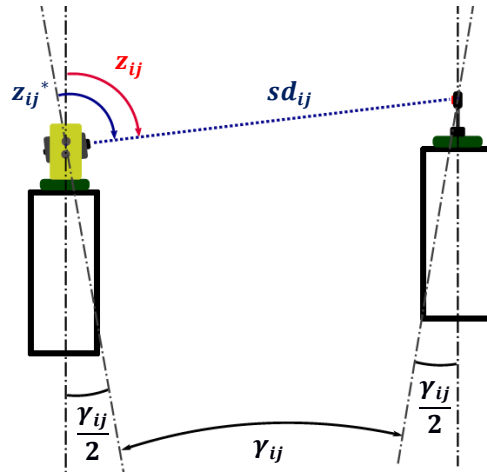
Oprava zenitového úhlu:

$$z_{ij} = z_{ij}^* - \frac{\gamma_{ij}}{2}, \quad (6)$$

kde γ_{ij} vyjadřuje vliv sbíhavosti tížnic mezi i-tým stanovištěm a j-tým cílem, který lze dle publikace [20] vypočítat zjednodušeným vztahem (vzhledem k navrženým rozměrům sítě) jako:

$$\gamma_{ij} \approx \frac{sd_{ij} \cdot \sin z_{ij}^*}{R}, \quad (7)$$

kde R je poloměr Země ($R = 6381000 \text{ m}$).



Obrázek 8: Vliv sbíhavosti tížnic na měřený zenitový úhel [vlastní zpracování]

Některé totální stanice umí tuto opravu zavádět automaticky, v takovém případě již úpravu měřených dat dle vztahů (6), (7) neprovádíme.

2.2.2 Vyrovnání volné prostorové sítě

Hlavní myšlenkou vyrovnání metodou nejmenších čtverců je to, aby při výpočtu docházelo k minimalizaci sumy kvadrátů oprav měření. Stěžejní podmínku této metody lze obecně formulovat:

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v} = \min, \quad (8)$$

kde \mathbf{v} je vektor oprav a \mathbf{P} je váhová matice měřených veličin. 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} . Rovnici oprav lze zapsat jako:

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}) - \mathbf{l}. \quad (9)$$

Měřenými veličinami mezi jednotlivými body sítě jsou šikmá délka sd , vodorovný směr φ a zenitový úhel ζ . Vektor měření:

$$\mathbf{l} = (\mathbf{l}_{sd} \ \mathbf{l}_{\varphi} \ \mathbf{l}_{\zeta})^T, \quad (10)$$

kde

$$\mathbf{l}_{sd} = (sd_1 \ sd_2 \ \dots \ sd_m)^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{l}_{\varphi} = (\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_m)^T, \quad (12)$$

$$\mathbf{l}_{\zeta} = (\zeta_1 \ \zeta_2 \ \dots \ \zeta_m)^T. \quad (13)$$

Ve vektorech m značí počet měřených šikmých délek, respektive měřených vodorovných směrů nebo měřených zenitových úhlů v celé síti.

Neznámými veličinami ve vyrovnání jsou souřadnice všech bodů sítě (X, Y, Z) a orientační posuny osnov vodorovných směrů měřených na stanoviskových bodech sítě (op). Vektor neznámých:

$$\mathbf{X} = (X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n \ Y_1 \ \dots \ Y_n \ Z_1 \ \dots \ Z_n \ op_1 \ \dots \ op_k)^T, \quad (14)$$

kde n je počet bodů v síti a k je počet stanovisek v síti.

Vztahy zprostředkující funkční závislost mezi měřenými a neznámými veličinami neboli tzv. rovnice pozorování lze vyjádřit jako:

$$sd_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}, \quad (15)$$

$$\varphi_{ij} = \arctan\left(\frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i}\right) - op_i + o_K, \quad (16)$$

$$\zeta_{ij} = \arccos\left(\frac{Z_j - Z_i}{\sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}}\right), \quad (17)$$

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

Z výše uvedených rovnic (15), (16), (17) je zřejmé, že vztahy mezi měřenými 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:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{dx}, \quad (18)$$

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}_0) + \frac{\partial \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \cdot \mathbf{dx} - \mathbf{l}. \quad (19)$$

Jestliže následně zavedeme substituci:

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}, \quad (20)$$

$$\mathbf{l}' = \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{l}, \quad (21)$$

lze psát rovnici oprav jako:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{l}', \quad (22)$$

kde \mathbf{x}_0 je vektor přibližných hodnot neznámých veličin, $d\mathbf{x}$ je vektor přírůstků přibližných hodnot neznámých veličin, \mathbf{l}' je vektor redukovaných měření, $\bar{\mathbf{l}}(\mathbf{x}_0)$ je vektor měřených veličin vypočítaných dosazením přibližných hodnot neznámých veličin do funkčních vztahů (15), (16), (17) a \mathbf{A} je matice parciálních derivací jednotlivých rovnic pozorování podle jednotlivých neznámých. Matice \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{sd} \\ \mathbf{A}_\varphi \\ \mathbf{A}_\zeta \end{bmatrix}, \quad (23)$$

kde

$$\mathbf{A}_{sd} = \begin{bmatrix} \frac{\partial sd_1}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial X_n} & \frac{\partial sd_1}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial Y_n} & \frac{\partial sd_1}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial Z_n} & \frac{\partial sd_1}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial op_n} \\ \frac{\partial sd_2}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial X_n} & \frac{\partial sd_2}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial Y_n} & \frac{\partial sd_2}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial Z_n} & \frac{\partial sd_2}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial op_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial sd_m}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_m}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial X_n} & \frac{\partial sd_m}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial Y_n} & \frac{\partial sd_m}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial Z_n} & \frac{\partial sd_m}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial op_n} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

podobně pro \mathbf{A}_φ a \mathbf{A}_ζ . Nenulové derivace mají tvar:

- Pro šikmou délku

$$\frac{\partial sd_{ij}}{\partial X_i} = -\frac{\Delta X_{ij}}{sd_{ij}}, \quad \frac{\partial sd_{ij}}{\partial X_j} = \frac{\Delta X_{ij}}{sd_{ij}}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial sd_{ij}}{\partial Y_i} = -\frac{\Delta Y_{ij}}{sd_{ij}}, \quad \frac{\partial sd_{ij}}{\partial Y_j} = \frac{\Delta Y_{ij}}{sd_{ij}}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial sd_{ij}}{\partial Z_i} = -\frac{\Delta Z_{ij}}{sd_{ij}}, \quad \frac{\partial sd_{ij}}{\partial Z_j} = \frac{\Delta Z_{ij}}{sd_{ij}}. \quad (27)$$

- Pro vodorovný směr

$$\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial X_i} = \frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial X_j} = -\frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial Y_i} = -\frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial Y_j} = \frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial op_i} = -1. \quad (30)$$

- Pro zenitový úhel

$$\frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial X_i} = -\frac{\Delta X_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial X_j} = \frac{\Delta X_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad (31)$$

$$\frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Y_i} = -\frac{\Delta Y_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Y_j} = \frac{\Delta Y_{ij} \Delta Z_{ij}}{d_{ij} s d_{ij}^2}, \quad (32)$$

$$\frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Z_i} = \frac{d_{ij}}{s d_{ij}^2}, \quad \frac{\partial \zeta_{ij}}{\partial Z_j} = -\frac{d_{ij}}{s d_{ij}^2}. \quad (33)$$

Kde ΔX_{ij} , ΔY_{ij} , ΔZ_{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 matic a vektorů je nezbytné skládat po sobě jdoucí měřené hodnoty ve stále stejném pořadí (v tomto výpočtu jsou do matic a vektorů nejprve vkládány všechny šikmé délky, následně všechny vodorovné směry a na závěr všechny zenitové úhly). Vždy totožné pořadí je třeba dodržovat i v případě skládání vektoru přibližných hodnot neznámých veličin (nejdříve vložit všechny x-ové souřadnice, poté všechny y-ové souřadnice, následně všechny z-ové souřadnice a na konec všechny orientační posuny). Stejné počítání platí i při skládání parciálních derivací funkčních vztahů podle jednotlivých neznámých do matice \mathbf{A} (nejprve derivace podle všech x-ových souřadnic bodů sítě, poté derivace podle všech y-ových souřadnic bodů sítě a tak dále).

2.2.2.1 Umístění sítě v prostoru

Vzhledem k tomu, že je výpočet řešen vyrovnáním volné sítě, která není do této chvíle nikterak umístěna v prostoru čili souřadnice všech bodů sítě jsou považovány za neznámé a mají být výsledkem vyrovnání, je nutností ukotvení sítě v prostoru definovat zavedením určitých podmínek do výpočtu (pro prostorovou síť jsou potřeba 4 podmínky).

V navrženém experimentu byla do výpočtu dodána podmínka v podobě metody Bod a směrník. Tento způsob stanovuje podmínky pro neznámé veličiny ve tvaru jednoho neměnného bodu a jednoho neměnného směrníku. To znamená, že vyrovnané souřadnice fixovaného bodu jsou identické s přibližnými souřadnicemi tohoto bodu a směrník vypočítaný z přibližných souřadnic mezi vybranými body zůstane pro vyrovnané souřadnice také zachován.

- Podmínka pro neměnný bod:

$$X_i - X_{i(x_0)} = 0, \quad (34)$$

$$Y_i - Y_{i(x_0)} = 0, \quad (35)$$

$$Z_i - Z_{i(x_0)} = 0. \quad (36)$$

Po linearizaci:

$$(X_{i(x_0)} + dX_i) - X_{i(x_0)} = 0, \quad (37)$$

$$(Y_{i(x_0)} + dY_i) - Y_{i(x_0)} = 0, \quad (38)$$

$$(Z_{i(x_0)} + dZ_i) - Z_{i(x_0)} = 0, \quad (39)$$

- Podmínka pro neměnný směrník:

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij(x_0)} = 0, \quad (40)$$

Po linearizaci:

$$\sigma_{ij(x_0)} + \frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2} dX_i - \frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2} dY_i - \frac{\Delta Y_{ij}}{d_{ij}^2} dX_j + \frac{\Delta X_{ij}}{d_{ij}^2} dY_j - \sigma_{ij(x_0)} = 0. \quad (41)$$

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 σ_{ij} je směrník z i -tého stanoviska na j -tý cíl, $\sigma_{ij(x_0)}$ je jeho přibližná hodnota.

