



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

ANALÝZA POUŽITELNOSTI TRIGONOMETRICKÉ NIVELACE NA ŽELEZNICI

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF TRIGONOMETRIC LEVELING ON RAILWAYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mykhailo Radchenko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav geodézie
Student: **Mykhailo Radchenko**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25
Studijní program: B0532A260001 Geodézie a kartografie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza použitelnosti trigonometrické nivelace na železnici

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vykonejte testovací měření metodou trigonometrické nivelace. Analyzujte přesnost metody s ohledem na její použití na železnici pro určení výšek bodů železničního bodového pole, popř. zajišťovacích značek. Experimentální měření vykonajte na kalibrační základně a také v terénních podmínkách. Formulujte zásady vhodného měřického postupu. Zhodnoťte dosažené výsledky a přesnost.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Analýza použitelnosti trigonometrické nivelace na železnici

Seznam doporučené literatury a podklady:

BÖHM, J., RADOUCH, V., HAMPACHER, M. – Teorie chyb a vyrovnávací počet, GKP Praha, 1990.

HRADÍLEK, L. - Vysokohorská geodézie. Nakladatelství Academia, 1984.

KÁDNER, S., SKALICKÝ, J., NOVÁK, Z., BIŇOVEC, V. - Železniční geodézie a kartografie. NADAS, Praha 1986.

MICHALČÁK, O., VOSIKA, O., VESELÝ, M., NOVÁK, Z. – Inžinierska geodézia I, SNTL Praha 1985.

MICHALČÁK, O., VOSIKA, O., VESELÝ, M., NOVÁK, Z. – Inžinierska geodézia II, ALFA Bratislava 1990, ISBN 80-05-00678-0.

ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A. - Inženýrská geodézie - návody do cvičení I., VUT v Brně, PC-DIR spol. s r.o., Brno 1993, ISBN 80-214-0499-X.

ŠTRONER, M., HAMPACHER, M. - Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. České vysoké učení technické v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04900-6

SŽDC M20/MP007 - Železniční bodové pole

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2024

L. S.

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá analýzou použitelnosti trigonometrické nivelace na železnici s využitím přesných univerzálních měřicích stanic. Cílem je vyhodnotit použitelnost dané metody pro určení převýšení (výšek) bodů železničního bodového pole ve vztahu k požadavkům metodického pokynu SŽ M20/MP007, ověřit výsledky měření v reálných podmínkách, optimalizovat měřický postup a automatizovat výpočty návrhem skriptu pro zpracování měřených dat v programovacím jazyce Python. Ve výsledku se ukázalo, že metoda trigonometrické nivelace, při použití hranolu s minimální excentricitou a zavedení korekcí pro měřená převýšení u strmých záměr, by mohla doplnit aktuálně používanou metodu technické nivelace.

KLÍČOVÁ SLOVA

trigonometrická nivelace, převýšení, železnice, excentricita hranolu, korekce strmé záměry, automatizace výpočtů

ABSTRACT

This thesis focuses on analyzing the applicability of trigonometric leveling in railway surveying using high-precision total stations. The aim is to assess the suitability of the method for determining height differences (elevations) of points in the railway control network in relation to the requirements of the SŽ M20/MP007 guideline, to verify the results under real-world conditions, to optimize the measurement procedure, and to automate the calculations through a script developed in the Python programming language. The results indicate that trigonometric leveling, when using a prism with minimal eccentricity and introducing corrections for height differences measured on steep sight lines, could serve as a complement to the currently used method of differential leveling.

KEYWORDS

trigonometric levelling, height difference, railway, prism eccentricity, steep sight line correction, calculation automation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RADCHENKO, Mykhailo. *Analýza použitelnosti trigonometrické nivelace na železnici*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Analýza použitelnosti trigonometrické nivelace na železnici* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. 5. 2025

Mykhailo Radchenko
autor

PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Burešovi, Ph.D., za mimořádnou vstřícnost, četné konzultace a množství cenných rad, které mi během zpracování práce poskytl. Dále bych rád poděkoval své snoubence, bratrovi a rodině za neocenitelnou podporu po celou dobu mého studia a při psaní této práce.

Obsah

Úvod.....	10
1 Přehled o současném stavu řešené problematiky	11
2 Teoretický základ řešené problematiky	13
2.1 Výpočet převýšení metodou trigonometrické nivelace.....	13
2.2 Stanovení přesnosti převýšení	15
2.3 Odhad refrakčního koeficientu	16
2.4 Vliv excentricity hranolu	19
3 Použité přístroje a příslušenství	23
4 Ověření přesnosti totální stanice Sokkia SET 2030 R3 – 2" podle ISO 17123	24
4.1 Ověření přesnosti – horizontální směry	24
4.2 Ověření přesnosti – vertikální úhly	27
4.3 Ověření přesnosti – délky	29
5 Určení konstant odrazných hranolů pro použité přístroje.....	31
6 Kalibrace přístrojů za účelem korekce vlivu excentricit hranolů	32
6.1 Výškové základny v budově B Fakulty stavební VUT.....	32
6.2 Kalibrace přístroje Trimble M3 DR 2"	34
6.3 Kalibrace přístroje Sokkia SET 2030 R3 – 2"	36
6.4 Kalibrace přístroje Trimble S8.....	37
6.5 Kalibrace přístroje Topcon GT	38
7 Trigonometrická nivelace na výškové základně budovy B Fakulty stavební VUT	40
7.1 Zkušební měření převýšení mezi dvěma body na různé typy hranolů	40
7.2 Přístroj Sokkia SET 2030 R3 – 2"	42
7.3 Přístroj Trimble M3 DR 2"	45
7.4 Přístroj Trimble S8.....	47
8 Trigonometrická nivelace v reálných podmínkách.....	51
8.1 Kalibrační základna Brno-Jih	51

8.1.1 Měření totální stanicí Sokkia SET 2030 R3 – 2"	52
8.1.2 Měření totální stanicí Trimble S5	53
8.1.3 Vyhodnocení výsledků	54
8.1.4 Odhad refrakčního koeficientu	55
8.2 Lokalita Kraví hora	57
8.3 Lokalita ulice Veveří	59
8.4 Lokalita Brno-Židenice	61
9 Automatizace výpočtů pomocí skriptu v programovacím jazyce Python	65
10 Zhodnocení výsledků	72
Závěr.....	74
Seznam použitých zdrojů	75
Seznam zkratk	78
Seznam obrázků	79
Seznam tabulek	81

Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje na analýzu použitelnosti trigonometrické nivelace v oblasti železniční infrastruktury. Hlavními cíli práce jsou analýza přesnosti trigonometrické nivelace s ohledem na její využití při určování výšek bodů železničního bodového pole, popř. zajišťovacích značek, stanovení zásad vhodného měřického postupu, definování požadavků na přesnost měřicích přístrojů a vývoj softwarového nástroje, který umožňuje automatizaci výpočtů naměřených hodnot a generování výstupů pro další zpracování ve vyrovnávacím softwaru.

V první části práce je zpracována teoretická část zaměřená na výšková měření v železničním prostředí. Obsahuje přehled současného stavu dané oblasti, dále se věnuje principům trigonometrického určování převýšení, hodnocení jeho přesnosti a vlivu refrakce. Následuje odvození a testování použitelnosti korekce chyby způsobené šikmostí záměr. Tato chyba se výrazně projevuje při měření na odrazné hranoly, u nichž střed nitkového kříže není totožný s geometrickým středem hranolu a neleží na ose otáčení hranolu. Tento nesoulad může způsobovat chyby ve výsledně určených převýšeních, které lze eliminovat zavedením korekce.

Další část práce je věnována praktické aplikaci trigonometrické nivelace. Začíná přípravou měřicích přístrojů a stanovením součtových konstant hranolů. Následuje měření na výškové základně budovy B Fakulty stavební VUT, měření na kalibrační základně v Brně-Jihu a tři měření v reálných podmínkách na různých lokalitách – konkrétně na ulici Veveří, na Kraví hoře a na železniční stanici Brno-Židenice. Součástí je i vyhodnocení naměřených dat.

Další část práce je zaměřena na vývoj softwarového nástroje v programovacím jazyce Python, který slouží k automatizaci výpočtů zápisníků MAPA2, získaných měřeními. Část popisuje požadovaný formát těchto zápisníků a způsob jejich zpracování.

Poslední část se zaměřuje na zhodnocení dosažených výsledků.

1 Přehled o současném stavu řešené problematiky

Podle metodického předpisu Správy železnic [1] výšky bodů železničního bodového pole se určují pořadovou technickou nivelací ze středu, prováděnou v obou směrech, navázanou na známé výškové body, přičemž mezní odchylka rozdílu měření tam a zpět je dána vztahem $14\sqrt{R_{km}}$ mm. Mezi nejvýznamnější nevýhody této metody patří nutnost dodržování vodorovných záměr, což na svažitém terénu vede k výraznému nárůstu počtu měřických postavení a tím i ke zvýšení časové náročnosti měření. Použití metody trigonometrické nivelace by mohlo tuto nevýhodu eliminovat a významně zvýšit efektivitu měřických prací.

K odborné literatuře zabývající se problematikou trigonometrické nivelace patří například článek profesora Miroslava Haufa s názvem „*Trigonometrická nivelace novodobými přístroji*“, publikovaný v časopisu GaKO. V tomto článku autor dospěl k závěru, že trigonometrická nivelace je velmi vhodná pro výškově členité terény, zejména při kratších délkách záměr – konkrétně do 250 metrů. Dále uvádí, že pokud jsou délky záměr vpřed a vzad přibližně stejné, není nutné uvažovat vliv refrakce, zohlednění zakřivení Země je však stále nezbytné. Článek je rovněž relevantní tím, že autor zohledňuje vliv šikmosti záměry na výsledné převýšení. Vysvětluje, že pokud paprsek dopadá kolmo na vstupní stěnu odrazného hranolu, jeho dráha uvnitř je nejkratší. Při šikmém dopadu se však prodlužuje, což se následně projevuje jako změna součtové konstanty. Autor však nezohledňuje vliv excentricity hranolu a dospívá k závěru, že pokud se používají sklopitelné hranoly, není nutné uvažovat chybu způsobenou šikmostí záměry [2].

Mezi další relevantní publikace na téma trigonometrické nivelace patří článek „*Research on precise trigonometric leveling in place of first order leveling*“, který se zabývá možností nahradit nivelaci prvního řádu v Americe (first order leveling) metodou trigonometrické nivelace [3]. U nivelace prvního řádu podle amerických standardů činí mezní odchylka měření tam a zpět $3\sqrt{R_{km}}$ mm [4], což odpovídá požadavkům na nivelační síť III. řádu České státní nivelační sítě [5]. Autoři uvádějí, že zaměření 14 bodů v kopcovitém terénu metodou přesné nivelace trvalo 15 dní, zatímco trigonometrickou nivelací bylo možné zaměřit 20 bodů za pouhých 6 dní. Trigonometrická nivelace byla realizována plně automatizovaně, čímž došlo k výraznému zvýšení efektivity práce a

současně ke snížení nároků na pracovní sílu i materiální vybavení. Možnost nahrazení nivelace I. řádu trigonometrickou metodou byla ověřena porovnáním výšek 14 bodů získaných oběma způsoby měření. U všech 14 bodů byly rozdíly menší než 2,5 mm, což bylo pod stanovenou mezní odchylkou. Tyto výsledky potvrdily, že trigonometrická nivelace může za určitých podmínek nahradit nivelaci prvního řádu v Americe [3].

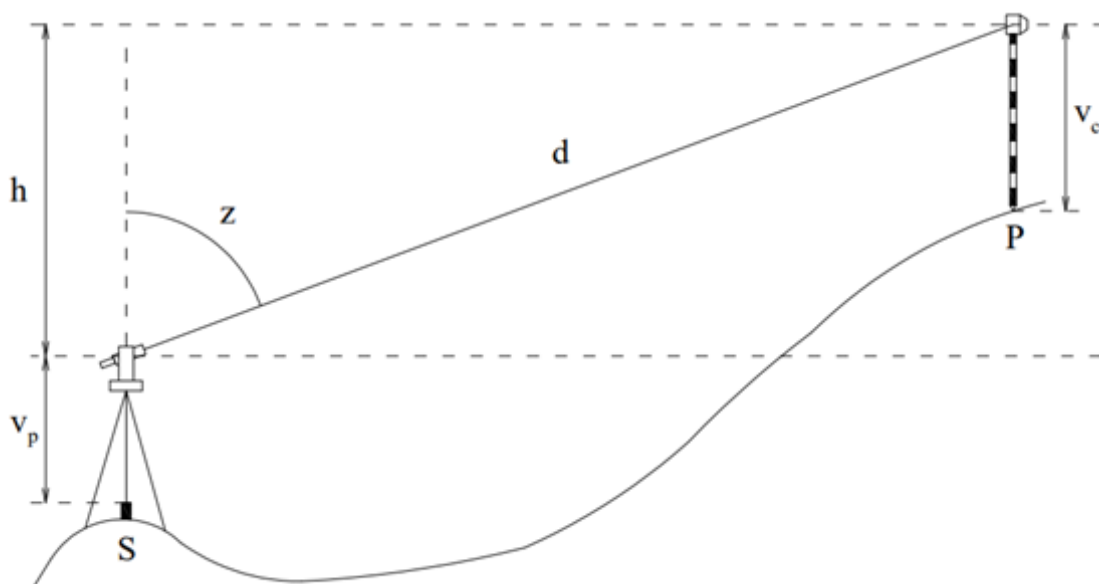
Článek „*Precise Height Determination Using Leap-Frog Trigonometric Leveling*“ porovnává metodu přesné nivelace s metodou trigonometrické nivelace na základě měření provedených ve stejné zkušební nivelační síti. Bylo zjištěno, že optimální délka záměry pro metodu trigonometrické nivelace činí přibližně 150 m. Přestože výsledná přesnost této metody ($1,87 \frac{mm}{\sqrt{km}}$) nedosahuje úrovně přesné nivelace ($0,59 \frac{mm}{\sqrt{km}}$ v tomto experimentu, běžně však kolem $1 \frac{mm}{\sqrt{km}}$), metoda trigonometrické nivelace se jeví jako vhodná alternativa v členitém terénu a při aplikacích, které nevyžadují extrémně vysokou přesnost (tj. přesnost horší než $2 \frac{mm}{\sqrt{km}}$). Z hlediska nákladů se metoda trigonometrické nivelace ukázala jako o 39 % levnější a přibližně 3,5× produktivnější než přesná nivelace. Autoři dále upozorňují, že ačkoliv klasická přesná nivelace poskytuje velmi přesné výsledky, je pomalejší, obtížněji proveditelná a ekonomicky náročnější. Naproti tomu metoda trigonometrické nivelace je rychlá, cenově dostupná a snadno použitelná i v různorodých terénních podmínkách [6].

2 Teoretický základ řešení problematiky

Kapitola se zaměřuje na shrnutí teoretických principů a konceptů, které tvoří základ řešení problematiky. Obsahuje klíčové informace, na které se bude odkazovat v dalších částech bakalářské práce, a poskytuje nezbytný kontext pro následné analýzy a návrhy.

