

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA STAVEBNÍ
OBOR GEODEZIE A KARTOGRAFIE**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace měřické základny při určování adiční konstanty laserového trackeru Leica AT401

Vedoucí práce: Ing. Filip Dvořáček, Ph.D.

Katedra speciální geodézie

Červen 2019

Bc. Petr Kúdela



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kúdela	Jméno: Petr	Osobní číslo: 439230
Zadávající katedra: Speciální geodézie (11154)		
Studijní program: Geodézie a kartografie		
Studijní obor: Geodézie a kartografie		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	Optimalizace měřické základny při určování adiční konstanty laserového trackeru Leica AT401.
Název diplomové práce anglicky:	Optimization of a Measuring Baseline for Determining of the Additive Contant of the Leica AT401 Laser Tracker.
Pokyny pro vypracování:	Testování určování adiční konstanty laserového trackeru Leica AT401 a odrazného hranolu Leica RRR 1,5" na dočasných laboratorních základnách o variabilní délce pomocí procedury bez MNC vyrovnání. Návrh experimentální grafické aplikace pro měření, ukládání a zpracování dat při určování adiční konstanty laserových trackerů Leica řady AT40x.
Seznam doporučené literatury:	HAMPACHER, M. a M. ŠTRONER. Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. Vydání druhé. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-05843-5. LEICA GEOSYSTEMS. EmScon 3.8: Leica Geosystems Laser Tracker Programming Interface - Programmers Manual. Switzerland, 2013. DVOŘÁČEK, F. Kalibrace terénních délkových základen laserovým trackerem Leica AT401. Disertační práce. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra speciální geodézie. 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.27558.01602
Jméno vedoucího diplomové práce:	Ing. Filip Dvořáček, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce:	22. 2. 2019
Termín odevzdání diplomové práce:	19. 5. 2019
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

<u>22.2.2019</u>	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou určování adiční konstanty u laserového trackeru Leica AT401 s hranolem Leica RRR 1,5in na základnách o různých délkách. Pro tento účel byla vytvořena grafická aplikace pro ovládání přístroje, ukládání a zpracování dat. Experimentální měření proběhlo na dočasných základnách, které byly vytvořeny v laboratoři Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického ve Zdíbech. Výsledkem práce je vyhodnocení vlivu délky základny na určení adiční konstanty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Leica, AT401, RRR 1,5in, adiční konstanta, laserový tracker, metrologie, základna

ABSTRACT

This master's thesis deals with the determination of additive constant for Leica AT401 Laser Tracker with Leica RRR 1.5in prism on baselines of different length. For this purpose, a graphical application for device controlling, data storing and data processing was created. The experimental measurements were carried out at temporary baselines which were created in the Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography. The goal of this thesis is evaluation of baseline length influence on the determination of the additive constant.

KEY WORDS

Leica, AT401, RRR 1.5in, additive constant, laser tracker, metrology, baseline

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Optimalizace měřické základny při určování adiční konstanty laserového trackeru Leica AT401“ vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

.....

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Filipu Dvořáčkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a čas, který mi věnoval při vyhotovení této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Lechnerovi, CSc. a kolektivu odd. 25 VÚGTK za umožnění práce v laboratoři a za zapůjčení laserového trackeru.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Laboratoř a použité vybavení	11
2.1 Laboratoř VÚGTK.....	11
2.2 Laserové trackery Leica AT40x	12
3. Adiční konstanta	15
3.1 AT40x Tracker Pilot.....	16
3.1.1 Popis ADM testu.....	16
3.1.2 Měřicí základna	17
3.1.3 Postup měření	18
3.1.4 Výpočet nové adiční konstanty	18
3.1.5 Výsledný protokol ADM testu	20
3.2 Metody zjištění adiční konstanty.....	21
3.2.1 Měřicí základna a způsob měření	21
3.2.2 Výpočet	22
3.2.2.1 Klasický výpočet.....	22
3.2.2.2 Výpočet pomocí redukce na přímku	23
3.3 Vývoj adiční konstanty v čase.....	25
4. Aplikace pro testování	27
4.1 Leica Software Development Kit	27
4.2 Další měřické aplikace	27
4.2.1 GeoTracker	27
4.2.2 ATControl	28
4.3 Použité technologie pro vytvoření aplikace	29

4.3.1	Programovací jazyk C++	29
4.3.2	Microsoft Foundation Class	29
4.4	Vývoj vlastní aplikace.....	30
4.4.1	Grafické rozhraní.....	31
4.4.1.1	Připojení k laserovému trackeru	31
4.4.1.2	Základní nastavení	32
4.4.1.3	Měření	35
4.4.2	Výsledný protokol	36
5.	Testovací měření	38
5.1	Příprava základen	38
5.2	Postup měření	39
6.	Zpracování výsledků	40
6.1	Určení adiční konstanty	40
6.2	Statistické testy	42
6.2.1	Výběrová směrodatná odchylka	42
6.2.2	Fisherovo-Snedecerovo F-rozdělení.....	43
6.2.3	Studentův T-test.....	44
7.	Závěr	46
	Použité zdroje a literatura.....	48
	Seznam obrázků	50
	Seznam tabulek	51
	Seznam tištěných příloh.....	52
	Seznam příloh na CD.....	52

Seznam použitých zkratek

ADM	Absolute Distance Measurement (absolutní měření délek)
API	Application Programming Interface
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AT	Absolute Tracker
ATR	Automatic Target Recognition (automatické poznávání hranolu)
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
EDM	Electronic Distance Measurement (elektronické měření délek)
FSv	Fakulta stavební
MFC	Microsoft Foundation Class
MPE	Maximum permissible error (maximální přípustná chyba)
RIGTC	Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography
RRR	Red Ring Reflector (označení kulového odrazného hranolu Leica)
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
Wi-Fi	Wireless-Fidelity (neoficiální zkratka)

1. Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na přesnost měření přístrojů pro určování prostorové polohy bodů. K tomu historicky bylo a stále je potřeba určovat úhly a délky s velkou přesností. Revoluční v tomto ohledu byl vynález a vývoj elektronických dálkoměrů, což geodetické práce nejen zjednodušilo, ale hlavně podstatně zrychlilo. Neodborné používání této technologie však s sebou přináší mnoho rizik. Pro dosažení správných výsledků je nutné zavádět několik korekcí. Ty jsou zpravidla aplikovány výrobcem automaticky a prověřovány v rámci kalibrace. Pro běžného uživatele je jejich znalost většinou omezená na atmosférickou korekci (fyzikální redukce) a adiční konstantu. U klasické geodézie, je pro přesnost v rámci milimetrů a centimetrů požadována pouze přibližná znalost těchto korekcí. U speciálních průmyslových měření a v aplikacích metrologie se ale přesnost může pohybovat až v řádu mikrometrů, a proto je třeba znát tyto korekce spolehlivěji.

Tato práce se zabývá určováním adiční konstanty u přesného laserového trackeru řady Leica AT401. K tomuto přístroji je zdarma poskytnut software Leica Tracker Pilot [1], kde je možné tuto hodnotu určit za pomoci tzv. ADM testu. Ten ovšem vyžaduje základnu o čtyřech bodech, kde je požadován konstantní rozestup přibližně 2 metry. Dříve ve starších verzích softwaru byl požadován rozestup pouze 1,5 metru. Změna požadovaného rozestupu se dotkla především laboratoří, které si již požadovanou základnu s rozestupem 1,5m pevně vytvořily. Existují i laboratoře, které disponují vhodnými základnami o jiných rozměrech, avšak z důvodu omezení softwaru nemohou být využity. Proto byla vytvořena tato práce, která má za úkol zkoumat vliv délky základny na adiční konstantu a posoudit, zda je prakticky možné volit odlišné délky základny při zachování uspokojivé přesnosti jejího určení.

V rámci práce byla za pomoci balíčku „Leica Software Development Kit“ vytvořena aplikace pro ovládání přístroje, ukládání a zpracování dat. Stejný balíček byl použit pro vývoj metrologických aplikací GeoTracker [2] a ATControl [3] vyvinutými zaměstnanci Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického ve Zdíbech

(dále VÚGTK). Vytvořená aplikace byla použita pro testovací měření, které proběhlo v laboratoři VÚGTK dne 29. 5. 2019. Určení adiční hodnoty se uskutečnilo na základnách o pravidelných rozestupech bodů 1,5 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m a 7 m. Výsledkem práce by mělo být porovnání vypočtených dat, určení odchylek a statistické testování.

Určování adiční konstanty konkrétního laserového trackeru již proběhlo v rámci disertační práce Ing. Filipa Dvořáčka Ph.D. [4]. Zde je popsáno opakované určování této hodnoty pomocí ADM testu ve dvou termínech, kde proběhlo určení čtyřikrát a v dalším termínu pětkrát. Výsledkem tohoto testu je kontrola časové změny adiční konstanty za účelem měření na Státním etanolu velkých délek Koštice (25 m až 1450 m). V této oblasti diplomová práce navazuje na disertační práci [4] a dále ji rozvíjí.

2. Laboratoř a použité vybavení

2.1 Laboratoř VÚGTK

Kalibrační laboratoř pro testování se nachází v suterénu VÚGTK ve Zdibech. Provozováním je pověřen útvar č. 25 - Metrologie a inženýrská geodézie. Laboratoř je v současnosti akreditovaná v oboru délka a úhel a autorizovaná ke kontrole měřických pásem. Od roku 2008 je pověřena správou Státního etanolu velkých délek Koštice (25 m až 1450 m), který je používán ke kalibraci dálkoměrů, zpravidla ručních elektronických dálkoměrů a EDM přístrojů totálních stanic [5].

Laboratoř je přibližně 30 metrů dlouhá. Díky celoplošné stropní klimatizace jsou atmosférické podmínky v laboratoři homogenní v čase v intervalu cca $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Větší místní rozdíly mohou však teoreticky dočasně nastat v oblasti vstupu a větracího průduchu laboratoře. Z tohoto důvodu je laboratoř nejvhodnějším dostupným prostředím použitelným k přesným měřením prováděné laserovým trackerem [4].



Obr. 1: Kalibrační laboratoř ve VÚGTK

2.2 Laserové trackery Leica AT40x

Laserový trackery řady Leica AT40x jsou inovativní měřicí systémy, které umožňují řádově přesnější měření délek než běžné totální stanice. Neobsahují okulár ani dalekohled, a proto je jejich ovládání a cílení možné pouze z externího elektronického zařízení, kde pro rychlé a jednoduché propojení slouží integrovaná Wi-Fi. Dále disponují funkcemi Powerlock a ATR, které umožňují kontinuálně sledovat cílový hranol v reálném čase bez zásahu uživatele.

Laserové trackery jsou hojně využívány v metrologických centrech, v průmyslu a ve stavebnictví k velmi přesným měřickým pracím. Jejich použití v komerční geodezii je omezené a soustředí se spíše na zakázky speciálního charakteru.

Leica AT401

Laserový tracker použitý pro tuto práci je model Leica AT401 a je ve výhradním vlastnictví VÚGTK.

Typické výrobcem uváděné hodnoty přesnosti pro laserový tracker se udávají jako MPE, což dle normy ASME B89.4.19 značí maximální odchylku od správné hodnoty. Lže předpokládat, že směrodatná odchylka je následně polovina této hodnoty [4]. Vybrané parametry, které jsou v přímé souvislosti s testy prováděnými v této práci [6]:

Délková přesnost – směrodatná odchylka:	+/- 5 μm
Úhlová přesnost – směrodatná odchylka:	+/- 7.5 μm + 3 $\mu\text{m}/\text{m}$ (0,5“)



Obr. 2: Senzor Leica AT401

Kontrolér Leica AT400

Leica AT400 je externí zařízení připojené kabelem k AT401. Zobrazuje základní informace o trackeru, jako je například poloha libelové bubliny, stav trackeru, nebo IP adresa. Kontrolér má zabudované senzory k určení teploty, tlaku a vlhkosti, jejíž hodnoty taktéž zobrazuje. Dále je možno ke kontroléru připojit externí teplotní čidlo, které umožňuje určit teplotu na požadovaném místě mimo kontrolér. To je důrazně doporučeno při všech přesných měřeních z důvodu nežádoucího zahřívání integrovaného teplotního čidla elektronikou kontroléru [4]. Při dlouhodobém používání trackeru, je možné připojit kontrolér ke zdroji elektřiny.

