

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra matematiky

Bakalářská práce

Kalibrace elektronických dálkoměrů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Hynek MAREK**
Osobní číslo: **A13B0076P**
Studijní program: **B3602 Geomatika**
Studijní obor: **Geomatika**
Název tématu: **Kalibrace elektronických dálkoměrů**
Zadávající katedra: **Katedra matematiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Metody měření délek.
2. Dělení elektronických dálkoměrů.
3. Chyby při měření délek elektronickými dálkoměry.
4. Technologie testování přístrojů.
5. Kalibrace vybraných přístrojů na komparační základně a zpracování dat.
6. Vyhodnocení dosažených výsledků.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **cca 20 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:


- ČSN ISO 17123-4: Optika a optické přístroje - Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů - Část 4: Elektrooptické dálkoměry
- ČSN EN ISO/IEC 17025 Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří
- ČSN EN ISO 10012 Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení
- V. ŠANDA a M. HERDA. Čs. kalibrační základna velkých délek. Zpráva o stabilitě geodetické základny Košnice. VÚGTK Zdíby, 1990.
- J. BÖHM, V. RADOUCH a M. HAMPACHER. Teorie chyb a vyrovnávací počet. GPK Praha, 1990.
- J. LECHNER, L. ČERVINKA, J. KRATOCHVÍL a I. UMNOV. Nový státní etalon velkých délek Košnice [<http://www.vugtk.cz/odd25/kostice/geos.pdf>].

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Václav Čada, CSc.**
Katedra matematiky

Datum zadání bakalářské práce: **1. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2016**


Doc. RNDr. Miroslav Lávička, Ph.D.
děkan




Prof. RNDr. Pavel Drábek, DrSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. října 2015

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 23. 5. 2016

Hynek Marek

Rád bych poděkoval doc. Ing. Václavu Čadovi, CSc. za cenné rady při realizaci této práce a za pomoc při měření, dále Ing. Martinu Pitoňákovi, Ph.D. za rady ohledně vyrovnávacího počtu a v neposlední řadě také Ing. Jiřímu Lechnerovi, CSc. za poskytnutí etalonu a za rady ohledně kalibračního měření.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá kalibrací elektronických dálkoměrů, konkrétně příslušným teoretickým základem a kalibrací dvou dálkoměrů integrovaných v totálních stanicích Leica Nova MS50 a Leica 1001. Ke kalibračnímu měření byl využit státní etalon velkých délek v Košticích, data byla zpracována dvěma způsoby vyrovnání. Bylo zjištěno, že dosažené výsledky jsou srovnatelné s přesností udávanou výrobcem, v případě Leica 1001 byla zjištěna dokonce lepší přesnost, než výrobce uvádí.

Klíčová slova

Kalibrace, elektronický dálkoměr, přesnost elektronických dálkoměrů, adiční konstanta, násobná konstanta, regresní přímka

Abstract

This bachelor thesis deals with calibration of electronic distance meters, more precisely of relevant theoretical basis and calibration of two distance meters integrated in total stations Leica Nova MS50 and Leica 1001. For the process of calibration measurement was used National measuring standard of long distances in Koštice, data were processed by two types of adjustment. It turns out, results are comparable with accuracy stated by the manufacturer, in case of Leica 1001 has been found even better accuracy than manufacturer mentions.

Key words

Calibration, electronic distance meter, accuracy of electronic distance meters, addition constant, multiple constant, regression line

Obsah

1	Úvod	8
2	Metrologie a metodika měření délek	9
2.1	Zákon o metrologii	9
2.1.1	Ověřování a kalibrace	10
2.2	ČSN ISO 17123-4	10
2.2.1	Zjednodušená metoda (Simplified test procedure)	11
2.2.2	Úplná metoda (Full test procedure)	12
3	Chyby při měření elektronickými dálkoměry	14
3.1	Základní dělení chyb	14
3.1.1	Omyly a hrubé chyby	14
3.1.2	Nevyhnutelné chyby	15
3.2	Chyby z hlediska jejich původu	16
3.2.1	Chyby měřiče	16
3.2.2	Přístrojové chyby	16
3.2.3	Vlivy prostředí	19
4	Dělení elektronických dálkoměrů	20
4.1	Dělení podle přesnosti	20
4.2	Dělení podle dosahu	21
4.3	Technologické dělení	22
4.4	Dělení podle ceny	23
5	Technologie testování	24
5.1	Státní etalon velkých délek Koštice	24
5.2	Testované přístroje	25
5.3	Kalibrační měření	26
5.3.1	Měření fyzikálních vlastností vzduchu	27
6	Zpracování dat	30
6.1	Vyrovnaní přímého měření se systémem podmínek	30
6.2	Diference měření tam a zpět	32

6.3	Vyrovnnání na regresní přímku	34
7	Zhodnocení dosažených výsledků	37
8	Použitá literatura	40

1 Úvod

Téma bakalářské práce je kalibrace elektronických dálkoměrů (ED). Podrobněji je téma směřováno ke geodézii a hlavní oblastí zájmu této práce jsou dálkoměry integrované v úhломěrných přístrojích, tedy totální stanice.

Zadání dělí práci na obvyklou teoretickou a praktickou část. Úkolem teoretické části je seznámit se s problematikou kalibrace ED, konkrétně pak s metodikou měření délek, teorií chyb měření s ED a s možnostmi dělení přístrojů dostupných na trhu.

V praktické části by pak měly být zvoleny přístroje, s nimi provést kalibrační měření na Státním etalonu velkých délek v Košticích a následně zvolit vhodné způsoby zpracování dat a výsledky kalibrace objektivně zhodnotit.

Cílem bakalářské práce je tedy provést kalibraci vybraných dálkoměrů a na základě vlastního měření a spolupráce s Výzkumným ústavem geodetickým, topografickým a kartografickým (VÚGTK) vystavit kalibrační list, což je zároveň jednou z hlavních motivací pro realizaci této práce.

2 Metrologie a metodika měření délek

”Metrologie je vědní obor zabývající se stanovením měřitelných veličin a jejich měřením; zahrnuje teoretické i praktické aspekty měření.” [1]

2.1 Zákon o metrologii

Z právního hlediska se metrologií v České republice zabývá předpis č. 505/1990 Sb. Zákon o metrologii. *”Účelem zákona je úprava práv a povinností fyzických osob, které jsou podnikateli, právnických osob a orgánů státní správy, a to v rozsahu potřebném k zajištění jednotnosti a správnosti měřidel a měření”* [2].

Ze zákona [2] plyne povinnost výše uvedeným používat základní měřicí jednotky uvedené v § 2, odstavci 2. Zde je mimo jiných uvedena definice metru jako délka dráhy, kterou proběhne světlo ve vakuu za dobu $1/299\,792\,458$ sekundy.

Dle zákona lze měřidla rozdělit na etalony, pracovní měřidla stanovená a pracovní měřidla nestanovená. Za měřidla lze také považovat certifikované a ostatní referenční materiály v případě, že jsou určeny k funkci ostatních třech typů měřidel. Etalonem příslušné měřicí jednotky (nebo stupnice) je měřidlo, jejímž účelem je uchovávání jednotky, její realizace a přenos na měřidla řádově nižší přesnosti. Stanovenými měřidly se rozumí taková měřidla, která jsou Ministerstvem průmyslu a obchodu stanovena k povinnému ověřování. Pracovní měřidla nestanovená jsou pak taková, která nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem. Referenční materiály jsou materiály nebo látky, jejichž složení a vlastnosti jsou přesně definovány. Tyto materiály jsou určeny, podobně jako etalony, především ke kalibraci a jiným testovacím procesům měřidel [2]. Měřidla mohou na základě vyhlášky podléhat před uvedením na trh schvalování typu. Schvalování měřidla provádí Český metrologický institut (ČMI). ČMI na základě technických zkoušek a dalších zjišťování testuje, zda je měřidlo schopno plnit funkci, pro níž bylo určeno. Po procesu schvalování měřidla ČMI vystaví výrobcí certifikát a stanoví grafickou značku, kterou musí být měřidlo označeno. V případě, že měřidlo nesplní nároky na schválení, které jsou dány příslušnou vyhláškou, nesmí být uvedeno do oběhu [2].

2.1.1 Ověřování a kalibrace

Část 3 zákona [2] popisuje ověřování a kalibraci měřidel. Oba procesy se týkají testování metrologických vlastností měřidel porovnáváním naměřených hodnot s hodnotami nominálními (hodnotami, které jsou považovány za správné). Účelem ověřování je zkouška, zda chyby, které měřidlo vykazuje, splňují maximální dovolené odchylky. Ve výsledku jsou pak konkrétní hodnoty chyb nepodstatné a v ověřovacím listu se neuvádí. Naproti tomu, účelem kalibrace je právě zjišťování závislosti mezi naměřenými a známými hodnotami a konkrétní číselné vyjádření chyb měřidla jsou požadovaným výstupem a součástí kalibračního listu. Tyto hodnoty lze pak použít ke korekcím naměřených hodnot.

Oprávnění k vykonávání ověřování a kalibrace má ČMI a autorizovaná metrologická střediska. Tato střediska může autorizovat Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví na základě prověření úrovně metrologického a technického vybavení a kvalifikace odpovědných zaměstnanců. Jedním z těchto středisek je i VÚ-GTK [2].

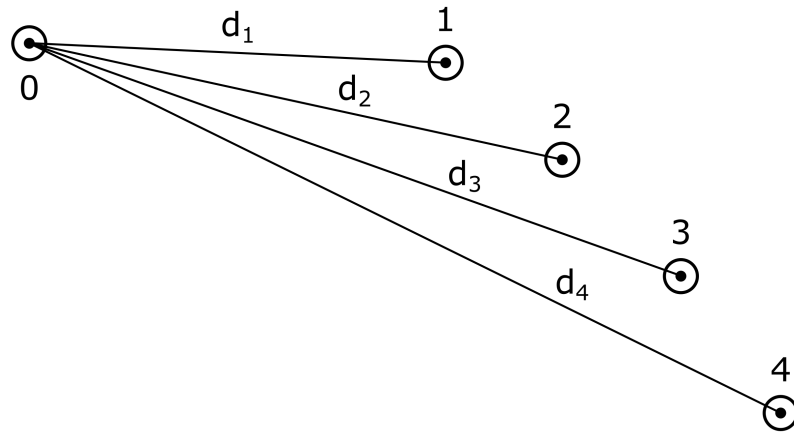
Procesu ověřování podléhají měřidla stanovená, uvedená ve vyhlášce [3]. Měřidla jsou po ověření označena buď úřední značkou, nebo je jim vystaven ověřovací list. Ověření je omezeno lhůtou uvedenou ve vyhlášce. Do stanovených měřidel patří z délkových měřidel například ocelová pásma, jejichž ověřovací lhůta je neomezená. Kalibrace se týká nestanovených měřidel. Z oboru geodézie jsou to měřidla uvedená v [4]. Mezi tato měřidla patří totální stanice, u nichž by se měla podle řádu kalibrace provádět po 3 letech.

2.2 ČSN ISO 17123-4

Norma ČSN ISO 17123 se zabývá terénními postupy pro určování a vyhodnocování přesnosti geodetických měřických přístrojů. Norma ČSN ISO 17123-4 je její navazující částí a zabývá se konkrétně elektrooptickými dálkoměry. Obsahem je podrobný popis dvou metod určených pro testovací měření a výpočetní postupy pro zjišťování přesnosti přístrojů a některých přístrojových chyb. Postupy měření jsou navrženy tak, aby byly minimalizovány vlivy atmosféry [5]. Vzhledem k tomu, že následující 2 kapitoly přímo popisují vybranou část normy, bylo pro ně čerpáno pouze z [5].