2.1 Výpočet převýšení metodou trigonometrické nivelace

Trigonometrická nivelace představuje jednu z nejběžněji využívaných metod pro určování výškových rozdílů mezi body. Převýšení mezi dvěma body se určuje na základě řešení pravoúhlého trojúhelníka. Princip metody je znázorněn na obr. 1:

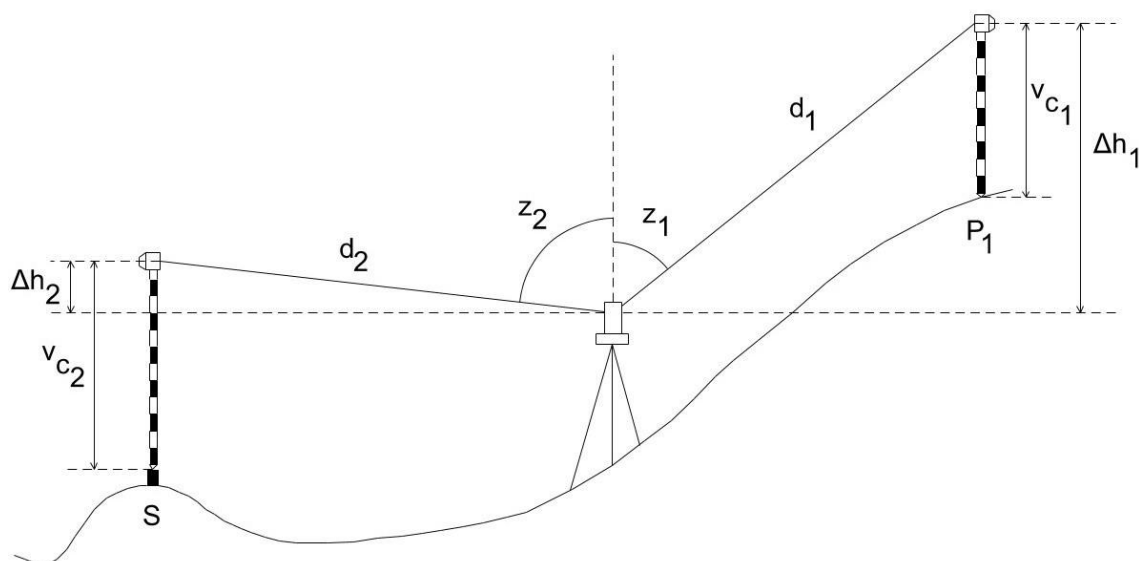


Obr. 1: Princip trigonometrického určení převýšení [7]

Z bodu S totální stanicí, jejíž výška je v_p , jsou změřeny šikmá délka d a zenitový úhel z na cíl, který je postaven na bod P a má výšku v_c . Převýšení z bodu S na bod P lze vypočítat pomocí vzorce (1), kde k je koeficient refrakce a R je poloměr Země [3], [6]:

$$\Delta H = d \cos z + (1 - k) \frac{(d \sin z)^2}{2R} + v_p - v_c \quad (1)$$

Při určování převýšení není nutné, aby přístroj stál přímo na bodech, mezi nimiž převýšení měříme. Tuto situaci ilustruje obr. 2:



Obr. 2: Princip trigonometrické nivelace

Pro výpočet převýšení z bodu S na bod P_1 můžeme použít vzorec:

$$\begin{aligned}\Delta H &= \Delta h_1 - \Delta h_2 \\ \Delta h_1 &= d_1 \cos z_1 + (1 - k_1) \frac{(d_1 \sin z_1)^2}{2R} - v_{c1} \\ \Delta h_2 &= d_2 \cos z_2 + (1 - k_2) \frac{(d_2 \sin z_2)^2}{2R} - v_{c2}\end{aligned}\quad (2)$$

Hodnoty Δh_1 a Δh_2 vyjadřují převýšení na body P_1 a S od horizontu přístroje, takže v tomto případě není nutné měřit výšku totální stanice.

Za předpokladu shodné výšky cíle $v_{c1} = v_{c2}$, stejných a krátkých vodorovných délek záměr (do 100 m), tedy $d_1 \sin z_1 = d_2 \sin z_2$ a konstantního koeficientu refrakce $k_1 = k_2$, lze vztah (2) výrazně zjednodušit [8], [9]:

$$\Delta H = \Delta h_1 - \Delta h_2 = d_1 \cos z_1 - d_2 \cos z_2 \quad (3)$$

Vzorec (3) nezohledňuje vliv zakřivení Země a atmosférické refrakce, avšak při délkách záměr do 100 m je chyba způsobená touto aproximací menší než 1 mm. Vzhledem k tomu, že na výsledné převýšení má vliv pouze rozdíl těchto chyb ve směrech vpřed a vzad, je za předpokladu stejně dlouhých záměr a shodných atmosférických podmínek výsledná odchylka zcela zanedbatelná.

Trigonometrický nivelační pořad se skládá z n sestav, z nichž jednu znázorňuje obr. 2. Vzorce (2) a (3) vyjadřují převýšení v jedné sestavě. Celkové převýšení mezi počátečním

a koncovým bodem pořadu se vypočte jako rozdíl součtu převýšení ve směru vpřed a součtu převýšení ve směru vzad nebo jako součet převýšení jednotlivých sestav:

$$\Delta H_{celkové} = \sum_{j=1}^n \Delta h_j - \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad (4)$$

Při měření pořadu tam a zpět lze jednotlivé převýšení ΔH_{TAM} a $\Delta H_{ZPĚT}$ vypočítat podle vzorce (4). Jejich hodnoty budou mít různé znaménko. Následně se výsledné převýšení vypočte podle:

$$\Delta H_{výsledné} = \frac{\Delta H_{TAM} - \Delta H_{ZPĚT}}{2} \quad (5)$$

Uvedený princip měření je využíván při měření pořadu trigonometrické nivelace s jedenkrát měřeným převýšením (analogicky jako u pořadu technické nivelace), který je v rámci této bakalářské práce využíván.

2.2 Stanovení přesnosti převýšení

Pro odvození přesnosti měřeného převýšení využijeme zákon hromadění středních chyb, který pro obecnou funkci $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ vypadá následovně [10], [11]:

$$m_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_k}\right)^2 m_{x_k}^2} \quad (6)$$

Vzorec (2) lze interpretovat jako funkci $\Delta H = f(\Delta h_1, \Delta h_2)$. Po diferencování získáme:

$$m_{\Delta H} = \sqrt{m_{\Delta h_1}^2 + m_{\Delta h_2}^2} \quad (7)$$

Kde $m_{\Delta H}$ je střední chyba převýšení mezi body jedné trigonometrické nivelační sestavy. Hodnoty $m_{\Delta h_1}^2$ a $m_{\Delta h_2}^2$ vyjadřují střední chyby převýšení od horizontu přístroje Δh_1 a Δh_2 . Zanedbáme vliv zakřivení Země a atmosférické refrakce a na funkce $\Delta h_1 = f(d_1, z_1, v_{c_1})$ a $\Delta h_2 = f(d_2, z_2, v_{c_2})$ znovu aplikujeme zákon hromadění středních chyb:

$$\begin{aligned} m_{\Delta h_1} &= \sqrt{(\cos z_1)^2 m_{d_1}^2 + (-d_1 \sin z_1)^2 m_{z_1}^2 + m_{v_{c_1}}^2} \\ m_{\Delta h_2} &= \sqrt{(\cos z_2)^2 m_{d_2}^2 + (-d_2 \sin z_2)^2 m_{z_2}^2 + m_{v_{c_2}}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Pro určení přesnosti celkového převýšení mezi počátečním a koncovým bodem trigonometrického nivelačního pořadu získáme aplikací stejného zákona na vzorec (4) následující vztah:

$$\begin{aligned} m_{\Delta H_{TAM}} &= \sqrt{m_{\Delta H_1}^2 + m_{\Delta H_2}^2 + \dots + m_{\Delta H_n}^2} \\ m_{\Delta H_{ZPĚT}} &= \sqrt{m_{\Delta H_1}^2 + m_{\Delta H_2}^2 + \dots + m_{\Delta H_n}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Přičemž rozdíl absolutních hodnot převýšení $m_{\Delta H_{TAM}}$ a $m_{\Delta H_{ZPĚT}}$ nesmí překročit mezní odchylku jejího rozdílu, která pro koeficient spolehlivosti $t = 2$ je dána vztahem:

$$\delta_{\Delta H_{TAM-ZPĚT}} = 2 \sqrt{m_{\Delta H_{TAM}}^2 + m_{\Delta H_{ZPĚT}}^2} \quad (10)$$

Střední chyba výsledného převýšení ze vzorce (5) je určena jako:

$$m_{\Delta H_{výsledné}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 m_{\Delta H_{TAM}}^2 + \left(-\frac{1}{2}\right)^2 m_{\Delta H_{ZPĚT}}^2} = \frac{\sqrt{m_{\Delta H_{TAM}}^2 + m_{\Delta H_{ZPĚT}}^2}}{2} \quad (11)$$

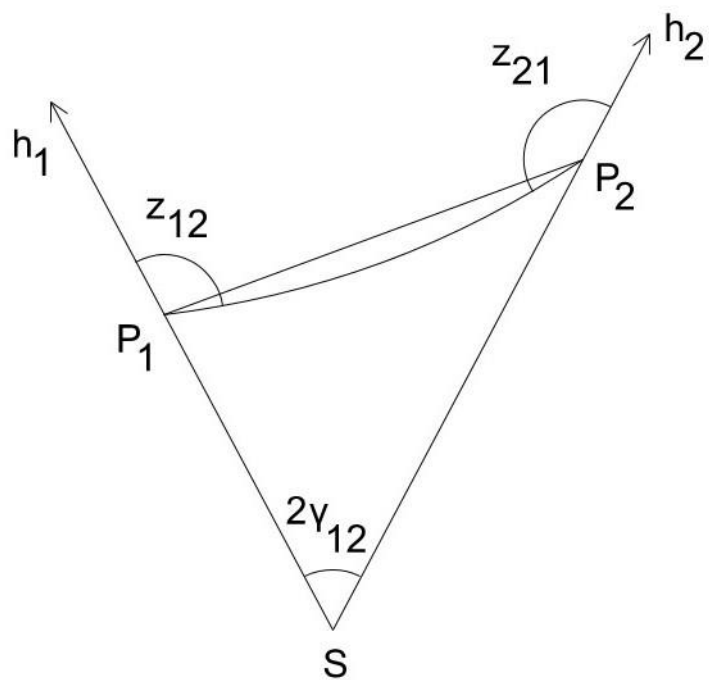
Uvedený postup lze využít pro výpočet střední chyby měřeného převýšení.

2.3 Odhad refrakčního koeficientu

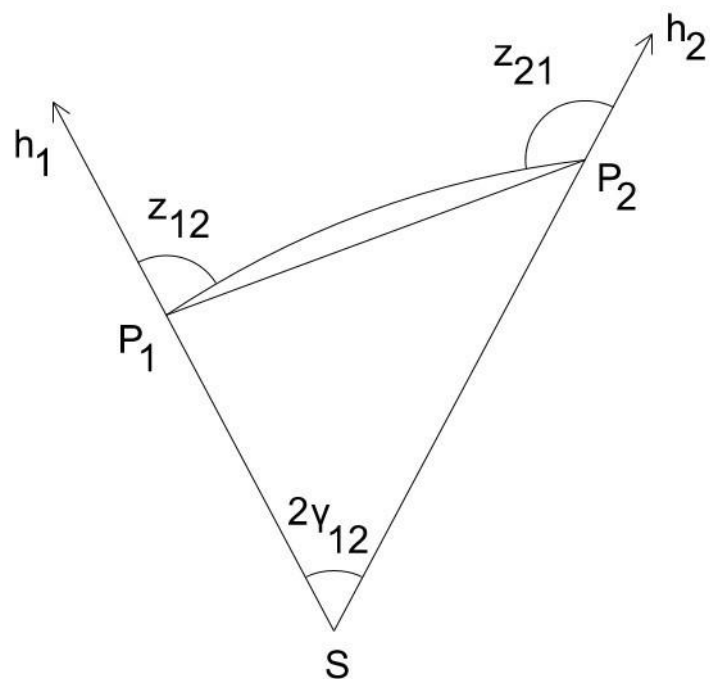
Geodetická měření se uskutečňují v nejnižších vrstvách zemské atmosféry, které představují složité optické prostředí. Z hlediska optiky hrají klíčovou roli teplota a tlak vzduchu, protože ovlivňují jeho hustotu, a tím i index lomu. Na rozhraních vrstev s různým indexem dochází k odchylování světelného paprsku, tedy k refrakci.

Hustota vzduchu obecně s rostoucí nadmořskou výškou klesá, což má za následek, že při dostatečné výšce záměry nad terénem bývá refrakční křivka nejčastěji vyduť směrem k povrchu Země. V přízemních vrstvách však mohou nastat specifické teplotní podmínky, kdy je vzduch několik metrů nad zemí hustší než přímo u povrchu – v tzv. mikroklimatu. V takovém případě dochází k inverzní refrakci a výsledná křivka je vůči zemskému povrchu vypuklá [12].

Oba případy jsou znázorněny na následujících obrázcích:



Obr. 3: Oboustranně trigonometricky zaměřená strana P_1P_2 a ukázka vyduté refrakční křivky



Obr. 4: Oboustranně trigonometricky zaměřená strana P_1P_2 a ukázka vypuklé refrakční křivky

Význam použitých symbolů je následující:

- h_1, h_2 – normály k referenčnímu elipsoidu v bodech P_1, P_2 ,
- z_{12}, z_{21} – zenitové úhly,
- $2\gamma_{12}$ – úhel, který svírají normály k elipsoidu (středový úhel)

Středový úhel $2\gamma_{12}$ lze vypočítat podle vztahu:

$$2\gamma_{12} = \frac{s_{12}}{R_{12}} \quad (12)$$

Kde s_{12} je délka tětivy oblouku normálového řezu referenčního elipsoidu a R je střední poloměr křivosti normálového řezu referenčního elipsoidu.

Pro určení refrakčního koeficientu můžeme využít rovnici odvozenou ze součtu zenitových úhlů měřených na obou koncích téže strany. Pro součet úhlů v trojúhelníku P_1P_2S by při zanedbání vlivu refrakce mělo platit:

$$200^g - z_{12} + 200^g - z_{21} + 2\gamma_{12} = 200^g \quad (13)$$

A po úpravě:

$$200^g - z_{12} - z_{21} + 2\gamma_{12} = 0 \quad (14)$$

V důsledku vlivu refrakce však odchylka součtu úhlů od 200 gradů nebude nulová, ale za předpokladu zanedbání tížnicových odchylek se bude rovnat součinu úhlu $2\gamma_{12}$ a hledanému refrakčnímu koeficientu k :

$$200^g - z_{12} - z_{21} + 2\gamma_{12} = 2\gamma_{12}k \quad (15)$$

Z rovnice (15) můžeme vyjádřit koeficient refrakce:

$$k = \frac{200^g - z_{12} - z_{21} + 2\gamma_{12}}{2\gamma_{12}} \quad (16)$$

Tento vztah lze použít k určení přibližného refrakčního koeficientu pro oboustranně zaměřenou stranu [13].