Kontrolér AT400 je výpočetním a komunikačním centrem celé soustavy, tracker AT401 je pak možné vnímat jako připojený senzor, který zprostředkovává měření požadovaných hodnot.



Obr. 3: Kontrolér Leica AT 400

Leica Red Ring Reflector

Kulový hranol RRR je přesné odrazné zařízení vyrobeno z magnetické nerezové oceli o váze 170 gramů. Průměr celého hranolu včetně ocelového krytu je 1,5 palce. Přesnost centrování optiky je výrobcem uváděná hodnota $\leq \pm 0.003$ mm [7]. Tento typ hranolu je výrobcem doporučen jako jeden ze dvou vhodných typů (CCR a RRR) k provádění inicializace přístroje. K provádění kompenzačních testů je doporučován právě hranol RRR.



Obr. 4: Hranol RRR 1,5in

Tab. 1: Identifikace pomůcek použitých pro měření

Produkt	Výrobní číslo	Sériové číslo
Leica AT401	576371	390740
Kontrolér Leica AT400	576370	390740
Red Ring Reflector 1.5in	8058	575784

3. Adiční konstanta

Adiční, neboli součtová konstanta, je jedna z hlavních redukcí elektronických dálkoměrů. Adiční konstanta se počítá ze dvou částí, a to geometrické a systematické (elektronické). Geometrická konstanta se dále dělí na přístrojovou a hranolovou. Přístrojová konstanta určuje vzdálenost vysílače paprsku od vertikální osy přístroje. Hranolová konstanta je dána vzdáleností, která vzniká při odrazení paprsku mezi dvěma zrcadlovými plochami a doplňkovou délkou mezi odrazovou plochou hranolu a určeným bodem. Systematická chyba je součet obvykle konstantních chyb, které jsou zapříčiněny například zpožděním signálu v různých elektrických obvodech přístroje [8].

Uživatelé klasických totálních stanic jsou zvyklí na v čase neměnnou hodnotu adiční konstanty, ovšem toto neplatí u přesnějších laserových trackerů. Zde je nutno uvažovat i časově variabilní charakter této korekce, a proto by měla být adiční konstanta pravidelně kontrolována a zaváděná její aktuální hodnota (viz kapitola 3.3). Pro všechny běžné měřické aplikace s laserovými trackery se obvykle předpokládá nezávislost adiční konstanty na měřené vzdálenosti. Testováním určenou hodnotu korekce zavádí přístroj následně k měření automaticky.

Pro klasické totální stanice se většinou určuje adiční konstanta dohromady pro přístroj a hranol stejné značky. Následně je případně možné dopočítat přístrojovou a hranolovou část. Přístrojové vybavení pak může být používáno v jakékoliv kombinaci a součtová konstanta je nejčastěji uváděná stejná pro jakýkoliv hranol či přístroj ze stejné série. Toto ovšem neplatí pro velmi přesné přístroje. U přístrojů jako je laserový tracker by se měla součtová konstanta určovat pro konkrétní přístroj s konkrétním hranolem. Při použití přístroje s jiným hranolem (i když je stejného typu) je zajištěná přesnost jen do takové úrovně, jak se shoduje dílenské zpracování optických a krycích částí odrazných hranolů. K ještě větším chybám by však došlo při zanedbání individuální přístrojové části adiční konstanty při předpokladu možné záměny přístrojů.

3.1 AT40x Tracker Pilot

AT40x Tracker Pilot [1] je oficiální software od firmy Leica. Slouží především k základnímu nastavení přístroje. Umožňuje jednoduché měření a registraci některých dat. Dále má integrované veškeré postupy, které jsou podle výrobce potřeba k zachování a kontrole přesnosti laserového trackeru. Není však plně určen k používání jako plnohodnotný geodetický nebo metrologický program. Teprve po přihlášení uživatele „Advanced“ zprostředkuje přístup ke kompenzacím přístroje a některým pokročilejším nastavením.



Obr. 5: AT40x Tracker Pilot

3.1.1 Popis ADM testu

ADM test je součástí softwaru AT40x Tracker Pilot. Slouží k ověřování (field check) či novému zjištění (compensation) adiční konstanty laserového trackeru. V softwaru je možné vybrat si mezi dvěma variantami určení, které jsou postupem a principem stejné. Rozdíl je pouze v účelu výsledku. První varianta je takzvaná polní zkouška. Výsledná hodnota z testu pouze ověřuje hodnotu adiční konstanty. Výsledek testu ukazuje, zdali se nově určená konstanta přístroje významně odlišuje či neodlišuje od staré

hodnoty. Výrobce definuje 100 % toleranční interval jako 5 μm . Druhá varianta je laboratorní test pro kompenzaci adiční hodnoty. V tomto testu je výsledek použit do nového souboru kompenzací a měřené délky jsou o tuto hodnotu dále redukovány.

3.1.2 Měřicí základna

Koncepce průběhu testu je navržena pro velmi přesné měřické stroje. Hlavním předpokladem testu je vyhnout se záměně stroje za hranol a opačně, což by způsobilo nestabilitu měřické základny. Ve starší verzích softwaru AT40x Tracker Pilot byl interval mezi body základny výrobcem zvolen na 1,5 metru. S novější verzí softwaru byl tento interval změněn na současné 2 metry.

Test je realizován na základně, která je tvořena čtyřmi body, mezi kterými je konstantní vzdálenost 2 metry. Základna by měla být co nejvíce v přímce a jednotlivé body přibližně ve stejné výšce. Stanoviska č. 1 a 3 jsou osazeny trojnožkou a slouží k usazení stroje. Cílové body č. 2 a 4 jsou osazeny trojnožkou s centrovačem, který slouží k usazení hranolu. Kvůli zachování přesnosti by během testu měl být pouze jemně přemísťován měřický hranol, nemělo by dojít k vyjmutí a zpětnému nasazení centrovače zpět do trojnožky.

Parametry základny, které je nutné dodržet, aby došlo k výpočtu [9]:

- a) Měřený úhel ze stanoviska 3 na 2 a 4 by neměl být menší než 170°
- b) Měřený úhel ze stanoviska 1 na 2 a 4 by měl být do 5°
- c) Zenitový úhel by měl být v rozmezí $\pm 5^\circ$ od roviny.



Obr. 6: Schéma ukázka základny

3.1.3 Postup měření

Nejdříve je nutné nechat přístroj rozehrát. Jedná se o takzvaný warm-up efekt, který trvá přibližně 2 hodiny. Důvodem je zahřátí přístroje (zejména inklinčního senzoru) na provozní teplotu a tím zajištění zejména stabilního měření směrů, úhlů a v menší míře i délek. Před samotným měřením je nutné laserový tracker inicializovat, aby došlo k aplikaci korekcí na měřené hodnoty.

- a) Přístroj je zhorizontován na stanovisku č. 3. Úhly a délky jsou postupně měřené nejdříve na cílový bod č. 2 a následně na bod č. 4
- b) Přístroj je přenesen a zhorizontován na stanovisku č. 1. Úhly a délky jsou postupně měřené nejdříve na cílový bod č. 2 a následně na bod č. 4.
- c) Přístroj je znova přenesen na stanovisko č. 3 a měří se ve stejném pořadí jako v případě a)

3.1.4 Výpočet nové adiční konstanty

Způsob výpočtu nové adiční konstanty podle ADM testu není uveden v žádných dostupných zdrojích. Omezeně se této problematice týká publikace [10]. Aplikace pouze po splnění podmínek při měření vygeneruje protokol s výslednou hodnotou.

Měřené veličiny, které je možné uložit během ADM testu, z neznámého důvodu plně neodpovídají klasicky naměřeným hodnotám mimo testovací proceduru. Lze předpokládat, že roli hraje zavádění kompenzací i při vypnutém inklinčním senzoru, nad čímž ale nemá běžný uživatel kontrolu.

Z tohoto důvodu proběhlo přímé kontaktování výrobce softwaru a byly položeny otázky ohledně postupu řešení této problematiky. Odpovědí firmy Leica bylo zaslání Excel souboru s předdefinovaným výpočtem a popis, jak do formuláře dosazovat měřené hodnoty. Chyběly informace, z čeho výrobce vychází a jaké matematické postupy používá. Proběhla snaha odvodit výpočet z Excel souboru, ovšem zde již byly použity vzorce po několika matematických úpravách a výchozí rovnice se nepodařilo získat. Druhý položený dotaz byl ohledně inklinčního senzoru, jakým způsobem opravuje měřené veličiny a jestli je nutné ho při určování adiční konstanty používat. Tento dotaz byl vznesen

hlavně kvůli tomu, že ADM test po přesunu na druhé stanoviště nevyžaduje novou inicializaci. Odpovědí bylo, že při určování není žádný důvod vypínat inklinanční senzor a že měření úhlů má jen pomocný charakter. Tato informace je ovšem v rozporu s ADM testem tak, jak je výrobcem koncipován v programu Leica Tracker Pilot.

Na základě prozatím získaných informací bylo provedeno testovací měření ADM pomocí AT40x Tracker Pilota na přibližně základně splňující parametry dané výrobcem. Měřené hodnoty získané z ADM testu byly dosazeny do výpočetního Excelu. Zde proběhlo zjištění, že výsledná hodnota neodpovídá hodnotě adiční konstanty z ADM testu. V tab. 2 je k vidění hrubý nesoulad jak absolutních hodnot čísel, tak jejich znamének. Znaménkový rozdíl není způsobem chybným dosazením dat do Excelu ve smyslu záměny pořadí stanic. Nesoulad je nutné hledat buď v selhávajícím výpočtu Excelu pro danou geometrickou konfiguraci základny anebo v datech získaných exportem při měření ADM testu. Uživatel však nemá plný přístup ani k datům z Excelu, ani k informacím týkající se hodnot měřených během ADM testu. V této práci nebude dále nesoulad zkoumán, neboť s ohledem na pomalejší komunikaci s Leica podporou není možné situaci rychle vyřešit. I když je toto již nad rámec původního zadání práce, přesto se doporučuje zaměřit se na tyto nejasnosti v některé z navazujících bakalářských či diplomových prací či v rámci výzkumu VÚGTK. Je potřeba počítat s dostatkem času pro vedení komunikace s podporou výrobce.

Tab. 2: Určení adiční konstanty Excel/ADM test

Určená adiční konstanta z ADM dat [mm]	
Leica Excel	ADM test
-73,221	73,109

3.1.5 Výsledný protokol ADM testu

V hlavičce je na první pohled vidět výsledek testu, který je dán symbolem \times a nápisem *not OK* v případě nesplnění tolerance anebo symbolem \checkmark a nápisem *OK* v případě splnění. Dále obsahuje datum a čas provedení testu. Následně je protokol rozdělen do několika sekcí.

Results

V této sekci je uvedena nová adiční hodnota, původní, jejich rozdíl a směrodatná odchylka nově určené hodnoty. V protokolu je uváděná tolerance rozdílu mezi starou a novou kompenzací, kde je $1 \mu\text{m}$ rovný 20 %. Mezní hodnota rozdílu nastavená výrobcem je $5 \mu\text{m}$, což je rovno 100 % tolerance. Tyto meze však nebyly vždy stejné a v minulosti došlo k jejich změně [4].

Tracker

Obsahuje základní informace o trackeru jako je název a sériové číslo. Následně IP adresu sítě a datum poslední kompenzace.

Configuration

V této části je popsáno základní nastavení použité při měření. Stav inklinčního senzoru, sledování hranolu, mód měření a dále aktuální verze softwaru.

Meteo Data

Obsahuje základní atmosférické podmínky během vykonávání měření. Těmi jsou myšleny hodnoty teploty vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], atmosférického tlaku [mBar] a relativní vlhkosti vzduchu [%].

V dalších částech protokolu jsou obsaženy směrodatné odchylky jednotlivých naměřených vzdáleností. Velkou nevýhodou je, že nejsou obsaženy naměřené horizontální směry, zenitové úhly a šikmé délky. Tyto hodnoty je nutné ukládat během měření u jednotlivých stanovisek. Není navíc jisté, že uvedené hodnoty jsou opravdu ty, které vstupují do přeprogramovaného výpočtu adiční konstanty. Může se jednat o hodnoty na které ještě nejsou aplikované různé úhlové a délkové korekce.