2.2.1 Zjednodušená metoda (Simplified test procedure)

Použití metody je závislé na využití kalibrační základny tvořené minimálně pěti body. Na prvním bodě je trvale umístěn přístroj, na ostatních jsou trvale umístěna odrazná zařízení. Vzdálenosti těchto čtyř bodů od přístroje by se měly pohybovat v rozmezí délek, pro jejichž měření je přístroj určen a využíván. Příklad rozmístění bodů je patrný z obrázku č. 1.



Obrázek 1: Konfigurace bodů pro zjednodušenou metodu [5]

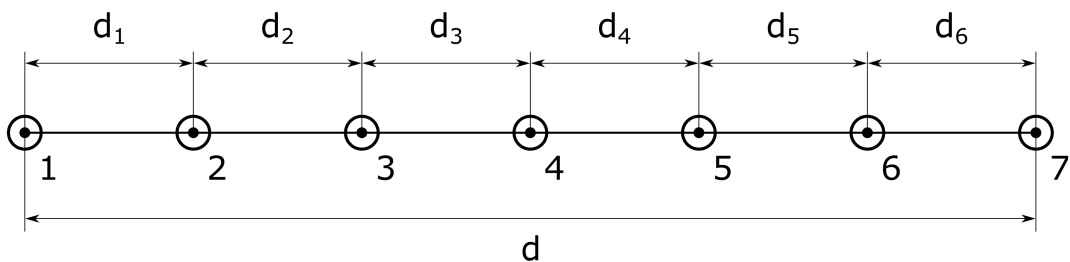
Každá délka by měla být měřena minimálně třikrát. Současně s měřením délek je potřeba měřit a zohledňovat i teplotu a tlak vzduchu. Z opakovaně naměřených délek je vypočítána střední hodnota (průměrem).

Při zpracování dat jsou počítány difference jako rozdíl mezi zprůměrovanými naměřenými délkami a nominálními délkami. Velikosti těchto diferencí jsou následně porovnávány s dopustnými hodnotami.

Tato konfigurace nabízí pouze omezený počet délek k měření. Slouží spíše k orientačnímu zjišťování přesnosti přístroje. Norma pro tuto metodu připouští, že pokud nejsou k dispozici nominální délky základny, lze si je doměřit zkalibrovaným a řádově přesnějším přístrojem než je přístroj testovaný. Nevýhodou této metody je, že není možné určit přesné hodnoty chyb měřidla. Pro podrobnější testování je potřeba provést komplexnější testy, například dále zmiňovanou Úplnou metodu.

2.2.2 Úplná metoda (Full test procedure)

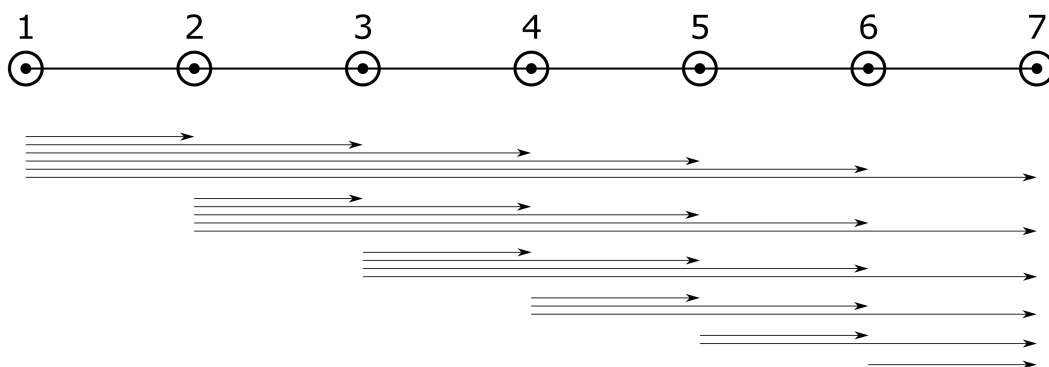
Pro použití této metody je nezbytná kvalitně stabilizovaná základna složená alespoň ze sedmi bodů. Za účelem minimalizace chyby centrace přístroje při měření je vhodné, aby byly body stabilizovány pilíři nucené centrace. Vzdálenost mezi počátečním a koncovým bodem by měla být přibližně 600 m, všechny body jsou zařazeny do přímky a to jak v polohovém, tak výškovém smyslu. Terén v němž je základna umístěna tedy nesmí být členitý. Příklad konfigurace bodů pro tuto metodu je patrný z obrázku č. 2.



Obrázek 2: Konfigurace bodů pro úplnou metodu [5]

Měření jsou všechny kombinace délek, které základna měřit umožňuje. V případě, že je základna tvořena sedmi body, obsahuje základní soubor měření celkem 21 hodnot. Přístroj je postupně přemísťován z bodu na bod od počátku až na předposlední bod. Z bodu, na němž je přístroj aktuálně umístěn, jsou měřeny vždy délky vpřed ve směru postupu přemísťování přístroje. Postup je patrný z obrázku č. 3. Měření by mělo probíhat svižně, aby nebylo zatíženo proměnlivostí atmosferických vlivů. Ideální je oblačnost, kdy je zmírněno působení slunečního záření.

Co se týče zpracování naměřených dat, popisuje norma podrobně postup pro výpočet adiční chyby (viz kapitola 3.2.2) a pomocí metody nejmenších čtverců (MNČ) výpočet výběrové směrodatné odchylky. V závěru části o výpočtech jsou uvedeny postupy pro další statistické zpracování měření. Jsou zde testovány 3 hypotézy.



Obrázek 3: Postup měření pro úplnou metodu [5]

První hypotéza testuje, zda hodnota výběrové směrodatné odchylky vypočtené z měřených délek je menší než hodnota přesnosti přístroje udávaná výrobcem. Hypotéza je testována pomocí testu χ^2 dobré shody na hladině významnosti 5 %. To znamená, že pokud je hypotéza potvrzena, lze s pravděpodobností 95 % říci, že přístroj splňuje přesnost udávanou výrobcem.

Druhá hypotéza se zabývá tvrzením, zda dvě výběrové směrodatné odchylky patří do stejného základního souboru. Původ různých výběrových směrodatných odchylek může být například z hodnot naměřených jedním přístrojem v různých časech, nebo z hodnot naměřených pomocí dvou různých přístrojů. Hypotéza je testována pomocí F-testu opět na hladině významnosti 5 %.

Třetí a poslední hypotéza se zabývá otázkou, zda přístroj vykazuje adiční chybu, jinými slovy, jestli se zjištěná hodnota adiční chyby s pravděpodobností 95 % blíží k nulové hodnotě. Test se provádí pomocí Studentova t-testu.

Metoda pro zpracování výsledků měření nevyžaduje znalost nominálních délek základny. Podle metody, jak ji norma popisuje, je sice možné určit adiční chybu, nelze však na základě těchto postupů zjistit, zda je přístroj ovlivněn chybou měřítka (viz kapitola 3.2.2).

3 Chyby při měření elektronickými dálkoměry

Měření, nejen geodetická, ale jakákoliv, jsou vždy zatížena řadou faktorů, které ovlivňují výsledek. Výsledek se tak stává náhodnou veličinou a tedy i při maximální pečlivosti měřiče je prakticky nemožné dosáhnout opakovaným měřením naprosto totožných výsledků.

Každá naměřená hodnota l_i je ve výsledku ovlivněna chybou ϵ_i . Tato chyba buď zmenší, nebo naopak zvětší skutečnou hodnotu veličiny L . Při opakovaném měření téže veličiny, může být původ chyby ϵ_i odlišný, tedy i její hodnota se může lišit.

$$l_1 = L - \epsilon_1, l_2 = L - \epsilon_2, \dots, l_n = L - \epsilon_n, \quad (1)$$

z čehož plyne, že hodnota skutečné chyby je

$$\epsilon_i = L - l_i \quad (2)$$

a skutečná hodnota

$$L = l_i + \epsilon_i \quad (3)$$

je dána součtem naměřené hodnoty a chyby. Vyrovnanou hodnotu \bar{l} lze určit například pomocí MNČ. Dále platí, že

$$\bar{l} = l_i + v_i, \quad (4)$$

kde v_i je hodnota opravy, po jejímž přičtení k naměřené hodnotě dostáváme vyrovnanou hodnotu. Je důležité brát v potaz, že vyrovnaná hodnota není hodnotou skutečnou, ale pouze statistickým odhadem, který se ke skutečné hodnotě blíží [6].

3.1 Základní dělení chyb

Podle [6] můžeme chyby obecně dělit na dvě skupiny. První skupinou jsou omyly a hrubé chyby, druhou jsou chyby nevyhnutelné.

3.1.1 Omyly a hrubé chyby

Omyly a hrubé chyby obvykle nejsou způsobeny objektivními příčinami, ale především rukou měřiče. Příčinnou těchto chyb může být například nezkušenost měřiče, únava, nepozornost, nebo nesprávně zvolené postupy. K tomuto navíc může neblaze

příspěvat nepříznivost prostředí (například otřesy nebo nestabilní podloží pod stativem). Takovéto chyby je potřeba z měření vyloučit. Pokud tyto chyby dosahují velkých hodnot, lze je obvykle snáze identifikovat. Kromě pečlivosti a důslednosti měřiče je jakousi možností jak tyto chyby z měření vyloučit opakované měření nebo měření nadbytečných veličin [6].

3.1.2 Nevyhnutelné chyby

Chyby nevyhnutelné nevznikají rukou měřiče, ale především technickým stavem měřidla a působením atmosferických vlivů. Tyto chyby nelze ze souboru měření zcela vyloučit. Vhodnou metodikou však lze jejich výskyt potlačit. Nevyhnutelné chyby lze podle jejich účinků na výsledek dále dělit na systematické a nahodilé [6].

Systematické chyby

Systematické chyby se vyznačují tím, že při vícenásobném měření jedné veličiny zůstává jejich hodnota stejná, nebo se mění předvídatelným způsobem. Podle [6] můžeme systematické chyby dělit na konstantní, proměnlivé, postupné a periodické. Konstantní systematická chyba se vyznačuje stejnou hodnotou i znaménkem po celou dobu měření. Nelze ji tedy identifikovat opakovaným měřením. Proměnlivá systematická chyba může v průběhu měření nabývat různých hodnot, které se nepohybují v blízkosti nuly a jejich střední hodnota je tedy zpravidla nenulová. Postupná systematická chyba (také progresivní) mění plynule svoji velikost v průběhu měření. Chyba periodická, jak plyne z názvu, mění svoji velikost v průběhu měření periodicky (například v podobě sinusoidy). Střední hodnota této chyby může být v určitých případech nulová. Působení systematických chyb může být ve výsledku velmi nebezpečné. Proto se je snažíme z měření vhodným způsobem vyloučit (například kalibrací přístroje, změnou postupu, nebo zavedením vhodných korekcí) [6].

Nahodilé chyby

Chyby nahodilé mohou nabývat různé velikosti i různého znaménka a to i při měření stejné veličiny, za použití téže metody, za stálých podmínek a při stejné pečlivosti měřiče. Příčinnou takovýchto chyb je především nedokonalost lidských smyslů [6].

3.2 Chyby z hlediska jejich původu

Podle [7] můžeme na chyby pohlížet i z hlediska jejich původu a dělit je na chyby měřiče, chyby přístrojové a chyby způsobené prostředím.

3.2.1 Chyby měřiče

Rukou měřiče může vznikat řada chyb. Mohou to být opět chyby hrubé, které jsou způsobeny nedbalostí, únavou, apod., nebo chyby nevyhnutelné způsobené nemožností vykonávat měřické úkony v absolutní přesnosti (např. chyba cílení) [7].