Koeficient atmosférické refrakce lze rovněž určit na základě referenční hodnoty převýšení, a to odvozením ze vztahu pro výpočet převýšení (1):

$$\begin{aligned} 1 - k &= (\Delta H_{ref} - d \cos z - v_p + v_c) \frac{2R}{(d \sin z)^2} \\ &\Downarrow \\ k &= 1 - (\Delta H_{ref} - d \cos z - v_p + v_c) \frac{2R}{(d \sin z)^2} \end{aligned} \quad (17)$$

Nahrazením šikmé délky její vodorovnou složkou získáme:

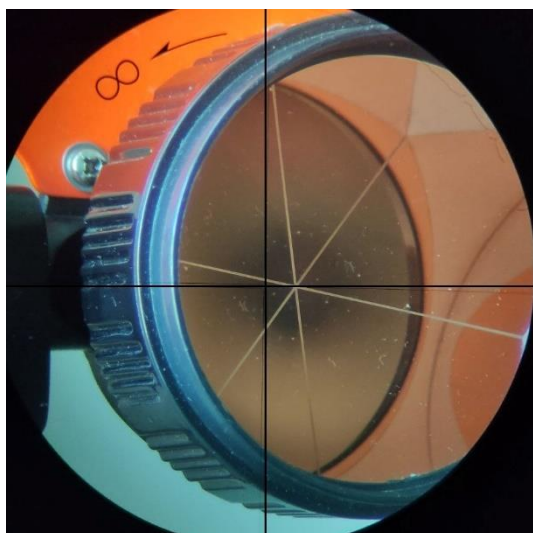
$$k = 1 - (\Delta H_{ref} - s \cot z - v_p + v_c) \frac{2R}{s^2} \quad (18)$$

Vzorec (18) může být rovněž využit k odhadu koeficientu atmosférické refrakce [3].

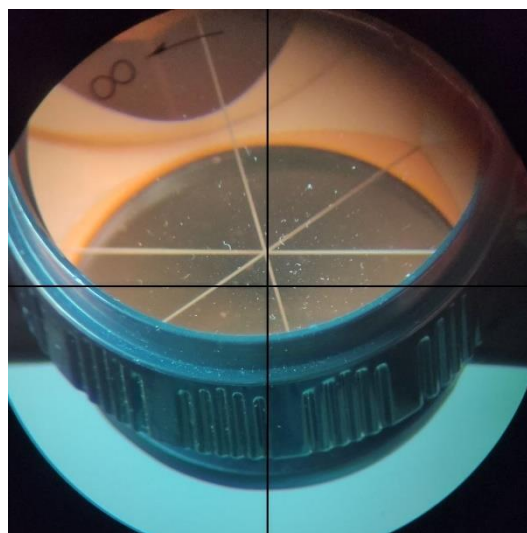
2.4 Vliv excentricity hranolu

Při vychýlení odrazného hranolu od směru na totální stanici vzniká excentricita. Její velikost závisí na typu hranolu a strmosti záměry a je nejmenší u hranolů centrických. Problém excentricity souvisí s lomem paprsku uvnitř hranolu. Pokud střed nitkového kříže neleží na ose otáčení hranolu, otáčí se spolu s ním. Při měření převýšení metodou trigonometrické nivelace je klíčová vertikální složka excentricity, neboť pohyb nitkového kříže ovlivňuje výsledné převýšení, a za určitých okolností velikost této chyby odpovídá velikosti hrubé chyby. V rámci této práce se během měření hranoly neskláněly.

Obr. 5 a obr. 6 znázorňují vliv excentricity při vychýlení hranolu o 20° v horizontálním a vertikálním směru u běžného hranolu, zatímco obr. 7 ukazuje totéž při použití centrického hranolu (anglicky „nodal prism“):

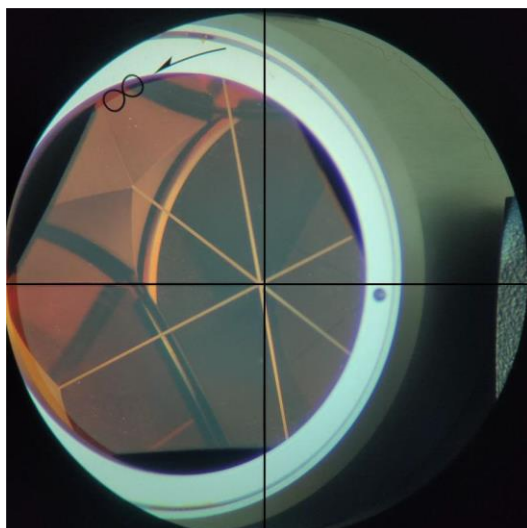


Obr. 5: Excentricita běžného hranolu – horizontální směr



Obr. 6: Excentricita běžného hranolu – vertikální směr

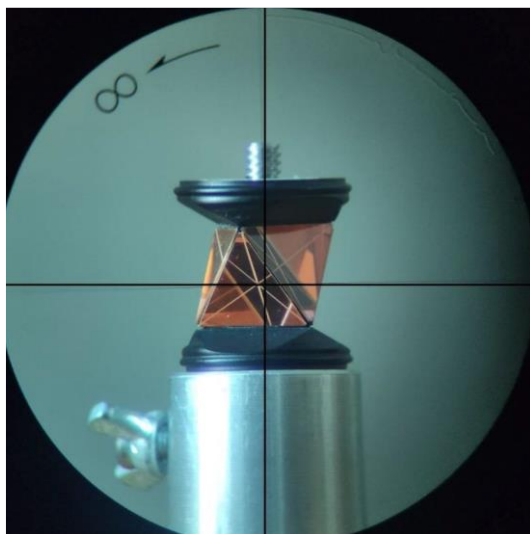
Na obrazech vidíme, že záměrný kříž je posunut vůči geometrickému středu hranolu.



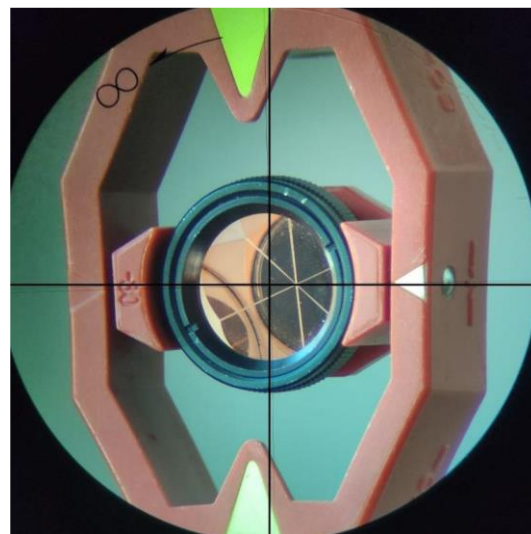
Obr. 7: Excentricita centrického hranolů

Z obr. 7 je zřejmé, že záměrný kříž centrického hranolu vykazuje výrazně menší odchylku, přesto je určitý pohyb stále detekovatelný.

Následující obrázky ilustrují tentýž jev při použití minihranolů:

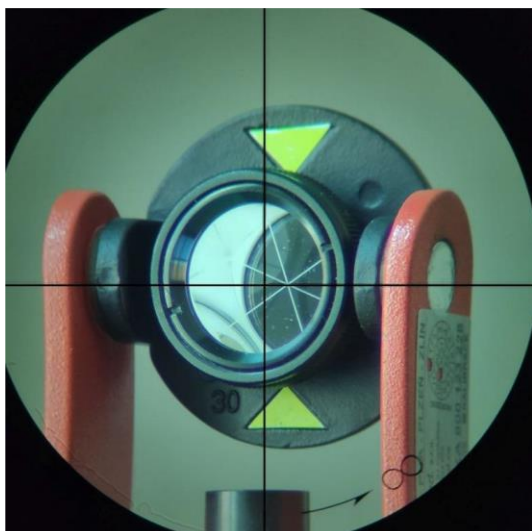


Obr. 8: Excentricita všestranného minihranolu

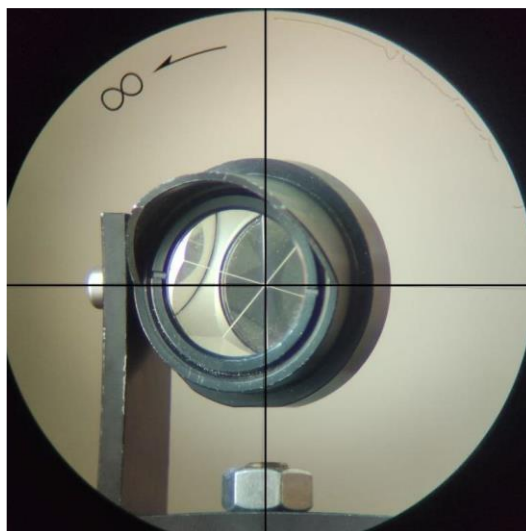


Obr. 9: Excentricita běžného minihranolu

Znovu vidíme, že záměrný kříž je posunut vůči geometrickému středu hranolu.

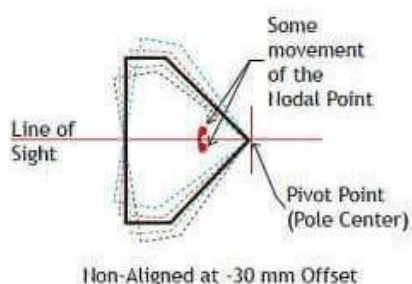


Obr. 10: Excentricita běžného minihranolu

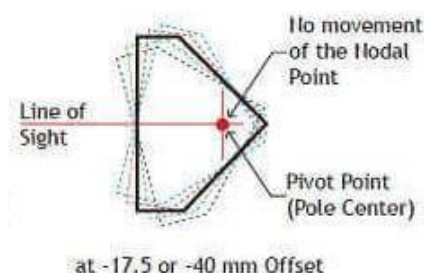


Obr. 11: Excentricita centrického minihranolu

Hranoly lze kromě dělení na centrické a necentrické dále rozlišovat na odsazené a předsazené, a to podle polohy osy otáčení vůči jejich geometrickému středu. Obr. 12 ukazuje schéma předsazeného hranolu. Hranoly na obr. 5, obr. 6 a obr. 8 jsou předsazené, neboť směr vychýlení nitkového kříže odpovídá směru vychýlení hranolu. Naopak hranoly zobrazené na obr. 9 a obr. 10 jsou odsazené.



Obr. 12: Schéma předsazeného hranolu [14]



Obr. 13: Schéma centrického hranolu [14]

Je zřejmé, že s rostoucím svislým úhlem se zvětšuje také velikost vertikální excentricity. Pro podrobnější analýzu této závislosti bylo provedeno kalibrační měření.

Kalibrační měření bylo provedeno na bodech s předem známými převýšeními, která byla určena s vyšší přesností, než jakou dosahuje kalibrovaná totální stanice. Výchozí záměra na jeden z bodů musí být vodorovná a převýšení se měří z tohoto bodu na všechny ostatní. Kalibrace musí být provedena zvlášť pro každou soustavu „přístroj – hranol“.

Naměřená převýšení jsou následně porovnávána s referenčními hodnotami, na jejichž základě jsou vypočteny korekce převýšení. Ukázalo se, že nejlepší aproximací vypočtených korekcí je přímka, kterou je však nutné rozdělit na dvě části – zvlášť pro

záměry nad a pod horizontem přístroje. Získané korekce následně slouží jako vstup pro lineární regresi. Předpokládá se, že korekce při vodorovné záměře je nulová. Výsledkem kalibrace je určení koeficientů k_1 a k_2 pro přímky popisující záměry nad a pod horizontem.

Funkce popisující závislost korekce na svislém úhlu je funkcí přímky procházející počátkem:

$$\begin{cases} o = k_1 \varepsilon \\ o = k_2 \varepsilon \end{cases} \quad (19)$$

Kde o je korekce v milimetrech a ε je svislý úhel v gradech. Koeficienty k_1 a k_2 můžeme určit pomocí následujícího vztahu [15]:

$$k = \frac{\sum \varepsilon_i o_i}{\sum \varepsilon_i^2} \quad (20)$$

Korekce převýšení lze následně stanovit pro každou záměru individuálně na základě jejího svislého úhlu.

3 Použité přístroje a příslušenství

Tato část práce se zaměřuje na popis a vyhodnocení všech experimentálních měření, která byla provedena za účelem analýzy přesnosti a praktické využitelnosti trigonometrické nivelace.



Obr. 14: Použité totální stanice a odrazné hranoly

Na obr. 14 je uveden přehled všech totálních stanic a odrazných hranolů využitých při provádění měření.

Tabulka 1: Přesnost totálních stanic

Totální stanice	Úhlová přesnost	Délková přesnost
Sokkia SET 2030 R3 – 2"	0,6 mgon	2 mm + 2 ppm
Trimble M3 DR – 2"	0,6 mgon	2 mm + 2 ppm
Trimble S5 – 2"	0,6 mgon	1 mm + 2 ppm
Trimble S8 – 0,5"	0,15 mgon	1 mm + 2 ppm
Topcon GT1001 – 1"	0,3 mgon	1 mm + 2 ppm

Tabulka 1 shrnuje úhlovou a délkovou přesnost použitých totálních stanic.

4 Ověření přesnosti totální stanice Sokkia SET 2030 R3 – 2” podle ISO 17123

Každá použitá totální stanice byla kalibrována v souladu s mezinárodní normou ISO 17123. Totální stanice Sokkia SET 2030 R3 – 2” neměla platný kalibrační list, a proto byla v rámci této bakalářské práce znovu kalibrována v laboratoři Fakulty stavební VUT.

4.1 Ověření přesnosti – horizontální směry

Pro ověření přesnosti měření horizontálních směrů byla použita zjednodušená metoda testování podle mezinárodní normy ISO 17123-3 [16]. Měření proběhlo ve dvou sériích po třech skupinách na pěti cílech. Po výpočtech na hladině významnosti 95 % byly provedeny statistické testy za účelem ověření

- a) zda je vypočtená experimentální směrodatná odchylka s menší než hodnota $\sigma = 0,6$ [mgon] udaná výrobcem, a
- b) zda dvě experimentální směrodatné odchylky s_1 a s_2 , získané ze dvou sérií měření se stejným počtem stupňů volnosti, pocházejí ze stejné populace.