Z parciálních derivací jednotlivých podmínek podle jednotlivých neznámých vznikne matice \mathbf{B} , která je nazývána maticí linearizovaných podmínek. Tvar této matice pro případ fixovaného bodu č. 2 a fixovaného směrníku σ_{26} je uveden níže. Zvolená kombinace neměnného bodu a směrníku byla použita v této práci. Důvodem tohoto výběru je velká vzdálenost mezi body 2 a 6 (taktéž pak přesně určená vzdálenost mezi zmíněnými body, podrobnosti v kapitole 2.2.4).

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\Delta Y_{26}}{d_{26}^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\Delta Y_{26}}{d_{26}^2} & 0 & -\frac{\Delta X_{26}}{d_{26}^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta X_{26}}{d_{26}^2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (42)$$

2.2.2.2 Váhování měřených hodnot

Na základě toho, že měřená data vstupující do vyrovnání disponují rozdílnou přesností, je potřeba tento fakt ve výpočtu uvážit zavedením vah pro hodnoty měřených veličin. Váha jednotlivých měření je dána:

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}, \quad (43)$$

kde σ_0 je apriorní směrodatná odchylka měření o váze rovné jedna – v tomto případě volená konstanta $\sigma_0 = 1$. A σ_i je apriorní směrodatná odchylka měřené veličiny (tj. apriorní směrodatná odchylka měřené šikmé délky σ_{sd} , apriorní směrodatná odchylka měřeného vodorovného směru σ_φ , apriorní směrodatná odchylka měřeného zenitového úhlu σ_ζ). Podle vzorce (43) lze vypočítat váhy jednotlivých měření a sestavit z nich diagonální váhovou matici \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{sd_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{sd_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{\zeta_m} \end{bmatrix}. \quad (44)$$

2.2.2.3 Sestavení a řešení soustavy normálních rovnic

Ze sestavených matic \mathbf{A} , \mathbf{l}' , \mathbf{B} , \mathbf{P} lze následně řešením soustavy normálních rovnic určit vektor odhadů přírůstků vyrovnaných neznámých \mathbf{dx} .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{dx} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}' \\ \mathbf{b} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (45)$$

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. Vzhledem k velkým rozměrům matic a faktu, že matice mohou být singulární, je za účelem stabilnějšího výpočtu soustava řešena pomocí pseudoinverze.

Vektor vyrovnaných souřadnic bodů sítě a orientačních posunů $\bar{\mathbf{x}}$ je vypočítán součtem vektoru přibližných hodnot neznámých veličin \mathbf{x}_0 a vektoru odhadů přírůstků neznámých veličin \mathbf{dx} (určeného dle (45))

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{dx}. \quad (46)$$

Kvadráty směrodatných odchylek vyrovnaných hodnot leží na diagonále matice, která je dána vztahem:

$$\mathbf{M}_{\bar{\mathbf{x}}} = s_0^2 [\bar{\mathbf{Q}}_{xx}], \quad (47)$$

kde s_0 je aposteriorní směrodatná odchylka jednotková, určená po vyrovnání. Lze ji psát jako:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v}}{n - u + p}}, \quad (48)$$

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

$$\mathbf{N}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Q}}_{xx} & \bar{\mathbf{Q}}_{kx}^T \\ \bar{\mathbf{Q}}_{kx} & \bar{\mathbf{Q}}_{kk} \end{bmatrix}. \quad (49)$$

Protože při výpočtu dochází k linearizaci rovnic pozorování, je potřeba vyrovnání provádět iteračně. Jinými slovy, v každém kroku iterace se výsledné odhady neznámých veličin položí rovny za přibližné hodnoty a celý výpočet je proveden znovu.

2.2.3 Uplatnění Förstnerovy metody

V předkládané práci byla do výpočtu zahrnuta Förstnerova metoda, při níž v každém kroku iterace spolu se změnou přibližných hodnot dochází i ke změně apriorních směrodatných odchylek měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů, které se uplatňují při výpočtu váhové matice. Iterace je aplikována do té doby, než se velikost aposteriorní směrodatné odchylky jednotkové s_0 , určené podle vztahu (48), dostatečně přiblíží velikosti apriorní směrodatné odchylky jednotkové σ_0 :

$$\sigma_0 = 1 \approx s_0. \quad (50)$$

Základní myšlenka odhadu variačních komponent Förstnerovou metodou spočívá ve výpočtu nadbytečných měření pro jednotlivé skupiny měřených veličin zvlášť. Na rozdíl od klasického vyrovnání MNČ, při němž dochází k míšení všech vlivů, a při kterém je tak počítán pouze aposteriorní odhad přesnosti charakterizující síť jako celek, v případě použití Förstnerovy metody lze samostatně určit aposteriorní směrodatnou odchylku pro měřené šikmé délky s_0^{sd} , pro vodorovné směry s_0^φ a pro zenitové úhly s_0^ζ .

Prvním krokem po samotném vyrovnání prostorové sítě je výpočet tzv. redundantní matice \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} - \mathbf{A} \bar{\mathbf{Q}}_{xx} \mathbf{A}^T \mathbf{P}, \quad (51)$$

kde \mathbf{I} je jednotková matice o patřičné velikosti. Každý prvek na diagonále redundantní matice vyjadřuje příspěvek konkrétního měření k celkovému počtu nadbytečných měření v síti. Na základě tohoto faktu lze vyčíslit, jak k počtu nadbytečných měření přispívají

jednotlivé skupiny měření, určit tedy příspěvek měřených šikmých délek r_{sd} , vodorovných směrů r_φ , zenitových úhlů r_ζ .

Následně je možné pomocí takto určených příspěvků vypočítat aposteriorní odhad přesnosti měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů:

$$s_0^{sd} = \sqrt{\frac{\sum(vv)_{sd}}{r_{sd}}}, \quad s_0^\varphi = \sqrt{\frac{\sum(vv)_\varphi}{r_\varphi}}, \quad s_0^\zeta = \sqrt{\frac{\sum(vv)_\zeta}{r_\zeta}}. \quad (52)$$

Vypočítané odhady směrodatných odchylek podle vztahu (52) se dále použijí jako apriorní přesnost vstupující do vyrovnání a celý výpočet se provede znovu, jak již bylo uvedeno dříve. [17]

2.2.4 Definování vzdálenosti udávající rozměr mikrosítě

Spolehlivějšího určení směrodatných odchylek měřených veličin lze dosáhnout definováním rozměru sítě pomocí „přesně“ stanovené šikmé vzdálenosti \widehat{sd} mezi 2 libovolnými body sítě. V takovém případě je následně vyrovnáním možné, mimo souřadnic bodů sítě a orientačních posunů, určit také součtové konstanty c (respektive jejich zbytkové chyby), a lépe tak i stanovit přesnost dálkoměru totální stanice. Tohoto zlepšení lze docílit drobnými úpravami některých výše uvedených vztahů. Princip výpočtu vyrovnání však zůstává stále stejný.

Počet neznámých veličin se zvětší o počet cílových bodů q v síti (respektive počet hranolů, tedy počet součtových konstant). Vektor neznámých:

$$\mathbf{X} = (X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n \ Y_1 \ \dots \ Y_n \ Z_1 \ \dots \ Z_n \ op_1 \ \dots \ op_k \ c_1 \ \dots \ c_q)^T, \quad (53)$$

Ve vztahu (15) zprostředkujícího funkční závislost mezi měřenou šikmou délkou a neznámými veličinami dojde ke změně na tvar:

$$sd_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2} - c_j, \quad (54)$$

kde c_j značí zbytkovou chybu součtové konstanty hranolu na příslušném cíli. Ostatní rovnice pozorování (pro vodorovný směr a zenitový úhel) zůstávají stejné – vztahy (16), (17).

Dále musí být vzdálenost udávající rozměr sítě vložena do vektoru přímo měřených veličin \mathbf{l} :

$$\mathbf{l} = (\mathbf{l}_{sd} \ \mathbf{l}_\varphi \ \mathbf{l}_\zeta \ \widehat{sd}_{ij})^T, \quad (55)$$

Podobně nesmíme opomenout vektor měřených veličin vypočítaných dosazením přibližných hodnot neznámých veličin do rovnic pozorování $\bar{l}(\mathbf{x}_0)$: také zde přibude jeden řádek s touto vzdáleností.

Vzhledem k většímu počtu neznámých veličin je potřeba další úpravu učinit při sestavování matice \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{sd} \\ \mathbf{A}_\varphi \\ \mathbf{A}_\zeta \\ \mathbf{A}_{\widehat{sd}} \end{bmatrix}, \quad (56)$$

kde

$$\mathbf{A}_{sd} = \begin{bmatrix} \frac{\partial sd_1}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial X_n} & \frac{\partial sd_1}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial Y_n} & \frac{\partial sd_1}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial Z_n} & \frac{\partial sd_1}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial op_k} & \frac{\partial sd_1}{\partial c_1} & \dots & \frac{\partial sd_1}{\partial c_q} \\ \frac{\partial sd_2}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial X_n} & \frac{\partial sd_2}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial Y_n} & \frac{\partial sd_2}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial Z_n} & \frac{\partial sd_2}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial op_k} & \frac{\partial sd_2}{\partial c_1} & \dots & \frac{\partial sd_2}{\partial c_q} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial sd_m}{\partial X_1} & \frac{\partial sd_m}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial X_n} & \frac{\partial sd_m}{\partial Y_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial Y_n} & \frac{\partial sd_m}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial Z_n} & \frac{\partial sd_m}{\partial op_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial op_k} & \frac{\partial sd_m}{\partial c_1} & \dots & \frac{\partial sd_m}{\partial c_q} \end{bmatrix}, \quad (57)$$

podobně pro \mathbf{A}_φ , \mathbf{A}_ζ a $\mathbf{A}_{\widehat{sd}}$. Do matice nyní vstupují i parciální derivace rovnic pozorování podle zbytkových chyb součtových konstant hranolů. Nenulový tvar této derivace existuje pouze pro šikmou délku:

$$\frac{\partial sd_{ij}}{\partial c_j} = -1. \quad (58)$$

Ostatní nenulové tvary derivací jsou stejné jako v (25)-(33).