ADM Check Report




Not OK

Name: 2019-03-15 12-51 ADM Check

Results

Tolerance Used: 129%

Measurements: 6

	New	Active	Deviation	Standard Deviation
ADM Offset [mm]	73,109	73,103	0,006	0,000

Tracker

Product Name: AT401

Serial Number: 390740

IP Address: 192.168.241.6

Compensation: 2018-12-21 11-21

Target

Product Name: Red Ring Reflector 1.5 Inch

Configuration

Powerlock: On

Inclination Sensor: On

Ext. Air Temperature Sensor: connected

Measurement Profile: Stationary, Precise

User: PETR as Advanced

Software Version: 3.4.1.151

Meteo Data (auto)

Temperature: 20,1 °C

Pressure: 969 mBar

Humidity: 36 %

Obr. 7: Ukázka části protokolu – Tracker Pilot v. 3.4.1.151

3.2 Metody zjištění adiční konstanty

3.2.1 Měřicí základna a způsob měření

Měřicí základna a způsob provedení měření je přebráno z ADM testu, který je popsán v kapitole 3.1.2 a 3.1.3. Výjimku tvoří pouze nutnost návratu na vnitřní stanoviště, které má pouze informativní charakter ohledně stability základny a není pro výpočet adiční konstanty použito.

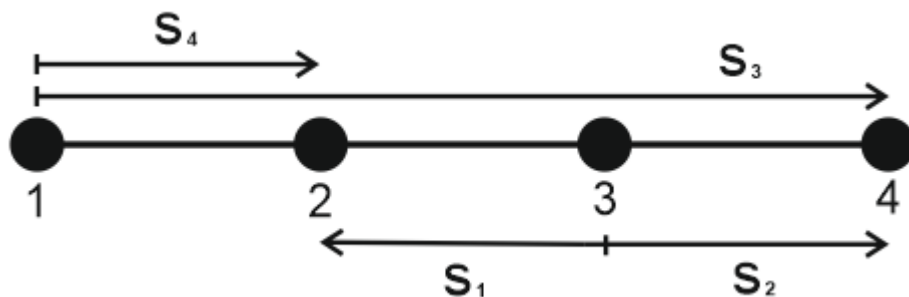
3.2.2 Výpočet

Výpočet adiční konstanty je možný několika způsoby. V této kapitole jsou popsány dva výpočty, které jsou nejjednodušší a lehce použitelné. Každý z těchto výpočtů je aplikován na měřená data ze základny z ADM testu.

3.2.2.1 Klasický výpočet

Tento výpočet je možné použít k určení adiční konstanty u totálních stanic. Hlavní podmínkou je urovnání všech čtyř stanovišek co nejvíce do přímky. To nejčastěji probíhá pomocí nitkového kříže z krajního stanoviška či stanoviška mimo základnu.

Výpočet předpokládá, že vzdálenosti s_3 a s_4 jsou zatíženy chybou ve stejném směru, a proto jejich rozdíl dává bezchybnou vzdálenost. Naopak jednotlivé délky s_1 a s_2 mají chybu v opačném směru, a tedy jejich součet zatíží vzdálenost dvounásobnou chybou součtové konstanty.



Obr. 8: Schéma základny při klasickém výpočtu

Nejprve je nutné redukovat šikmé délky na vodorovné:

$$s_i = \check{s}_i * \sin(z_i) \quad (1)$$

Směrodatná odchylka vodorovné délky:

$$\sigma_{s_i} = \sqrt{\sigma_{\check{s}_i}^2 * \sin(z)^2 + \check{s}_i^2 * \cos(z)^2 * \sigma_{z_i}^2} \quad (2)$$

Součtová konstanta se vypočte:

$$k = \frac{(s_1 + s_2) - (s_3 - s_4)}{2} \quad (3)$$

Směrodatná odchylka součtové konstanty:

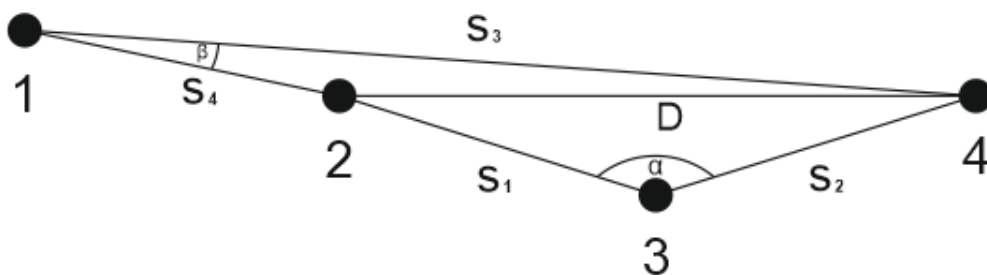
$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sigma_{s_1}^2 + \sigma_{s_2}^2 + \sigma_{s_3}^2 + \sigma_{s_4}^2}{4}} \quad (4)$$

Bez precizního urovnání bodů na přímku je tento výpočet pro laserový tracker nedostatečný. Urovnání bodů na přímku pomocí trackeru je relativně pracné, protože nelze využít chybějící optiku s ryskovým křížem pro cílení. Pro přípravu bodů by bylo možné také využít jinou totální stanici, ale i to sebou přináší drobné nepřesnosti způsobené nezbytnou záměnou centračních pomůcek (centrační pomůcky za tracker). Výhodou výpočtu je jeho jednoduchost, ovšem jelikož výsledek je požadován na μm , proto i vychýlení od osy základny v rámci více mm a cm má nezanedbatelný negativní dopad na nově určenou součtovou konstantu.

3.2.2.2 Výpočet pomocí redukce na přímku

Tento výpočet je navržen tak, aby pracoval se skutečnou situací a co nejvíce potlačil vychýlení stanovisek od osy. Přesto je však snahou, aby úhel β byl přibližně roven 0 gon a úhel α byl přibližně roven 200 gon.

Při výpočtu je pomocí kosinové věty zjištěna vzdálenost D z obou stanovisek. Ze stanoviska č. 1 je měřeno přibližně v jednom směru (úhel $\beta = 0$ gon), můžeme tedy předpokládat, že vzdálenost D obsahuje pouze zanedbatelnou chybu. Naopak ze stanoviska č. 3 je každá vzdálenost měřena v opačném směru (úhel $\alpha = 200$ gon), proto vypočtená vzdálenost D je zatížena dvounásobnou chybou součtové konstanty podobně, jako v předchozím postupu.



Obr. 9: Schéma základny při redukovaném výpočtu

Pro zpřehlednění postupu výpočtu bude použito pro určenou vzdálenost D ze stanoviska č. 3 označení D_1 a ze stanoviska č. 1 označení D_2 .

Nejprve je nutné redukovat šikmé délky na vodorovné:

$$s_i = \check{s}_i * \sin(z_i) \quad (5)$$

Směrodatná odchylka vodorovné délky:

$$\sigma_{s_i} = \sqrt{\sigma_{\check{s}_i}^2 * \sin(z)^2 + \check{s}_i^2 * \cos(z)^2 * \sigma_{z_i}^2} \quad (6)$$

Vrcholové úhly α a β jsou určeny z naměřených vodorovných směrů:

$$\begin{aligned} \alpha &= Hz_{3-4} - Hz_{3-2} \\ \beta &= Hz_{1-4} - Hz_{1-2} \end{aligned} \quad (7)$$

Směrodatné odchylky vrcholových úhlů α a β :

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= \sqrt{\sigma_{Hz_{3-4}}^2 + \sigma_{Hz_{3-2}}^2} \\ \sigma_\beta &= \sqrt{\sigma_{Hz_{1-4}}^2 + \sigma_{Hz_{1-2}}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Vzdálenosti D_1 a D_2 se určí pomocí kosinové věty:

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt{s_1^2 + s_2^2 - 2 * s_1 * s_2 * \cos(\alpha)} \\ D_2 &= \sqrt{s_3^2 + s_4^2 - 2 * s_3 * s_4 * \cos(\beta)} \end{aligned} \quad (9)$$

Směrodatné odchylky vzdáleností D_1 a D_2 :

$$\begin{aligned} \sigma_{D_1} &= \sqrt{\left(\frac{s_1 - s_2 * \cos(\alpha)}{D_1}\right)^2 * \sigma_{s_1}^2 + \left(\frac{s_2 - s_1 * \cos(\alpha)}{D_1}\right)^2 * \sigma_{s_2}^2 + \left(\frac{s_1 * s_2 * \sin(\alpha)}{D_1}\right)^2 * \sigma_\alpha^2} \\ \sigma_{D_2} &= \sqrt{\left(\frac{s_3 - s_4 * \cos(\beta)}{D_2}\right)^2 * \sigma_{s_3}^2 + \left(\frac{s_4 - s_3 * \cos(\beta)}{D_2}\right)^2 * \sigma_{s_4}^2 + \left(\frac{s_3 * s_4 * \sin(\beta)}{D_2}\right)^2 * \sigma_\beta^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Výsledná součtová konstanta:

$$k = \frac{D_2 - D_1}{2} \quad (11)$$

Směrodatná odchylka součtové konstanty:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sigma_{D_2}^2 + \sigma_{D_1}^2}{4}} \quad (12)$$

Tento výpočet významně potlačuje chybu vzniklou možným horizontálním vychýlením stanovisek od osy základny. Toto navržené řešení je použito pro následující testovací měření a výpočty v diplomové práci a je součástí i dále popsané vytvořené softwarové aplikace na kontrolu součtové konstanty.

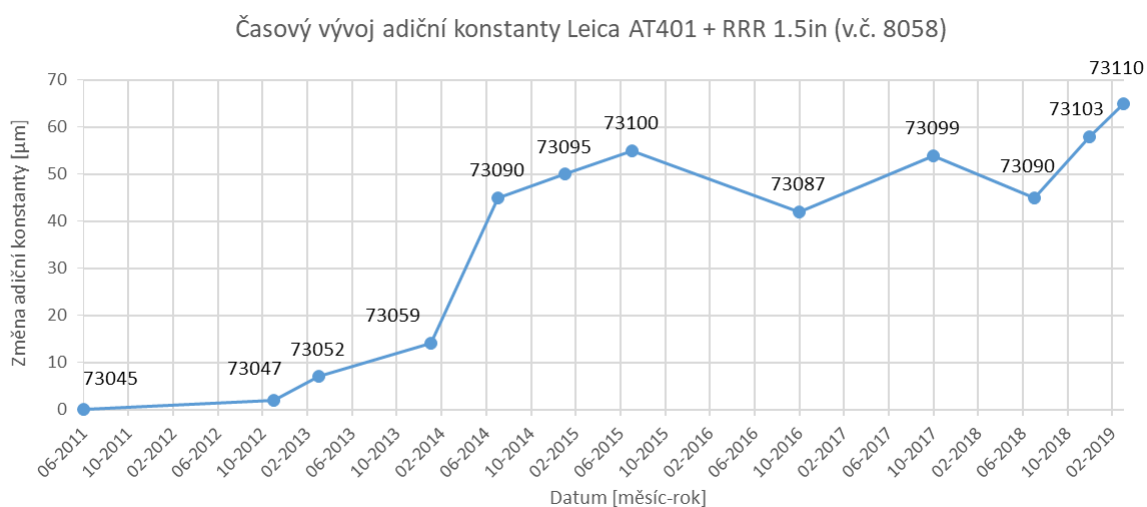
3.3 Vývoj adiční konstanty v čase

Adiční konstanta laserového trackeru Leica AT401 je pravidelně proměřována zaměstnanci VÚGTK. S ohledem na vývoj hodnot adiční konstanty byla stanovena potřeba testování zhruba jednou za půl roku [4].

Data z období června 2011 do října 2016 jsou přebrány z [4]. Novější měření je získáno buďto z interní paměti přístroje, kde jsou tyto data skladována, anebo od prosince 2018 z vlastního měření.