Tabulka 2: První série měření horizontálních směru

1 j	2 k	3 $x_{j,k,I}$ gon	4 $x_{j,k,II}$ gon	5 $x_{j,k}$ gon	6 $x'_{j,k}$ gon	7 x_k gon	8 $d_{j,k}$ mgon	9 $r_{j,k}$ mgon	10 $r^2_{j,k}$ mgon ²
1	1	0,010	200,010	0,0100	0,0000	0,0000	0,0	-0,1	0,01
	2	101,069	301,072	101,0707	101,0607	101,0603	0,3	0,2	0,05
	3	155,693	355,696	155,6943	155,6843	155,6838	0,5	0,4	0,17
	4	181,188	381,190	181,1894	181,1794	181,1796	-0,3	-0,4	0,14
	5	316,498	116,501	116,4995	116,4895	116,4895	-0,1	-0,2	0,03
	Σ	754,458	1354,469	554,4638	554,4138	554,4133	0,5	0,0	0,40
2	1	0,011	200,013	0,0119	0,0000		0,0	0,2	0,03
	2	101,071	301,073	101,0719	101,0600		-0,3	-0,2	0,02
	3	155,695	355,695	155,6950	155,6831		-0,7	-0,6	0,32
	4	181,190	381,194	181,1921	181,1802		0,5	0,7	0,49
	5	316,500	116,503	116,5011	116,4892		-0,3	-0,2	0,02
	Σ	754,467	1354,477	554,4719	554,4124		-0,9	0,0	0,89
3	1	0,010	200,010	0,0100	0,0000		0,0	-0,1	0,01
	2	101,069	301,072	101,0704	101,0604		0,0	-0,1	0,01
	3	155,694	355,695	155,6941	155,6841		0,2	0,2	0,03
	4	181,187	381,192	181,1895	181,1794		-0,2	-0,3	0,10
	5	316,498	116,502	116,5000	116,4900		0,4	0,3	0,11
	Σ	754,458	1354,470	554,4640	554,4138		0,5	0,0	0,25
	Σr^2								1,54

Hodnota střední chyby směru v jedné skupině v první sérii činila

$$s_1 = \sqrt{\frac{\Sigma r_1^2}{8}} = 0,44 \text{ [mgon]}.$$

Tabulka 3: Druhá série měření horizontálních směru

1 j	2 k	3 $x_{j,k,I}$ gon	4 $x_{j,k,II}$ gon	5 $x_{j,k}$ gon	6 $x'_{j,k}$ gon	7 x_k gon	8 $d_{j,k}$ mgon	9 $r_{j,k}$ mgon	10 $r^2_{j,k}$ mgon ²
4	1	0,010	200,010	0,0098	0,0000	0,0000	0,0	0,2	0,05
	2	101,069	301,072	101,0704	101,0606	101,0609	-0,3	-0,1	0,02
	3	155,692	355,694	155,6934	155,6835	155,6840	-0,5	-0,3	0,07
	4	181,188	381,192	181,1900	181,1802	181,1798	0,3	0,5	0,30
	5	316,497	116,501	116,4993	116,4894	116,4900	-0,6	-0,4	0,12
	Σ	754,456	1354,469	554,4629	554,4136	554,4147	-1,1	0,0	0,56
5	1	0,009	200,007	0,0080	0,0000		0,0	-0,8	0,59
	2	101,068	301,073	101,0705	101,0625		1,5	0,8	0,61
	3	155,691	355,696	155,6937	155,6856		1,6	0,9	0,72
	4	181,184	381,192	181,1883	181,1802		0,4	-0,4	0,15
	5	316,496	116,501	116,4983	116,4903		0,3	-0,5	0,23
	Σ	754,449	1354,468	554,4588	554,4185		3,8	0,0	2,30
6	1	0,008	200,009	0,0088	0,0000		0,0	0,6	0,31
	2	101,067	301,070	101,0685	101,0597		-1,2	-0,6	0,42
	3	155,689	355,695	155,6917	155,6829		-1,1	-0,6	0,34
	4	181,186	381,190	181,1879	181,1791		-0,7	-0,2	0,03
	5	316,496	116,502	116,4991	116,4903		0,3	0,8	0,70
	Σ	754,445	1354,467	554,4559	554,4119		-2,8	0,0	1,79
	Σr^2								4,65

Hodnota střední chyby směru v jedné skupině v druhé sérii činila

$s_2 = \sqrt{\frac{\Sigma r_2^2}{8}} = 0,76$ [mgon]. Výsledná střední chyba směru v jedné skupině ze dvou sérii

byla $s = \sqrt{\frac{\Sigma_{i=1}^2 \Sigma r_i^2}{16}} = \sqrt{\frac{\Sigma s_i^2}{2}} = 0,62$ [mgon]. Statistické testy:

a) Nulová hypotéza: $s \leq \sigma$. Alternativní hypotéza $s > \sigma$. Kritická hodnota:

$\sigma \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(16)}{16}} = 0,77$ [mgon]. Jelikož $s \leq 0,77$ [mgon], nulovou hypotézu nezamítáme na hladině významnosti 95 %.

b) Nulová hypotéza: $s_1 = s_2$. Alternativní hypotéza $s_1 \neq s_2$. Testovací kritérium:

$\frac{s_1^2}{s_2^2} = 0,33$. Obor přijetí: $\langle \frac{1}{F_{0,975}(8,8)}; F_{0,975}(8,8) \rangle \equiv \langle 0,23; 4,43 \rangle$. Jelikož $0,23 \leq 0,33 \leq 4,43$, nulovou hypotézu nezamítáme na hladině významnosti 95 %.

V závěru lze konstatovat, že hodnota $\sigma = 0,6$ [mgon] udávaná výrobcem byla provedeným testováním potvrzena.

4.2 Ověření přesnosti – vertikální úhly

Pro ověření přesnosti měření vertikálních úhlů byla rovněž použita zjednodušená metoda testování podle mezinárodní normy ISO 17123-3 [16]. Měření proběhlo ve dvou sériích po třech skupinách na pěti cílech. Stejně jako při testování horizontálních směrů na hladině významnosti 95 % byly po výpočtech provedeny statistické testy a) a b), přičemž navíc byl proveden také test

c) zda je vertikální indexová chyba δ rovna nule.

Tabulka 4: První série měření vertikálních úhlů

1 j	2 k	3 $x_{j,k,I}$ gon	4 $x_{j,k,II}$ gon	5 $\delta_{j,k}$ mgon	6 $x'_{j,k}$ gon	7 x_k gon	8 $r_{j,k}$ mgon	9 $r^2_{j,k}$ mgon ²
1	1	99,4232	300,5785	0,85	99,42235	99,42247	-0,12	0,014
	2	99,6768	300,3249	0,85	99,67595	99,67582	0,13	0,018
	3	99,5876	300,4150	1,30	99,58630	99,58613	0,17	0,028
	4	100,0792	299,9218	0,50	100,07870	100,07892	-0,22	0,047
	5	95,5501	304,4515	0,80	95,54930	95,54982	-0,52	0,267
	Σ	494,3169	1505,6917	4,30	494,31260	494,31315	-0,55	0,373
2	1	99,4229	300,5786	0,75	99,42215		-0,32	0,100
	2	99,6768	300,3254	1,10	99,67570		-0,12	0,014
	3	99,5864	300,4143	0,35	99,58605		-0,08	0,007
	4	100,0796	299,9219	0,75	100,07885		-0,07	0,004
	5	95,5511	304,4507	0,90	95,55020		0,38	0,147
	Σ	494,3168	1505,6909	3,85	494,31295		-0,20	0,272
3	1	99,4240	300,5782	1,10	99,42290		0,43	0,188
	2	99,6765	300,3249	0,70	99,67580		-0,02	0,000
	3	99,5856	300,4135	-0,45	99,58605		-0,08	0,007
	4	100,0791	299,9207	-0,10	100,07920		0,28	0,080
	5	95,5503	304,4504	0,35	95,54995		0,13	0,018
	Σ	494,3155	1505,6877	1,60	494,31390		0,75	0,293
	Σr^2							0,938

Hodnota střední chyby vertikálního úhlu v jedné skupině v první sérii činila

$$s_1 = \sqrt{\frac{\Sigma r_i^2}{10}} = 0,31 \text{ [mgon]}.$$

Tabulka 5: Druhá série měření vertikálních úhlů

1 j	2 k	3 $x_{j,k,I}$ gon	4 $x_{j,k,II}$ gon	5 $\delta_{j,k}$ mgon	6 $x'_{j,k}$ gon	7 x_k gon	8 $r_{j,k}$ mgon	9 $r^2_{j,k}$ mgon ²
4	1	99,4234	300,5782	0,80	99,42260	99,42260	0,00	0,000
	2	99,6755	300,3241	-0,20	99,67570	99,67602	-0,32	0,100
	3	99,5859	300,4138	-0,15	99,58605	99,58607	-0,02	0,000
	4	100,0798	299,9222	1,00	100,07880	100,07890	-0,10	0,010
	5	95,5512	304,4522	1,70	95,54950	95,54970	-0,20	0,040
	Σ	494,3158	1505,6905	3,15	494,31265	494,31328	-0,63	0,151
5	1	99,4232	300,5781	0,65	99,42255		-0,05	0,003
	2	99,6769	300,3246	0,75	99,67615		0,13	0,018
	3	99,5863	300,4137	0,00	99,58630		0,23	0,054
	4	100,0804	299,9227	1,55	100,07885		-0,05	0,003
	5	95,5492	304,4507	-0,05	95,54925		-0,45	0,202
	Σ	494,3160	1505,6898	2,90	494,31310		-0,18	0,280
6	1	99,4228	300,5775	0,15	99,42265		0,05	0,003
	2	99,6768	300,3244	0,60	99,67620		0,18	0,034
	3	99,5866	300,4149	0,75	99,58585		-0,22	0,047
	4	100,0795	299,9214	0,45	100,07905		0,15	0,023
	5	95,5513	304,4506	0,95	95,55035		0,65	0,423
	Σ	494,3170	1505,6888	2,90	494,31410		0,82	0,528
	Σr^2							0,958

Hodnota střední chyby vertikálního úhlu v jedné skupině v druhé sérii činila

$s_2 = \sqrt{\frac{\Sigma r_2^2}{10}} = 0,31$ [mgon]. Výsledná střední chyba vertikálního úhlu v jedné skupině ze

dvou sérii byla $s = \sqrt{\frac{\Sigma_{i=1}^2 \Sigma r_i^2}{20}} = \sqrt{\frac{\Sigma s_i^2}{2}} = 0,31$ [mgon]. Statistické testy:

a) Nulová hypotéza: $s \leq \sigma$. Alternativní hypotéza $s > \sigma$. Kritická hodnota:

$\sigma \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(20)}{20}} = 0,75$ [mgon]. Jelikož $s \leq 0,75$ [mgon], nulovou hypotézu nezamítáme na hladině významnosti 95 %.

b) Nulová hypotéza: $s_1 = s_2$. Alternativní hypotéza $s_1 \neq s_2$. Testovací kritérium:

$\frac{s_1^2}{s_2^2} = 0,98$. Obor přijetí: $\langle \frac{1}{F_{0,975}(10,10)}; F_{0,975}(10,10) \rangle \equiv \langle 0,27; 3,72 \rangle$. Jelikož $0,27 \leq 0,98 \leq 3,72$, nulovou hypotézu nezamítáme na hladině významnosti 95 %.

c) Nulová hypotéza: $\delta = 0$. Alternativní hypotéza $\delta \neq 0$. Testovací kritérium $|\delta| = 0,62$ [mgon]. Obor přijetí: $\langle 0; \frac{s}{\sqrt{15}\sqrt{2}} t_{0,975}(20) \rangle \equiv \langle 0; 0,12 \rangle$. Jelikož $0,62 \geq 0,12$ [mgon], zamítáme nulovou hypotézu na hladině významnosti 95 %.

V závěru lze konstatovat, že hodnota $\sigma = 0,6$ [mgon] udávaná výrobcem byla provedeným testováním potvrzena.

4.3 Ověření přesnosti – délky

Pro ověření přesnosti měření délek byla použita modifikovaná zjednodušená metoda testování podle mezinárodní normy ISO 17123-4 [17].

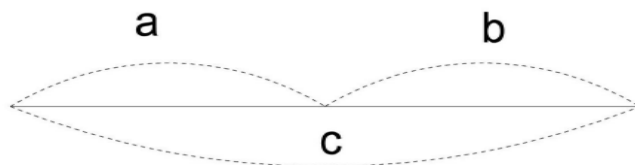
Tabulka 6: Měření délek

Série 1			Série 2		
1	2	3	1	2	3
$x_{j,k}$	$\bar{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^6 x_{j,k}}{6}$	$\bar{x}_j - x_j$	$x_{j,k}$	$\bar{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^6 x_{j,k}}{6}$	$\bar{x}_j - x_j$
m	m	mm	m	m	m
14,0826	14,0826	0,0	14,0833	14,0827	-0,6
14,0825		0,1	14,0827		0,0
14,0820		0,6	14,0835		-0,8
14,0824		0,2	14,0821		0,6
14,0822		0,4	14,0826		0,1
14,0837		-1,1	14,0822		0,5
5,7404	5,7407	0,2	5,7404	5,7409	0,5
5,7399		0,8	5,7413		-0,4
5,7402		0,4	5,7410		-0,1
5,7412		-0,6	5,7412		-0,3
5,7416		-1,0	5,7401		0,8
5,7406		0,0	5,7411		-0,2
6,8564	6,8560	-0,4	6,8557	6,8559	0,2
6,8558		0,2	6,8563		-0,4
6,8557		0,3	6,8554		0,5
6,8562		-0,2	6,856		-0,1
6,8554		0,6	6,8567		-0,8
6,8565		-0,5	6,8555		0,4
5,3319	5,3317	-0,2	5,3327	5,3318	-0,9
5,3316		0,1	5,3310		0,8
5,3308		0,9	5,3316		0,2
5,3321		-0,4	5,3320		-0,2
5,3316		0,1	5,3308		1,0
5,3324		-0,7	5,3325		-0,7
2,5209	2,5205	-0,4	2,5203	2,5201	-0,2
2,5208		-0,3	2,5195		0,6
2,5208		-0,3	2,5199		0,2
2,5197		0,8	2,5202		-0,1
2,5208		-0,3	2,5206		-0,5
2,5202		0,3	2,5202		-0,1

Měření proběhlo ve dvou sériích na pěti cílech, přičemž každý cíl byl zaměřen šestkrát. Jelikož největší odchylka od průměru činila $-1,1$ mm, lze konstatovat, že délková přesnost odpovídá hodnotě $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ uvedené výrobcem.

5 Určení konstant odrazných hranolů pro použité přístroje

Pro každou soustavu „přístroj – hranol“ byla určena součtová konstanta hranolu metodou měření tří úseků.

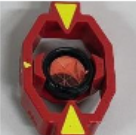


Obr. 15: Schéma metody měření tří úseků

$$PSM = \bar{c} - (\bar{a} + \bar{b}) \quad (21)$$

Ukázalo se, že při použití stejného hranolu s různými přístroji je třeba konstantu upravit.