3.2.2 Přístrojové chyby

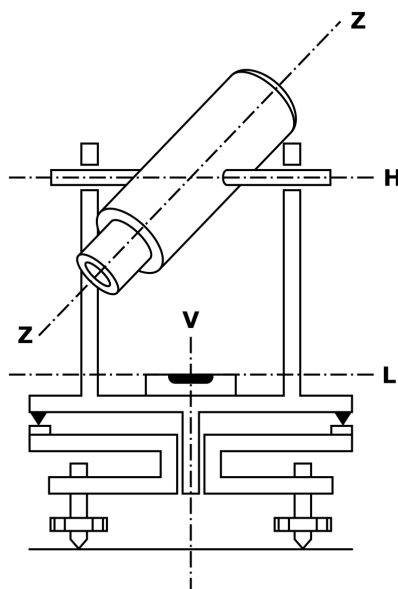
I navzdory dnešním vyspělým výrobním technologiím nelze vyrobit všechny součástky měřidel s absolutní přesností, ale pouze v omezené míře. K těmto nedokonalostem navíc neblaze přispívá například nešetrné zacházení s přístrojem a opotřebení. Z těchto důvodů dochází ke vzniku tzv. přístrojových chyb [7].

Osové chyby

Nejčastějšími veličinami měřenými v geodézii jsou kromě délek také úhly. Zároveň je výhodné pro měření obou veličin využívat jeden přístroj, namísto dvou. Proto jsou v dnešní době využívány především tzv. totální stanice, jejichž hlavní účelem je právě propojení úhlového měřidla (teodolitu) a ED. U takovýchto přístrojů se mohou vyskytovat tzv. osové chyby.

Teodolity obecně mají 4 základní osy (viz obrázek 4):

- Osa alhidádové libely – L
- Svislá osa (osa alhidády) – V
- Vodorovná osa (točná osa dalekohledu) – H
- Záměrná osa – Z



Obrázek 4: Osy teodolitu [7]

Aby totální stanice správně plnila svoji funkci, měl by přístroj splňovat tzv. osové podmínky:

1. Svislá osa (V) \perp osu alhidádové libely (L)
2. Záměrná osa (Z) \perp vodorovnou osu (H)
3. Vodorovná osa (H) \perp svislou osu (V)

Nesplněním první podmínky vzniká u přístroje chyba alhidádové libely. Tato chyba má zásadní vliv na správné postavení stroje na stanovisku, neboť i při pečlivém urovnání alhidádové libely není svislá osa ve vertikální poloze. Tuto chybu lze však snadno identifikovat a případně na místě opravit. Po urovnání alhidádové libely a otočení alhidády o $2R$ by se libela neměla vychýlit. Pokud ano, lze stavěcími šrouby odstranit polovinu této odchylky a tím i dočasně chybu odstranit [7].

Nesplněním druhé podmínky dochází ke kolimační chybě, nesplnění třetí podmínky způsobuje chybu úklonnou. Osové chyby mají spíše než na měření délek vliv na měření úhlů. Správnou metodikou (například měřením ve dvou polohách dalekohledu) je však lze vyloučit i z tohoto měření [7]. Vzhledem k tomu, že osy, respektive jejich průsečíky, tvoří jakýsi střed přístroje, od něhož by měla délka být měřena, můžou konstrukční nedostatky os souviset s dále zmiňovanou adiční chybou a kaž-

dou měřenou délku pak ovlivnit o hodnotu neměnné adiční konstanty.

Většina moderních přístrojů bývá vybavena komepenzátory (od jednoosých až po trojosé), které jsou v omezené míře schopny osově podmínky zajistit.

Adiční chyba

Adiční (součtová) chyba je závislá na kombinaci použitého dálkoměru a odrazného zařízení. Tato chyba je způsobena neidentičností mechanického a elektronického středu přístroje. U totální stanice tedy může být počátek dálkoměru odsazen od svislé osy. V takovém případě nejsou měřeny vzdálenosti od bodu, na němž je stroj postaven, ale od počátku dálkoměru. Z krátkodobého pohledu je toto odsazení neměnné a lze ho číselně vyjádřit. Stejný problém může nastat i u odrazného hranolu. Celkově lze pak hodnotu obou těchto odsazení vyjádřit tzv. adiční konstantou, o kterou lze výsledek měření opravit [8].

Měřítková chyba

Měřítková chyba má charakter chyby systematické a je přímo úměrná měřené délce. Čím je tedy měřená délka větší, tím více se chyba projeví. Příčinou výskytu je především chyba frekvence přístroje. Protože měřítko ED je závislé mimo jiného také na nastavených atmosferických korekcích (teplota a tlak vzduchu), dojde ke vzniku chyby měřítka také v případě špatného naměření nebo nastavení těchto korekcí. Hodnota měřítkové chyby bývá běžně vyjadřována tzv. násobnou konstantou [8].

Cyklická chyba

Cyklická chyba je způsobena chybnou amplitudovou modulací vlny. Touto chybou mohou být postiženy pouze fázové dálkoměry, používané převážně v minulosti. Dnes jsou častěji využívány pulzní dálkoměry, které fungují na principu měření tranzitního času. Tato chyba patří do skupiny proměnlivých systematických chyb. Má většinou charakter funkce sinus s vlnovou délkou totožnou s jednotkovou délkou dálkoměru. Násobkem jednotkové délky a naměřeným fázovým posunem je ve výsledku určena celková délka, přičemž cyklická chyba se projeví v každé celé naměřené jednotkové délce. Tato chyba je často spojována se stářím přístroje [8].

3.2.3 Vlivy prostředí

Z atmosferických vlivů mají nejzásadnější účinky teplota a tlak vzduchu, případně relativní vlhkost vzduchu. Tyto vlivy způsobují chyby buď přímo (např. chyba refrakce), nebo nepřímo, kdy dochází k ovlivňování vlastností přístroje a měřiče. Velmi častou a poměrně nebezpečnou chybou způsobenou vlastnostmi prostředí je refrakce. Při refrakci dochází k odklonu dráhy paprsku od přímé spojnice, čímž je naměřena vždy větší délka než je její skutečná hodnota. Odklon paprsku způsobuje nehomogenita prostředí. Dochází pak k podobnému lomu světla jako při průchodu jednoduchými optickými přístroji jako jsou planparalelní desky, optické klíny, apod. Měřič má pak pocit, že cílí na daný bod, ale ve skutečnosti tomu tak není. Vlivu refrakce není možné se zcela vyvarovat, lze ho však zmírnit. Nedoporučuje se například volit záměrné přímky probíhající nízko nad terénem, kde je větší nebezpečí výskytu teplotních změn [7].

4 Dělení elektronických dálkoměrů

Moderní technologie dnešní doby nabízí celou řadu přístrojů o různých vlastnostech. Při výběru přístroje je vhodné tyto vlastnosti brát v potaz a to jak z ekonomického důvodu, tak i z pohledu technologického. Následující kapitoly popisují některá základní kritéria, podle nichž lze ED (především pak totální stanice) dělit, konkrétně pak dělení podle přesnosti, dosahu, technologického zpracování a ceny.

4.1 Dělení podle přesnosti

Jedním z nejdůležitějších kritérií, podle nichž lze dálkoměrné přístroje členit, je přesnost. Přesnost ED je výrobcem obvykle udávána ve tvaru

$$\pm(a \text{ mm} + b \text{ ppm}),$$

kde a odpovídá adiční konstantě, která je nezávislá na velikosti měřené délky. Naproti tomu b udává hodnotu násobné konstanty (viz měřítková chyba), která vyjadřuje jednu miliontinu měřené délky (ppm) [9]. Rozmezí hodnot, v němž se tyto konstanty pohybují, lze vyzorovat například z tabulky č. 2 v kapitole 4.4.

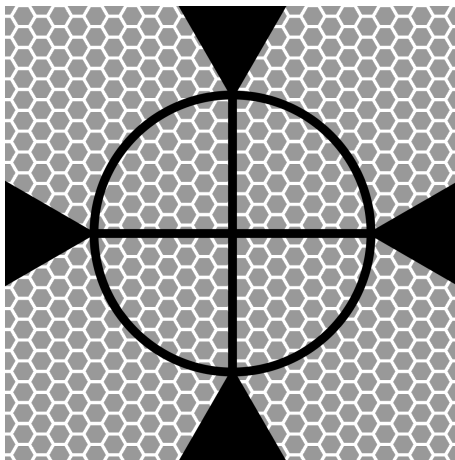
Moderní přístroje bývají nyní stále častěji vybaveny technologií, která umožňuje měřit délku i bez odrazného hranolu. Paprsek dálkoměru je pak schopen se odrazit od prakticky libovolného povrchu, ovšem na úkor přesnosti. Výrobce obvykle udává různou přesnost právě pro měření s a bez odrazného hranolu. I přes to, že měření bez odrazného hranolu bývá méně přesné, lze tuto technologii v určitých situacích vhodně využít namísto měření s hranolem a dosáhnout tak rovnocenného, ne-li lepšího výsledku. Takovou situací je například měření délky k lomovému bodu budovy, kam není možné přesně hranol umístit a je nutné použít úhlové nebo délkové odsazení.

4.2 Dělení podle dosahu

Dalším kritériem, byť oproti přesnosti dálkoměru méně důležitým, je jeho dosah. Dosah dálkoměrů závisí především na způsobu odrazu paprsku a na meteorologických podmínkách měření.

Při použití odrazného hranolu jsou moderní totální stanice schopny měřit vzdálenosti při ideálních meteorologických podmínkách v řádech až několika kilometrů (viz tabulka č. 2). Takový dosah je v běžných situacích více než dostatečný.

V případě měření bez odrazného hranolu je dosah dálkoměru výrazně menší. Pohybuje se obvykle v řádu několika stovek metrů. Opět velmi záleží na viditelnosti a podmínkách počasí. V případě bezhranolového měření je možné využít odrazné štítky (viz obrázek č. 5). Tyto štítky jsou vyrobeny z materiálů umožňujících lepší odraz paprsku, čímž zvyšují dosah dálkoměru oproti přímého odrazu od běžného povrchu. Tyto štítky lze na cíl nalepit, což je velmi výhodné například při měření deformací objektů.



Obrázek 5: Nalepovací odrazný štítek

4.3 Technologické dělení

ED můžeme také rozdělovat podle technologického provedení. Následující odstavce popisují některé aspekty, v nichž se přístroje odlišují.

Vlivem technologického vývoje vniká snaha propojit nejen úhломěrné a dálkoměrné zařízení, ale navíc do přístroje zakomponovat také celou řadu dalších funkcí, jakými jsou například pozemní laserový skener, GNSS aparatura, digitální kamera apod. Takovéto zařízení již nenazýváme totální stanicí, nýbrž univerzální stanicí. Z tabulky č. 2 spadají do této kategorie poslední dva přístroje. Je pochopitelné, že tímto rozšířením značně narůstá také cena přístroje.

Další technologickou odlišností je způsob, jakým je realizována rotace dalekohledu v horizontálním a vertikálním směru. Běžnější je obyčejné ruční natáčení pomocí mechanických ustanovek. Druhou možností je automatická rotace pomocí servomotorů. Z tohoto pohledu tedy rozlišujeme mechanické a motorizované totální stanice. Výhodou motorizovaných přístrojů je možnost tzv. one-man systému měření, při němž lze přístroj ovládat na dálku. Řadu geodetických činností pak zvládne sám jeden měřič, což je výhodné jak z ekonomických, tak praktických důvodů.

Pro snadné ovládání je důležité také uživatelské rozhraní přístroje. Kromě vlastních rozhraní vyvinutých přímo jednotlivými výrobci se na trhu objevují také přístroje s operačním systémem Microsoft Windows CE. V prostředí MS Windows lze pak v přístroji mimo jiného přímo spustit aplikaci pro klasické měření.