Tab. 3: Časový vývoj adiční konstanty

Časový vývoj adiční konstanty AT401 + RRR 1.5in (v.č. 8058)					
Datum	Měřil	Počet určení	Adiční konstanta [μm]		
			Hodnota	Sm. odch.	Změna
2011-06-15	Leica	1 ?	73045	?	0
2012-11-22	VÚGTK	1	73047	-	2
2013-03-20	FD, M. Volkmann	4	73052	2	7
2014-01-16	FD, J. Braun	5	73059	1	14
2014-07-25	FD	5	73090	1	45
2015-01-30	FD	3	73095	1	50
2015-07-30	FD	3	73100	1	55
2016-10-26	Hexagon	1 ?	73087	-	42
2017-10-13	FD	2	73099	-	54
2018-07-12	VÚGTK	1 ?	73090	-	45
2018-12-21	PK, FD	5	73103	1	58
2019-03-15	PK, FD	2	73110	1	65



Obr. 10: Časový vývoj adiční konstanty – graf [4]

Z výsledků za posledních 8 let je patrné, že až na dvě výjimky má adiční konstanta rostoucí trend. Ovšem ten je náhodný a neřídí se viditelnými zákonitostmi. Výhoda takto zaznamenaných dat je možnost odhadnout další nutnou kalibraci tak, aby byla při měření dodržena požadovaná délková přesnost.

Z obrázku č. 10 je patrné, že v období od června 2011 do ledna 2014 měla adiční konstanta přibližně konstantní stoupající tendenci. Následně však během půl roku došlo ke změně o 31 μm. Tento skok může být způsoben mechanickým zacházením, servisním zákrokem nebo i aktualizací softwaru. V tomto období, měla být adiční konstanta kontrolována častěji, ovšem z dostupných dat nešlo takto veliký výkyv předpokládat. Od července 2014 do července 2015 měl dále přístroj přibližně stejný trend jako na začátku sledování.

Po servisním zásahu Hexagonu v říjnu 2016 došlo poprvé k poklesu adiční konstanty. K poklesu došlo ještě jednou v červenci 2018. Od té doby je znovu prokazatelný rostoucí trend, ovšem rychlejší. Z posledních hodnot lze tedy usuzovat, že by následně další kontrola součtové konstanty měla být provedena dříve než za půl roku.

4. Aplikace pro testování

4.1 Leica Software Development Kit

K vytvoření grafické aplikace byl použit vývojářský balíček „Leica Software Development Kit“, který je dostupný z oficiálních stránek firmy Leica. Balíček je přístupný po registraci, a to zcela bezplatně.

Součástí vývojářského balíčku jsou knihovny v jazyce C a C++, které obsahují základní funkce pro práci s přístrojem. Další součástí je manuál pro uživatele [11], který popisuje obsah knihoven a dává rady pro vytváření aplikace v různých programovacích jazycích. Vývoj je možný například v C, C++, C#, Matlab nebo ve Visual Basic. Pro zjednodušení a urychlení vývoje jsou v balíčku ukázky aplikací, ve kterých jsou implementovány vybrané funkce z knihoven. Některé z těchto ukázkových skriptů byly po úpravě použity ve vlastním softwaru. Bez jejich využití by bylo v daném časovém horizontu nereálné uvažovat o vývoji vlastního software, protože v návodu pro programátory je vše popsáno v omezeném rozsahu a bez podrobností.

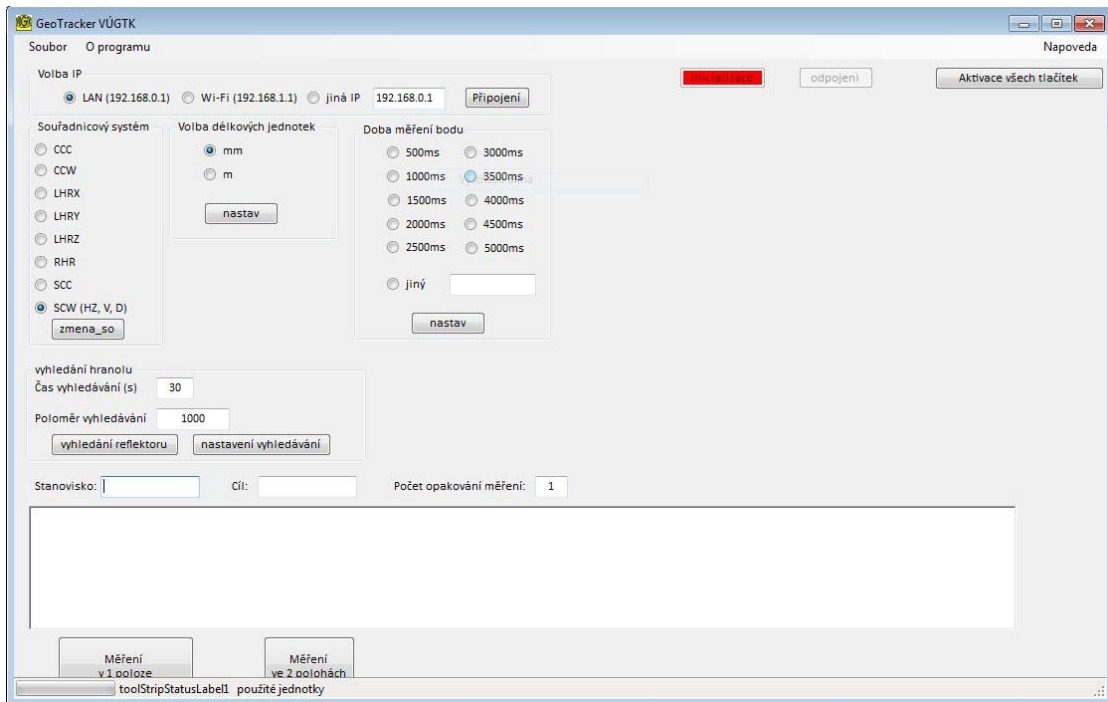
4.2 Další měřické aplikace

Za pomoci balíčku „Leica Software Development Kit“ již bylo několik aplikací v ČR vytvořeno. Za zmínku stojí především dvě aplikace, které byly vytvořeny zaměstnanci VÚGTK, a to GeoTracker a ATcontrol. Tyto dvě aplikace byly vytvořeny z důvodu nevhovujících komerčních programů, které plně nesplňují požadavky pro práci s laserovými trackery řady AT40x. Především se jedná o neúplnou možnost registrace surových dat (úhly, délky, parametry atmosféry) a nastavení přístroje pro specifickou práci při údržbě Státního etanolu velkých délek Koštice (25 m až 1450 m).

4.2.1 GeoTracker

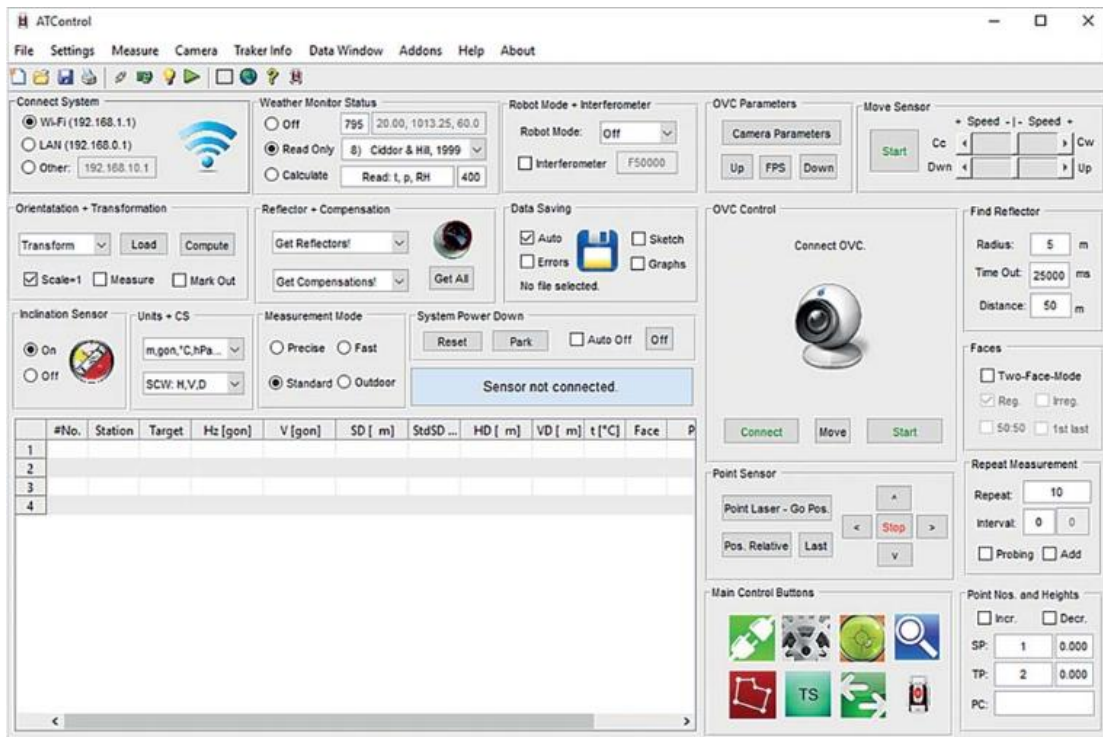
Tento software byl vyvinut Ing. Pavlem Hánkem Ph.D. v roce 2011. Vývoj probíhal v jazyce C#, ve vývojovém prostředí Microsoft Visual C# 2010 Express. GeoTracker umožňuje základní nastavení přístroje jako například volbu souřadného systému, dobu

měření, nebo možnost měření ve dvou polohách dalekohledu. Dále program registruje veškerá měřená surová data s aktuálními atmosférickými podmínkami [2].



Obr. 11: Grafické rozhraní softwaru Geotracker [2]

4.2.2 ATControl



Obr. 12: Grafické rozhraní softwaru ATControl [3]

Tento software byl vyvinut Ing. Filipem Dvořáčkem Ph.D. v rámci disertační práce [4]. Vývoj aplikace probíhal v systému Matworks Matlab. ATControl umožňuje používat velmi pokročilé nastavení pro práci s laserovým trackerem. Nesporná výhoda je i část aplikace pro sledování obrazu z kamery. Dále program registruje veškerá data, které lze z přístroje při měření získat, a navíc je doplňuje o různé popisné a statistické údaje. Výhodou je zaměření aplikace na klasická geodetická měření a schopnost odstranit několik chyb firmwaru přístroje, které negativně ovlivňují přesnost měření délek [12].

4.3 Použité technologie pro vytvoření aplikace

Podle doporučení z manuálu pro uživatele probíhal vývoj aplikace v programovacím jazyce C++ s pomocí frameworku Microsoft Foundation Classes. Pro psaní kódu, bylo zvoleno vývojové prostředí Visual Studio 2017 od firmy Microsoft.

4.3.1 Programovací jazyk C++

C++ je standardizovaným programovacím jazykem vyšší úrovně a byl vyvinut v roce 1985 Bjarnem Stroustrupem. Jedná se o rozšíření jazyka C. Jeho objektový model umožňuje vícenásobnou dědičnost nebo přetěžování operátorů. Dále mezi výhody patří rychlost a správa paměti. Momentálně je mezinárodně standardizována verze C++17 [13].

4.3.2 Microsoft Foundation Class

Microsoft Foundation Class Library je knihovna, která obsahuje funkce Windows API a umísťuje je do jednotlivých tříd. Tyto třídy jsou psané v C++ a obsahují základní prvky grafického uživatelského rozhraní jako jsou například dialogová okna, nabídky, panely nástrojů a podobně [14].

Momentálně je dostupná verze MFC 14.2. Framework umožňuje vytvoření jednoduchých i složitějších grafických aplikací. Velká výhoda spočívá v editoru pro vytvoření grafické aplikace a v předgenerovaném kódu, který šetří čas a není nutné psát stejný kód opakovaně.