Tabulka 7: Porovnání konstant hranolů

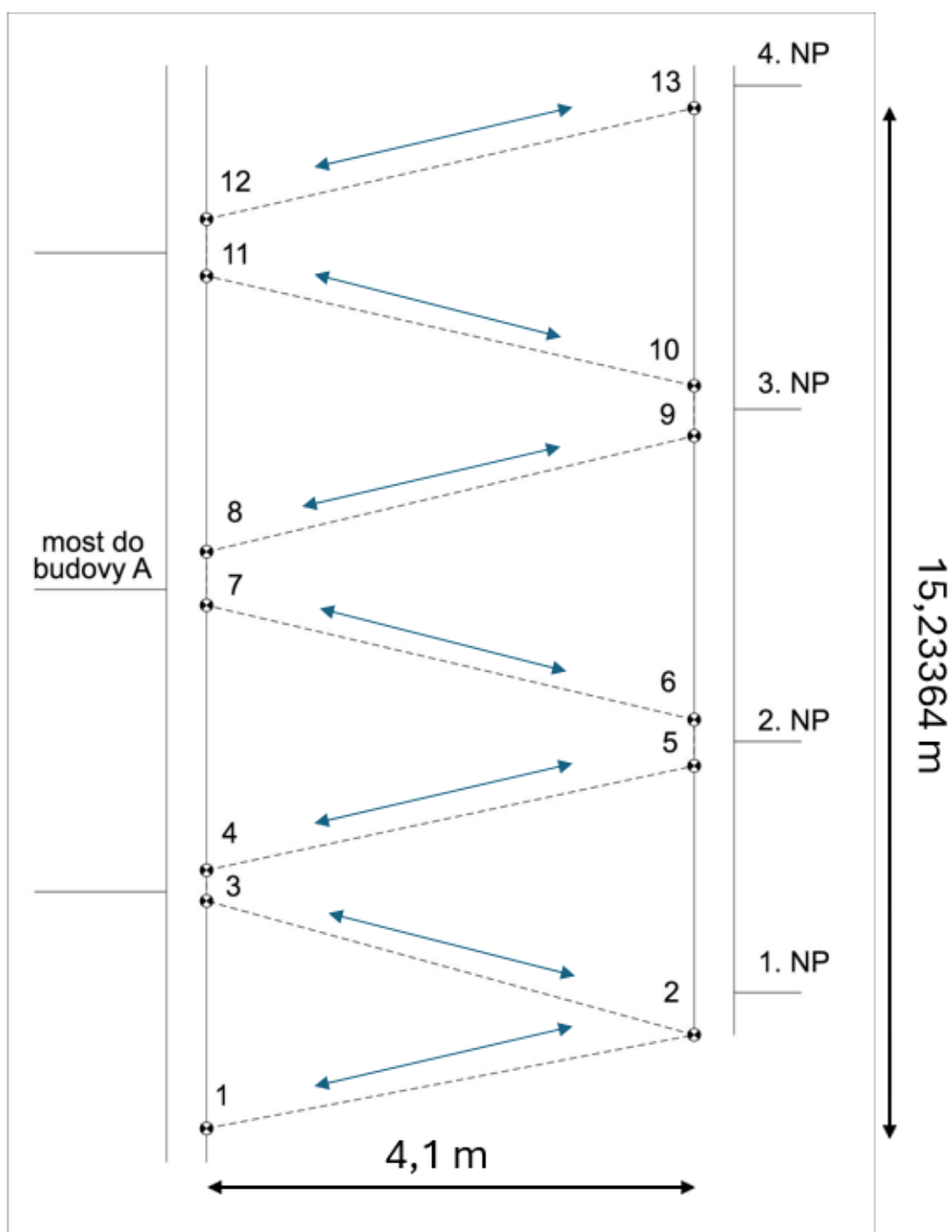
	Sokkia SET 2030 R3	Trimble M3 DR	Trimble S5	Trimble S8	Topcon GT1001
	-25,9 mm	x	x	x	x
	-0,2 mm	x	x	x	x
	-24,4 mm	-29,6 mm	x	-28,7 mm	x
	-25,6 mm	x	x	x	x
	-11,5 mm	-17,8 mm	x	-18,1 mm	-18,1 mm
	-29 mm	x	-35,0 mm	-34,1 mm	x

6 Kalibrace přístrojů za účelem korekce vlivu excentricit hranolů

Tato část obsahuje určení koeficientů k_1 a k_2 podle postupu uvedeného v kapitole 2.4 pro všechny totální stanice. Na základě těchto koeficientů budou následně zavedeny korekce excentricity hranolu.

6.1 Výškové základny v budově B Fakulty stavební VUT

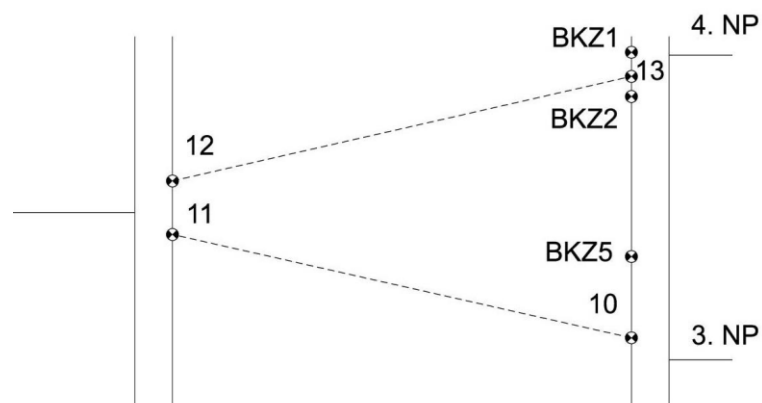
V budově B Fakulty stavební VUT se mezi patry nachází body výškové základny, jejichž převýšení byla určena s vysokou přesností metodou přesné nivelace. Tyto hodnoty budou v rámci této práce použity jako referenční. Základna obsahuje celkem 13 bodů a dále bude v textu označována jako „1. základna“. Pro experimentální měření byla zvolena z důvodu výrazné strmosti záměr, která umožňuje testování měření výškových rozdílů metodou trigonometrické nivelace za náročných podmínek. Během měření dosahovaly svislé úhly hodnoty přibližně 40 gonů.



Obr. 16: Schéma 1. základny

Mezi body 11 a 13 první základny se nachází dalších šest bodů, které tvoří samostatnou základnu (dále označovanou jako „2. základna“) a nejsou výškově propojeny s první základnou. Převýšení mezi body druhé základny je rovněž známo s vysokou přesností a bylo určeno metodou přesné nivelace. Pro propojení obou základen bylo v rámci této práce změřeno převýšení mezi body 13 a BKZ1, a to rovněž metodou přesné nivelace.

Kalibrační základna je tvořena sedmi body – čtyřmi z první a třemi z druhé základny.



Obr. 17: Schéma kalibrační základny

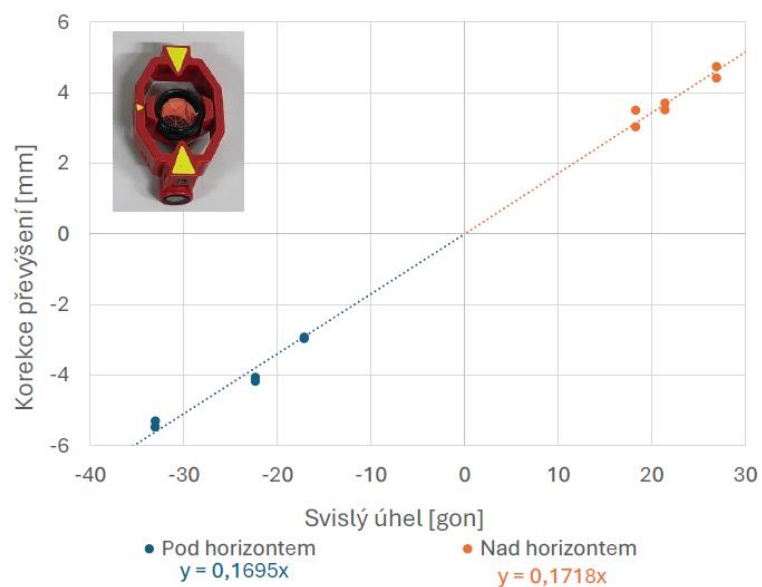
Během kalibračního měření záměra na bod 12 byla vodorovná, body BKZ1, 13 a BKZ2 tvořily základ pro odhad koeficientu nad horizontem přístroje a body 11, BKZ5 a 10 tvořily základ pro odhad koeficientu záměr pod horizontem přístroje.



Obr. 18: Schéma kalibračního měření

6.2 Kalibrace přístroje Trimble M3 DR 2"

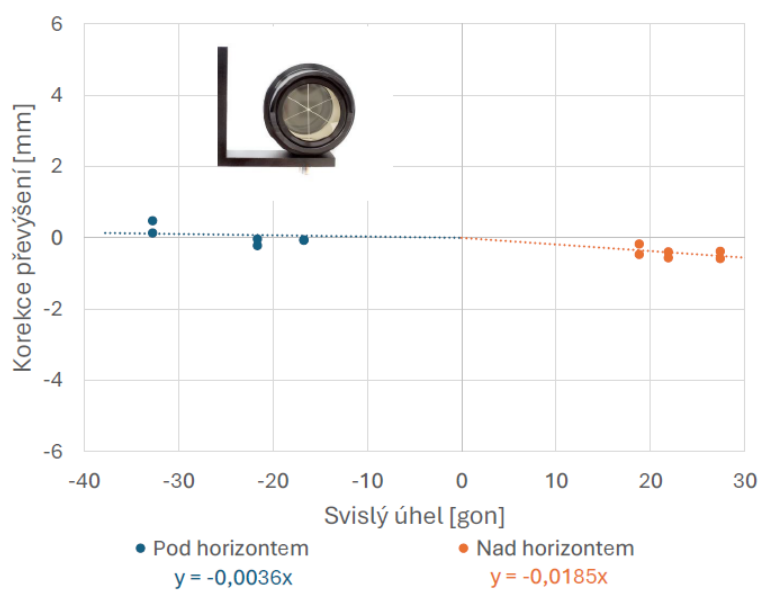
Na základě rozdílů mezi naměřenými převýšeními a referenčními hodnotami podle vzorce (20) byly vypočteny koeficienty pro záměry nad a pod horizontem přístroje pro dva hranoly.



Obr. 19: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble M3 a hranol Leica GMP111

Korekce převýšení mohou být zavedeny podle vzorců (19):

$$\begin{cases} o = 0,1718\varepsilon \\ o = 0,1695\varepsilon \end{cases} \quad (22)$$



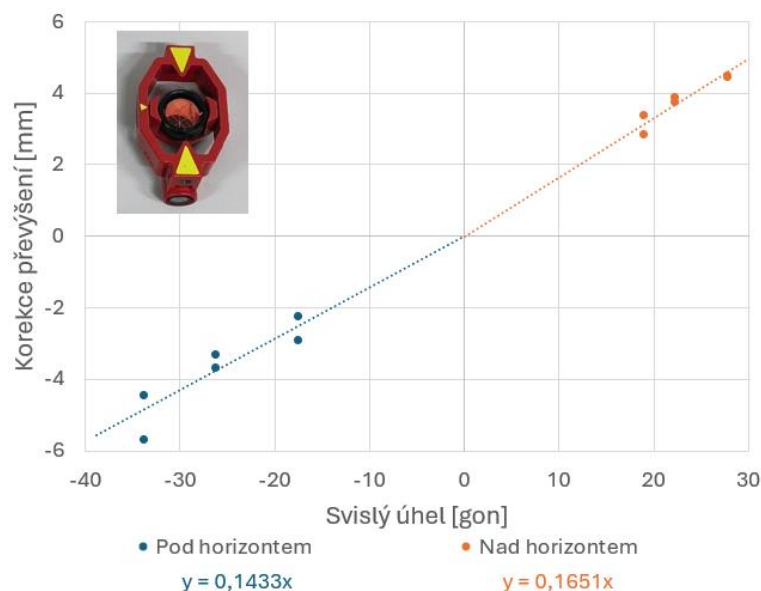
Obr. 20: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble M3 a hranol Trimble M

Korekce převýšení mohou být zavedeny podle vzorců (19):

$$\begin{cases} o = -0,0185\varepsilon \\ o = -0,0036\varepsilon \end{cases} \quad (23)$$

6.3 Kalibrace přístroje Sokkia SET 2030 R3 – 2"

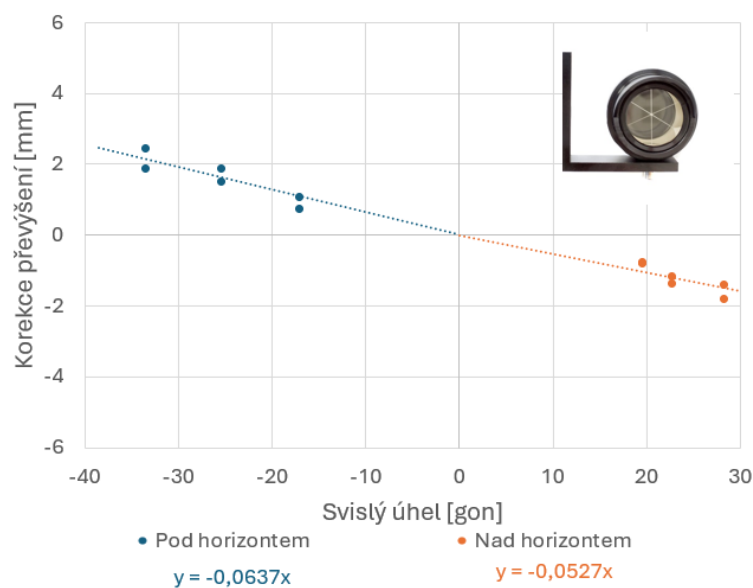
Na základě rozdílů mezi naměřenými převýšeními a referenčními hodnotami podle vzorce (20) byly vypočteny koeficienty pro záměry nad a pod horizontem přístroje pro dva hranoly.