Za účelem zjednodušení a zpříjemnění měřických prací a zároveň zlepšení konkurenceschopnosti vzniká pod vedením různých výrobců řada nadstavbových funkcí. Velmi populární je v dnešní době například funkce, která umožňuje na dálku zablokovat nebo vyhledat ukradený nebo ztracený přístroj. Tuto funkci s názvem TS Shield nabízí například produkty značky Topcon. Dalším zajímavým doplňkem je například polní software Leica Captivate, který umožňuje tvorbu a vizualizaci 3D scény z dat nasbíraných laserovým skenováním [10], [11].

4.4 Dělení podle ceny

Dalším velmi zásadním faktorem, podle něhož lze dálkoměry dělit, je cena. Při výběru přístroje, obzvláště pokud jde o totální stanice, je potřeba zvážit celou řadu skutečností. Jak vyplývá z předchozích kapitol, moderní přístroje disponují poměrně rozličnými parametry a funkcemi. Každý přístroj je tak vhodný pro jiné účely, což je vhodné, hlavně z ekonomických důvodů, při koupi zohlednit. Cena se také může odvíjet od příslušenství, které výrobce k přístroji dodává.

V následující tabulce jsou uvedeny vybrané přístroje seřazené podle jejich ceny. Parametry v tabulce udávající dosah a přesnost dálkoměru se týkají pouze měření na odrazný hranol. Položka M udává, zda se jedná o motorizovanou stanici či nikoliv. Jak již bylo zmíněno, poslední dva přístroje patří mezi univerzální stanice, čímž je ovlivněna i jejich cena.

Značka	Typ	Dosah [m]	Přesnost	M	Cena
Foif	RTS105R5	3 000	2 mm + 2 ppm	ne	88 900,-
Spectra	Focus 6	5 000	3 mm + 2 ppm	ne	111 900,-
Nikon	NIVO 3M	5 000	3 mm + 2 ppm	ne	147 800,-
Pentax	R-425N	9 000	2 mm + 2 ppm	ne	159 900,-
Topcon	OS-105 BG	4 000	2 mm + 2 ppm	ne	178 000,-
Pentax	W-822 NX	4 500	2 mm + 2 ppm	ne	199 900,-
Sokkia	CX-102	4 000	2 mm + 2 ppm	ne	223 400,-
Leica	TS09plus 3"R500	3 500	1.5 mm + 2 ppm	ne	258 000,-
Trimble	5503 DR	5 500	3 mm + 3 ppm	ano	288 000,-
Leica	TS12 P 5"R400	3 500	1 mm + 1.5 ppm	ano	434 000,-
Topcon	PS-105 A	6 000	1.5 mm + 2 ppm	ano	441 000,-
Topcon	IS-305	3 000	2 mm + 2 ppm	ano	611 100,-
Leica	Nova MS60	10 000	1 mm + 1.5 ppm	ano	1 345 000,-

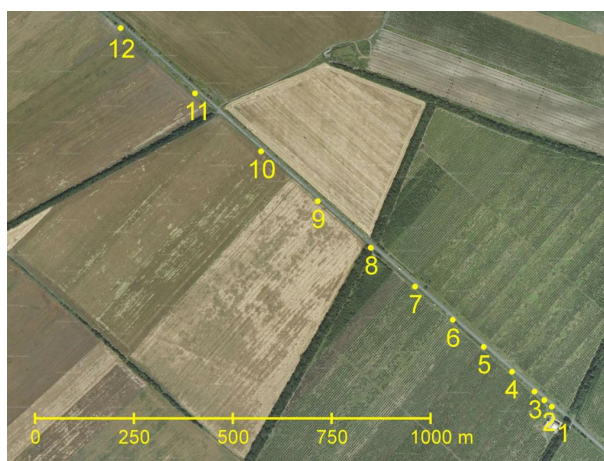
Tabulka 1: Vybrané přístroje a jejich parametry seřazené podle ceny

Informace uvedené v tabulce pocházejí ze zdrojů [10], [11] a [13].

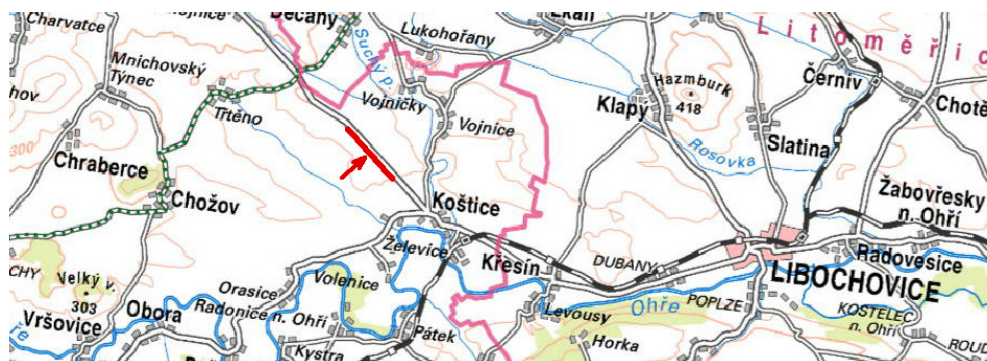
5 Technologie testování

5.1 Státní etalon velkých délek Koštice

Pro kalibraci ED je zapotřebí kalibrační základna. Pro kalibrační měření v rámci této práce byl zvolen Státní etalon velkých délek Koštice. Etalon je umístěn podél silnice mezi obcemi Koštice a Libčeves v okrese Louny v Ústeckém kraji. Základna je složena z 12 pilířů nucené centrace, které celkem ve všech kombinacích realizují 66 délek v rozmezí 25 – 1450 m. Součástí etalonu jsou nominální délky, které jsou pro účely kalibrace považovány za správné, přestože i tyto délky jsou pochopitelně určeny pouze s limitovanou přesností. Body, jež jsou těmito pilíři stabilizovány, jsou umístěny přibližně v jedné linii (viz obrázek č. 6). Pilíře jsou již vybaveny závitmi pro upevnění centračních podložek a není tedy zapotřebí sada čepů [12].



Obrázek 6: Schéma rozložení pilířů na podkladu ortofota [12]



Obrázek 7: Lokalizace etalonu

5.2 Testované přístroje

Ke kalibraci byly vybrány dva přístroje: Leica Nova MS50 a Leica 1001. Leica Nova MS50 patří mezi jeden z nejnovějších produktů dostupných na trhu. Patří do kategorie univerzálních stanic a kromě klasického využití přístroje ve formě totální stanice lze například využít integrovaný 3D laserový skener, nebo rozšířit možnosti přístroje připojením aparatury GNSS. Druhý přístroj patří mezi klasické totální stanice. Oba přístroje jsou produktem renomované společnosti Leica. Hlavním rozdílem z pohledu kalibrace by měla být přesnost integrovaného dálkoměru.

	Leica Nova MS50	Leica 1001
Přesnost dálkoměru	1 mm + 1.5 ppm	5 mm + 5 ppm

Tabulka 2: Předpokládaná přesnost testovaných přístrojů

Uvedená přesnost dálkoměrů se týká pouze měření s využitím odrazného hranolu.



Obrázek 8: Leica Nova MS50 [13] a Leica 1001

5.3 Kalibrační měření

Kalibrační měření proběhlo 7. 3. 2016 na již zmíněné kalibrační základně v Košticích za poměrně příznivých podmínek - převážně oblačno až zataženo, bezvětří, průměrná teplota vzduchu 12°C.

Za účelem zvýšení efektivity a přesnosti byly před začátkem měření na všechny pilíře upevněny a zhorizontovány centrační podložky. Při následném přemísťování odrazného hranolu a stroje již nebylo potřeba se horizontací zdržovat.

Měřeno bylo se dvěma již zmíněnými stroji. Pro přehlednost bude v následujících částech textu zmiňováno měření se strojem Leica Nova MS50 jako první fáze měření, měření se strojem Leica 1001 jako fáze druhá.

Průběh měření převážně odpovídal postupu uvedenému v kapitole 2.2.2. Měřeno bylo všech 66 kombinací délek, které etalon poskytuje. Měření postupovalo systematicky z prvního pilíře na dvanáctý. Každá délka byla měřena vždy 3x, přičemž před registrací hodnoty bylo na hranol znovu zacíleno.

V první fázi byly měřeny délky vpřed i vzad. Každá délka byla tedy měřena celkem 6x. Základní soubor z první fáze je tedy poměrně objemný, což sice umožňuje více možností při zpracování dat, zároveň ale měření trvá poměrně dlouho (v tomto případě asi 4 hodiny). Proto bylo od tohoto v druhé fázi upuštěno a měřeny byly pouze délky vpřed, jak předpokládá metodika VÚGTK.



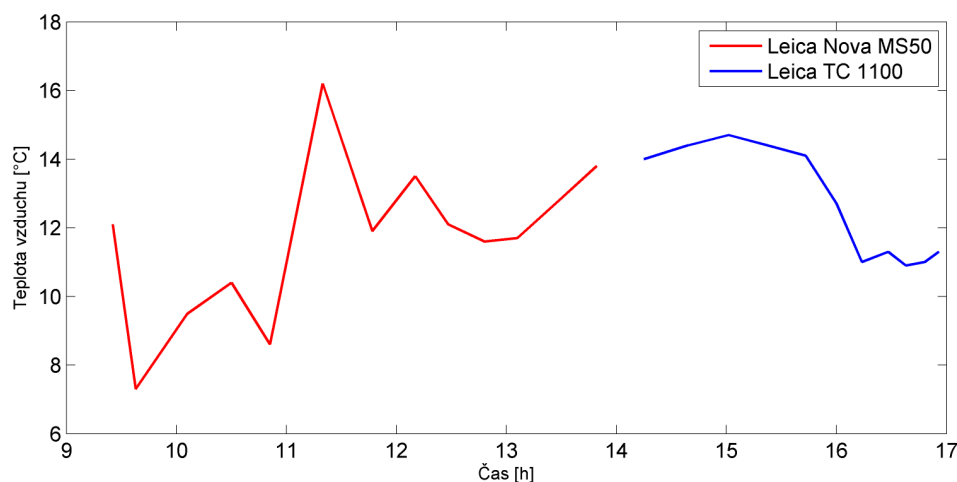
Obrázek 9: Leica Nova MS50 při kalibračním měření

Ke komunikaci byly použity vysílačky, což celý proces měření zrychlilo a zjednodušilo. Ve druhé fázi ovšem docházelo k rušení spojení, což bylo pravděpodobně příčinou nedorozumění, jehož následkem bylo vynechání jedné délky. Měřeno tedy ve druhé fázi bylo 65 z 66 dostupných délek. Vzhledem k tomu, že se již předem počítá s případným vyřazením hodnot nedosahujících požadované přesnosti, neměla by tato skutečnost být překážkou pro získání kvalitních výsledků kalibrace. Celkem bylo oběma stroji dohromady registrováno 591 záznamů.

5.3.1 Měření fyzikálních vlastností vzduchu

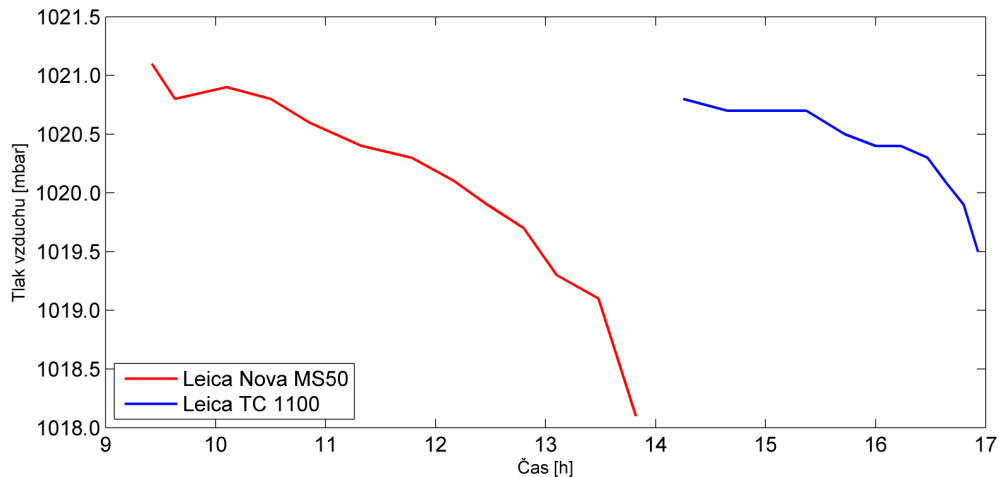
V průběhu měření byly průběžně zaznamenávány a zohledňovány hodnoty teploty a tlaku vzduchu. Hodnoty byly zároveň nastavovány přímo do přístroje, čímž odpadá nutnost zavádět korekce manuálně při zpracování dat.