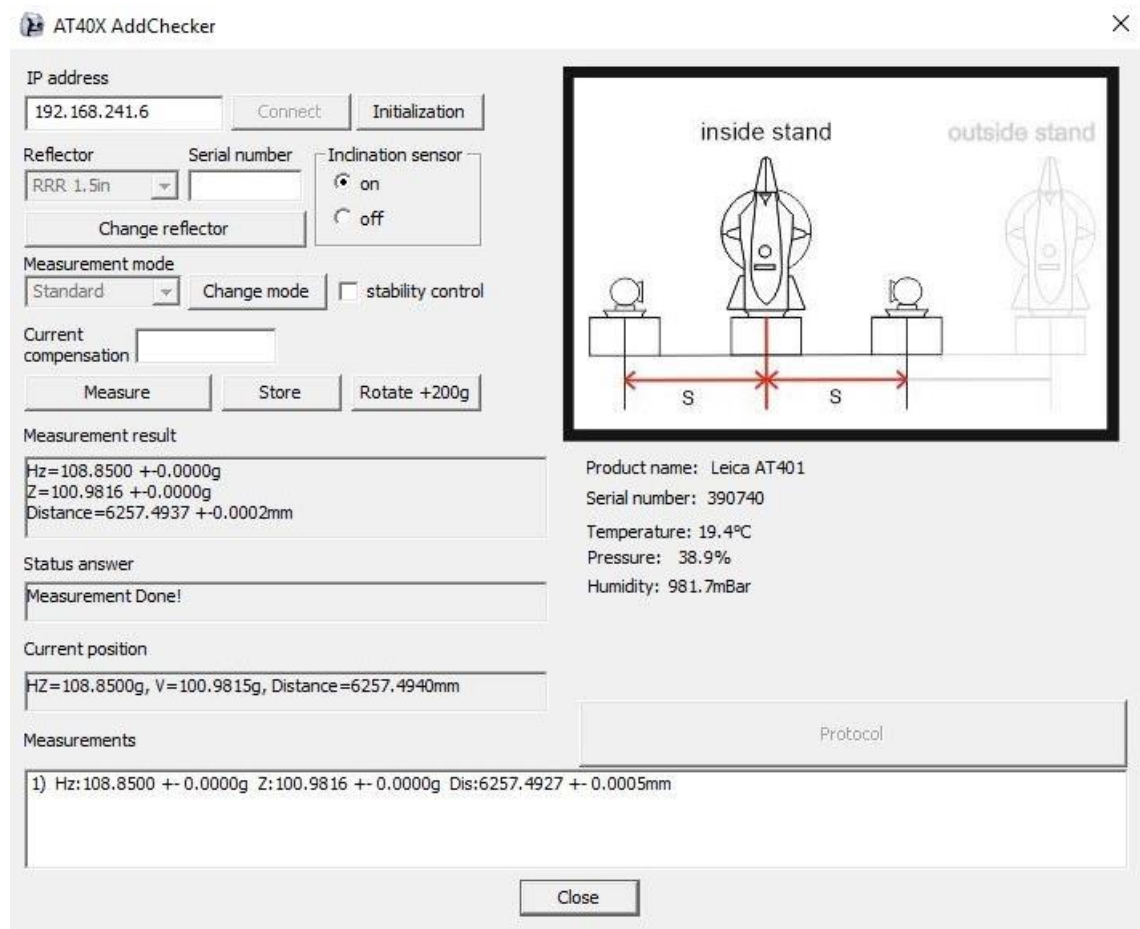
4.4 Vývoj vlastní aplikace

Důvodem vytvoření aplikace je možnost jednoduchého a rychlého zjištění adiční konstanty bez omezení dispozice měřické základny. Software obsahuje veškeré základní nastavení a kontrolu přístroje, která je nutná k dosažení výsledků. Program má za úkol provést uživatele všemi měřickými úkony a po splnění vygenerovat přehledný protokol se všemi důležitými informacemi, včetně naměřených hodnot přímo vstupujících do výpočtu.

Komunikace s přístrojovým serverem emScon je pomocí třídy CSocket, která je součástí knihovny Microsoft Foundation. V celé aplikaci jsou použity synchronní příkazy. To v praxi znamená, že jestliže přístroj vykonává akci, která byla zadaná uživatelem, tak další příkaz bude přijat až po obdržení odpovědi o ukončení akce. V aplikacích je tato doba mezi začátkem a koncem příkazu ošetřena zablokováním okna a příkazových tlačítek. Uživatel tedy nemůže zadávat další operace. Nevýhoda v tomto ošetření je, že uživatel musí počkat na dokončení běžícího příkazu. To nebývá problém při běžném měření, delší prodlevy se však mohou vyskytnout například u příkazů FindReflector či při chybovém měření a ztrátě Wi-Fi signálu.

Vyvinutý program pojmenovaný „AddChecker“ pracuje pod operačním systémem Windows. Kód i grafické rozhraní je psáno v anglickém jazyce. Aplikaci je možné spouštět pomocí .exe souboru, který je součástí elektronických příloh.

4.4.1 Grafické rozhraní



Obr. 13: Ukázka vytvořené grafické aplikace

4.4.1.1 Připojení k laserovému trackeru

Pro úspěšné připojení, je potřeba mít elektronické zařízení s běžící aplikací připojené na stejné síti s laserovým trackerem. Následně je nutné zadat IP adresu trackeru a zmáčknout tlačítko *Connect*. Jestliže je připojení úspěšně vykonáno, aplikace připojení ohlásí a zpřístupní ostatní funkce programu. V opačném případě dá aplikace vědět o neúspěšném navázání spojení. Při dosažení tohoto stavu je doporučeno zkontrolovat IP adresu, nastavení sítě a laserového trackeru.

4.4.1.2 Základní nastavení

Inicializace

Inicializace se provede tlačítkem *Initialization*. Přístroj provede opakovaně inklinální, úhlová a délková měření v obou polohách dalekohledu, což trvá asi 1 minutu. Výrobce doporučovaná vzdálenost hranolu od stroje je přibližně 8 metrů. Z naměřených dat jsou vypočteny aktuální korekce související se stavem zahřátí přístroje a jeho olejového náklonoměrného senzoru. Tato korekce má nejvíce vliv na měřené zenitové úhly a vodorovné směry [4].

Inicializaci je doporučeno provádět [4]:

- Při použití hranolu 1,5in CCR nebo 1,5in RRR.
- Po stabilním postavení přístroje a cíle.
- Každých 30 minut během prvních 2 hodin měření.
- Při přemístění nebo pohybu přístroje.
- Při oznámení nového stavu zahřátí.

Inklinační senzor

Inklinační senzor je obdoba kompenzátoru u totálních stanic. Při zapnutí přístroje je inklinální senzor automaticky zapnutý a v aplikaci označen v kruhovém přepínači *on*. V tomto režimu se aplikují opravy podle olejového kompenzátoru získané z inicializace přístroje i aktuálního měření kompenzátoru.

Jestliže senzor zaznamená větší pohyb přístroje, vyžaduje opakovanou inicializaci. Z tohoto důvodu je možné tlačítkem *off* senzor vypnout. Přístroj následně nevyžaduje opakovat inicializaci po změně stanoviska. Vypnutí inklinálního senzoru je nutné dobře zvážit. Urychlí se sice doba měření, ale naměřené zenitové úhly a vodorovné směry nejsou opravovány o chybu kompenzátoru. Přesné řešení zavádění korekcí s ohledem na zapnutí/vypnutí inklinálního senzoru není uživatelům běžně známé. Při opětovném zapnutí inklinálního senzoru tlačítkem *on* je nutné ihned znovu provést inicializaci přístroje.

Volba reflektoru

Nastavení odrazného hranolu se provádí tlačítkem *Change reflector*. Následně se otevře paletový seznam, z kterého je možné vybrat mezi podporovanými hranoly pro daný přístroj. Po vybrání je doporučeno zadat i sériové číslo hranolu do kolonky *Serial number*. Výběr se potvrdí tlačítkem *Apply*.

Odrasné hranoly podporované přístrojem AT401:

- RRR 1,5in (doporučovaný výrobcem pro ADM test)
- BRR 1,5in
- RRR 0,5in

Měřicí módy

Nastavení měřického módu se provádí tlačítkem *Change mode*. Následně se zpřístupní paletový seznam, z kterého je možné vybrat mezi čtyřmi módy měření. Výběr se potvrdí tlačítkem *Apply*.

Měřické módy u laserového trackeru AT401 nejsou obdobné jako u totálních stanic, kde jsou rozlišovávány režimy jako tracking, standart, nebo fast. Módy, které jsou předdefinovány výrobcem se liší zejména v době měření. Dochází k většímu nebo menšímu počtu opakování. Dále se liší v hodnotě citlivostí senzoru pro rozpoznávání hranolu a tolerancí k atmosférickým změnám. Měřické módy byly zavedeny až u systémových softwarů Leica řady AT40x od verze 2.x, dříve se používalo manuální nastavení času měření [4].

U přístrojů řady AT40x jsou dostupné čtyři módy měření [4]:

- Standard – slouží pro běžné měření.
- Precise – především k měření v laboratorním prostředí.
- Fast – k rychlému měření.
- Outdoor – pro měření ve venkovním prostředí.

Kontrola stability

Význam této funkce je především doplňující. Defaultně je tato funkce vypnutá. Při zapnutí *Stability control* bude aplikace požadovat po změření vnějšího stanoviska návrat na vnitřní. Důvodem návratu je pouze kontrola nehybnosti stanovisek, na kterých probíhá opakované usazení hranolu.

Tato kontrola slouží pouze k odhalení hrubé chyby. Při opětovném usazení kulového hranolu do centrovače dochází k minimálním změnám. Přestože dochází k opakovanému usazování přístroje do trojnožky a tím i k nechtěnému drobnému pohybu stanovisek, v případě výpočtu základny pomocí kosinové věty to příliš nevadí. Opakované určení základny s časovým rozestupem může ale například poukázat na výraznější nestabilitu či nehomogenitu atmosférických podmínek ovlivňující měření délek.

Aktuální kompenzace

Pro správné určení nové adiční konstanty je nutné zadat do kolonky *Current compensation* stávající adiční konstantu v milimetrech na tři desetinná místa s tečkou jako oddělovačem. Při neznalosti současné konstanty je možné zjistit její aktuální hodnotu v programu AT40x Tracker Pilot v záložce *Compensations*.

Výrobce laserového trackeru neumožňuje náhled do souboru kompenzací jinak než oficiálním softwarem. Taktéž není možné soubor, jakkoliv přepisovat. Tato ochrana je nejspíše zavedená z důvodu zachování kompatibility s oficiálním softwarem, nebo jako prevence proti přepsání nezkušeným uživatelem, který by svým jednáním mohl způsobit nevratné škody.