Obr. 21: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Sokkia SET a hranol Leica GMP111

Korekce převýšení mohou být zavedeny podle vzorců (19):

$$\begin{cases} o = 0,1651\varepsilon \\ o = 0,1433\varepsilon \end{cases} \quad (24)$$



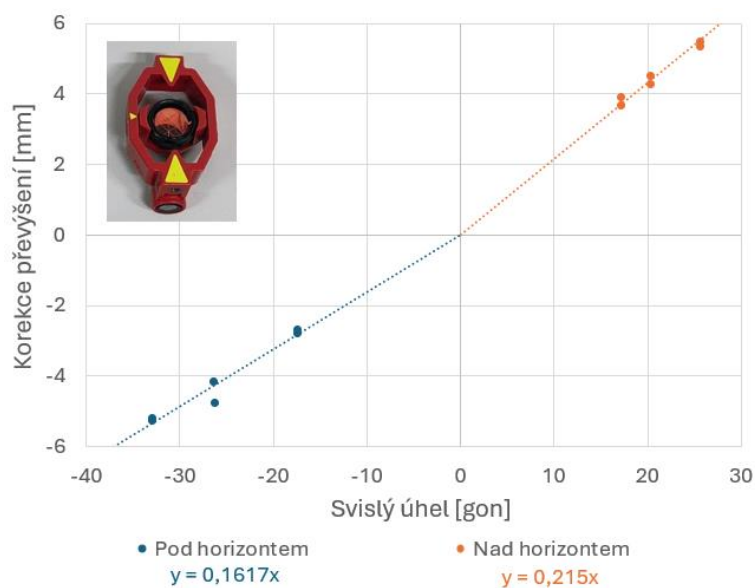
Obr. 22: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Sokkia SET a hranol Trimble M

Korekce převýšení mohou být zavedeny podle vzorců (19):

$$\begin{cases} o = -0,0527\varepsilon \\ o = -0,0637\varepsilon \end{cases} \quad (25)$$

6.4 Kalibrace přístroje Trimble S8

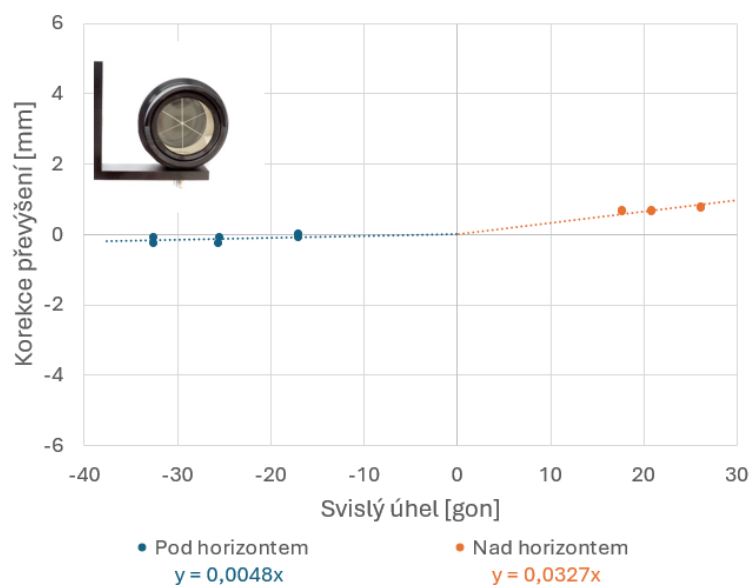
Na základě rozdílů mezi naměřenými převýšeními a referenčními hodnotami podle vzorce (20) byly vypočteny koeficienty pro záměry nad a pod horizontem přístroje pro dva hranoly.



Obr. 23: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble S8 a hranol Leica GMP111

Korekce převýšení mohou být zavedeny podle vzorců (19):

$$\begin{cases} o = 0,2150\varepsilon \\ o = 0,1617\varepsilon \end{cases} \quad (26)$$



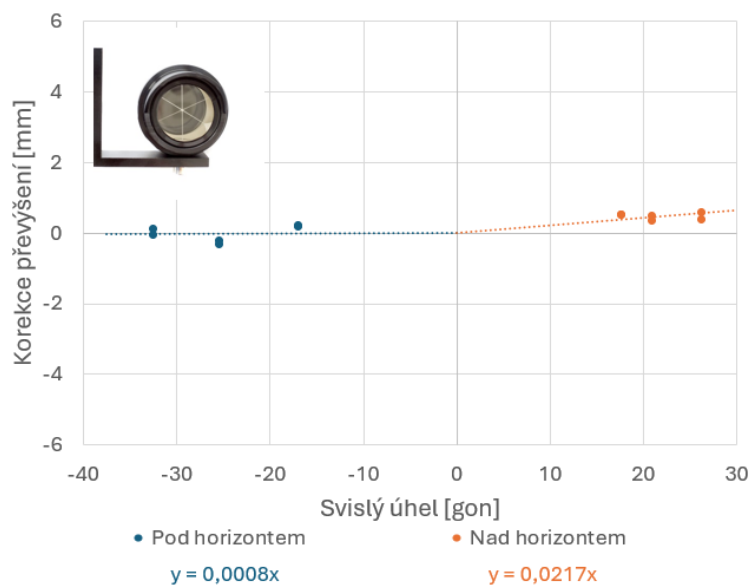
Obr. 24: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble S8 a hranol Trimble M

Korekce převýšení mohou být zavedeny podle vzorců (19):

$$\begin{cases} o = 0,0327\varepsilon \\ o = 0,0048\varepsilon \end{cases} \quad (27)$$

6.5 Kalibrace přístroje Topcon GT

Na základě rozdílů mezi naměřenými převýšeními a referenčními hodnotami podle vzorce (20) byly vypočteny koeficienty pro záměry nad a pod horizontem přístroje pro jeden hranol.



Obr. 25: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Topcon GT a hranol Trimble M

Korekce převýšení mohou být zavedeny podle vzorců (19):

$$\begin{cases} o = 0,0217\varepsilon \\ l_o = 0,0008\varepsilon \end{cases} \quad (28)$$

7 Trigonometrická nivelace na výškové základně budovy B Fakulty stavební VUT

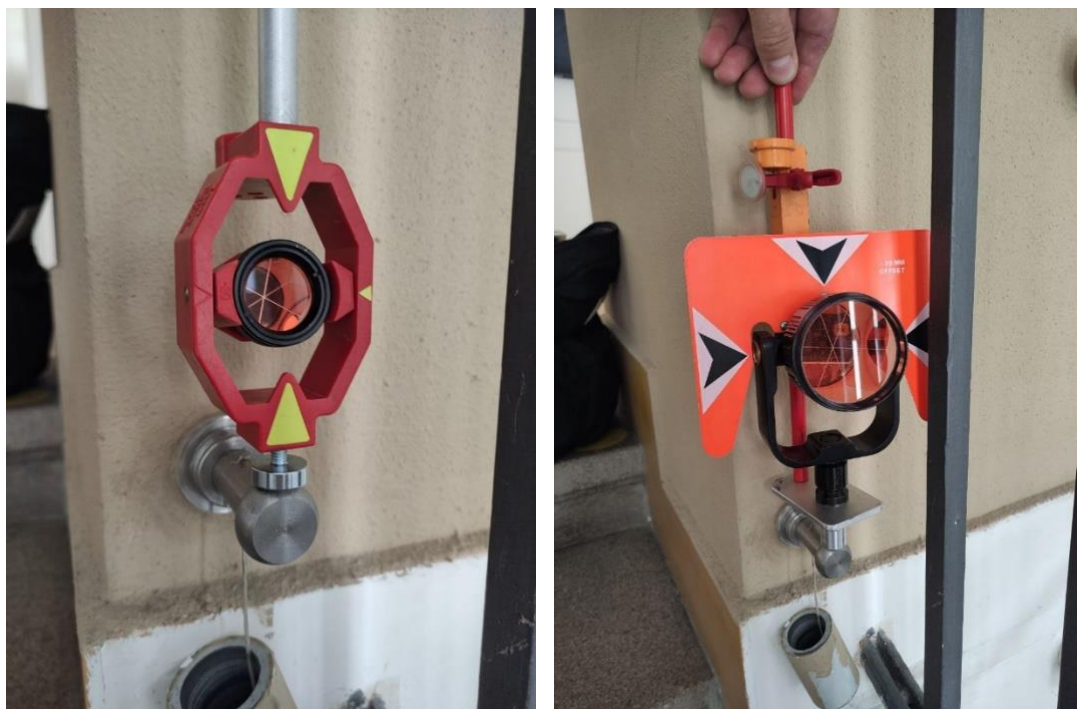
Trigonometrická nivelace byla provedena celkem třemi totálními stanicemi za použití různých typů odrazných hranolů.

7.1 Zkušební měření převýšení mezi dvěma body na různé typy hranolů

Obr. 26 a obr. 27 znázorňují hranoly umístěné na bodě základny.



Obr. 26: Hranoly Seco 25mm (vlevo) a Leica GRZ101 (vpravo) umístěné na bodě základny



Obr. 27: Hranoly Leica GMP111 (vlevo) a Trimble AK18 (vpravo) umístěné na bodě základny

Měření bylo provedeno ve dvou skupinách a ve dvou polohách pomocí totální stanice Sokkia SET 2030 R3, která byla umístěna přibližně uprostřed mezi měřenými body. Každý z hranolů byl vybaven krabicovou libelou, podle které byl na bodě urovnán.

Tabulka 8: Porovnání převýšení naměřených různými hranoly

Použitý hranol	Rozdíl od referenční hodnoty [mm]
Seco 25mm	5,1
Leica GRZ101	-1,5
Leica GMP111	3,7
Trimble AK18	-7,9

Po zavedení korekce pro hranol Leica GMP111 podle vzorce (24) se rozdíl zmenšil z 3,7 mm na -1,5 mm.

Pro další měření byl vybrán hranol Leica GMP111. Všestranný hranol Leica GRZ101 nebyl zvolen z důvodu nejednoznačnosti středu – při zaměření jsou viditelná dvě centra zároveň.

7.2 Přístroj Sokkia SET 2030 R3 – 2"

Bylo měřeno převýšení z bodu 1 na bod 13, přičemž každá záměra byla měřena ve dvou skupinách, ve dvou polohách, na hranol Leica GMP111 a na centrický hranol Trimble M.

Rozdíly dvou měření ukazují tabulka 9 a

tabulka 10.

Tabulka 9: Rozdíly dvou měření na hranol Leica GMP111

Leica GMP111		1. měření	2. měření	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
1	2	1,3953	1,3927	-2,63
2	3	1,9953	1,9951	-0,19
3	4	0,4576	0,4578	0,12
4	5	1,5585	1,5578	-0,74
5	6	0,6864	0,6864	0,06
6	7	1,7046	1,7046	0,03
7	8	0,7980	0,7980	0,01
8	9	1,7204	1,7209	0,46
9	10	0,7441	0,7439	-0,15
10	11	1,6336	1,6336	-0,03
11	12	0,8455	0,8456	0,11
12	13	1,6553	1,6551	-0,24
Součet		15,1947	15,1915	-3,19

Je pravděpodobné, že jedno z převýšení mezi body 1 a 2 je zatíženo hrubou chybou.

Tabulka 10: Rozdíly dvou měření na hranol Trimble M

Trimble M		1. měření	2. měření	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
1	2	1,3984	1,3996	1,11
2	3	2,0025	2,0014	-1,13
3	4	0,4597	0,4597	0,02
4	5	1,5649	1,5639	-0,90
5	6	0,6901	0,6901	-0,01
6	7	1,7111	1,7116	0,51
7	8	0,8016	0,8018	0,22
8	9	1,7287	1,7283	-0,31
9	10	0,7464	0,7466	0,18
10	11	1,6394	1,6397	0,26
11	12	0,8492	0,8490	-0,18
12	13	1,6625	1,6626	0,07
Součet		15,2544	15,2543	-0,15

Můžeme konstatovat, že celkové převýšení ze dvou měření se liší o 0,15 mm. Tabulka 11 a tabulka 12 ukazují porovnání naměřených převýšení s referenčními hodnotami.

Tabulka 11: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami bez zavedení korekce

Leica GMP111		Měření	Reference	Sokkia SET
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3940	1,39655	2,55
2	3	1,9952	1,99987	4,66
3	4	0,4577	0,45885	1,16
4	5	1,5581	1,56260	4,45
5	6	0,6864	0,68851	2,12
6	7	1,7046	1,70908	4,47
7	8	0,7980	0,79984	1,80
8	9	1,7206	1,72537	4,73
9	10	0,7440	0,74574	1,74
10	11	1,6336	1,63781	4,21
11	12	0,8456	0,84843	2,85
12	13	1,6552	1,66122	6,03
Součet		15,1931	15,2339	40,78

Ačkoli rozdíl mezi měřeními tam a zpět nebyl výrazný, což naznačuje vysokou vnitřní přesnost, každá záměra je zatížena systematickou chybou způsobenou excentricitou hranolu, která ve výsledku způsobuje chybu v celkovém převýšení přesahující 4 cm.

Tabulka 12: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami bez zavedení korekce

Trimble M		Měření	Reference	Sokkia SET
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3990	1,39655	-2,44
2	3	2,0019	1,99987	-2,07
3	4	0,4597	0,45885	-0,81
4	5	1,5644	1,56260	-1,80
5	6	0,6901	0,68851	-1,56
6	7	1,7114	1,70908	-2,31
7	8	0,8017	0,79984	-1,82
8	9	1,7285	1,72537	-3,13
9	10	0,7465	0,74574	-0,77
10	11	1,6395	1,63781	-1,72
11	12	0,8491	0,84843	-0,69
12	13	1,6626	1,66122	-1,33
Součet		15,2543	15,2339	-20,47

Přestože rozdíly mezi jednotlivými měřeními byly minimální a svědčí o dobré opakovatelnosti, výsledky jsou systematicky ovlivněny excentricitou hranolu, což vede k chybnému určení převýšení s odchylkou přesahující 2 cm.

Tabulka 13 a tabulka 14 znázorňují přínos zavedení korekce tohoto vlivu podle vzorců (24) a (25).

Tabulka 13: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami po zavedení korekce

Leica GMP111		Měření	Reference	Sokkia SET
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3973	1,39655	-0,75
2	3	2,0008	1,99987	-0,94
3	4	0,4590	0,45885	-0,16
4	5	1,5634	1,56260	-0,84
5	6	0,6889	0,68851	-0,38
6	7	1,7100	1,70908	-0,92
7	8	0,8004	0,79984	-0,51
8	9	1,7267	1,72537	-1,34
9	10	0,7461	0,74574	-0,32
10	11	1,6383	1,63781	-0,49
11	12	0,8482	0,84843	0,28
12	13	1,6606	1,66122	0,64
Součet		15,2396	15,2339	-5,73

Je patrné, že po zavedení korekce klesla chyba v celkovém převýšení z více než 40 mm na méně než 6 mm.

Tabulka 14: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami po zavedení korekce

Trimble M		Měření	Reference	Sokkia SET
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3975	1,39655	-0,93
2	3	1,9994	1,99987	0,43
3	4	0,4592	0,45885	-0,38
4	5	1,5620	1,56260	0,58
5	6	0,6892	0,68851	-0,69
6	7	1,7090	1,70908	0,08
7	8	0,8009	0,79984	-1,09
8	9	1,7259	1,72537	-0,54
9	10	0,7459	0,74574	-0,12
10	11	1,6374	1,63781	0,38
11	12	0,8482	0,84843	0,19
12	13	1,6602	1,66122	1,01
Součet		15,2349	15,2339	-1,07

Z výsledků je zřejmé, že po zavedení korekce se chyba v celkovém převýšení snížila z více než 20 mm na hodnotu mírně přesahující 1 mm.

Na základě výsledků lze konstatovat, že nejvhodnějším postupem by bylo měření s použitím centrického hranolu a zavedením korekce vlivu jeho excentricity.

7.3 Přístroj Trimble M3 DR 2"

Bylo měřeno převýšení z bodu 13 na bod 4, přičemž každá záměra byla měřena v jedné skupině, ve dvou polohách, na hranol Leica GMP111 a na centrický hranol Trimble M.