Zároveň s měřením teploty a tlaku byl zaznamenáván čas a je tedy možné sledovat průběh těchto veličin (viz grafy na obrázku 10 a 11).



Obrázek 10: Průběh teplotních změn

V první fázi byly hodnoty zaznamenávány přibližně v intervalu 30 minut, což zhruba odpovídalo době měření na 1 pilíři. Většinou byla tedy na každém stanovišti stroje teplota a tlak měřena jednou. Pokud však došlo k viditelné změně podmínek, jako tomu bylo záhy po začátku měření, byly tyto fyzikální korekce zohledňovány i v nepravidelných intervalech.



Obrázek 11: Průběh změn tlaku vzduchu

Ve druhé fázi již byly fyzikální korekce zaváděny vždy při přemístění stroje na nové stanoviště, přičemž počet měřených délek na stanovištích se postupně snižoval, a zmenšoval se tedy i časový rozestup jejich zaznamenávání.

Jak je patrné z prvního grafu, teplota vzduchu měla poměrně kolísavý průběh, a to především v dopoledních hodinách. V odpoledních hodinách se již teplota částečně ustálila a měnila se plynuleji.

Při měření tlaku vzduchu nebyly zaznamenány žádné prudké změny. Z druhého grafu je patrné, že tlak vzduchu v rámci obou fází měření postupně klesal a to nejen v závislosti na čase, jak je v grafu znázorněno, ale přirozeně také na poloze měření. Kromě teploty a tlaku vzduchu ovlivňuje měřítko dálkoměru také relativní vlhkost vzduchu, ovšem v minimální míře. Proto nebyla při měření zohledňována a pokud stroj nastavení vlhkosti umožňoval, byla hodnota ponechána na výchozí hodnotě 60 %, což přibližně odpovídá běžným podmínkám.

Fyzikální vlastnosti vzduchu byly v našem případě měřeny pouze v místě postavení stroje. V lepším případě by mohly být hodnoty zaznamenávány z více stanovišek zároveň a v kratších rozestupech. Ani tak by však nebylo možné se nehomogenosti prostředí v terénních podmínkách zcela vyhnout.

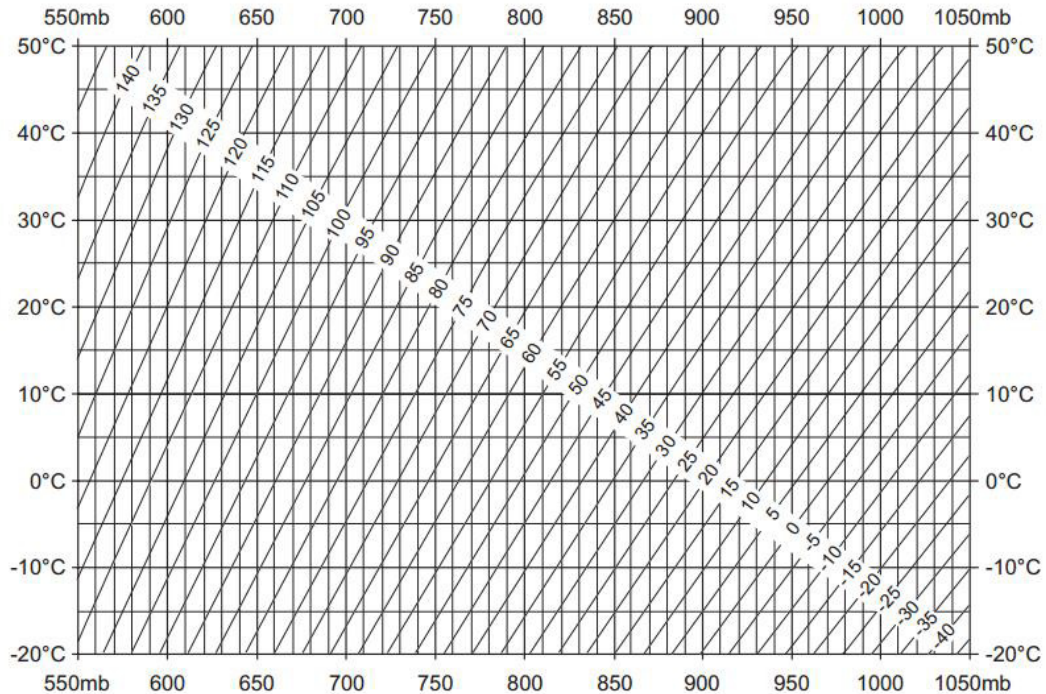
Hodnotu atmosferické korekce je možné vypočítat pomocí různých vzorců. Podle [14] používají přístroje Leica vzorec:

$$\Delta D_1 = 283,04 - \left[\frac{0,29195 \cdot p}{1 + \alpha \cdot t} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{1 + \alpha \cdot t} \cdot 10^x \right], \quad (5)$$

kde p je tlak vzduchu [mbar], t je teplota vzduchu [$^{\circ}C$], h je relativní vlhkost vzduchu [%] a α je konstanta o hodnotě $1/273,16$. Dále

$$x = \frac{7,5 \cdot t}{237,3 + t} + 0,7857. \quad (6)$$

Závislost atmosferické korekce na teplotě a tlaku vzduchu je patrná z diagramu na obrázku č. 11. Hodnoty korekcí pro měření v rámci této práce se pohybují v rozmezí od -7 do 2 ppm. Při nejvyšší hodnotě korekce (-7 ppm) je největší délka etalonu (1450 m) ovlivněna asi o 1 cm. Vliv této korekce je tedy evidentní a je třeba ji zohledňovat [14].



Obrázek 12: Vliv teploty a tlaku na fyzikální korekci [14]

6 Zpracování dat

Pro zpracování dat byly zvoleny dva typy vyrovnání. První je vyrovnání přímých měření se systémem podmínek, jejímž výsledkem je jednotková střední chyba měření s daným přístrojem. Druhým způsobem je vyrovnání zprostředkujících pozorování ve formě regresní přímky, jejímž výsledkem je hodnota adiční a násobné konstanty. Druhé vyrovnání vychází z postupů, které používá při kalibraci VÚGTK.

6.1 Vyrovnání přímého měření se systémem podmínek

Výpočty vycházejí z [16]. Základní soubor měření z první fáze je složen ze dvou částí. V první části jsou délky měřeny tam, seřazené podle stanovisek měření. Druhou část tvoří tytéž délky měřené zpět. Základní soubor druhé fáze je pak omezen pouze na první část.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} l_{1,tam} \\ \vdots \\ l_{n,tam} \\ l_{1,zpět} \\ \vdots \\ l_{n,zpět} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Dále je potřeba stanovit podmínkové rovnice. Pro vyrovnání druhé fáze byly použity rovnice v podobě součtů

$$l_{i,i+1} + l_{i+1,i+2} + \dots + l_{n-1,n} - l_{i,n} = 0. \quad (8)$$

Pro první fázi bylo navíc potřeba zohlednit délky měřené zpět. Potom platí

$$l_{i,i+1,tam} + l_{i,i+1,zpět} + \dots + l_{n-1,n,tam} + l_{n-1,n,zpět} - l_{i,n,tam} - l_{i,n,zpět} = 0. \quad (9)$$

Navíc přibudou podmínky

$$l_{i,tam} - l_{i,zpět} = 0 \quad (10)$$

zajišťující rovnost délek tam a zpět. Protože však pilíře základny nejsou polohově umístěny přesně v přímce, je potřeba nejprve stanovit výchylky od pomyslné přímky tvořené počátečním a koncovým bodem základny. Současně s délkami a zenitovými úhly byly měřeny i vodorovné směry, což umožňuje výpočet souřadnic pilířů v místní souřadnicové soustavě. To bylo provedeno vyrovnáním sítě v SW Kokeš. Za pevné body byly zvoleny body 1 a 12 se souřadnicemi $1 = [0, 0]$ a $12 = [0, 1450.0055]$. Souřadnice X bodu 12 je rovna nominální délce $l_{1,12}$. Výsledné souřadnice Y jsou pak rovny vychýlení pilířů od přímky. Pythagorovou větou lze pak snadno naměřené délky přepočítat tak, aby odpovídaly délce zařazené do přímky.

Derivací podmínkových rovnic podle určovaných parametrů dostáváme matici plánu **B**. Pro vyrovnání byla zvolena váhová matice

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \frac{c}{\sigma_{l_1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{c}{\sigma_{l_2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{c}{\sigma_{l_n}} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

kde c je konstanta zvolená tak, aby váhy dosahovaly přibližně hodnoty blízké 1 a σ_{l_i} je střední chyba příslušné délky udávaná výrobcem. Ze všech hodnot σ_{l_i} byla vypočtena průměrná hodnota a použita jako konstanta c .

Přibližné hodnoty \mathbf{l}_0 , které jsou pro výpočty nezbytné, lze získat například zaokrouhlením měřených hodnot z vektoru \mathbf{x} . Dále je potřeba zavést tzv. vektor redukováných měření, který udává difference přibližných hodnot od měřených, tedy

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{l}_0. \quad (12)$$

Protože dosazením měřených hodnot za skutečné do (8) nebo do (9) a (10) většinou nebudou podmínkové rovnice splněny, vzniká dosazením vektor, který udává míru splnění těchto podmínek

$$\mathbf{b} = \mathbf{B}\mathbf{l}_0 \quad (13)$$

a následně vektor uzávěrů

$$\mathbf{u} = \mathbf{b} + \mathbf{B}\mathbf{y}. \quad (14)$$

Dosazením do normálních rovnic získáme difference přibližných hodnot od vyrovnaných

$$\Delta\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{y} - \mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T(\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}^T)^{-1}(\mathbf{b} + \mathbf{B}\mathbf{y}). \quad (15)$$

Odtud již lze určit vyrovnané hodnoty

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l}_0 + \Delta\hat{\mathbf{l}}. \quad (16)$$

Pro určení charakteristiky přesnosti celého měření (jednotkové střední chyby) je potřeba nejprve stanovit hodnoty oprav měřených hodnot od vyrovnaných

$$\mathbf{v} = \Delta\hat{\mathbf{l}} - \mathbf{y}. \quad (17)$$

Odtud již lze přímo určit odhad jednotkové střední chyby měření jako

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n + q - k}}, \quad (18)$$

kde n je počet měřených hodnot, k je počet určovaných parametrů a q je počet podmínek.

6.2 Diference měření tam a zpět

Dvojice měřených délek tam a zpět z první fáze se liší většinou pouze v řádu desetin milimetrů. U několika délek jsou však rozdíly několikanásobně větší (viz tabulka na obrázku č. 14). Atmosférické korekce byly zaváděny v intervalu přibližně 30 minut. Za tak dlouhou dobu se však podmínky mohou snadno změnit. Předpokládáme-li,

že hodnoty zavedených korekcí v danou dobu jsou správné a že změny mezi jejich zavedením jsou lineární, lze pomocí interpolace snadno dopočítat předpokládanou hodnotu konstanty pro každou měřenou délku a posléze rozdíl interpolované a nastavené konstanty. Rozdílem těchto odchylek pro délku měřenou tam a zpět pak získáme předpokládaný rozdíl délky tam a zpět ve formě konstanty ppm. Jejím uplatněním na příslušné délky pak získáme předpokládané difference délek přímo v délkových jednotkách. Po vizuálním porovnání těchto předpokládaných a skutečných rozdílů (obrázky č. 13 a 14) je patrná jejich závislost. Je tedy pravděpodobné, že rozdíly mezi délkami tam a zpět byly způsobeny proměnlivostí fyzikálních vlastností atmosféry mezi zavedením korekcí.