K důležité definici dochází při sestavování váhové matice \mathbf{P} . Princip váhování jednotlivých měření podle vzorce (43) zůstává zachován, nicméně vzdálenosti udávající rozměr sítě \widehat{sd} je nutné přiřadit velkou váhu. Jinak řečeno, vstupní přesnost této vzdálenosti tedy musí být velmi vysoká (čili nízká hodnota), aby byla vzdálenost považována za téměř bezchybnou, a opravdu tak definovala rozměr celé sítě. Poté váhová matice \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{sd_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{sd_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{\zeta_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{\widehat{sd}_{ij}} \end{bmatrix}. \quad (59)$$

Umístění sítě v prostoru je opět provedeno metodou Bod a směrnik (podrobně popsáno v kapitole 2.2.2.1). Fixaci je nyní již ale nutné provést na body, mezi nimiž je určena „přesná“ vzdálenost \widehat{sd} . Tvar matice \mathbf{B} pro případ fixovaného bodu č. 2

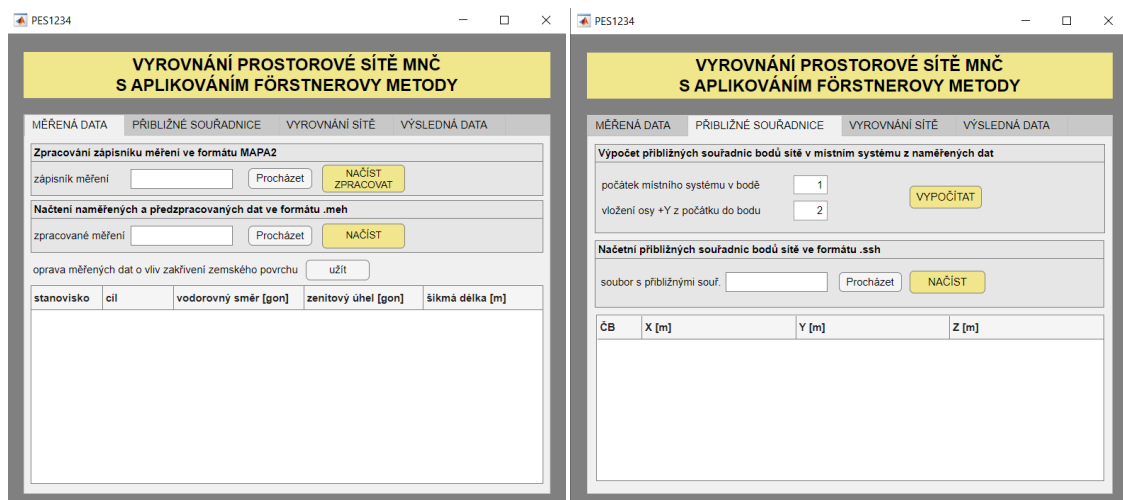
a fixovaného směrníku σ_{26} (v této práci byla vzdálenost definující rozměr sítě určována mezi body 2 a 6) je uveden ve vztahu (42).

Další postup výpočtu je již obdobný jako v předchozím případě bez vzdálenosti, která by definovala rozměr sítě. Ze soustavy rovnic (45) jsou vypočítány odhady přírůstků neznámých veličin dx , které jsou následně přičteny k přibližným hodnotám neznámých veličin x_0 . Tím je získán vektor vyrovnaných souřadnic bodů sítě, orientačních posunů a zbytkových chyb součtových konstant \bar{x} (46). Poté jsou podle (47) určeny směrodatné odchylky neznámých veličin, aposteriorní směrodatná odchylka jednotková s_0 (48) a pomocí Förstnerovy metody dle vztahů (52) i aposteriorní směrodatná odchylka pro šikmé délky s_0^{sd} , vodorovné směry s_0^φ a zenitové úhly s_0^ζ .

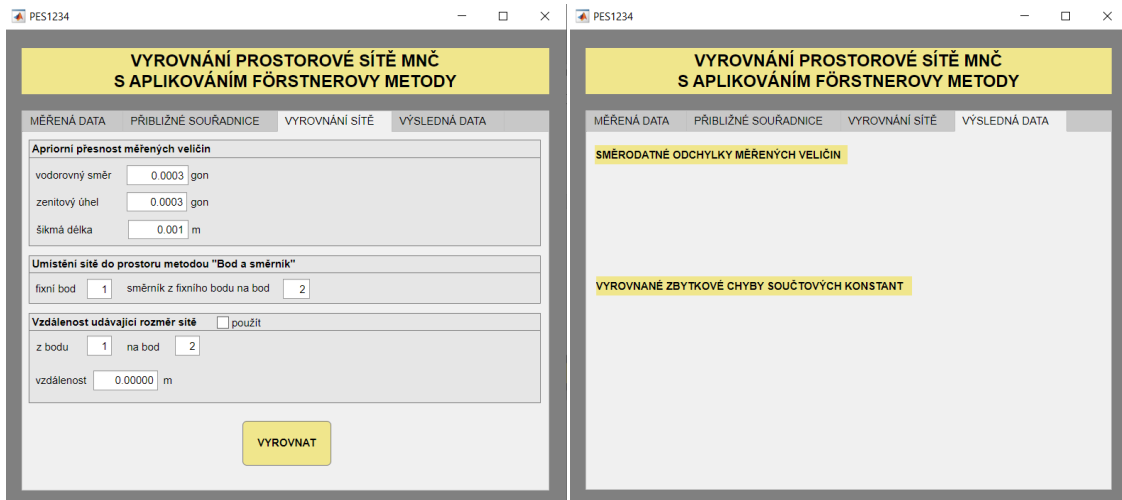
Vyrovnané hodnoty neznámých veličin se stanoví za přibližné, aposteriorní odhad přesnosti měřených šikmých délek, vodorovných směrů i zenitových úhlů je považován za novou vstupní přesnost měřených veličin a vyrovnaní je provedeno znovu (jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách). Přesnost vzdálenosti definující rozměr sítě však zůstává v každém kroku iterace stejná, nemění se.

2.3 Postup vyhodnocení

Postup vyhodnocení naměřených dat a určení výsledných odhadů směrodatných odchylek měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů totálních stanic využívajících automatického cílení (popřípadě i výsledných zbytkových chyb součtových konstant) spočívá v použití vytvořené aplikace PES1234 (Přístrojový evaluační systém 1234), která pracuje na základě postupu uvedeného v kapitole 2.2.



Obrázek 9: Vzhled aplikace (záložky: vyrovnání sítě, výsledná data) [vlastní zpracování]



Obrázek 10: Vzhled aplikace (záložky: vyrovnání sítě, výsledná data) [vlastní zpracování]

2.3.1 Princip fungování vytvořené aplikace

Aplikace byla vyhotovena v programovacím prostředí MATLAB R2022a a je přílohou této práce. Její princip fungování je snadný. Stačí do ní nahrát měřický zázpisník ve formátu známé šablony MAPA2 (anebo v předdefinovaném textovém souboru, viz návod na ovládání aplikace). Z načtených měřených hodnot pak aplikace vypočítá přibližné souřadnice bodů sítě v místním souřadnicovém systému (nebo je lze opět rovnou do aplikace nahrát v předdefinovaném textovém souboru). Na závěr je potřeba zvolit apriorní přesnost měřených veličin, nadefinovat umístění sítě do prostoru a případně zadat délku udávající rozměr sítě. Výsledné hodnoty jsou následně v textovém souboru uloženy do vybrané složky v počítači. Podrobný návod na instalaci a ovládání aplikace je k diplomové práci přiložen (příloha č. 5).

Před tím než lze aplikaci použít, je však nutné učinit malou editaci vstupního zázpisníku měření. Rozdílná čísla bodů (zadaná kvůli nezávislosti měření) je potřeba sjednotit. Nejlepším způsobem je otevřít měřický zázpisník v textovém editoru, který umí označovat data po sloupcích (např. volně dostupný Notepad++) a odebrat z čísel nežádoucí předčísli: z čísla 109 učinit číslo 09, z čísla 111 zas číslo 11 atd, viz Obr. 11.

230406_DP_TS60_sitzap [3]					230406_DP_TS60_sitzap [3]						
1	1	1	0.00000		1	1	1	0.00000			
2	-1			orientace	2	-1			orientace		
3	9999	0.00000	200.00000	100.82476	3	9999	0.00000	200.00000	100.82476		
4	109	45.67665	0.00000	217.57844	105.55499	4	09	45.67665	0.00000	217.57844	105.55499
5	111	106.18761	0.00000	229.99043	101.68125	5	11	106.18761	0.00000	229.99043	101.68125
6	112	122.82092	0.00000	246.13427	101.69516	6	12	122.82092	0.00000	246.13427	101.69516
7	110	40.50439	0.00000	273.76709	105.46874	7	10	40.50439	0.00000	273.76709	105.46874
8	108	17.60114	0.00000	316.59375	99.16864	8	08	17.60114	0.00000	316.59375	99.16864
9	108	17.60099	0.00000	116.59672	300.83294	9	08	17.60099	0.00000	116.59672	300.83294
10	110	40.50454	0.00000	73.77074	294.53406	10	10	40.50454	0.00000	73.77074	294.53406
11	112	122.82102	0.00000	46.13803	298.30775	11	12	122.82102	0.00000	46.13803	298.30775
12	111	106.18741	0.00000	29.99412	298.32286	12	11	106.18741	0.00000	29.99412	298.32286
13	109	45.67640	0.00000	17.58154	294.44812	13	09	45.67640	0.00000	17.58154	294.44812

Obrázek 11: Editace čísel bodů v zázpisníku [vlastní zpracování]

3 Testování navrženého experimentu

Použitelnost navrženého experimentu, popsaného v kapitole 2, byla testována na zvolené venkovní geodetické mikrosítí o 6 bodech. Podrobný průběh realizace měření a vyhodnocení je popsán v této kapitole.