Tabulka 15: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami bez zavedení korekce

Leica GMP111		Měření	Reference	bez korekce
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
13	12	-1,6550	1,66099	5,98
12	11	-0,8455	0,84843	2,94
11	10	-1,6319	1,63781	5,96
10	9	-0,7432	0,74574	2,55
9	8	-1,7191	1,72537	6,26
8	7	-0,7975	0,79984	2,36
7	6	-1,7022	1,70908	6,86
6	5	-0,6863	0,68851	2,26
5	4	-1,5563	1,56260	6,29
Součet		-11,3369	11,3784	41,45

Opět se potvrzuje, že každé jednotlivé měření je ovlivněno systematickou chybou vyplývající z excentricity hranolu, která ve výsledku vede k odchylce v celkovém převýšení přesahující 4,1 cm.

Tabulka 16. Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami bez zavedení korekce

Trimble M		Měření	Reference	bez korekce
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
13	12	-1,6620	1,66099	-0,99
12	11	-0,8487	0,84843	-0,29
11	10	-1,6381	1,63781	-0,28
10	9	-0,7458	0,74574	-0,02
9	8	-1,7264	1,72537	-1,07
8	7	-0,7998	0,79984	0,02
7	6	-1,7096	1,70908	-0,52
6	5	-0,6886	0,68851	-0,12
5	4	-1,5633	1,56260	-0,67
Součet		-11,3823	11,3784	-3,93

Opět je patrné, že chyba způsobená vlivem excentricity je při použití centrického hranolu výrazně menší a v daném případě nepřesahuje 4 mm.

Tabulka 17 a tabulka 18 znázorňují přínos zavedení korekce tohoto vlivu podle vzorců (22) a (23).

Tabulka 17: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami po zavedení korekce

Leica GMP111		Měření	Reference	po korekci
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
13	12	-1,6614	1,66099	-0,43
12	11	-0,8482	0,84843	0,19
11	10	-1,6373	1,63781	0,50
10	9	-0,7454	0,74574	0,30
9	8	-1,7257	1,72537	-0,32
8	7	-0,7997	0,79984	0,11
7	6	-1,7092	1,70908	-0,11
6	5	-0,6883	0,68851	0,16
5	4	-1,5622	1,56260	0,37
Součet		-11,3776	11,3784	0,77

Je patrné, že po zavedení korekce klesla chyba v celkovém převýšení z více než 41 mm na méně než 1 mm.

Tabulka 18: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami po zavedení korekce

Trimble M		Měření	Reference	po korekci
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
13	12	-1,6618	1,66099	-0,86
12	11	-0,8485	0,84843	-0,04
11	10	-1,6380	1,63781	-0,16
10	9	-0,7455	0,74574	0,23
9	8	-1,7263	1,72537	-0,90
8	7	-0,7996	0,79984	0,26
7	6	-1,7094	1,70908	-0,30
6	5	-0,6884	0,68851	0,10
5	4	-1,5631	1,56260	-0,54
Součet		-11,3806	11,3784	-2,20

Z výsledků je zřejmé, že po zavedení korekce se chyba v celkovém převýšení snížila z přibližně 4 mm na hodnotu mírně přesahující 2 mm.

Na základě výsledků lze konstatovat, že v tomto případě byla korekce excentricity účinnější u necentrického hranolu než u hranolu centrického.

7.4 Přístroj Trimble S8

Bylo měřeno převýšení z bodu 13 na bod 1 tam a zpět, přičemž každá záměra byla měřena v jedné skupině, ve dvou polohách, na hranol Leica GMP111 a na centrický hranol Trimble M za využití automatického cílení. Rozdíly mezi měřeními tam a zpět ukazují tabulka 19 a tabulka 20.

Tabulka 19: Rozdíly měření tam a zpět na hranol Leica GMP111

Leica GMP111		měření tam	měření zpět	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
1	2	-1,3915	1,3922	0,63
2	3	-1,9942	1,9932	-1,00
3	4	-0,4572	0,4598	2,61
4	5	-1,5580	1,5567	-1,24
5	6	-0,6860	0,6861	0,18
6	7	-1,7047	1,7039	-0,76
7	8	-0,7963	0,7966	0,36
8	9	-1,7199	1,7197	-0,23
9	10	-0,7428	0,7432	0,38
10	11	-1,6341	1,6316	-2,53
11	12	-0,8449	0,8454	0,55
12	13	-1,6552	1,6549	-0,34
Součet		-15,1847	15,1833	-1,40

Můžeme konstatovat, že celkové převýšení z měření tam a zpět se liší o 1,40 mm.

Tabulka 20: Rozdíly měření tam a zpět na hranol Trimble M

Trimble M		měření tam	měření zpět	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
1	2	1,3968	-1,3969	-0,09
2	3	1,9992	-1,9994	-0,12
3	4	0,4588	-0,4587	0,10
4	5	1,5621	-1,5621	0,01
5	6	0,6884	-0,6883	0,13
6	7	1,7088	-1,7089	-0,07
7	8	0,7995	-0,7994	0,09
8	9	1,7247	-1,7249	-0,24
9	10	0,7454	-0,7454	-0,07
10	11	1,6377	-1,6373	0,39
11	12	0,8480	-0,8480	0,01
12	13	1,6607	-1,6609	-0,23
Součet		15,2301	-15,2302	-0,09

Je zřejmé, že celkové převýšení z měření tam a zpět se liší o 0,09 mm, což naznačuje vysokou vnitřní přesnost. Tabulka 21 a tabulka 22 ukazují porovnání naměřených převýšení s referenčními hodnotami.

Tabulka 21: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami bez zavedení korekce

Leica GMP111		Měření	Reference	bez korekce
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3919	1,39655	4,69
2	3	1,9937	1,99987	6,15
3	4	0,4585	0,45885	0,39
4	5	1,5573	1,56260	5,27
5	6	0,6860	0,68851	2,46
6	7	1,7043	1,70908	4,77
7	8	0,7965	0,79984	3,37
8	9	1,7198	1,72537	5,54
9	10	0,7430	0,74574	2,77
10	11	1,6329	1,63781	4,94
11	12	0,8451	0,84843	3,30
12	13	1,6550	1,66122	6,19
Součet		15,1840	15,2339	49,83

Opět se potvrzuje, že každé jednotlivé měření je zatíženo systematickou chybou způsobenou excentricitou hranolu, která v konečném důsledku způsobuje odchylku celkového převýšení téměř 5 cm.

Tabulka 22: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami bez zavedení korekce

Trimble M		Měření	Reference	bez korekce
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3968	1,39655	-0,27
2	3	1,9993	1,99987	0,57
3	4	0,4588	0,45885	0,07
4	5	1,5621	1,56260	0,54
5	6	0,6884	0,68851	0,14
6	7	1,7089	1,70908	0,22
7	8	0,7994	0,79984	0,42
8	9	1,7248	1,72537	0,57
9	10	0,7454	0,74574	0,34
10	11	1,6375	1,63781	0,34
11	12	0,8480	0,84843	0,38
12	13	1,6608	1,66122	0,41
Součet		15,2301	15,2339	3,72

Chyba způsobená vlivem excentricity je při použití centrického hranolu výrazně menší a v daném případě nepřesahuje 4 mm.

Tabulka 23: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami po zavedení korekce

Leica GMP111		Měření	Reference	po korekci
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3960	1,39655	0,58
2	3	1,9995	1,99987	0,33
3	4	0,4602	0,45885	-1,36
4	5	1,5623	1,56260	0,30
5	6	0,6886	0,68851	-0,13
6	7	1,7088	1,70908	0,26
7	8	0,7998	0,79984	0,00
8	9	1,7250	1,72537	0,37
9	10	0,7459	0,74574	-0,12
10	11	1,6377	1,63781	0,09
11	12	0,8485	0,84843	-0,04
12	13	1,6607	1,66122	0,53
Součet		15,2331	15,2339	0,80

Je patrné, že po zavedení korekce klesla chyba v celkovém převýšení z téměř 50 mm na méně než 1 mm.

Tabulka 24: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami po zavedení korekce

Trimble M		Měření	Reference	po korekci
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	rozdíly [mm]
1	2	1,3969	1,39655	-0,38
2	3	1,9995	1,99987	0,41
3	4	0,4590	0,45885	-0,13
4	5	1,5622	1,56260	0,40
5	6	0,6887	0,68851	-0,22
6	7	1,7090	1,70908	0,09
7	8	0,7998	0,79984	0,04
8	9	1,7250	1,72537	0,42
9	10	0,7458	0,74574	-0,07
10	11	1,6376	1,63781	0,20
11	12	0,8485	0,84843	-0,05
12	13	1,6610	1,66122	0,24
Součet		15,2329	15,2339	0,95

Z výsledků je zřejmé, že po zavedení korekce se chyba v celkovém převýšení snížila z přibližně 4 mm na hodnotu nepřesahující 1 mm.

Na základě výsledků lze konstatovat, že v tomto případě byla korekce excentricity stejně účinná u obou typů hranolů.

8 Trigonometrická nivelace v reálných podmínkách

Tato část práce se zabývá měřeními provedenými v reálných podmínkách. Celkem byla uskutečněna čtyři měření: dvě mezi nivelačními body výškového bodového pole, jedno mezi body ŽBP a zajišťovacími značkami a jedno mezi body základny Brno-Jih. Naměřené hodnoty převýšení byly následně porovnány s referenčními hodnotami.

Hranol se během měření neskláněl a pro umístění tyče na nivelační značku nebo podložku byla místo hrotu použita patka s úpravou na plošku, jak ukazují obr. 28 a obr. 29.



Obr. 28: Tyč s hranolem na nivelační značce

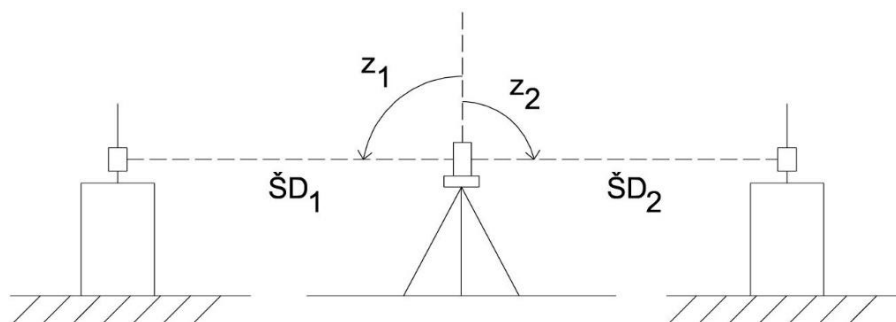


Obr. 29: Tyč s hranolem na nivelační podložce

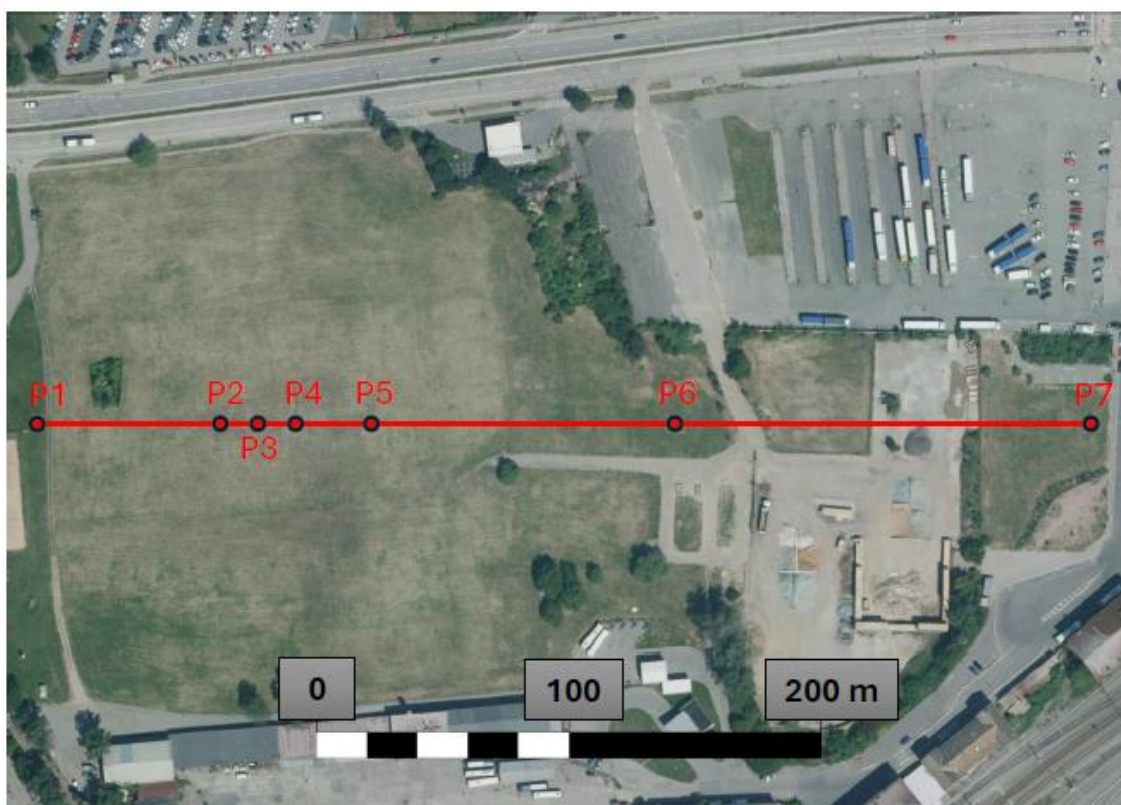
Nivelační pořad byl vždy měřen v obou směrech (tam i zpět).

8.1 Kalibrační základna Brno-Jih

Kalibrační základna Brno-Jih se nachází v Brně mezi ulicemi Opuštěná, Dolním nádražím a řekou Svratkou. Měření na této základně bylo provedeno současně dvěma přístroji, a to Sokkia SET 2030 R3 a Trimble S5 na centrický hranol GPH1P. Byla měřena převýšení mezi body základny při použití automatického a manuálního cílení. Naměřená převýšení byla porovnána s referenčními hodnotami. Obr. 30 znázorňuje princip měření převýšení mezi body základny.



Obr. 30: Schéma měření převýšení mezi body základny



Obr. 31: Vizualizace bodů základny

V rámci dalšího měření byla oboustranně zaměřena převýšení mezi body, kde délka záměr přesahovala 100 metrů. Tato měření byla využita pro odhad koeficientu atmosférické refrakce.

8.1.1 Měření totální stanicí Sokkia SET 2030 R3 – 2"

Bylo měření převýšení mezi body tam a zpět, přičemž každá záměra byla měřena v jedné skupině, ve dvou polohách na centrický hranol GPH1P s využitím manuálního cílení. tabulka 25 shrnuje výsledky měření tam a zpět.

Tabulka 25: Výsledky měření tam a zpět – Sokkia SET 2030 R3

Výsledky		Tam	Zpět	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
P2	P3	-0,0230	0,0228	-0,21
P3	P4	-0,0377	0,0378	0,16
P4	P5	-0,0810	0,0812	0,14
P5	P6	-0,0647	0,0654	0,77
P6	P7	0,8532	-0,8535	-0,37
Součet		0,6468	-0,6463	0,50

Rozdíl mezi měřením tam a zpět činí 0,5 mm.