Stanovisko	Cíl [mm]										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,0	0,1	1,3	0,9	0,3	0,3	0,3	0,6	0,5	0,9	3,0
2		0,0	0,6	0,2	0,0	0,3	0,2	0,1	0,4	0,8	0,4
3			0,5	0,0	0,3	0,8	0,4	1,0	1,9	2,7	2,2
4				0,6	0,8	0,8	2,2	1,3	0,7	0,1	0,3
5					0,1	0,6	0,0	1,1	2,0	3,1	3,1
6						0,2	0,4	1,8	2,6	3,5	3,2
7							0,4	0,5	0,3	0,8	0,3
8								0,2	0,5	0,9	0,4
9									0,0	0,3	0,3
10										0,1	0,1
11											0,1

Obrázek 13: Předpokládané difference

Stanovisko	Cíl [mm]										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,0	0,1	0,3	0,0	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	0,8	3,9
2		0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,1
3			0,1	0,2	0,1	0,1	0,6	0,0	0,4	2,2	1,6
4				0,2	0,3	0,4	0,9	0,6	0,6	0,8	3,0
5					0,3	0,6	0,7	1,6	2,3	3,1	1,9
6						0,0	0,0	1,4	2,1	2,5	2,0
7							0,1	0,3	0,9	1,2	0,3
8								0,2	0,6	1,1	0,2
9									0,1	0,3	0,1
10										0,1	0,0
11											0,4

Obrázek 14: Skutečné difference

6.3 Vyrovnání na regresní přímku

Cílem kalibrace ED je určení číselné hodnoty adiční a násobné konstanty a jejich příslušných charakteristik přesnosti. Princip výpočtů je založen na určení koeficientů regresní přímky, kdy do osy x jsou položeny hodnoty nominálních délek a do osy y rozdíly naměřených délek a délek nominálních. Koeficienty regresní přímky pak odpovídají dvěma hledaným konstantám. Konkrétní uvedené výpočty vychází z [15] a [17]. Bohužel nejsou k dispozici nominální délky všech kombinací délek etalonu, proto byla pro toto vyrovnání použita pouze část měření.

Regresní přímka obecně umožňuje aproximovat lineární závislost dvou veličin, přičemž jedna je obvykle získána měřením a druhá známá, považovaná za správnou, nebo se zanedbatelnou chybovostí. Výsledná regresní přímka má pak tvar

$$y = k_0 + k_1 \cdot x, \quad (19)$$

kde k_0 a k_1 jsou koeficienty regresní přímky, přičemž k_0 při kalibraci odpovídá hodnotě adiční konstanty a k_1 hodnotě násobné konstanty. Při výpočtech jsou pak do osy x položeny hodnoty nominálních délek a do osy y difference

$$y_i = l_i - x_i, \quad (20)$$

kde l_i jsou naměřené délky a x_i nominální délky.

Pro výpočet odhadu koeficientů regresní přímky bylo použito vyrovnání zprostředkujících měření. Za vektor měření budeme brát \mathbf{y} . Po dosazení (20) do (19) a po úpravě dostáváme soustavu zprostředkujících rovnic, nebo-li vektorový funkční vztah mezi určovanými parametry a měřenými veličinami, ve tvaru

$$l_i = f(\mathbf{k}) = k_0 + k_1 \cdot x_i - x_i. \quad (21)$$

Po derivaci rovnic podle určovaných parametrů, tedy podle k_0 a k_1 , dostáváme matici plánu

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_{38} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Matice vah byla zvolena stejně jako v předchozím vyrovnání, tedy viz (11). Přibližné hodnoty koeficientů regresní přímky \mathbf{k}_0 lze vypočítat ze dvou měřených délek, například z nejkratší a nejdelší délky etalonu ($l_{1,2}$ a $l_{1,12}$) jako

$$k_{0_1} = \frac{y_{1,12} - y_{1,2}}{x_{1,12} - x_{1,2}}, \quad (23)$$

$$k_{0_0} = y_{1,2} \cdot k_{0_1} \cdot x_{1,2}. \quad (24)$$

Opět zavedeme vektor redukovaných měření

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - f(\mathbf{k}_0). \quad (25)$$

Po vyřešení normálních rovnic

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \Delta \hat{\mathbf{k}} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{r} \quad (26)$$

dostáváme difference přibližných hodnot od vyrovnaných

$$\Delta \hat{\mathbf{k}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{r}. \quad (27)$$

Odtud již odhad vyrovnaných hodnot

$$\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{k}_0 + \Delta \hat{\mathbf{k}}. \quad (28)$$

Pro charakteristiku přesnosti koeficientů \mathbf{k} je opět potřeba vektor oprav

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\Delta\hat{\mathbf{k}} - \mathbf{r} \quad (29)$$

a následně odhad jednotkové střední chyby

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - m}}, \quad (30)$$

kde n je počet měřených hodnot a m počet určovaných parametrů. Střední chyby odhadnutých parametrů \mathbf{k} jsou pak rovny druhé odmocnině diagonálních prvků kovarianční matice

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{k}}} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}. \quad (31)$$

7 Zhodnocení dosažených výsledků

Prvotní zpracování dat (redukce šikmých délek na vodorovné, apod.) bylo provedeno v SW MS Excel 2013. Veškeré další výpočetní práce byly dokončeny v programu Matlab. Výsledkem prvního vyrovnání jsou odhady jednotkových středních chyb ($\hat{\sigma}_0$) obou fází měření.

Přístroj	$\hat{\sigma}_0$
Leica Nova MS50	1,2 mm
Leica 1001	1,7 mm

Tabulka 3: Odhady jednotkových středních chyb měření

Tyto chyby sice lze brát jako charakteristiku přesnosti přístrojů pro měření délek v rozsahu 25 - 1450 metrů, nelze z nich však vyčíst hodnoty adiční a násobné konstanty. Odhady těchto chyb jsou výsledkem druhého vyrovnání. Výsledky lze snadno porovnat s přesností udávanou výrobcem z následující tabulky.

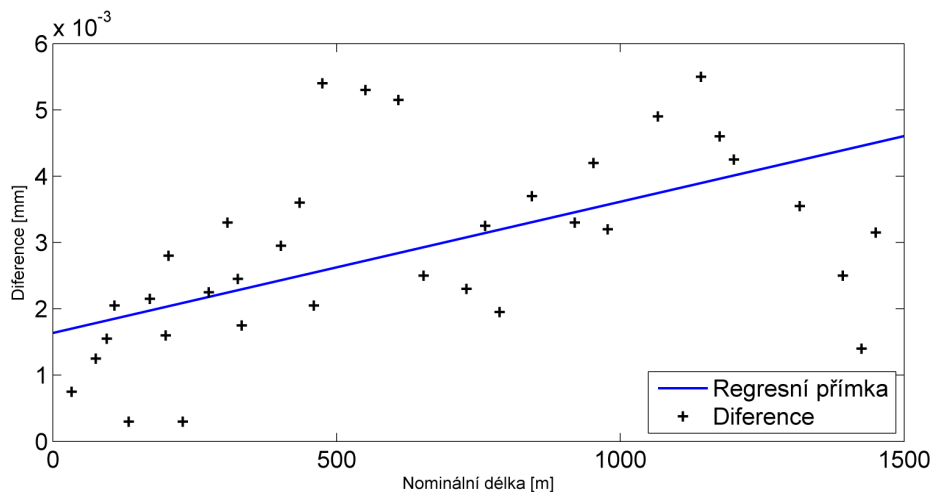
Přístroj	Přesnost od výrobce	Zjištěná přesnost	Střední chyby
Leica Nova MS50	1,0 mm + 1,5 ppm	1,6 mm + 2,0 ppm	0,3 mm + 0,5 ppm
Leica 1001	5,0 mm + 5,0 ppm	2,5 mm - 0,1 ppm	0,5 mm + 0,7 ppm

Tabulka 4: Zjištěné hodnoty konstant a jejich přesnost

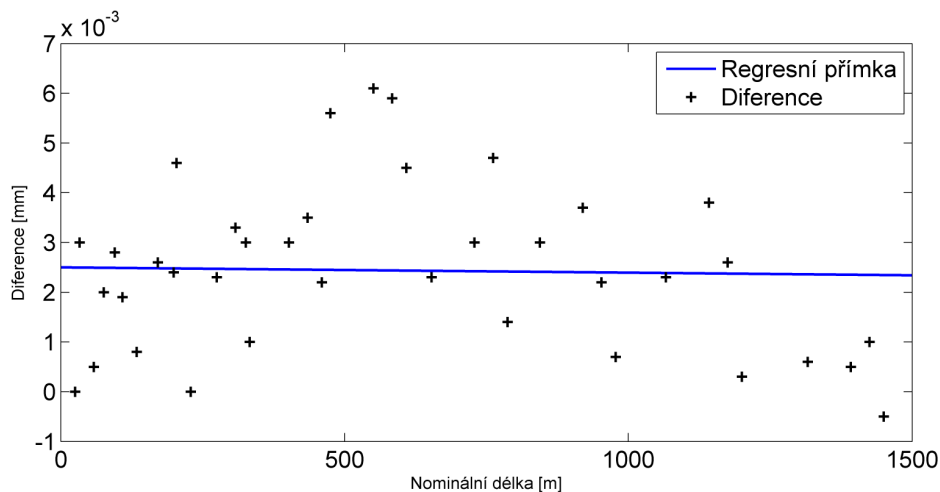
Výsledky jsou poměrně překvapivé. Zjištěná přesnost Leica Nova MS50, jakožto zástupce jednoho z nejmodernějších přístrojů dnešní doby, jsou mírně horší, než jakou udává výrobce. Naproti tomu zjištěná přesnost Leica 1001 je mnohonásobně lepší, než jakou výrobce udává. První fáze měření byla však zásadně ovlivněna atmosférickými podmínkami, což výsledky pravděpodobně nezanedbatelně ovlivnilo. Proto byl zvolen jednoduchý test odlehlosti, při němž bylo pro každou délku spočteno kritérium

$$|\sigma_{l_i} - (l_i - x_i)| \leq 3, 6, \quad (32)$$

kde σ_i je předpokládaná přesnost od výrobce, l_i naměřená délka a x_i nominální délka. Hodnota 3,6 pochází z prvního vyrovnání a je trojnásobkem odhadu jednotkové střední chyby. Celkem byly ze základního souboru první fáze vyřazeny 3 délky. Konkrétně jsou to délky $l_{1,2}$, $l_{1,3}$ a $l_{2,8}$. Zajímavé je, že poměrně velkých odchylek podle zmíněného kritéria dosahovaly délky spojené s pilíři 8 a 11. Testovací kritéria však pro tyto délky nebyly překročeny, tudíž byly délky v základním souboru ponechány.



Obrázek 15: Regresní přímka pro Leica Nova MS50



Obrázek 16: Regresní přímka pro Leica 1001

Celkově lze kalibraci hodnotit úspěšně, obzvláště v případě Leica 1001, nicméně i přesnost Leica Nova MS50 lze považovat za uspokojivou a srovnatelnou s výrobcem udávanou přesností.

Data naměřená s Leica Nova MS50 byla zaslána kalibrační laboratoři VÚGTK k nezávislému vyhodnocení. Výsledky (viz následující tabulka) jsou uváděny ve formě doplňkové adiční a násobné konstanty. Násobná konstanta zde není uvedena v jednotkách ppm, ale v milimetrech a udává hodnotu měřítkové chyby pro celkovou délku etalonu 1450 m. Do stejné formy byla dopočtena i vlastní násobná konstanta, aby bylo možné výsledky porovnat.