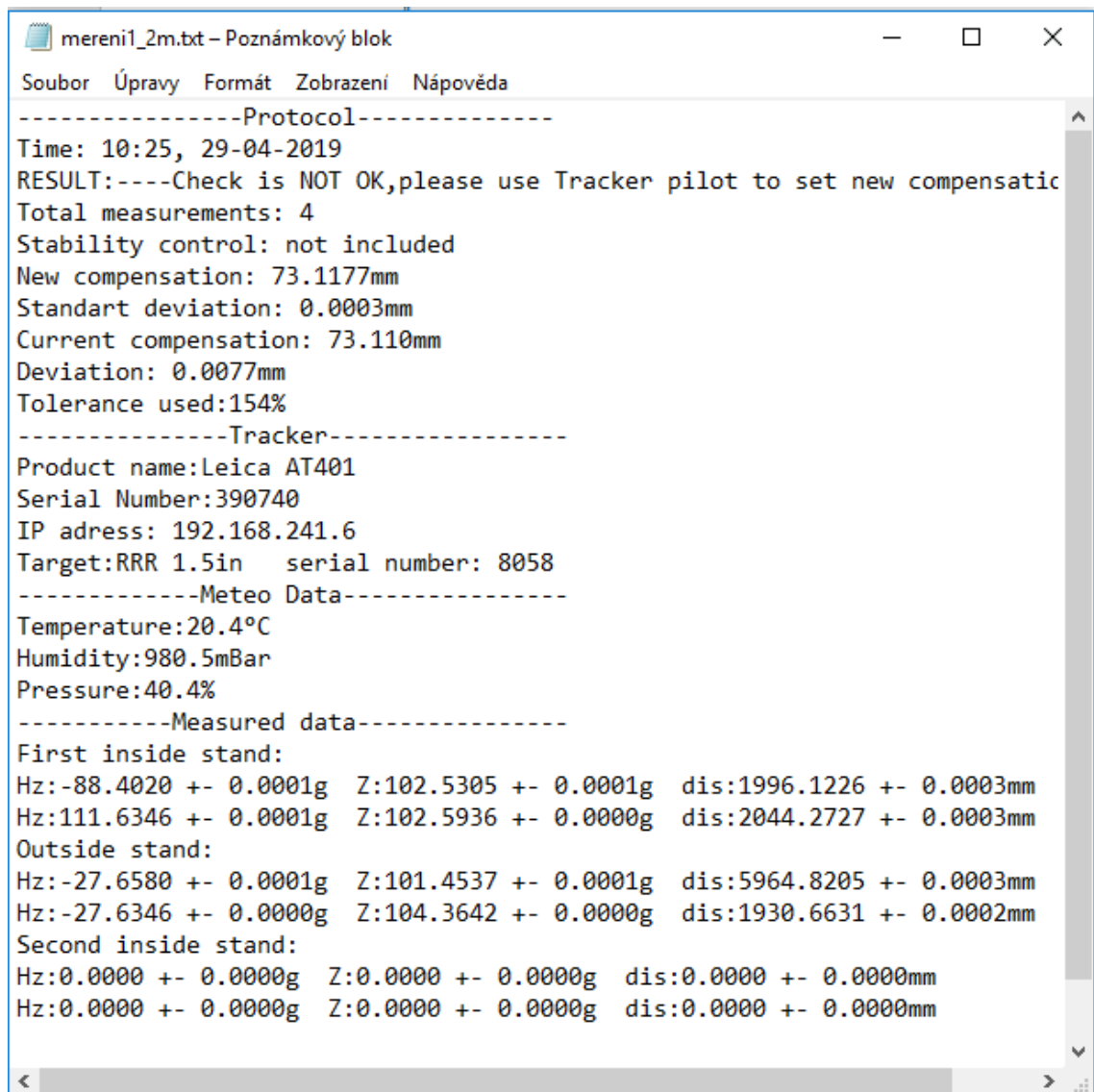
Nutné je také dodat, že přístroj měří vždy tak, že měřené délky opravuje o hodnotu adiční konstanty, která je uložena v aktivním souboru kompenzací. V tomto případě je zjištěna pouze změna adiční konstanty, proto při neznalosti aktuální hodnoty není možné určit novou.

4.4.1.3 Měření

Aktuální „real time“ hodnoty (šikmá délka, vodorovný směr a zenitový úhel) se zobrazují v okně *Current position*. Tyto hodnoty jsou přibližné a pouze orientační. Nejsou nijak použity pro další určení.

Z každého stanoviska aplikace vyžaduje dvě měřené vzdálenosti. Pořadí, v jakém jsou délky registrovány není důležité a nijak to neovlivní výpočet. Záleží však na pořadí stanovisek, které určuje a ukazuje schématický obrázek v aplikaci. Měření se provádí tlačítkem *Measure*. Program v okně *Measurement result* zobrazí naměřené hodnoty a jejich směrodatné odchytky (vnitřní přesnost, kterou vrací přístroj). Jestliže uživatel není spokojen s výslednými hodnotami (například vysoká směrodatná odchytky měření) je možné hodnoty přeměřit. Po dosažení požadovaných hodnot je nutné měření uložit, což je možné provést tlačítkem *Store*. Tento krok je nutné pečlivě zvážit. Měření je přemístěno do *Measurements* seznamu a následně již nelze editovat. Po změření vnitřního a vnějšího stanoviska (popřípadě ještě vnitřního, jestliže je zapnuta kontrola stability) se zpřístupní protokol z testu.

4.4.2 Výsledný protokol



```
mereni1_2m.txt - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
-----Protocol-----
Time: 10:25, 29-04-2019
RESULT:----Check is NOT OK,please use Tracker pilot to set new compensatic
Total measurements: 4
Stability control: not included
New compensation: 73.1177mm
Standart deviation: 0.0003mm
Current compensation: 73.110mm
Deviation: 0.0077mm
Tolerance used:154%
-----Tracker-----
Product name:Leica AT401
Serial Number:390740
IP adress: 192.168.241.6
Target:RRR 1.5in serial number: 8058
-----Meteo Data-----
Temperature:20.4°C
Humidity:980.5mBar
Pressure:40.4%
-----Measured data-----
First inside stand:
Hz:-88.4020 +- 0.0001g Z:102.5305 +- 0.0001g dis:1996.1226 +- 0.0003mm
Hz:111.6346 +- 0.0001g Z:102.5936 +- 0.0000g dis:2044.2727 +- 0.0003mm
Outside stand:
Hz:-27.6580 +- 0.0001g Z:101.4537 +- 0.0001g dis:5964.8205 +- 0.0003mm
Hz:-27.6346 +- 0.0000g Z:104.3642 +- 0.0000g dis:1930.6631 +- 0.0002mm
Second inside stand:
Hz:0.0000 +- 0.0000g Z:0.0000 +- 0.0000g dis:0.0000 +- 0.0000mm
Hz:0.0000 +- 0.0000g Z:0.0000 +- 0.0000g dis:0.0000 +- 0.0000mm
```

Obr. 14: Ukázka protokolu

Výsledný protokol je vygenerován v textovém formátu. Poslední kopie souboru *protocol_file.txt* je dohledatelná ve složce se spouštěcím souborem. Tento soubor je vždy přepsán nově vygenerovaným protokolem. Z tohoto důvodu je uživateli následně doporučeno uložit soubor na místo, které je k tomu určené a kde nemůže dojít k jeho nečekanému přepsání.

Protokol je rozdělený na 4 části a jeho obsah je podobný protokolu generovanému z ADM testu v programu AT40x Tracker Pilot.

Hlavička

Hlavička souboru obsahuje čas a datum provedení testu. Závěrečné slovní zhodnocení testu o úspěšnosti/neúspěšnosti. Počet měřených vzdáleností. Hodnotu dosaženou kontrolním měřením ze středního stanoviště (je-li provedená). Další součástí je původní (zadaná) adiční konstanta, vypočtený doplněk dle postupu v podkapitole 3.2.2.2 a nově určená konstanta s vnitřní směrodatnou odchylkou. Poslední hodnota je procentuální odchylka nové kompenzace od staré, kde je $5 \mu\text{m} = 100 \%$.

Tracker

Druhá část protokolu obsahuje pojmenování laserového trackeru, hranolu a přidružená sériová čísla. Dále obsahuje IP adresu sítě, která byla použita při měření.

Meteo Data

Obsahuje základní atmosférické podmínky během vykonávání měření. Těmi jsou myšleny hodnoty teploty vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], atmosférického tlaku [mBar] a relativní vlhkosti vzduchu [%], které jsou brány z podmínek při poslední měřené délce.

Measured Data

Poslední část obsahuje měřená surová data (šikmá délka, horizontální úhel a zenitový úhel). Ke každé této veličině je přidružena vnitřní směrodatná odchylka, která je zjištěná z počtu opakování měření.

5. Testovací měření

Měření probíhalo dne 29. 4. 2019 v laboratoři VÚGTK.

5.1 Příprava základen

K umístění bodů základny posloužila betonová interferometrická dráha, která se nachází přibližně ve výšce 1,2 m. Z tohoto důvodu nebylo měření ovlivněno teplotními výkyvy, které je možné očekávat u podlahy laboratoře a zároveň nedošlo k chybám způsobenými nestabilitou podlahy a stativu. Stanoviska byla stabilizována přenosnými zařízeními tzv. pilířovkami, na kterých byla umístěná trojnožka. Cílové body byly osazeny trojnožkou s centrovačem. Centrační pomůcky byly od výrobců Leica a Sokkia.

Pro testování byly zvoleny základny s rozestupy 1,5 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m a 7 m. Realizace delších základen by již byla v prostorách laboratoře obtížná, navíc není předpoklad, že by uživatelé laserových trackerů potřebovali testovat konstantu na takto dlouhých základnách. Delší základna znamená obecně větší riziko nehomogenních atmosférických podmínkách podél měřených délek.

U každé základny byla snaha dodržet téměř ideální směrovou geometrii. Příčné vychylky jednotlivých bodů základny byly mechanicky redukovány za pomoci totální stanice Leica TCA2003 s dalekohledem a okulárem. Ta se nacházela mimo základnu v přímce se všemi 4 body. Urovnání proběhlo pomocí nitkového kříže, kde jako výchozí směr byl brán poslední nejvzdálenější bod základny a další body byly zařazeny do této přímky. Usměrnění délkové složky proběhlo pomocí pásma, které bylo položeno na interferometrické dráze. Větší výškové odchylky v řádu cm byly ve vertikální rovině, kde se muselo pracovat pouze s pomůckami dostupnými v laboratoři (například pilířovky nestejně výšky).

5.2 Postup měření

K základnímu nastavení laserového trackeru a k registraci dat byla použita aplikace popsána ve 4. kapitole. Ke komunikaci s přístrojem posloužila místní síť VÚGTK, ke které se pomocí zadané IP adresy připojilo. Aktuální hodnota adiční konstanty byla zjištěna v softwaru AT40x Tracker Pilot.

Základní nastavení softwaru

Před každým měřením byl zkontrolován správný typ hranolu (RRR 1,5in) a zapsáno jeho sériové číslo. Měřicí mód byl zvolen *Precise*, který je přímo určený pro laboratorní měření tohoto typu. Z důvodu zrychlení celého měření nebyla vyžadována kontrola stability základny a opakované měření středního stanoviska. Inklinační senzor byl zanechán zapnutý, což mělo za následek nutnost inicializovat po každém přemístění laserového trackeru. V poslední řadě byla zapsána aktuálně nastavená adiční konstanta.

Průběh měření

Základna o určitém intervalu byla vytvořena dle popisu v podkapitole 5.1. Měření proběhlo 5x za sebou na každé základně.

- a) Laserový tracker byl postaven na vnitřní stanovisko, zhorizontován a zinicializován na hranol, který se nacházel přibližně v doporučené vzdálenosti 8 m a zenitovém úhlu 100 gon. Následně došlo k měření na cílové body dle požadavku softwaru.
- b) Na vyzvání aplikace došlo k přemístění laserového trackeru na vnější stanovisko, kde se provedlo zhorizontování a inicializace. Nakonec se provedlo měření na cílové body.
- c) Po doměření již nebylo vyžadováno opakovaně provádět měření na vnitřním stanovisku, proto aplikace vygenerovala protokol, který byl následně uložen. Laserový tracker byl znovu přemístěn na vnitřní stanovisko, kde se pokračovalo v dalším měření dle a).

Na základně o intervalu 2 metry byl navíc proveden 3x ADM test pomocí aplikace AT40x Tracker Pilot. Postup měření tímto softwarem je popsán v podkapitole 3.1.3, proto zde již nebude prezentován.

6. Zpracování výsledků

6.1 Určení adiční konstanty

Z naměřených hodnot proběhlo určení adiční konstanty dvěma způsoby. První výpočet proběhl pomocí redukce na přímku, který je více popsán v kapitole 3.2.2.2. Druhý způsob určení je pomocí Excelu, který byl zaslán firmou Leica (viz kapitola 3.1.4). Je nutno podotknout, že v poskytnutém souboru není řešena přesnost dosažených výsledků, a proto zde není uvedena.

Dále jsou zde uvedeny i výsledné hodnoty z ADM testu (z aplikace AT40x Tracker Pilot) u základny s dvoumetrovým rozestupem. Je nutné dodat, že určení výsledné adiční konstanty nepochází se stejných vstupních hodnot jako u předešlých dvou případů.

Měření probíhalo s aktivní adiční konstantou 73,110 mm, proto výslednou hodnotou je vždy doplněk, který je nutné pro zjištění nové hodnoty připočíst. V následujících tabulkách jsou tedy vždy uváděny doplňky adiční konstanty.