3.1 Použité přístroje a pomůcky

Přesnost automatického cílení byla testována na robotické totální stanici Leica Nova TS60 zapůjčené od společnosti Inset s.r.o. a na robotické totální stanici Leica Nova MS50 zapůjčené od geodetické společnosti Riges s.r.o. Další potřebné pomůcky byly půjčeny od katedry Speciální geodézie Fakulty stavební Českého vysokého učení technického (ČVUT) v Praze.

3.1.1 Totální stanice Leica Nova TS60

Prvním testovaným přístrojem byla totální stanice Leica Nova TS60 s výrobním číslem: 882534. Podle výrobců je tato totální stanice (Obr. 12) jednou z nejkrokovějších totálních stanic na světě. Dosahuje velmi vysoké úhlové přesnosti a poskytuje nejlepší délkovou přesnost na českém trhu. Totální stanice Leica Nova TS60 je ideální volbou pro velmi přesná měření. [21]



Obrázek 12: Totální stanice Leica Nova TS60 [22]

TECHNICKÉ PARAMETRY PŘÍSTROJE [21]

Úhlová přesnost (standartní odchylka ISO 17123-3)	0,5 " (0,15 mgon)
Měření vzdálenosti, hranol (standartní odchylka ISO 17123-4)	0,6 mm + 1 ppm

3.1.2 Multistanice Leica Nova MS50

Dále byla k testování použita Multistanice Leica Nova MS50 (Obr. 13) s výrobním číslem: 367194. Multistanice kombinuje hned několik měřických technologií. Krom toho, že ji lze využít jako velmi přesnou robotickou totální stanici, se používá i jako laserový skener. [23]



Obrázek 13: Totální stanice Leica Nova MS50 [24]

TECHNICKÉ PARAMETRY PŘÍSTROJE [23]

Úhlová přesnost (standartní odchylka ISO 17123-3)	1 " (0,3 mgon)
Měření vzdálenosti, hranol (standartní odchylka ISO 17123-4)	1 mm + 1,5 ppm

3.1.3 Ostatní pomůcky

Jako cílové terče byly na všech bodech sítě použity Leica mini-hranoly GMP101 (Obr. 18), které jsou vhodné pro přesná měření. Pro přístroje Leica činí jejich součtová konstanta +17,5 mm [25]. Hranoly byly nasazeny na Leica trny GRT144 a během celého měření společně tvořily jedinečnou soupravu, která byla na příslušném stanovisku zaměřována s přístrojem.

Oba přístroje a soupravy trn + hranol byly vkládány do 6 Leica trojnožek, které byly našroubovány na všechny body sítě a pečlivě urovnané. V průběhu celého testování již zůstaly neměnné.

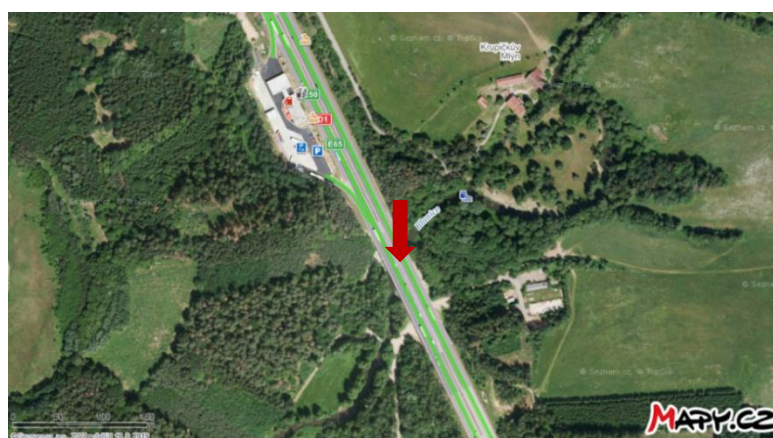
Při provádění experimentu byl taktéž použit jeden klasický těžký dřevěný stativ Leica GST120-9, ze kterého bylo provedeno měření pro stanovení přesného rozměru sítě.

V celém průběhu testování byly měřeny okolní teplota a tlak vzduchu za pomoci digitálního tlakoměru a teploměru.

3.2 Lokalita

K provedení experimentu bylo nutné zvolit vhodnou lokalitu. Důležité bylo dbát na výběr prostředí s minimálním vlivem rušivých elementů. Nežádoucí byla místa nechráněná přes slunečním zářením, frekventované silnice, příliš rozsáhlé nebo naopak příliš malé plochy atd. Potřeba bylo taktéž nalézt takovou mikrosíť, která poskytovala viditelnost mezi všemi body v navržené síti.

Vybrána byla geodetická mikrosíť pod dálničním mostem přes řeku Blanici v okrese Benešov u obce Všechny (D1, 49. km). Zvolená mikrosíť byla použita se souhlasem vlastníka – Ředitelství silnic a dálnic České republiky (ŘSD ČR).

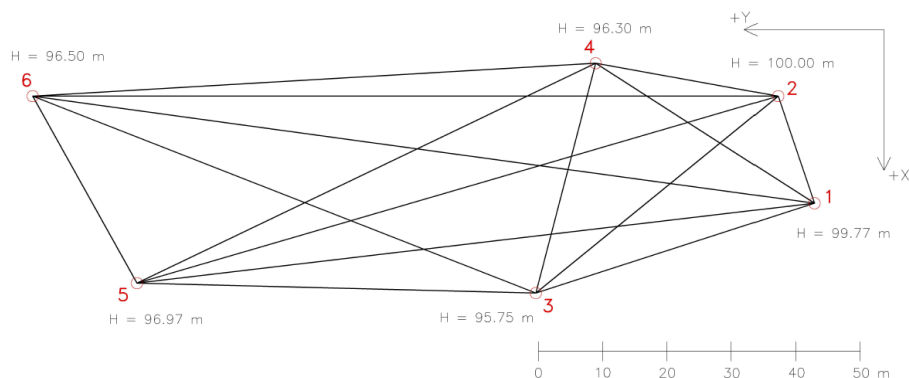


Obrázek 14: Lokalita měření [26]

3.2.1 Tvar a rozměr mikrosítě

Zvolená geodetická mikrosíť je tvořena 4 body s nucenou centrací na betonových pilířích a 2 body stabilizovanými v betonovém bloku taktéž s nucenou centrací.

Délky záměr ve zvolené mikrosíti se pohybovaly v rozmezí cca 20 m až 120 m. Maximální převýšení mezi body sítě dosahovalo přibližně 4 m. Schéma sítě je zachyceno na Obr. 15. Reálné prostředí a vzhled bodů na Obr. 16 – Obr. 21.



Obrázek 15: Schéma sítě [vlastní zpracování]



Obrázek 16: TS Leica Nova TS60 na bodě č. 6 [vlastní zpracování]



Obrázek 17: TS Leica Nova MS50 na nově stabilizovaném bodě č. 2 [vlastní zpracování]



Obrázek 18: Leica mini-branch na bodě č. 3 [vlastní zpracování]



Obrázek 19: TS Leica Nova TS60 na nově stabilizovaném bodě č. 1 [vlastní zpracování]



Obrázek 20: TS Leica Nova TS60 na bodě č. 4 [vlastní zpracování]

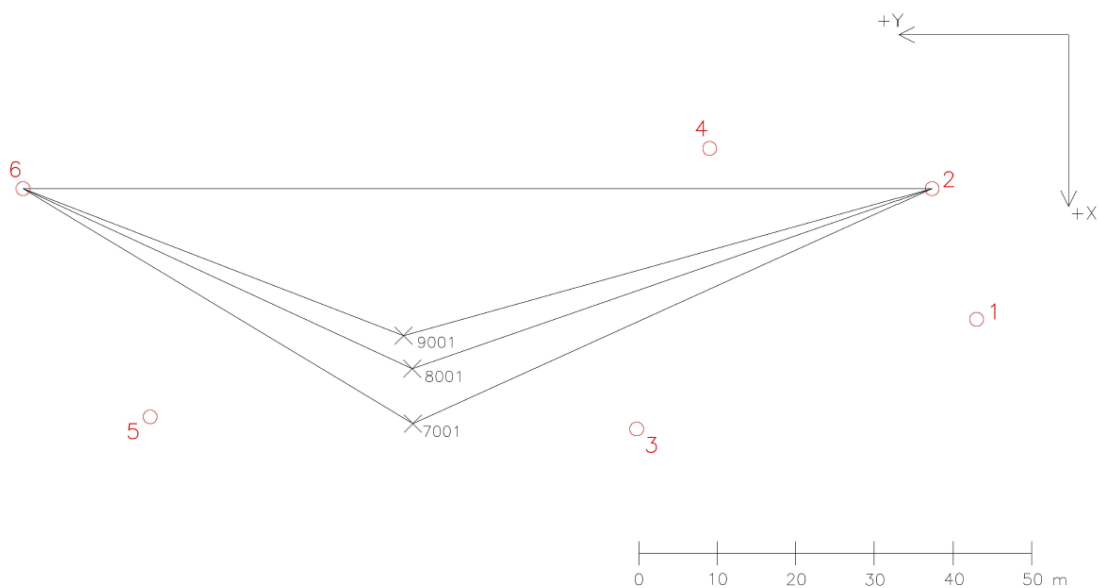


Obrázek 21: Leica mini-hranol na bodě č. 5 [vlastní zpracování]

3.3 Postup měření

Zaměření sítě bylo provedeno 6. 4. 2023 podle navrženého postupu. Během měření panovaly vhodné atmosférické podmínky: bylo zataženo, teplota 4-7 °C.