	Adiční konstanta	Násobná konstanta
Vlastní výsledky	1,6 mm	2,9 mm/1450 m
Výsledky VÚGTK	1,25 mm	3,88 mm/1450 m

Tabulka 5: Výsledky dodané VÚGTK

Kompletní výsledky viz kalibrační list uvedený v přílohách. Vzhledem k tomu, že nejsou známy přesné postupy VÚGTK a vlastní použité výpočty se pravděpodobně od výpočtů VÚGTK liší, nejsou ani výsledky totožné. Výsledky například ovlivňuje způsob zvolení vah pro vyrovnání. Také mohlo být přistupováno odlišně k identifikaci a odstranění odlehlých hodnot měření. I tak lze však výsledky považovat za srovnatelné.

8 Použitá literatura

- [1] Terminologická komise Českého úřadu zeměměřického a katastrálního. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. ©2005, [cit. 28. 1. 2015]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník/index.php>
- [2] Zákon č. 505/1990 Sb. ze dne 16. listopadu 1990, Zákon o metrologii.
- [3] Vyhláška č. 345/2002 Sb. ze dne 11. července 2002, Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu, kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu.
- [4] ČÚZK. *Metrologický řád resortu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního* [online]. Praha, 2009. Dostupné z: <http://tinyurl.com/hbvkdta>
- [5] ČSN ISO 17123-4. *Optika a optické přístroje - Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů - Část 4: Elektrooptické dálkoměry*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] HAMPACHER, M., RADOUCH, V. *Teorie chyb a vyrovnávací počet 10*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01704-4.
- [7] MICHALČÁK, S., SOKOL, Š. *Geodézia. Meranie uhlov a dĺžok*. 1. vyd. Bratislava: STU, 1999. ISBN 80-227-1163-2.
- [8] MIHALCEA, V., ONOSE, D. *EDM calibration - Instrument constants and errors* [online]. Bukurešť: 1 Decembrie 1918 University, 2014. [cit. 29. 1. 2016]. Dostupné z: <http://tinyurl.com/h5j6xh3>
- [9] HÁNEK, P., KOZA, P. *Geodézie pro SPŠ stavební*. 4. vyd. Praha: Sobotáles, 2010. ISBN 978-80-86817-36-1.
- [10] Geodetické centrum s.r.o. *Geoserver* [online]. ©2016, [cit. 18. 2. 2016]. Dostupné z: <http://www.geoserver.cz/>
- [11] *Gefos* [online]. ©2016, [cit. 18. 2. 2016]. Dostupné z: <http://www.gefos-leica.cz/cz/indexl.php>
- [12] LECHNER, J., ČERVINKA, L., KRATOCHVÍL, J., UMNOV, I. *Nový český státní etalon velkých délek Koštice* [online]. Zdiby: VÚGTK, 2007. [cit. 21. 3. 2016]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/odd25/kostice/geos.pdf>
- [13] *Opti-cal Survey Equipment Ltd.* [online]. ©2016, [cit. 21. 3. 2016]. Dostupné z: <http://surveyequipment.com/>

- [14] Leica Geosystems AG. *Leica MS50/TS50/TM50 User Manual* [online]. Heerbrugg, 2013. [cit. 22. 3. 2016].
Dostupné z: <http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/219/>
- [15] WEIGEL, J. *Teorie chyb a vyrovnávací počet I* [online]. Brno: VUT, 2004. [cit. 26. 4. 2016]. Dostupné z: <http://tinyurl.com/zvv5332>
- [16] WEIGEL, J. *Teorie chyb a vyrovnávací počet II* [online]. Brno: VUT, 2006. [cit. 26. 4. 2016]. Dostupné z: <http://tinyurl.com/j3237rw>
- [17] HEBÁK, P. *Regrese I. část*. 1. vyd. Praha: VŠE, 1998. ISBN 80-7079-909-9.

Seznam použitých zkratek

ED - Elektronický dálkoměr

VÚGTK - Výzkumný ústav geodetický topografický a kartografický

ČMI - Český metrologický úřad

ČÚZK - Český úřad zeměměřický a katastrální

MNČ - Metoda nejmenších čtverců

Seznam obrázků

Konfigurace bodů pro zjednodušenou metodu [5]

Konfigurace bodů pro úplnou metodu [5]

Postup měření pro úplnou metodu [5]

Osy teodolitu [7]

Nalepovací odrazný štítek

Schéma rozložení pilířů na podkladu ortofota [12]

Lokalizace etalonu

Leica Nova MS50 [13] a Leica 1001

Leica Nova MS50 při kalibračním měření

Průběh teplotních změn

Průběh změn tlaku vzduchu

Vliv teploty a tlaku na fyzikální korekci [14]

Předpokládané difference

Skutečné difference

Regresní přímka pro Leica Nova MS50

Regresní přímka pro Leica 1001

Seznam tabulek

Vybrané přístroje a jejich parametry seřazené podle ceny

Základní parametry testovaných přístrojů

Odhady jednotkových středních chyb měření

Zjištěné hodnoty konstant a jejich přesnost

Výsledky dodané VÚGTK

Seznam příloh

Nominální délky Státního etalonu velkých délek Koštice

Naměřené délky (Leica Nova MS50)

Naměřené délky (Leica 1001)

Záznam o měření teploty a tlaku vzduchu

Vstupní hodnoty pro regresní přímku (Leica Nova MS50)

Vstupní hodnoty pro regresní přímku (Leica 1001)

Místní souřadnice etalonu

Kalibrační list Leica Nova MS50

Přílohová část

Nominální délky etalonu Košnice

Stanovisko	Vodorovná délka [m]			
	1	2	3	4
1		25,0910	58,0495	133,8808
2	25,0909		32,9590	108,7899
3	58,0495	32,9590		75,8310
4	133,8802	108,7895	75,8309	

Stanovisko	Vodorovná délka [m]			
	5	6	7	8
1	228,9790	332,9580	459,8592	608,8415
2	203,8886	307,8673	434,7685	583,7509
3	170,9296	274,9083	401,8100	550,7921
4	95,0988	199,0774	325,9790	474,9616

Stanovisko	Vodorovná délka [m]			
	9	10	11	12
1	787,0674	977,8877	1199,9933	1450,0055
2	761,9767	952,7972	1174,9026	1424,9150
3	729,0180	919,8387	1141,9438	1391,9565
4	653,1873	844,0080	1066,1133	1316,1256

Měřené délky (Leica Nova MS50) - 1. část

Stanovisko	Vodorovná délka [m]					
	1	2	3	4	5	6
1		25,0924	58,0507	133,8808	228,9786	332,9559
		25,0924	58,0507	133,8808	228,9787	332,9558
		25,0924	58,0507	133,8808	228,9787	332,9559
2	25,0924		32,9584	108,7880	203,8853	307,8641
	25,0924		32,9584	108,7881	203,8856	307,8641
	25,0923		32,9584	108,7880	203,8856	307,8640
3	58,0505	32,9580		75,8299	170,9272	274,9060
	58,0504	32,9581		75,8299	170,9273	274,9060
	58,0504	32,9581		75,8299	170,9271	274,9060
4	133,8801	108,7877	75,8297		95,0972	199,0755
	133,8803	108,7876	75,8295		95,0969	199,0757
	133,8803	108,7877	75,8297		95,0971	199,0754
5	228,9785	203,8861	170,9275	95,0974		103,9788
	228,9787	203,8860	170,9277	95,0974		103,9790
	228,9788	203,8861	170,9278	95,0973		103,9788
6	332,9566	307,8639	274,9063	199,0761	103,9784	
	332,9566	307,8639	274,9060	199,0760	103,9783	
	332,9565	307,8639	274,9061	199,0761	103,9783	
7	459,8576	434,7648	401,8069	325,9769	230,8796	126,9007
	459,8574	434,7648	401,8069	325,9768	230,8796	126,9006
	459,8575	434,7648	401,8069	325,9769	230,8795	126,9007
8	608,8370	583,7446	550,7873	474,9571	379,8593	275,8804
	608,8369	583,7444	550,7873	474,9573	379,8597	275,8802
	608,8370	583,7443	550,7875	474,9570	379,8594	275,8802
9	787,0662	761,9733	729,0158	653,1853	558,0878	454,1089
	787,0662	761,9734	729,0157	653,1854	558,0879	454,1090
	787,0662	761,9733	729,0156	653,1854	558,0880	454,1089
10	977,8854	952,7926	919,8350	844,0048	748,9072	644,9283
	977,8854	952,7928	919,8349	844,0049	748,9073	644,9284
	977,8855	952,7926	919,8350	844,0051	748,9069	644,9283
11	1199,9900	1174,8975	1141,9395	1066,1093	971,0117	867,0326
	1199,9896	1174,8976	1141,9293	1066,1089	971,0118	867,0331
	1199,9898	1174,8974	1141,9396	1066,1095	971,0122	867,0330
12	1450,0063	1424,9135	1391,9558	1316,1249	1221,0274	1117,0481
	1450,0061	1424,9133	1391,9554	1316,1251	1221,0268	1117,0480
	1450,0064	1424,9137	1391,9556	1316,1250	1221,0270	1117,0479

Měření délký (Leica Nova MS50) - 2. část

Stanovisko	Vodorovná délka [m]					
	7	8	9	10	11	12
1	459,8568	608,8359	787,0650	977,8838	1199,9880	1449,9986
	459,8567	608,8357	787,0644	977,8834	1199,9886	1449,9983
	459,8568	608,8354	787,0647	977,8837	1199,9883	1449,9984
2	434,7649	583,7443	761,9735	952,7933	1174,8985	1424,9138
	434,7651	583,7443	761,9737	952,7934	1174,8985	1424,9136
	434,7650	583,7443	761,9735	952,7933	1174,8985	1424,9137
3	401,8072	550,7863	729,0158	919,8360	1141,9395	1391,9522
	401,8072	550,7861	729,0159	919,8354	1141,9409	1391,9526
	401,8071	550,7862	729,0155	919,8360	1141,9412	1391,9525
4	325,9762	474,9553	653,1841	844,0040	1066,1075	1316,1193
	325,9762	474,9552	653,1841	844,0038	1066,1080	1316,1185
	325,9761	474,9554	653,1844	844,0034	1066,1073	1316,1194
5	230,8808	379,8610	558,0911	748,9115	971,0183	1221,0308
	230,8808	379,8608	558,0907	748,9119	971,0181	1221,0304
	230,8808	379,8609	558,0913	748,9118	971,0181	1221,0314
6	126,9008	275,8803	454,1118	644,9326	867,0380	1117,0523
	126,9007	275,8804	454,1115	644,9325	867,0383	1117,0520
	126,9006	275,8803	454,1116	644,9324	867,0375	1117,0518
7		148,9792	327,2081	518,0289	740,1340	990,1471
		148,9793	327,2082	518,0289	740,1341	990,1470
		148,9791	327,2083	518,0288	740,1340	990,1469
8	148,9788		178,2287	369,0493	591,1545	841,1671
	148,9791		178,2289	369,0492	591,1546	841,1673
	148,9790		178,2289	369,0492	591,1545	841,1671
9	327,2075	178,2283		190,8196	412,9247	662,9367
	327,2076	178,2284		190,8195	412,9245	662,9368
	327,2076	178,2284		190,8195	412,9247	662,9367
10	518,0272	369,0481	190,8193		222,1046	472,1167
	518,0272	369,0482	190,8192		222,1047	472,1166
	518,0270	369,0481	190,8192		222,1046	472,1166
11	740,1318	591,1526	412,9241	222,1045		250,0120
	740,1317	591,1522	412,9240	222,1045		250,0121
	740,1315	591,1521	412,9239	222,1045		250,0120
12	990,1464	841,1668	662,9366	472,1166	250,0112	
	990,1464	841,1668	662,9368	472,1165	250,0112	
	990,1464	841,1670	662,9364	472,1165	250,0111	