Tab. 4: Výsledné adiční konstanty – část 1

Základna	Měření č.	Redukce na přímku		Leica Excel	ADM test	
		Doplňk ad. kon. [um]	Teoretická sm. odchylka [um]	Doplňk ad. kon. [um]	Doplňk ad. kon [um]	Sm. odch [um]
1,5 m	1	8,0	5,1	8,0	-	-
	2	7,8	5,1	7,8	-	-
	3	6,4	5,1	6,5	-	-
	4	6,3	5,1	6,3	-	-
	5	6,3	5,1	6,3	-	-
2,0 m	1	7,6	5,0	7,6	-4,0	1,0
	2	8,3	5,0	8,4	-4,0	1,0
	3	7,6	5,0	7,6	-4,0	0,0
	4	7,1	5,0	7,1	-	-
	5	5,3	5,0	5,3	-	-
3,0 m	1	9,0	5,0	9,0	-	-
	2	8,4	5,0	8,4	-	-
	3	5,7	5,0	5,7	-	-
	4	7,0	5,0	7,0	-	-
	5	6,2	5,0	6,2	-	-

Tab. 5: Výsledné adiční konstanty – část 2

Základna	Měření č.	Redukce na přímku		Leica Excel	ADM test	
		Doplněk ad. kon. [um]	Teoretická sm. odchylka [um]	Doplněk ad. kon. [um]	Doplněk ad. kon [um]	Sm. odch [um]
4,0m	1	6,7	5,0	6,8	-	-
	2	7,9	5,0	7,9	-	-
	3	6,5	5,0	6,5	-	-
	4	8,6	5,0	8,6	-	-
	5	7,4	5,0	7,4	-	-
5,0 m	1	7,9	5,0	7,9	-	-
	2	5,9	5,0	5,9	-	-
	3	6,0	5,0	6,0	-	-
	4	5,0	5,0	5,0	-	-
	5	3,5	5,0	3,5	-	-
7,0 m	1	6,4	5,0	6,4	-	-
	2	4,2	5,0	4,2	-	-
	3	5,9	5,0	6,2	-	-
	4	5,9	5,0	5,8	-	-
	5	6,6	5,0	6,5	-	-

Z tabulek 4 a 5, lze vypořádat, že navržený výpočet pomocí redukce na přímku se shoduje s výpočtem, který byl poskytnut firmou Leica v Excel souboru. U některých měření, lze vypořádat rozdíl v rámci desetiny mikrometru, ovšem ten je vzhledem k požadované přesnosti zanedbatelný. Dle dřívějších předběžných testů se však již plně neshoduje výpočet redukce na přímku a Excel, pokud se základna více liší od ideální přímé geometrie.

Dále je k vidění rozdíl, který se nachází mezi ADM testem a ostatními určeními u základny s 2 m rozstupem. Tento rozdíl je přibližně 11 μm , což vzhledem k mezní chybě (resp. MPE) přístroje 10 μm je značný problém. Zajímavostí je, že tento rozdíl nastává u určení, které podle výrobce mělo být totožné (Leica Excel a ADM test). Zjištěné neshody mezi těmito dvěma výpočty byly firmě Leica oznámeny. Bohužel v rámci časových možností této práce nebyla obdržena odpověď.

6.2 Statistické testy

6.2.1 Výběrová směrodatná odchylka

Z malého souboru měření, který je k dispozici pro každou základnu, je možné určit výběrovou směrodatnou odchylku. Ta udává skutečnou přesnost, která byla dosažena při měření. Zde je nutné dodat, že náš soubor měření není optimálně veliký, přesto získaná hodnota může dát prvotní náhled na přesnost výsledků z jednotlivých základen.

Průměrná hodnota doplňku adiční konstanty:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \quad (13)$$

Výběrová směrodatná odchylka jednoho měření je spočtena:

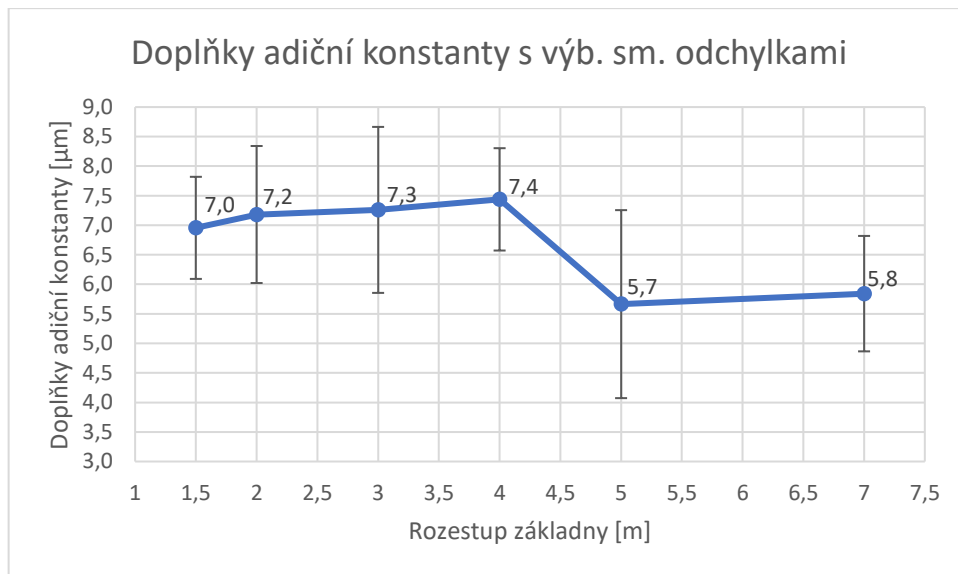
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

Výběrová směrodatná odchylka průměru je určena:

$$\bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

Tab. 6: Výběrové směrodatné odchylky základen

Interval základny	Průměrný doplněk ad. konstanty [μm]	Výb. sm. odch. 1 měření [μm]	Výb. sm. odch. průměru [μm]
1,5 m	7,0	0,9	0,4
2,0 m	7,2	1,2	0,5
3,0 m	7,3	1,4	0,6
4,0m	7,4	0,9	0,4
5,0m	5,7	1,6	0,7
7,0 m	5,8	1,0	0,4



Obr. 15: Graf doplňků adiční konstanty s výběrovými směrodatnými odchylkami

Z obr. 15 je vidět, že výběrová směrodatná odchylka jednotlivých základů nejeví žádný jednoznačný trend. U základů se vzdálenostmi 5 a více metrů je vidět změna velikosti adiční konstanty. Ta je však možná v rámci přesnosti přístroje a nejspíše je způsobena změnou atmosférických podmínek v laboratoři.

6.2.2 Fisherovo-Snedecerovo F-rozdělení

Tento test je využit pro zjištění, jestli měření prováděné na různých základnách má stejnou směrodatnou odchylku.

Testuje se hypotéza, jestli pro dvě výběrové směrodatné odchylky s a \tilde{s} , které pocházejí z jiných stejně velkých výběrů, platí rovnost základních směrodatných odchylek. Nulová hypotéza $\sigma = \tilde{\sigma}$ není zamítnuta, jestliže je splněna podmínka:

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(\nu, \nu)} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(\nu, \nu) \quad (16)$$

$$\frac{1}{F_{0,975}(4,4)} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq F_{0,975}(4,4) \quad (17)$$

$$0,10 \leq \frac{s^2}{\bar{s}^2} \leq 9,61 \quad (18)$$

V jiném případě nulovou hypotézu zamítáme.

V tabulce 7 je zobrazen poměr s^2/\bar{s}^2 a jsou zde navzájem porovnány výběrové směrodatné odchylky všech základů.

Tab. 7: Test stejných směrodatných odchylek

	Základna	1,5m	2,0m	3,0m	4,0m	5,0m	7,0m
Základna	s/š [μm]	0,9	1,2	1,4	0,9	1,6	0,9
1,5m	0,9	-	-	-	-	-	-
2,0m	1,2	0,56	-	-	-	-	-
3,0m	1,4	0,38	0,68	-	-	-	-
4,0m	0,9	1,00	1,79	2,63	-	-	-
5,0m	1,6	0,29	0,53	0,78	0,30	-	-
7,0m	1,0	0,78	1,41	2,07	0,79	2,65	-

V tabulce 7 zeleně označené hodnoty značí, že nulovou hypotézu nezamítáme na hladině významnosti 5 % a tedy že výběrové směrodatné odchylky měření na různých základnách si mohou být rovny. To znamená, že mezi soubory měření nebyla prokázána změna přesnosti adiční konstanty při různých délkách základů.

6.2.3 Studentův T-test

U tohoto testu jsou porovnány střední hodnoty dvou nezávislých výběrů. Výchozí střední hodnota je brána ze základny s dvoumetrovým intervalem a dále je porovnávána se zbývajícími. To je zejména z důvodu, že tato základna o dvou metrech je doporučena firmou Leica jako ideální ke zjištění adiční konstanty. K tomuto porovnání je nejvhodnější na základě výsledků z F-testu použít nepárový T-test pro shodné rozptyly.

Testuje se hypotéza, jestli pro dvě střední hodnoty, které pocházejí z nezávislých výběrů, platí rovnost středních hodnot. Nulová hypotéza $\mu = \mu_0$ není zamítnuta, jestliže je splněna podmínka pro dva stejně velké výběry:

platí $n = n_1 = n_2$

$$\frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}} \leq t_{1-\frac{\alpha}{2}}((n-1) * 2) \quad (19)$$

$$\frac{|\bar{x}_1 - 7,2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 + 1,2^2}{5}}} \leq t_{0,975}(8) \quad (20)$$

$$\frac{|\bar{x}_1 - 7,2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 + 1,44}{5}}} \leq 2,31 \quad (21)$$

V jiném případě nulovou hypotézu zamítáme.

Tab. 8: Test rovnosti středních hodnot

Základna	\bar{x}_1 [μm]	s [μm]	$\frac{ \bar{x}_1 - 7,2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + 1,2^2}{5}}}$	$\frac{ \bar{x}_1 - 7,2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + 1,44}{5}}} \leq 2,31$
1,5m	7,0	0,9	0,35	Splněno
3,0m	7,3	1,4	0,10	Splněno
4,0m	7,4	0,9	0,40	Splněno
5,0m	5,7	1,6	1,72	Splněno
7,0m	5,8	1,0	1,98	Splněno

Z tabulky 8 lze vypočítat, že nulovou hypotézu nezamítáme na hladině významnosti 5 % ani v jednom případě. To znamená, že vlivem zvětšení rozestupu základny nedošlo k prokazatelné změně výsledného doplňku adiční konstanty.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo určení adiční konstanty u laserového trackeru Leica AT401 v kombinaci s odrazným hranolem Leica RRR 1,5in. Měření se mělo provést na dočasných základnách o variabilních délkách a výsledné hodnoty následně mezi sebou porovnat. K tomuto účelu bylo za úkol navrhnout grafickou aplikaci pro měření, ukládání a zpracování dat.

K měření byla vytvořena grafická aplikace „AddChecker“ za pomoci balíčku, který je za tímto účelem poskytován firmou Leica. Vývoj probíhal v programovacím jazyce C++ s frameworkem MFC. Aplikace umožňuje měření dat a je schopna provádět základní nastavení přístroje jako je volba hranolu, typ měření, nebo inicializace. Software vede uživatele celým postupem měření a na konci vygeneruje přehledný protokol s dosaženými výsledky.

Testovací měření na základnách o různých délkách proběhlo v laboratoři VÚGTK dne 29.4.2019. Z naměřených dat byly určeny doplňky adiční konstanty třemi způsoby. Zde bylo zjištěno, že navržený výpočet pomocí redukce na přímku poskytuje stejné výsledky jako výpočet poskytnutý technickou podporou firmy Leica. To však nemusí platit při nepřímosti měřické základny (viz kapitola 6.1). V dalším porovnání Excel souboru výrobce, které proběhlo s výsledky ADM testu softwaru Tracker Pilot, byl zjištěn rozdíl mezi těmito dvěma metodami přibližně 11 μm , přestože 2 m základna byla urovnána do téměř ideální směrové přímky. Práce tak poukázala na nesrovnalosti při matematickém řešení výpočtu adiční konstanty přístrojů Leica řady AT40x. Firma Leica byla v této oblasti informovaná, nicméně bez její další kooperace se rozklíčování nejasností musí omezit na praktické experimenty bez znalosti teoretického základu.