Nejprve byla použita totální stanice Leica Nova TS60. Vzhledem k její vysoké přesnosti s ní bylo provedeno určení vzdálenosti definující rozměr sítě mezi bodem č. 2 a č. 6. Tento postup spočíval ve změření osnova vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek v 5 skupinách na vybrané 2 body ze 3 vhodně zvolených stanovišek (7001, 8001, 9001), Obr. 22. Z takto určených prvků a z převýšení mezi body 2 a 6 byla následně vypočítána přímá vzdálenost mezi zmíněnými body.



Obrázek 22: Náčrt situace při měření délky určující rozměr sítě [vlastní zpracování]

Následně byla s oběma totálními stanicemi (Leica Nova TS60, Leica Nova MS50) proměřena celá síť. Na každém pilíři byla změřena osnova vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek na ostatní body sítě v 5 skupinách (funkcí: měření v řadách a skupinách).

3.4 Zpracování měřených hodnot

3.4.1 Příprava dat

Před samotným vyrovnáním byla provedena hrubá analýza měřených dat za účelem vyhledání odlehlých hodnot v software Microsoft Office Excel. Vypočítány byly průměrné hodnoty vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek ze souborů měření

v 5 skupinách. Poté byly určeny opravy od průměrů a výběrové směrodatné odchylky. Celý soubor měření žádné hrubé chyby nevykázal (viz přílohy diplomové práce č. 3, 4).

Ve zmiňovaném software byla určena i vzdálenost udávající rozměr sítě (délkový normál). Vztah pro vodorovnou vzdálenost d_{26} mezi bodem č. 2 a č. 6 je dán aplikováním Kosinové věty jako:

$$d_{26} = \sqrt{d_{x2}^2 + d_{x6}^2 - 2 \cdot d_{x2} \cdot d_{x6} \cdot \cos \omega_{6x2}}. \quad (60)$$

Z takto určené hodnoty a z převýšení mezi body lze vypočítat šikmou vzdálenost:

$$sd_{26} = \sqrt{d_{26}^2 + h_{26}^2}, \quad (61)$$

kde d_{x2} je vodorovná vzdálenost od stanoviště k bodu č. 2, d_{x6} je vodorovná vzdálenost od stanoviště k bodu č. 6, ω_{6x2} je úhel ze stanoviště mezi bodem č. 2 a č. 6 a h_{26} je převýšení mezi body č. 2 a č. 6.

K výpočtu bylo použito měření provedené z volných stanovišť i měření provedené v rámci zaměření sítě. Výsledná hodnota délkového normálu byla určena váženým průměrem (Tab. 2). Protože směrodatná odchylka šikmé délky mezi bodem č. 2 a č. 6, určená ze stanoviště 1, je větší než přesnost dálkoměru uváděná výrobcem použitého přístroje, nebyla tato hodnota do výpočtu průměru uvažována. Směrodatné odchylky šikmých délek byly určeny na základě zákona hromadění směrodatných odchylek (výsledná směrodatná odchylka pak jejich kvadratickým průměrem).

Tabulka 2: Vzdálenost definující rozměr sítě

stanoviště	šikmá délka mezi bodem 2 a 6 [m]	směrodatná odchylka šikmé délky [m]
9001	116,02608	0,00016
8001	116,02629	0,00018
7001	116,02612	0,00025
3	116,02617	0,00033
4	116,02616	0,00043
5	116,02668	0,00052
†	116,02643	0,00079
délkový normál	116,02618	0,00034

3.4.2 Vyrovnání naměřených dat

Všechna naměřená data byla vyrovnána ve vytvořené aplikaci podle navrženého výpočetního postupu. Protože cílem výpočtu je určit směrodatnou odchylku jednoho měření, vstupovala do vyrovnání každá měřená skupina zvlášť (aplikace při načítání zázpisníku průměruje pouze měření z obou poloh dalekohledu, nepočítá průměr z 5 skupin).

Při výpočtu přibližných souřadnic bodů sítě byl počátek místní soustavy zvolen v bodě č. 2 a kladný směr osy Y byl vložen do spojnice bodů č. 2 a č. 6.

Apriorní směrodatné odchylky měřených hodnot byly stanoveny dle jejich odhadů, deklarovaných výrobcem použitého přístroje. Úhlová směrodatná odchylka je pro totální stanici Leica Nova TS60 výrobcem udávána hodnotou 0,15 mgon a pro druhý testovaný přístroj Leica Nova MS50 činí 0,3 mgon. Přesnost měřených délek na hranol je výrobcem poskytnuta ve tvaru 0,6 mm + 1 ppm pro přístroj Leica Nova TS60, respektive 1 mm + 1,5 ppm pro přístroj Leica Nova MS50. Na základě velikostí vzdáleností v zaměřené mikrosíti (cca 20 m až 120 m) byla apriorní přesnost měřených šikmých délek dána hodnotou 0,7 mm (Leica Nova TS60) a 1,2 mm (Leica Nova MS50).

Vyrovnání bylo provedeno s využitím všech 6 bodů mikrosítě a poté s využitím 5 nebo 4 bodů v různých konfiguracích. To vše ve 2 režimech: bez použití vzdálenosti udávající rozměr sítě a s použitím vzdálenosti udávající rozměr sítě.

V Tab. 3 je uveden počet měřených veličin, neznámých veličin a nadbytečných měření v síti pro případ použití různého počtu bodů. Počet nadbytečných měření lze vyjádřit jako:

$$n' = n - u + p, \quad (62)$$

kde n je počet měření, u je počet neznámých a p je počet podmínek pro umístění sítě do prostoru (pro prostorovou síť jsou potřeba 4 podmínky) [14]. V závorkách jsou v Tab. 3 uvedeny výsledné počty pro případ, že do vyrovnání zahrneme i vzdálenost udávající rozměr sítě.

Tabulka 3: Počet měření, neznámých a nadbytečných měření podle počtu bodů v síti

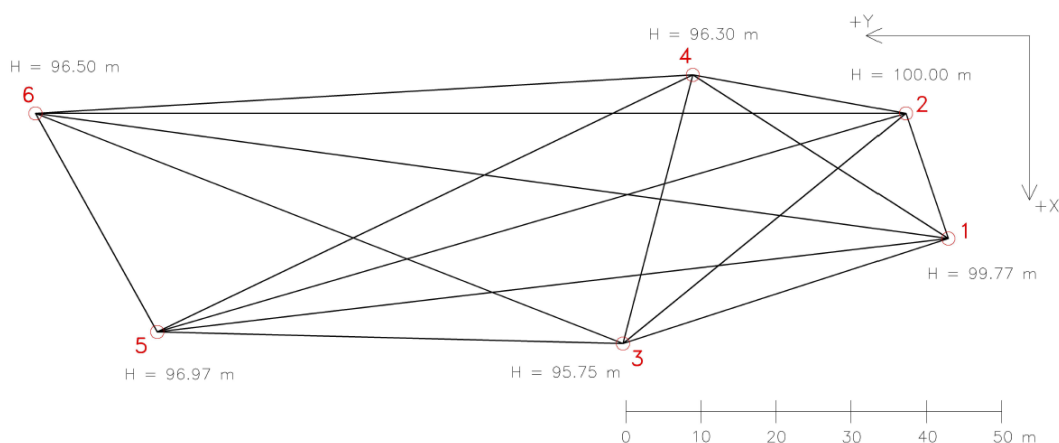
Počet bodů v síti	Počet měřených hodnot	Počet neznámých veličin	Počet nadbytečných měření
6, resp. 12	450 (451)	42 (48)	412 (407)
5, resp. 10	300 (301)	35 (40)	269 (265)
4, resp. 8	180 (181)	28 (32)	156 (153)

3.5 Výsledné hodnoty určené vyrovnáním

V následující kapitole jsou uvedeny všechny výsledné hodnoty. Vyrovnání naměřených dat bylo provedeno ve dvou režimech. V prvním režimu byl výpočet proveden bez užití vzdálenosti definující rozměr sítě, v takovém případě jsou výsledkem vyrovnání pouze směrodatné odchylky měřených veličin. V druhém režimu byla při výpočtu vyrovnání vzdálenost definující rozměr sítě použita. V tomto případě jsou mimo směrodatných odchylek měřených veličin výstupem vyrovnání i zbytkové chyby součtových konstant.

3.5.1 Leica Nova TS60

V Tab. 4 jsou uvedeny vyrovnané směrodatné odchylky měřených veličin totální stanice Leica Nova TS60. Tyto hodnoty byly získány z výpočtu vyrovnání, ve kterém nebyla definována vzdálenost udávající rozměr sítě. Naopak v Tab. 5 jsou poznamenány výsledné hodnoty vyrovnání (směrodatné odchylky měřených veličin a zbytkové chyby součtových konstant) získané z výpočtu, ve kterém byl délkový normál mezi body č. 2 a č. 6 definující rozměr sítě uplatněn. V obou tabulkách jsou uvedeny vyrovnané hodnoty při použití 6, 5 nebo 4 bodů sítě ve výpočtu. Pro lepší orientaci v jednotlivých konfiguracích bylo opětovně přiloženo schéma zaměřené sítě (Obr. 23).