Měřené délky (Leica 1001) - 1. část

Stanovisko	Vodorovná délka [m]					
	1	2	3	4	5	6
1	25,091	58,049	133,880	228,979	332,957	459,857
	25,091	58,049	133,880	228,979	332,957	459,857
	25,091	58,049	133,880	228,979	332,957	459,857
2		32,956	108,788	203,884	307,864	434,766
		32,956	108,788	203,884	307,863	434,766
		32,956	108,788	203,884	307,863	434,765
3			75,829	170,927	274,906	401,807
			75,829	170,927	274,906	401,807
			75,829	170,927	274,906	401,808
4				95,096	199,075	325,976
				95,096	199,075	325,976
				95,096	199,075	325,976
5					103,977	230,878
					103,977	230,878
					103,977	230,878
6						126,900
						126,900
						126,900
7						
8						
9						
10						
11						

Měřené délky (Leica 1001) - 2. část

Stanovisko	Vodorovná délka [m]				
	7	8	9	10	11
1	608,837	787,066	977,887	1199,993	1450,006
	608,838	787,066	977,887	1199,993	1450,006
	608,837	787,066	977,887	1199,993	1450,005
2	583,745	761,972	952,795	1174,900	1424,914
	583,745	761,972	952,795	1174,900	1424,914
	583,745	761,972	952,795	1174,901	1424,914
3	550,786	729,015	919,835	1141,941	1391,956
	550,786	729,015	919,836	1141,940	1391,956
	550,786	729,015	919,835	1141,940	1391,956
4	474,955	653,185	844,005	1066,111	1316,125
	474,956	653,185	844,005	1066,111	1316,125
	474,955	653,185	844,005	1066,111	1316,125
5	379,858	558,087	748,906	971,013	1221,026
	379,858	558,087	748,906	971,013	1221,026
	379,858	558,087	748,907	971,013	1221,026
6	275,879	454,107	644,927	867,032	1117,045
	275,879	454,107	644,927	867,032	1117,045
	275,879	454,107	644,927	867,032	1117,045
7	148,978	327,206	518,024	740,129	990,141
	148,978	327,206	518,024	740,129	990,141
	148,978	327,206	518,024	740,129	990,141
8		178,226	369,046	591,150	841,163
		178,226	369,046	591,150	841,163
		178,226	369,046	591,150	841,163
9				412,922	662,934
				412,922	662,934
				412,922	662,933
10				222,102	472,115
				222,103	472,114
				222,102	472,114
11					250,009
					250,009
					250,009

Záznam o měření teploty a tlaku vzduchu

Záznam o měření teploty a tlaku vzduchu			
Datum: 7. 3. 2016		Přístroj: Greisinger GTD 1100	
Pilíř	Čas	Teplota [°C]	Tlak [mbar]
1	9:25	12,1	1021,1
1	9:38	7,3	1020,8
2	10:06	9,5	1020,9
3	10:30	10,4	1020,8
4	10:51	8,6	1020,6
5	11:20	16,2	1020,4
6	11:47	11,9	1020,3
7	12:10	13,5	1020,1
8	12:28	12,1	1019,9
9	12:48	11,6	1019,7
10	13:06	11,7	1019,3
11	13:29	12,8	1019,1
12	13:49	13,8	1018,1
1	14:15	14,0	1020,8
2	14:39	14,4	1020,7
3	15:01	14,7	1020,7
4	15:22	14,4	1020,7
5	15:43	14,1	1020,5
6	16:00	12,7	1020,4
7	16:14	11,0	1020,4
8	16:28	11,3	1020,3
9	16:38	10,9	1020,1
10	16:48	11,0	1019,9
11	16:56	11,3	1019,5

Vstupní hodnoty pro vyrovnání (Leica Nova MS50)

Stanovisko	Vodorovná délka [m]					
	1	2	3	4	5	6
1		25,0924	58,0507	133,8808	228,9787	332,9559
2	25,0924		32,9584	108,7880	203,8855	307,8641
3	58,0504	32,9581		75,8299	170,9272	274,9060
4	133,8802	108,7877	75,8296		95,0971	199,0755
5	228,9787	203,8861	170,9277	95,0974		103,9789
6	332,9566	307,8639	274,9061	199,0761	103,9783	
7	459,8575	434,7648	401,8069	325,9769	230,8796	126,9007
8	608,8370	583,7444	550,7874	474,9571	379,8595	275,8803
9	787,0662	761,9733	729,0157	653,1854	558,0879	454,1089
10	977,8854	952,7927	919,8350	844,0049	748,9071	644,9283
11	1199,9898	1174,8975	1141,9361	1066,1092	971,0119	867,0329
12	1450,0063	1424,9135	1391,9556	1316,1250	1221,0271	1117,0480

Stanovisko	Vodorovná délka [m]					
	7	8	9	10	11	12
1	459,8568	608,8357	787,0647	977,8836	1199,9883	1449,9984
2	434,7650	583,7443	761,9736	952,7933	1174,8985	1424,9137
3	401,8072	550,7862	729,0157	919,8358	1141,9405	1391,9524
4	325,9762	474,9553	653,1842	844,0037	1066,1076	1316,1191
5	230,8808	379,8609	558,0910	748,9117	971,0182	1221,0309
6	126,9007	275,8803	454,1116	644,9325	867,0379	1117,0520
7		148,9792	327,2082	518,0289	740,1340	990,1470
8	148,9790		178,2288	369,0492	591,1545	841,1672
9	327,2076	178,2284		190,8195	412,9246	662,9367
10	518,0271	369,0481	190,8192		222,1046	472,1166
11	740,1317	591,1523	412,9240	222,1045		250,0120
12	990,1464	841,1669	662,9366	472,1165	250,0112	

Vstupní hodnoty pro vyrovnání (Leica 1001)

Stanovisko	Vodorovná délka [m]					
	1	2	3	4	5	6
1	25,091	58,049	133,880	228,979	332,957	459,857
2		32,956	108,788	203,884	307,864	434,765
3			75,829	170,927	274,906	401,807
4				95,096	199,075	325,976
5					103,977	230,878
6						126,900
7						
8						
9						
10						
11						

Stanovisko	Vodorovná délka [m]				
	7	8	9	10	11
1	608,837	787,066	977,887	1199,993	1450,006
2	583,745	761,972	952,795	1174,900	1424,914
3	550,786	729,015	919,835	1141,940	1391,956
4	474,956	653,185	844,005	1066,111	1316,125
5	379,858	558,087	748,906	971,013	1221,026
6	275,879	454,107	644,927	867,032	1117,045
7	148,978	327,206	518,024	740,129	990,141
8		178,226	369,046	591,150	841,163
9				412,922	662,934
10				222,102	472,114
11					250,009

Souřadnice pilířů etalonu

bod	Y [m]	X [m]	σ_y [mm]	σ_x [mm]
1	0,0000	0,0000	-	-
2	0,0397	25,0929	0,1	0,2
3	-0,0183	58,0510	0,2	0,2
4	-0,0076	133,8813	0,3	0,2
5	-0,0047	228,9782	0,5	0,2
6	-0,0040	332,9568	0,7	0,3
7	0,0257	459,8583	0,7	0,3
8	0,0285	608,8377	0,8	0,3
9	0,0123	787,0669	0,9	0,3
10	0,0140	977,8868	1,0	0,3
11	-0,0236	1199,9918	1,0	0,3
12	0,0000	1450,0055	-	-



Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v. v. i.
Ústecká 98, 250 66 Zdiby
Kalibrační laboratoř

Kalibrační list č.: VÚGTK/39564/2016

Datum vystavení: 17.5.2016

Stránka 1 z 2

Zadavatel:	Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 2732/8, 306 14 Plzeň
Datum přijetí měřidla:	7.3.2016
Měřidlo:	Pracovní měřidlo nestanovené, totální stanice Leica Nova MS 50
Výrobní číslo:	369328
Inventární číslo:	52593
Použitý etalon:	Státní etalon délky 25 m až 1450 m ev. č. ECM 110-13/08-041, KL č. 38682/2015
Předpisy:	Kalibrační postup č. 5/2012 Délky u dálkoměrů a totálních stanic ČSN ISO 8322-10 Rozdíl mezi odraznými terči a hranoly pro měření vzdálenosti do 150 m ČSN ISO 17123-4 Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Elektrooptické dálkoměry EA-04/02 M: 2013 Metodika vyjadřování nejistot měření při kalibracích
Podmínky pro kalibraci:	Teplota: od + 7,3° C do + 16,2° C $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, tlak od 1018,1 hPa do 1021,1 hPa
Místo kalibrace:	Státní etalon délky 25 m až 1450 m ev. č. ECM 110-13/08-041, Koštice

Kalibrační list může být rozšiřován v celkovém počtu stran beze změn. Změny a doplňky mohou být provedeny pouze laboratoří, která dokument vystavila.

Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i. – Kalibrační laboratoř

<http://kalibrace.vugtk.cz>, tel: +420 226 802 338, fax: +420 284 890 056, Ústecká 98, 25066 Zdiby

Výsledky měření na hranol:

Konstanty nastavené v přístroji během měření:

hodnota ppm (násobná konstanta přístroje) viz. tabulka

hodnota pcm (adiční konstanta hranolu) je 0 mm

Pilíř	Čas	Teplota [°C]	Tlak [hPa]	PPM
1	9:25	12,1	1021,1	-2
1	9:38	7,3	1020,8	-7
2	10:06	9,5	1020,9	-5
3	10:30	10,4	1020,8	-4
4	10:51	8,6	1020,6	-6
5	11:20	16,2	1020,4	2
6	11:47	11,9	1020,3	-2
7	12:10	13,5	1020,1	0
8	12:28	12,1	1019,9	-2
9	12:48	11,6	1019,7	-2
10	13:06	11,7	1019,3	-2
11	13:29	12,8	1019,1	-1
12	13:49	13,8	1018,1	0

Doplňková adiční konstanta: + 1,25 mm

Doplňková násobná konstanta: + 3,88 mm/1450 m

Standardní nejistota určení doplňkové adiční konstanty je $\pm 0,52$ mmStandardní nejistota určení doplňkové násobné konstanty je $\pm 1,00$ mm**Poznámka:** Hodnoty jsou platné pro délky do 1450 m, znaménka u konstant mají korekční charakter.**Celková rozšířená nejistota měření je $U = Q[1,4 \text{ mm}; 3,6 \text{ mm} \cdot L_{(km)}]$,***kde: Q vyjadřuje kvadratický součet (druhá odmocnina součtu kvadrátů jednotlivých složek nejistot),* *$L_{(km)}$ je hodnota měřené délky v kilometrech.*Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardních nejistot měření a koeficientu rozšíření $k = 2$, který při normálním rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-04/02 M: 2013 Metodika vyjadřování nejistot měření při kalibracích.**Poznámka:** Vlastní měření proběhlo dle specifické rozšířené metodiky. Pro účely stanovení metrologických charakteristik dle tohoto kalibračního listu byla využita data standardního rozsahu.

Dne 7.3.2016 kalibraci provedl: H. Marek

Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v.v.i.
Ústecká 98, 250 66 Zdíby
-10-


Ing. J. Lechner, CSc.
vedoucí KL

Konec kalibračního listu

*Kalibrační list může být rozšiřován v celkovém počtu stran beze změn. Změny a doplňky mohou být provedeny pouze laboratoří, která dokument vystavila.***Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i. – Kalibrační laboratoř**

http://kalibrace.vugtk.cz, tel: +420 226 802 338, fax: +420 284 890 056, Ústecká 98, 25066 Zdíby