Pomocí F-testu bylo statisticky otestováno, zda pro určené výběrové směrodatné odchylky, pocházející ze dvou výběrů o stejném rozsahu, platí rovnost základních směrodatných odchylek. Zde bylo zjištěno, že doplňky adiční konstanty, které jsou určeny na různě dlouhých základnách nemají statisticky odlišnou přesnost.

Další testování pomocí nepárového T-testu porovnává, zda pro určené střední hodnoty dvou nezávislých výběrů platí rovnost středních hodnot. Zde byla brána výchozí střední hodnota ze základny s dvoumetrovým intervalem a ostatní hodnoty s ní byly porovnány. Výsledek testu ukazuje, že doplněk adičních konstanty je statisticky stejný a změnou délky intervalu základny nebyl výrazněji ovlivněn.

Z dosažených výsledků lze usuzovat, že v atmosféricky stabilním prostředí jako je laboratoř VÚGTK by mohlo probíhat určení nové adiční konstanty na základnách s intervalem od 1,5 m do 7 m a nedošlo by k podstatnému snížení přesnosti měřených délek. Pro důvěryhodnější závěr by bylo potřeba testování nezávisle opakovat, protože podmínky v laboratoři VÚGTK nejsou během celého roku neměnné [4]. Přestože byla testována i základna s rozstupem 7 m, atmosféricky bezpečnější i uživatelsky přívětivější budou pro testování základny o délkách 1,5 až 3 m. Z provedeného testování tak nevyplývá nezbytnost měření na základně o délce 2 m, jak je striktně vyžadováno v softwaru AT40x Leica Tracker Pilot.

Testování prokázala uspokojivé určování vodorovných směrů a zenitových úhlů na kratší i delší vzdálenost, pokud je dodržena konfigurace měřické základny v přímce. Pokud bychom připustili méně optimální geometrii základny, přesnost měření úhlů začne hrát výraznější roli a začnou se více lišit výpočetní metody adiční konstanty. Přestože vnitřní směrodatné odchylky větších vzdáleností již rostly a měly větší rozptyl, na výsledcích doplňkových adičních konstant se to výrazněji neprojevalo.

Použité zdroje a literatura

- [1] Hexagon Geosystems: Leica AT40x Software v3.4.1 [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://support.hexagonmi.com/s/article/Leica-AT40x-Software-and-Firmware>
- [2] HÁNEK, Pavel: GeoTracker. [online]. 2011 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/odd25/kostice/geotracker.html>
- [3] DVOŘÁČEK, Filip. ATControl Software for Leica AT40x Laser Trackers [online]. Geoinformatics FCE CTU. Praha, 2015, 14(2), 9-20. ISSN 1802-2669.
- [4] DVOŘÁČEK, Filip. Kalibrace terénních délkových základů laserovým trackerem Leica AT401. 2017. Disertační práce. ČVUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.
- [5] VÚGTK: Základní informace o akreditované kalibrační laboratoři a autorizovaném metrologickém středisku [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://kalibrace.vugtk.cz/>
- [6] GEOTECH: Leica Absolute Tracker AT401: ASME B89.4.19-2006 Specifications [online]. 2010 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: http://www.geotech.sk/downloads/Totalnestanice/AT401/AT401_ASME_specifikacie_presnosti_en.pdf
- [7] Hexagon Metrology: Leica Red-Ring Reflector (RRR) 1.5" ball with hardened steel surface [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://store.hexagonmetrology.us/red-ring-reflector-rrr-1-5-ball-with-hardened-steel-surface>
- [8] ŠÍMEK, Miroslav. Kalibrace odrazných hranolů. 2012. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Pavel Hánek, Ph. D.
- [9] Hexagon Geosystems: Leica Tracker Pilot for AT40x Reference Manual v3.4 [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://support.hexagonmi.com/s/article/Leica-AT40x-Software-and-Firmware>
- [10] R. Loser and S. Kyle: Alignment and field check procedures for the Leica Laser Tracker LTD 500, Boeing Large Scale Optical Metrology Seminar 1999.
- [11] Leica Geosystems: EmScon 3.8. Leica Geosystems Laser Tracker Programming Interface Programmers Manual. Switzerland, 2013.
- [12] DVOŘÁČEK, Filip: Kalibrace terénních délkových základů Košnice a Hvězda pomocí laserového trackeru Leica AT401. Geodetický a kartografický obzor, 2016, roč. 62 (104) č.8. ISSN 1805-7446.

[13] PERINGER, Petr: Seminář C++ [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2019 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ICP/public/Prednasky/ICP-9.pdf>

[14] MICROSOFT: Framework MFC [online], 2016 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/mfc/framework-mfc?view=vs-2017>

Seznam obrázků

Obr. 1: Kalibrační laboratoř ve VÚGTK	11
Obr. 2: Senzor Leica AT401	12
Obr. 3: Kontrolér Leica AT 400.....	13
Obr. 4: Hranol RRR 1,5in	14
Obr. 5: AT40x Tracker Pilot	16
Obr. 6: Schéma ukázka základny.....	17
Obr. 7: Ukázka části protokolu – Tracker Pilot v. 3.4.1.151	21
Obr. 8: Schéma základny při klasickém výpočtu.....	22
Obr. 9: Schéma základny při redukovaném výpočtu	23
Obr. 10: Časový vývoj adiční konstanty – graf [4]	26
Obr. 11: Grafické rozhraní softwaru Geotracker [2].....	28
Obr. 12: Grafické rozhraní softwaru ATControl [3]	28
Obr. 13: Ukázka vytvořené grafické aplikace.....	31
Obr. 14: Ukázka protokolu.....	36
Obr. 15: Graf doplňků adiční konstanty s výběrovými směrodatnými odchylkami	43

Seznam tabulek

Tab. 1: Identifikace pomůcek použitých pro měření	14
Tab. 2: Určení adiční konstanty Excel/ADM test	19
Tab. 3: Časový vývoj adiční konstanty	25
Tab. 4: Výsledné adiční konstanty – část 1	40
Tab. 5: Výsledné adiční konstanty – část 2	41
Tab. 6: Výběrové směrodatné odchylky základů	42
Tab. 7: Test stejných směrodatných odchylek.....	44
Tab. 8: Test rovnosti středních hodnot.....	45

Seznam tištěných příloh

A Naměřené hodnoty

Seznam příloh na CD

B Zdrojový kód aplikace

C Spouštěcí soubor

D Protokoly měření

A Naměřené hodnoty

Tab. A. 1: Naměřené hodnoty – základna 1,5m

Základna 1,5m			
Měření č.	HZ[g]	Z[g]	D[mm]
1	-112,5601	103,4552	1472,171
	87,4674	103,4968	1536,458
	-64,0670	101,9333	4535,824
	-64,0852	105,5312	1535,365
2	87,4653	103,4968	1536,418
	-112,5637	103,4553	1472,211
	-64,0852	105,5312	1535,365
	-64,0672	101,9333	4535,825
3	-112,5639	103,4553	1472,211
	87,4653	103,4967	1536,420
	-64,0644	101,9333	4535,834
	-64,0829	105,5310	1535,375
4	87,4687	103,4963	1536,535
	-112,5591	103,4560	1472,097
	-64,0831	105,5311	1535,375
	-64,0646	101,9332	4535,834
5	-112,5590	103,4560	1472,098
	87,4687	103,4964	1536,535
	-64,0639	101,9333	4535,838
	-64,0828	105,5311	1535,378

Tab. A. 2: Naměřené hodnoty – základna 2,0m

Základna 2,0m			
Měření č.	HZ[g]	Z[g]	D[mm]
1	-88,4020	102,5305	1996,123
	111,6346	102,5936	2044,273
	-27,6580	101,4537	5964,821
	-27,6346	104,3642	1930,663
2	-88,3974	102,5308	1996,134
	111,6392	102,5934	2044,258
	-27,6480	101,4535	5964,802
	-27,6245	104,3643	1930,647
3	-88,4596	102,5304	1996,083
	111,5784	102,5934	2044,306
	-27,6583	101,4537	5964,783
	-27,6350	104,3642	1930,631
4	-112,5809	102,5355	1995,537
	87,4607	102,5949	2043,958
	-27,6540	101,4540	5964,365
	-27,6226	104,3666	1931,122
5	-112,5776	102,5357	1995,496
	87,4633	102,5943	2043,998
	-27,6780	101,4541	5964,385
	-27,6473	104,3669	1931,147

Tab. A. 3: Naměřené hodnoty – základna 3,0m

Základna 3,0m			
Měření č.	HZ[g]	Z[g]	D[mm]
1	87,7563	101,7506	3001,080
	-112,0689	101,6322	3005,109
	-111,7711	100,9105	8995,327
	-111,7716	102,8535	2993,336
2	-112,5168	101,6324	3005,193
	87,3094	101,7508	3000,991
	-111,7731	102,8534	2993,354
	-111,7723	100,9108	8995,341
3	87,3094	101,7509	3000,991
	-112,5169	101,6323	3005,187
	-111,7711	100,9105	8995,350
	-111,7719	102,8533	2993,374
4	87,3106	101,7507	3000,995
	-112,5158	101,6321	3005,184
	-111,7743	100,9104	8995,340
	-111,7749	102,8533	2993,362
5	-112,5144	101,6323	3005,190
	87,3122	101,7506	3000,990
	-111,7752	102,8534	2993,362
	-111,7744	100,9105	8995,340

Tab. A. 4: Naměřené hodnoty – základna 4,0m

Základna 4,0m			
Měření č.	HZ[g]	Z[g]	D[mm]
1	47,8470	101,2603	4002,648
	-152,1603	101,3387	3960,520
	74,0049	102,1073	4029,661
	74,0032	100,6866	11989,672
2	-152,1604	101,3386	3960,519
	47,8466	101,2604	4002,648
	73,9897	100,6871	11989,663
	73,9913	102,1077	4029,650
3	47,8462	101,2602	4002,650
	-152,1612	101,3385	3960,519
	73,9912	102,1077	4029,650
	73,9896	100,6871	11989,663
4	47,8454	101,2603	4002,650
	-152,1618	101,3386	3960,519
	73,9909	100,6869	11989,659
	73,9926	102,1077	4029,643
5	47,9655	101,2607	4002,682
	-152,0434	101,3389	3960,488
	73,9926	102,1076	4029,644
	73,9909	100,6870	11989,659

Tab. A. 5: Naměřené hodnoty – základna 5,0m

Základna 5,0m			
Měření č.	HZ[g]	Z[g]	D[mm]
1	47,8297	101,0126	5043,113
	-152,1498	101,0736	5003,440
	75,3527	101,7635	4942,932
	75,3503	100,5640	14986,843
2	-152,1500	101,0737	5003,440
	47,8294	101,0129	5043,105
	75,3252	100,5641	14986,837
	75,3278	101,7636	4942,939
3	47,8310	101,0129	5043,101
	-152,1486	101,0740	5003,443
	75,3278	101,7635	4942,938
	75,3251	100,5639	14986,835
4	-152,1484	101,0740	5003,444
	47,8311	101,0129	5043,094
	75,3003	100,5637	14986,801
	75,3034	101,7634	4942,912
5	47,8325	101,0127	5043,091
	-152,1470	101,0738	5003,451
	75,3034	101,7633	4942,913
	75,3002	100,5640	14986,803

Tab. A. 6: Naměřené hodnoty – základna 7,0m

Základna 7,0m			
Měření č.	HZ[g]	Z[g]	D[mm]
1	-7,5240	101,2311	7000,232
	192,4807	101,1812	6996,040
	-74,8729	101,7708	7055,560
	-74,8631	100,6101	21047,569
2	192,4856	101,1810	6996,042
	-7,5190	101,2311	7000,234
	-74,8635	100,6104	21047,569
	-74,8731	101,7707	7055,559
3	-7,5179	101,2312	7000,176
	192,4858	101,1812	6996,035
	-74,8977	101,7708	7055,656
	-74,8881	100,6102	21047,604
4	192,4791	101,1808	6995,977
	-7,5249	101,2313	7000,231
	-74,8881	100,6102	21047,603
	-74,8983	101,7709	7055,659
5	-7,5248	101,2314	7000,232
	192,4788	101,1807	6995,980
	-74,8879	101,7706	7055,646
	-74,8778	100,6101	21047,596