Obrázek 23: Schéma sítě [vlastní zpracování]

Tabulka 4: Výsledné hodnoty bez užití délkového normálu, Leica Nova TS60

použitý počet bodů	6 bodů	5 bodů				4 body		
		bez 1	bez 3	bez 4	bez 5	bez 3, 4	bez 1, 5	bez 4, 5
s_0^{sd} [mm]	0,16	0,15	0,13	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10
s_0^φ [mgon]	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10
s_0^ζ [mgon]	0,15	0,16	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,13

Tabulka 5: Výsledné hodnoty s užitím délkového normálu, Leica Nova TS60

použitý počet bodů	6 bodů	5 bodů				4 body		
		bez 1	bez 3	bez 4	bez 5	bez 3, 4	bez 1, 5	bez 4, 5
s_0^{sd} [mm]	0,14	0,08	0,14	0,14	0,08	0,09	0,06	0,06
s_0^φ [mgon]	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,09	0,10	0,09
s_0^ζ [mgon]	0,15	0,16	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,13
c_1 [mm]	0,02	-	-0,08	0,14	0,22	-0,74	-	0,47
c_2 [mm]	0,02	-0,78	0,00	0,04	0,24	-0,27	-0,21	0,33
c_3 [mm]	0,08	0,08	-	0,11	0,24	-	0,12	0,29
c_4 [mm]	0,15	0,19	0,05	-	0,31	-	0,24	-
c_5 [mm]	0,23	0,31	0,10	0,29	-	-0,14	-	-
c_6 [mm]	-0,11	0,76	-0,19	-0,19	-0,15	-0,27	0,22	-0,17

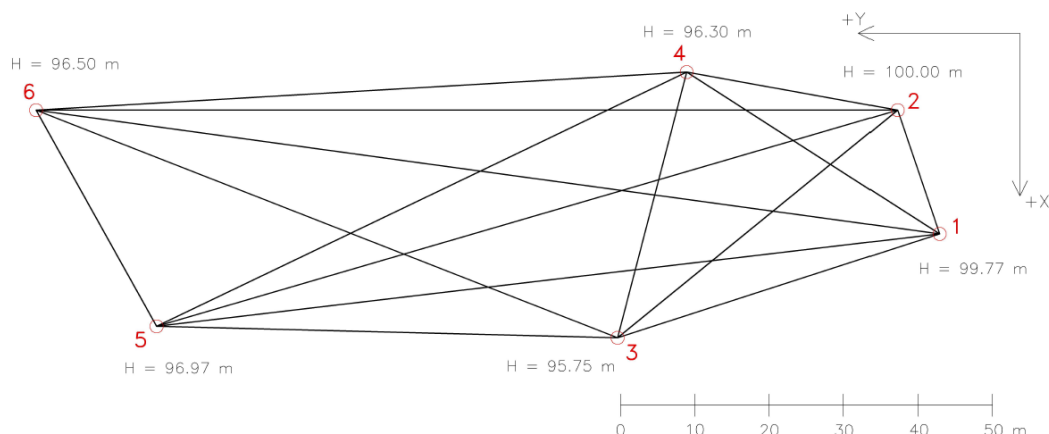
Z porovnání výsledných hodnot mezi jednotlivými konfiguracemi v Tab. 4 je zřejmé, že vyloučení kteréhokoli bodu (nebo i více bodů) nemá na výsledné směrodatné odchylky téměř žádný vliv. Rozdíly mezi směrodatnými odchylkami napříč všemi konfiguracemi jsou minimální (maximální rozptyl je 6 setin mm v případě šikmé délky).

Podobně je tomu tak i u výsledných přesností v Tab. 5: hodnoty směrodatných odchylek napříč všemi konfiguracemi jsou stabilní. Při srovnání velikostí vyrovnaných zbytkových chyb součtových konstant v této tabulce jsou již rozdíly mezi výslednými hodnotami z různých konfigurací patrnější. Na první pohled je jasné, že největší nesrovnalosti přináší hodnoty určené vyrovnaním naměřených hodnot mezi 4 body sítě. Příčinou může být nedostatečný počet nadbytečných měření vzhledem k počtu neznámých veličin v síti. Evidentní je také to, že pokud ve vyrovnaní není použit bod č. 1, výsledky zbytkových chyb součtových konstant na bodech č. 2 a č. 6 vykazují oproti ostatním situacím odlehle hodnoty.

Pokud bychom porovnávali výsledné hodnoty vzájemně mezi oběma tabulkami, rozdíl nalezneme pouze u hodnot směrodatných odchylek šikmých délek. Při definování rozměru sítě se výsledná přesnost měřené šikmé délky mírně zlepšuje. Na úhlovou přesnost nemá tato úprava při dané konfiguraci a při použití daného přístroje žádný vliv.

3.5.2 Leica Nova MS50

V Tab. 6 a v Tab. 7 jsou uvedeny výsledné hodnoty získané vyrovnaním naměřených dat totální stanicí Leica Nova MS50. Podobně jako v předchozím případě je v první zmiňované tabulce zaznamenána pouze výsledná přesnost měřených veličin, získaná z vyrovnaní sítě jako takové. V druhé zmiňované tabulce jsou uvedeny výsledné hodnoty určené vyrovnaním sítě, která měla definovaný rozměr délkovým normálem mezi body č. 2 a č. 6.



Obrázek 24: Schéma sítě [vlastní zpracování]

Tabulka 6: Výsledné hodnoty bez užití délkového normálu, Leica Nova MS50

použitý počet bodů	6 bodů	5 bodů				4 body		
		bez 1	bez 3	bez 4	bez 5	bez 3, 4	bez 1, 5	bez 4, 5
s_0^{sd} [mm]	0,25	0,25	0,22	0,28	0,19	0,12	0,20	0,22
s_0^φ [mgon]	0,10	0,09	0,09	0,09	0,11	0,09	0,09	0,11
s_0^ζ [mgon]	0,28	0,24	0,31	0,32	0,21	0,37	0,16	0,25

Tabulka 7: Výsledné hodnoty s užitím délkového normálu, Leica Nova MS50

použitý počet bodů	6 bodů	5 bodů				4 body		
		bez 1	bez 3	bez 4	bez 5	bez 3, 4	bez 1, 5	bez 4, 5
s_0^{sd} [mm]	0,10	0,05	0,11	0,08	0,08	0,03	0,03	0,03
s_0^φ [mgon]	0,11	0,13	0,10	0,13	0,11	0,09	0,11	0,12
s_0^ζ [mgon]	0,28	0,24	0,31	0,32	0,21	0,37	0,16	0,25
c_1 [mm]	0,48	-	0,43	0,61	0,62	0,19	-	0,81
c_2 [mm]	0,40	-0,15	0,34	0,38	0,50	0,17	0,17	0,48
c_3 [mm]	0,41	0,41	-	0,45	0,54	-	0,72	0,55
c_4 [mm]	0,47	0,54	0,40	-	0,49	-	0,55	-
c_5 [mm]	0,67	0,73	0,61	0,70	-	0,47	-	-
c_6 [mm]	0,66	1,33	0,63	0,59	0,67	0,53	1,09	0,59

Z výsledných hodnot v Tab. 6 vyplývá, že podobně jako u předchozího přístroje, nemá vyloučení některého z bodů na výslednou přesnost měřených veličin větší vliv. Hodnoty směrodatných odchylek (především zenitových úhlů) jsou sice napříč konfiguracemi o něco rozdílnější než u totální stanice Leica Nova TS60 – nejvíce vybočuje situace bez použití bodů č. 3 a č. 4 a situace bez použití bodů č. 1 a č. 5, nicméně vzniklé odchylky jsou minimální (hovoříme o maximálním rozdílu 2 gradových vteřin, přesnost přístroje udávaná jeho výrobcem jsou 3 gradové vteřiny).

Obdobný stav jako u předchozího přístroje je zřejmý i při porovnání dosažených hodnot mezi jednotlivými konfiguracemi v Tab. 7. Největší odchylky vykazují hodnoty zbytkových chyb součtových konstant při použití 4 bodů v síti. To potvrzuje domněnku, že v případě potřeby určení zbytkových chyb součtových konstant, jsou 4 body v síti nedostatečným počtem. Odlehlé hodnoty lze opětovně taktéž pozorovat u zbytkových chyb na bodě č. 2 a č. 6 při vyloučení bodu č. 1 z výpočtu vyrovnání.

Ze vzájemného porovnání výsledných hodnot mezi oběma tabulkami je zřejmé, že při definování rozměru sítě se zvýší přesnost měřených šikmých délek zhruba o desetinu milimetru. K mírným změnám dojde i u směrodatných odchylek vodorovného směru: výsledná přesnost se při definování rozměru sítě ve většině případů mírně zhorší (což není chybou, ale vyjádřením reálné přesnosti měřených směrů).

3.6 Analýza dosažených výsledků

Na základě výše uvedených výsledných hodnot získaných z vyrovnání naměřených dat bylo učiněno několik závěrů.

V případě, že uživatel definuje rozměr sítě délkovým normálem, a požaduje tak vyrovnáním určit přesnost měřených veličin i zbytkové chyby součtových konstant, je nutné zaměřit a vyrovnat síť, která obsahuje minimálně 5 bodů. Nezbytné je zajistit i vhodnou konfiguraci bodů.

Pokud uživateli stačí vyrovnáním určit pouze směrodatné odchylky měřených veličin (dédkový normál do výpočtu nezavádí) postačí mu 4 body v síti. V takové situaci však může být výsledná přesnost poznamenána chybou způsobenou součtovými konstantami.

3.6.1 Porovnání výsledných hodnot s hodnotami udávanými výrobcí

Protože spolehlivější odhady přesnosti měřených veličin přináší vyrovnání prostorové sítě, která má definovaný rozměr nežli vyrovnání sítě, která definovaný rozměr nemá, byly následující charakteristiky dosažené přesnosti uvažovány pouze z výsledků získaných z výpočtu vyrovnání, při němž byl uplatněn délkový normál.

3.6.1.1 Přesnost měřených veličin – Leica Nova TS60

V Tab. 8 bylo provedeno srovnání mezi přesností totální stanice Leica Nova TS60, dosaženou z navrženého experimentu s přesností, jenž udává její výrobce. Jako výsledné

přesnosti měřených veličin byly označeny průměrné směrodatné odchylky vodorovného směru, zenitového úhlu a šikmé délky z vyrovnaných směrodatných odchylek charakterizujících přesnost zaměření sítě s 5 a 6 body (viz Tab. 5):

$$s_{sd} = \sqrt{\frac{\sum (s_0^{sd})^2}{5}}, \quad s_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum (s_0^{\varphi})^2}{5}}, \quad s_{\zeta} = \sqrt{\frac{\sum (s_0^{\zeta})^2}{5}}. \quad (63)$$

Tabulka 8: Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem, Leica Nova TS60

	Šikmá délka [mm]	Vodorovný směr [mgon]	Zenitový úhel [mgon]
Deklarovaná přesnost [21]	0,70	0,15	0,15
Přesnost z vyrovnání	0,12	0,11	0,15
Rozdíl	-0,58	-0,04	±0,00

Z porovnání je patrné, že hodnota směrodatné odchylky šikmé délky, určená navrženým postupem, výrazně převyšuje přesnost deklarovanou výrobcem. Přesnost vodorovného směru a zenitového úhlu je srovnatelná s přesností stanovenou výrobcem přístroje.

3.6.1.2 Přesnost měřených veličin – Leica Nova MS50

Průměrné směrodatné odchylky měřených veličin byly podle (63) vypočítány i pro totální stanici Leica Nova MS50. V Tab. 9 bylo provedeno jejich srovnání s přesností, kterou deklaruje výrobce přístroje.

Tabulka 9: Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem, Leica Nova MS50

	Šikmá délka [mm]	Vodorovný směr [mgon]	Zenitový úhel [mgon]
Deklarovaná přesnost [23]	1,20	0,30	0,30
Přesnost z vyrovnání	0,09	0,12	0,28
Rozdíl	-1,11	-0,18	-0,02

Z porovnání je zřejmé, že hodnota směrodatné odchylky šikmé délky, určená experimentálním postupem, výrazně převyšuje přesnost udávanou výrobcem (jako u předchozího přístroje). Důvodem může být to, že se při zaměření sítě neprojeví systematické chyby dálkoměru. Zároveň se domnívám, že výrobci přístrojů obecně udávají nižší přesnost měření šikmé délky, než jaké ve skutečnosti dálkoměry totálních stanic dosahují (předchází tak nepřesnostem, které mohou vzniknout například velkou zbytkovou chybou součtové konstanty použitého hranolu). Směrodatná odchylka měřeného vodorovného směru také vykazuje lepší přesnost, než jakou stanovuje výrobce. V případě měřeného zenitového úhlu vypočítaná přesnost odpovídá přesnosti, kterou udává výrobce.

3.6.1.3 Velikost součtových konstant

Výsledné zbytkové chyby součtových konstant byly určeny zprůměrováním hodnot získaných z vyrovnání sítě obsahující 6 a 5 bodů. Do výpočtu nebyly zahrnuty odlehlé hodnoty na bodech č. 2 a č. 6 vzniklé při vyloučení bodu č. 1 z výpočtu vyrovnání. Výsledné průměry jsou pro oba testované přístroje uvedeny v Tab. 10.

Tabulka 10: Zbytkové chyby součtových konstant, Leica Nova TS60, Leica Nova MS50

číslo bodu	Leica Nova TS60		Leica Nova MS50	
	c [mm]	sm. odch. s_c [mm]	c [mm]	sm. odch. s_c [mm]
1	0,03	0,07	0,58	0,05
2	0,08	0,05	0,42	0,04
3	0,13	0,04	0,47	0,03
4	0,17	0,04	0,48	0,03
5	0,23	0,05	0,70	0,04
6	-0,16	0,04	0,65	0,03

Na všech bodech sítě byly umístěny Leica mini-hranoly, jejichž součtová konstanta činí pro přístroje Leica +17,5 mm [25]. Přesto, že byla všechna měření délky provedena s takto zadanou hodnotou do totální stanice, na naměřených hodnotách se projeví zbytkové chyby.

Hodnoty zbytkových chyb součtových konstant, charakterizující délky měřené totální stanicí Leica Nova TS60, jsou velice nízké. Některé jsou dokonce menší, než je vypočítaná směrodatná odchylka dálkoměru: 0,12 mm (např. na bodě č. 1 a č. 2). Takové zbytkové chyby by bylo optimální označit za zcela zanedbatelné – nulové (v předkládané práci však plní především informativní funkci, proto jsou prezentovány svou skutečnou velikostí).

Hodnoty zbytkových chyb součtových konstant, charakterizující délky měřené totální stanicí Leica Nova MS50, jsou již o něco větší. Jejich velikosti se pohybují v rozmezí 0,58-0,70 mm, takové hodnoty nelze považovat za nezajímavé, ba naopak je potřeba je při analyzování přesnosti totální stanice brát v úvahu.

Fakt, že jsou zbytkové chyby součtových konstant charakterizující přesnost měřené šikmé délky obou totálních stanic tolik rozdílné, může být zprvu zarážející. Vzhledem ke konstantním posunům o cca 0,5 mm, mohou být důvodem těchto odchylek rozdílné zbytkové chyby dálkoměrů použitých totálních stanic. Navíc, velikost součtové chyby je neměnná pouze pro konkrétní dvojici přístroje a hranolu [6].

4 Výsledná metodika

Na základě získaných poznatků při testování navrženého experimentu, byla stanovena následující metodika pro určení směrodatných odchylek měřených veličin totálních stanic využívajících automatického cílení. Metodika byla shrnuta do bodového zápisu, podrobně navržený postup měření je uveden v kapitole 2.

POTŘEBNÉ VYBAVENÍ: totální stanice, 5krát sada trojnožka + trn + hranol (počet sad je závislý na počtu bodů v síti), teploměr, tlakoměr, popřípadě stativ

1) VÝBĚR VHODNÉ MĚŘICKÉ LOKALITY

- geodetická síť minimálně o 5 bodech, vhodné jsou body s nucenými centracemi na betonových pilířích (případně lze použít i síť s body stabilizovanými stativy)
 - vzájemná viditelnost mezi body, vhodná konfigurace bodů
 - maximální délky záměr 150 m, rovinný charakter
 - minimální vliv rušivých prvků okolí (sluneční záření, frekventovaná oblast, vysoká refrakce).

2) PŘÍPRAVA

- temperace přístrojů a pomůcek minimálně 60 minut na okolní teplotu vzduchu
- uvedení totální stanice do provozní teploty provedením cca 30 sérií měření na 2 body sítě
- pečlivá horizontace trojnožek na všech bodech sítě
- umístění soupravy trnu s hranolem na všechny body sítě – dodržování stále stejné orientace trnu v trojnožce
- umístění totální stanice na první stanovisko
- nasměrování hranolů na první stanovisko

3) TERESTRICKÉ ZAMĚŘENÍ SÍTĚ

- nastavení místního souřadnicového systému na každém stanovisku
 - nastavení měřítkového faktoru na hodnotu 1
 - nastavení orientace s nulovým směrem mimo síť bodů
 - nastavení výšky stanoviska i cílů na hodnotu 0 m
- vložení naměřené teploty a tlaku vzduchu do totální stanice
- změření osnovy vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek na ostatní body sítě v 5 skupinách s dodržáním navrženého postupu číslování bodů*

- přesun totální stanice na další bod sítě (při vracení hranolu dodržování stále stejné orientace trnu), pečlivé nasměrování hranolů na nové stanoviště
- zopakování postupu dle odstavce 3)
 - měření provést na každém bodě sítě ve vlastní soustavě souřadnic

4) URČENÍ VZDÁLENOSTI UDÁVAJÍCÍ ROZMĚR SÍTĚ**

- stanovení přesné vzdálenosti definující rozměr sítě mezi 2 body
 - ideálně použití vysoce přesného přístroje, kterým je např. laser tracker
 - alternativní navržená metoda je popsána v kapitole 3.4.

5) EXPORTOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

- export dat z totální stanice v šabloně MAPA2 (popřípadě v jiném formátu)

6) VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

- prvotní kontrola zápisníku, vyhledání hrubých chyb v naměřených datech
- vyhodnocení přesnosti naměřených dat ve vytvořené aplikaci PES1234
 - návod na ovládání aplikace je k diplomové práci přiložen (příloha č. 5)

*Při měření je nezbytné zaznamenávat měřené hodnoty v obou polohách dalekohledu. Body je obecně nutné číslovat vždy od čísla 1 až do jejich celkového počtu v síti (zde 5, respektive 10). Aby byl splněn požadavek na nezávislé číslování, a aby byla uvážena myšlenka odlišit ve výpočtu stanoviště a cíle (viz kapitola 2.1.2), je vhodné na stanoviště číslo 1 označovat cílové body sítě (představující body 2-5) pod čísly 107-110, na stanoviště číslo 2 zas 206, 208-210 atd. Celý princip je shrnut v Tab. 11.

Tabulka 11: Návrh na číslování bodů

číslo stanoviště	čísla cílů				
	1	2	3	4	5
1	-	107	108	109	110
2	206	-	208	209	210
3	306	307	-	309	310
4	406	407	408	-	410
5	506	507	508	509	-

**Určení vzdálenosti definující rozměr sítě je krokem pouze doporučeným, nikoli nezbytným. Pokud jej uživatel učiní, lze vyrovnáním mimo souřadnic bodů sítě a orientačních posunů určit také součtové konstanty (respektive jejich zbytkové chyby), a lépe tak i stanovit přesnost dálkoměru totální stanice. V případě, že tento krok uživatel neučiní, stačí k určení směrodatných odchylek měřených veličin v geodetické mikrosíti 4 body.

Závěr

Výstupem předkládané diplomové práce je komplexní metodika pro určení odhadů směrodatných odchylek měření totálních stanic s využitím automatického cílení (viz kapitola 4). Souhrnná metodika se skládá z podrobného postupu na zaměření geodetické mikrosítě, včetně volby vhodné lokality, rozměru mikrosítě a potřebného počtu bodů. Dále metodika obsahuje návod na vyhodnocení naměřených dat. Postup vyhodnocení a určení výsledných odhadů směrodatných odchylek měřených šikmých délek, vodorovných směrů a zenitových úhlů totálních stanic (popřípadě i výsledných zbytkových chyb součtových konstant odrazných hranolů) spočívá v použití vytvořeného softwarového nástroje PES1234.

Aplikace pracuje na principu iteračního vyrovnání měřených hodnot, získaných terestrickým zaměřením místní prostorové geodetické sítě, metodou nejmenších čtverců. Pomocí Förstnerovy metody odhadu variačních komponent jsou v každém kroku iterace vypočítány odhady směrodatných odchylek pro skupinu měřených vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek. Tyto odhady jsou následně označeny jako apriorní 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.

Navrženým postupem byla v rámci této práce testována data naměřená totálními stanicemi Leica Nova TS60 a Leica Nova MS50. Z výsledků vyplynulo, že dosažená přesnost obou totálních stanic je srovnatelná či vyšší než přesnost udávaná výrobcem obou přístrojů. V rámci testování byly určeny i zbytkové chyby součtových konstant. Hodnoty zbytkových chyb součtových konstant, charakterizující délky měřené totální stanicí Leica Nova TS60, jsou téměř zanedbatelné. Oproti tomu hodnoty zbytkových chyb součtových konstant, charakterizující délky měřené totální stanicí Leica Nova MS50, jsou již o něco větší, a jejich znalost tak může napomoci k získání kvalitnějších výsledků při dalších měřeních.

Závěrem je možno říci, že navržená metodika může být využita všemi koncovými uživateli při potřebě vlastního testování totální stanice (tedy při požadavku určit přesnost měření totální stanice a při požadavku určit velikosti zbytkových chyb součtových konstant v závislosti na použitých odrazných hranolech) jiným způsobem, než jakým je tomu činěno při pravidelných kontrolách v kalibračních laboratořích.

Seznam literatury

- [1] ČSN ISO 17123-3. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: Optika a optické přístroje – Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Část 3: Teodolity*. Český normalizační institut, Praha, 2005.
- [2] ČSN ISO 17123-4. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: Optika a optické přístroje – Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Část 4: Elektrooptické dálkoměry*. Český normalizační institut, Praha, 2005.
- [3] ČSN ISO 5725-1. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření – Část 1: Obecné zásady a definice*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2018.
- [4] VÁCHOVÁ, Hana. *Určení přesnosti automatického cílení totálních stanic z vyrovnání prostorové sítě*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- [5] BRAUN, Jaroslav. *Inovace přesných měření inženýrské geodézie v průmyslu*. Praha, 2016. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- [6] RÜEGGER, J.M.: *Electronic distance measurement: an introduction*. Springer-Verlag, 3rd totally rev. ed., New York, 1990. ISBN 03-875-1523-2.
- [7] ČSN ISO 4463-1. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: Měřicí metody ve výstavbě – Vytyčování a měření – Část 1: Navrhování, organizace, postupy měření a přijímací podmínky*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [8] FLÁDROVÁ, Hana. *Testování přesnosti automatického cílení totálních stanic Trimble S6 a S8*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [9] KULHAVÝ, Adam: *Testování úhlové přesnosti automatického cílení totálních stanic*. Praha, 2019. Bakalářská práce, ČVUT v Praze.
- [10] PYŠEK, Jaroslav. *Porovnání automatického a manuálního cílení ve zkušební síti dvojicí přístrojů (Trimble S3)*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [11] TŘASÁK, Pavel. *Simulace, modelování a statistické zpracování geodetických měření*. Praha, 2013. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- [12] EHRHART M., LIENHART W.: *Object tracking with robotic total stations: Current technologies and improvements based on image data*. Journal of Applied Geodesy, vol. 11 (3): 131-142, 2017. DOI: /10.1515/jag-2016-0043
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] KOCH, Karl-Rudolf. *Parameter estimation and hypothesis testing in linear model*. 2nd edition. Germany: Springer-Verlag, 1999. ISBN 3-540-65257-4.
- [16] FÖRSTNER, W. In: *Ein Verfahren zur Schätzung von Varianz- und Kovarianzkomponenten*. Stuttgart: AVN 11-12/1979, s. 446-453.
- [17] 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.
- [18] BRAUNOVÁ, Hana. *Určování přesnosti měření robotických totálních stanic*. Praha, 2023. Odborná studie ke státní doktorské zkoušce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- [19] SOBOLOVÁ, Kristýna. *Určení excentricit hranolových sestav*. Praha, 2016 [cit. 2023-04-23]. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- [20] BLAŽEK, R. a Z. SKOŘEPA. *Geodézie 30 (Výškopis)*. Praha: Nakladatelství ČVUT v Praze, 1999. ISBN 80-01-01598-X.
- [21] *Leica Nova TS60 Data sheet* [online]. Switzerland, Leica Geosystems AG, 2020 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-nova-ts60>
- [22] *GEFOS Leica: Leica TS60* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/geodeticke-pristroje/totalni-stanice/ts60>
- [23] *Leica NOVA MS50: Dělejte pouze správná rozhodnutí* [online]. GEFOS a.s., zastoupení Leica Geosystems pro ČR [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: https://www.gefos-leica.cz/ftp/Totalni_stanice/NOVA/Leica_Nova_MS50_le-tak_CZ.pdf
- [24] *GEOOPREMA: Leica MS50 1" R2000* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: https://geoprema.com/products/used-equipment/used_total_stations/leica-ms50-1-r2000/
- [25] *Gefos Leica: 641662 - GMP101 sada s mini-hranolem* [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: https://www.gefos-leica.cz/e-shop/geodeticke-pristroje/prislusenstvi-geodeticke/odrazne-hranoly-a-stitky/gmp101-sada-s-mini-hranolem_641662
- [26] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://mapy.cz>

Seznam tabulek

Tabulka 1: Návrh na číslování bodů v síti	21
Tabulka 2: Vzdálenost definující rozměr sítě	40
Tabulka 3: Počet měření, neznámých a nadbytečných měření podle počtu bodů v síti .	41
Tabulka 4: Výsledné hodnoty bez užití délkového normálu, Leica Nova TS60	42
Tabulka 5: Výsledné hodnoty s užitím délkového normálu, Leica Nova TS60	43
Tabulka 6: Výsledné hodnoty bez užití délkového normálu, Leica Nova MS50	44
Tabulka 7: Výsledné hodnoty s užitím délkového normálu, Leica Nova MS50	44
Tabulka 8: Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem, Leica Nova TS60	46
Tabulka 9: Porovnání vypočítané přesnosti měřených veličin s hodnotou udávanou výrobcem, Leica Nova MS50	46
Tabulka 10: Zbytkové chyby součtových konstant, Leica Nova TS60, Leica Nova MS50	47
Tabulka 11: Návrh na číslování bodů	49

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schématický zakres pravdivých a prezicních výsledků měření [4]	11
Obrázek 2: Ilustrační zakres chyby součtové konstanty [vlastní zpracování]	12
Obrázek 3: Spirálové vyhledávání cíle [vlastní zpracování]	14
Obrázek 4: Vějířovité vyhledávání cíle [12].....	15
Obrázek 5: GNSS vyhledávání cíle [12].....	15
Obrázek 6: Stopa na obrazovém senzoru: a) po hrubém zacílení, b) po přesném zacílení [13].....	16
Obrázek 7: Stopa na kvadrantovém detektoru: a) po hrubém zacílení, b) po přesném zacílení [13]	16
Obrázek 8: Vliv sbíhavosti tížnic na měřený zenitový úhel [vlastní zpracování]	23
Obrázek 9: Vzhled aplikace (záložky: vyrovnání sítě, výsledná data) [vlastní zpracování].....	32
Obrázek 10: Vzhled aplikace (záložky: vyrovnání sítě, výsledná data) [vlastní zpracování].....	33
Obrázek 11: Editace čísel bodů v zápisníku [vlastní zpracování]	33
Obrázek 12: Totální stanice Leica Nova TS60 [22]	34
Obrázek 13: Totální stanice Leica Nova MS50 [24]	35
Obrázek 14: Lokalita měření [26].....	36
Obrázek 15: Schéma sítě [vlastní zpracování].....	36
Obrázek 16: TS Leica Nova TS60 na bodě č. 6 [vlastní zpracování].....	37
Obrázek 17: TS Leica Nova MS50 na nově stabilizovaném bodě č. 2 [vlastní zpracování].....	37
Obrázek 18: Leica mini-hranol na bodě č. 3 [vlastní zpracování].....	37
Obrázek 19: TS Leica Nova TS60 na nově stabilizovaném bodě č. 1 [vlastní zpracování].....	38
Obrázek 20: TS Leica Nova TS60 na bodě č. 4 [vlastní zpracování].....	38
Obrázek 21: Leica mini-hranol na bodě č. 5 [vlastní zpracování].....	38
Obrázek 22: Náčrt situace při měření délky určující rozměr sítě [vlastní zpracování] ..	39
Obrázek 23: Schéma sítě [vlastní zpracování].....	42
Obrázek 24: Schéma sítě [vlastní zpracování].....	44

Seznam elektronických příloh

Příloha 1 230406_SIT_TS60.zap

- surová data z totální stanice Leica Nova TS60

Příloha 2 230406_SIT_MS50.zap

- surová data z totální stanice Leica Nova MS50

Příloha 3 230406_SIT_TS60_zpracovani.xls

- analýza naměřených dat z TS Leica Nova TS60 a výpočet délkového normálu

Příloha 4 230406_SIT_MS50_zpracovani.xls

- analýza naměřených dat z TS Leica Nova MS50

Příloha 5 aplikace PES1234

- složka obsahující aplikaci PES1234 (verze 1.0), uživatelskou příručku na instalaci a ovládání aplikace, ukázkové soubory s měřenými daty