Tabulka 26: Srovnání výsledků s referenčními hodnotami – Sokkia SET 2030 R3

Výsledky		Měření	Reference	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
P2	P3	-0,0229	-0,0237	-0,78
P3	P4	-0,0377	-0,0380	-0,25
P4	P5	-0,0811	-0,0812	-0,09
P5	P6	-0,0651	-0,0643	0,76
P6	P7	0,8533	0,8551	1,76
Součet		0,6465	0,6479	1,40

Největší odchylka od referenční hodnoty činila 1,76 mm. Záměry na body P6 a P7 byly nejdelší ze všech a dosahovaly přibližně 82,5 metrů, což mohlo mít vliv na přesnost.

8.1.2 Měření totální stanicí Trimble S5

Bylo měření převýšení mezi body tam a zpět, přičemž každá záměra byla měřena ve třech skupinách, ve dvou polohách na centrický hranol GPH1P s využitím automatického cílení.

Tabulka 27: Výsledky měření tam a zpět – Trimble S5

Výsledky		Tam	Zpět	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
P2	P3	-0,0228	0,0228	0,01
P3	P4	-0,0379	0,0379	0,02
P4	P5	-0,0810	0,0810	0,00
P5	P6	-0,0650	0,0652	0,20
P6	P7	0,8541	-0,8544	-0,23
Součet		0,6475	-0,6475	0,00

Rozdíl mezi měřením tam a zpět vyšel nulový.

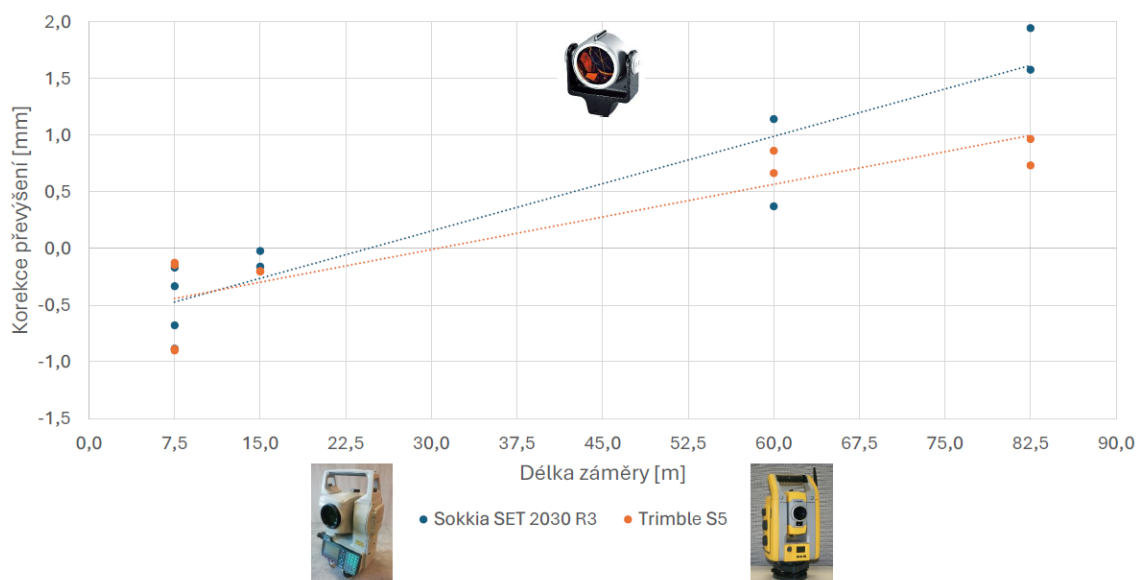
Tabulka 28: Srovnání výsledků s referenčními hodnotami – Trimble S5

Výsledky		Měření	Reference	Rozdíly [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
P2	P3	-0,0228	-0,0237	-0,89
P3	P4	-0,0379	-0,0380	-0,13
P4	P5	-0,0810	-0,0812	-0,20
P5	P6	-0,0651	-0,0643	0,76
P6	P7	0,8542	0,8551	0,85
Součet		0,6475	0,6479	0,38

Největší odchylka od referenční hodnoty nepřekročila 1 mm.

8.1.3 Vyhodnocení výsledků

Lze konstatovat, že díky vyššímu počtu skupin a automatizovanému cílení byly výsledky získané totální stanicí Trimble S5 přesnější. Na základě vypočtených nejistot byl sestaven graf závislosti odchylky od referenční hodnoty převýšení na délce záměry.



Obr. 32: Závislost korekce převýšení na délce záměry

Z grafu je patrné, že velikost nejistoty je přímo úměrná délce záměry. Dále lze konstatovat, že při délce záměry do 60 metrů nepřesahuje nejistota hodnotu přibližně 1 mm.

8.1.4 Odhad refrakčního koeficientu

Převýšení s délkami záměr přesahujícími 100 metrů byla zaměřena oboustranně. Měření probíhalo s využitím totální stanice Trimble S5 a centrického hranolu GPH1P, přičemž přístroj i hranol byly umístěny na pilířích s nucenou centrací.

Celkem bylo zaměřeno 5 převýšení. Pro každou záměru byl odhadnut koeficient atmosférické refrakce, a to dvěma metodami podle vzorců (16) a (18).

Pro výpočet úhlu, který svírají normály k elipsoidu byla použita hodnota $R = 6380700$ m, což je střední poloměr křivosti referenčního elipsoidu pro celé území ČR pro Besselův elipsoid.

Dosazením do vzorce (16) dostaneme následující koeficienty:

Tabulka 29: Refrakční koeficienty určené podle vzorce (16)

Záměra		Refrakční koeficient
z bodu	na bod	
P2	P6	-0,45
P2	P7	-0,19
P5	P7	-0,17
P5	P6	-0,09
P6	P7	-0,27

Pro výpočet refrakčních koeficientů podle vzorce (18) byl rovněž použit střední poloměr křivosti referenčního elipsoidu pro celé území ČR pro Besselův elipsoid. Také byly použity referenční hodnoty převýšení mezi body.

Tabulka 30: Refrakční koeficienty určené podle vzorce (18)

Záměra		Refrakční koeficient		
z bodu	na bod	záměra tam	záměra zpět	průměr
P2	P6	-0,43	-0,48	-0,45
P2	P7	-0,12	-0,26	-0,19
P5	P7	-0,14	-0,21	-0,17
P5	P6	-0,93	0,76	-0,09
P6	P7	-0,20	-0,34	-0,27

Lze konstatovat, že koeficienty atmosférické refrakce určené oběma metodami se vzájemně shodují.

Vzhledem k tomu, že vypočtené koeficienty atmosférické refrakce jsou záporné, lze konstatovat, že během měření panovaly neobvyklé atmosférické podmínky. V důsledku

toho se refrakční křivka ohýbá směrem vzhůru a je vůči povrchu Země vydutá, jak ukazuje obr. 3. Tuto domněnku podporuje i skutečnost, že měření probíhalo přibližně v poledne, při teplotě okolo 30 °C a za jasného slunečného počasí.



Obr. 33: Měření na výškové základně Brno-Jih

Jak je patrné z obr. 33, lokalita byla pokryta poměrně vysokou trávou dosahující úrovně kolen. To mohlo způsobit, že vzduchové vrstvy ve vyšších výškách měly vyšší teplotu než vrstvy těsně nad vegetací, což vedlo k inverznímu teplotnímu gradientu a tím i k zápornému refrakčnímu koeficientu.

Koeficient atmosférické refrakce během měření kolísal mezi $-0,09$ a $-0,45$, což potvrzuje výrazný vliv aktuálních meteorologických podmínek na jeho hodnotu.

Tabulka 31: Porovnání oboustranného měření převýšení

Výsledky		Tam	Zpět	Rozdíly [mm]	Vodorovná délka [m]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]		
P2	P6	-0,2108	0,2038	-7,032	179,977
P2	P7	0,6374	-0,6596	-22,184	344,955
P5	P7	0,7841	-0,7985	-14,416	284,988
P5	P6	-0,0665	0,0640	-2,452	120,009
P6	P7	0,8525	-0,8576	-5,079	164,976

Z výsledků je zřejmé, že měření jsou zatížena systematickými chybami.

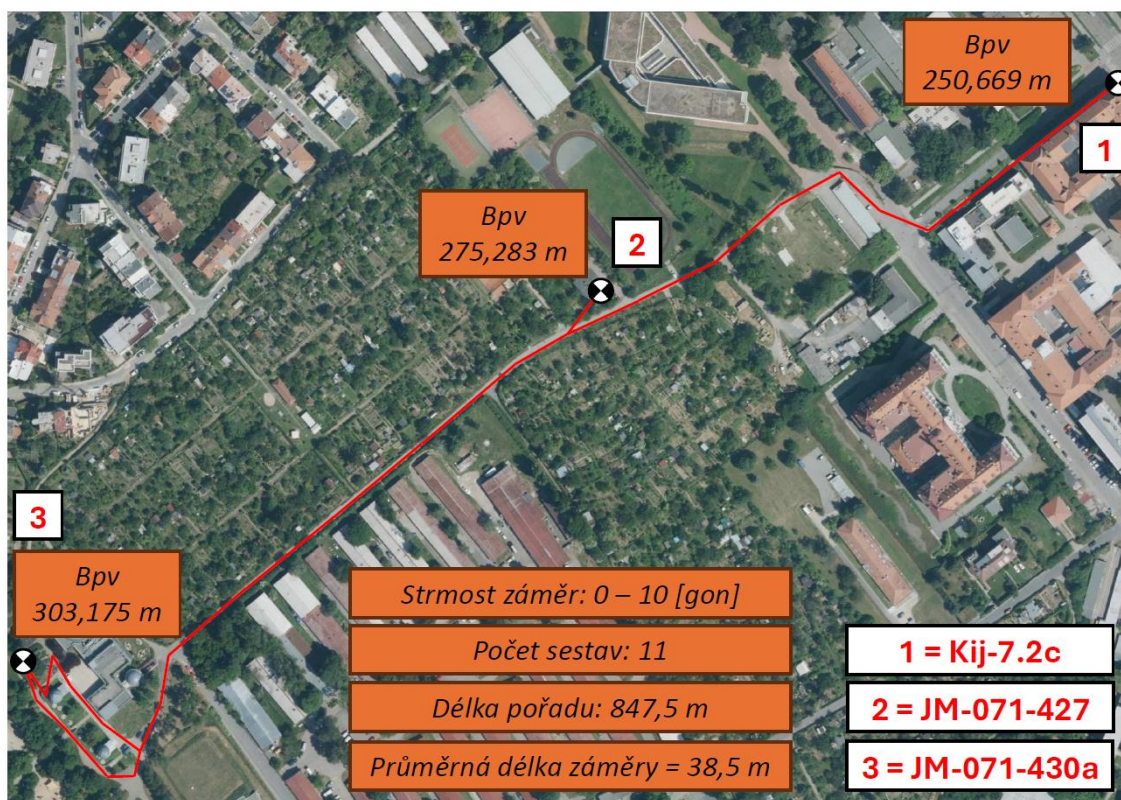
Tabulka 32: Výsledky oboustranného měření převýšení

Výsledky		Průměr [m]	Reference [m]	Rozdíly [mm]	Vodorovná délka [m]	Refrakční koeficient
z bodu	na bod					
P2	P6	-0,2073	-0,2072	0,11	179,977	-0,45
P2	P7	0,6485	0,6479	-0,64	344,955	-0,19
P5	P7	0,7913	0,7908	-0,47	284,988	-0,17
P5	P6	-0,0653	-0,0643	0,95	120,009	-0,09
P6	P7	0,8551	0,8551	0,02	164,976	-0,27

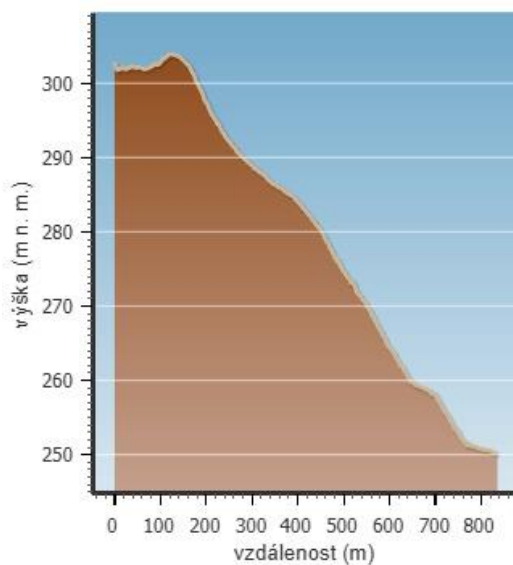
Je patrné, že průměrováním protisměrných měření dochází k eliminaci systematických chyb, a rozdíly převýšení vůči referenčním hodnotám nepřesahují 1 mm.

8.2 Lokalita Kraví hora

Cílem tohoto měření bylo posoudit vliv excentricity hranolu ve svažitém terénu při strmých záměrech. Měřeno bylo převýšení mezi body Kij-7.2c, JM-071-427 a JM-071-430a výškového bodového pole. Nivelace probíhala v jedenácti sestavách v délce přibližně 850 m, přičemž celkové převýšení činilo přibližně 50 m. Průměrná délka záměry byla 38,5 m a její sklon se pohyboval v rozmezí 0 až 10 gonů. Naměřené hodnoty byly porovnány s rozdílem výšek převzatým z geodetických údajů uvedených bodů. Při měření byl použit centrický minihranol Trimble M (PRI-50018) a totální stanice Trimble M3 DR – 2”.



Obr. 34: Schéma nivelačního pořadu v lokalitě Kraví hora



Obr. 35: Výškový profil nivelačního pořadu [18]

Záměra na bod 2 byla provedena bočně pouze při měření pořadu ve směru tam, a to z důvodu, že se uvedený bod nachází na budově mateřské školy ve dvorku, který byl v době zpětného měření již uzavřen.

Tabulka 33: Výsledky měření tam a zpět

Trigonometrická nivelace		Měření tam	Měření zpět	Rozdíl [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
Kij-7.2c	JM-071-427	24,618	-	-
JM-071-427	JM-071-430a	27,894	-	-
Kij-7.2c	JM-071-430a	52,513	-52,516	-3,47

Podle předpisu SŽ M20/MP007 byla mezní odchylka rozdílu měření v obou směrech pro danou délku pořadu stanovena na $14\sqrt{R_{km}} = 12,89$ mm [1]. Naměřená převýšení byla porovnána s rozdíly výšek získanými z geodetických údajů příslušných bodů z databáze ČÚZK.

Tabulka 34: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami bez zavedení korekce

Hranol Trimble M – bez korekce				
Z bodu	Na bod	Měřené převýšení [m]	Rozdíl výšek [m]	Rozdíl [mm]
Kij-7.2c	JM-071-427	24,618	24,614	-4,26
JM-071-427	JM-071-430a	27,894	27,892	-2,45
Kij-7.2c	JM-071-430a	52,514	52,506	-8,45

Zjištěné rozdíly mohly být způsobeny zastaralými výškovými údaji bodů.

Tabulka 35: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami po zavedení korekce

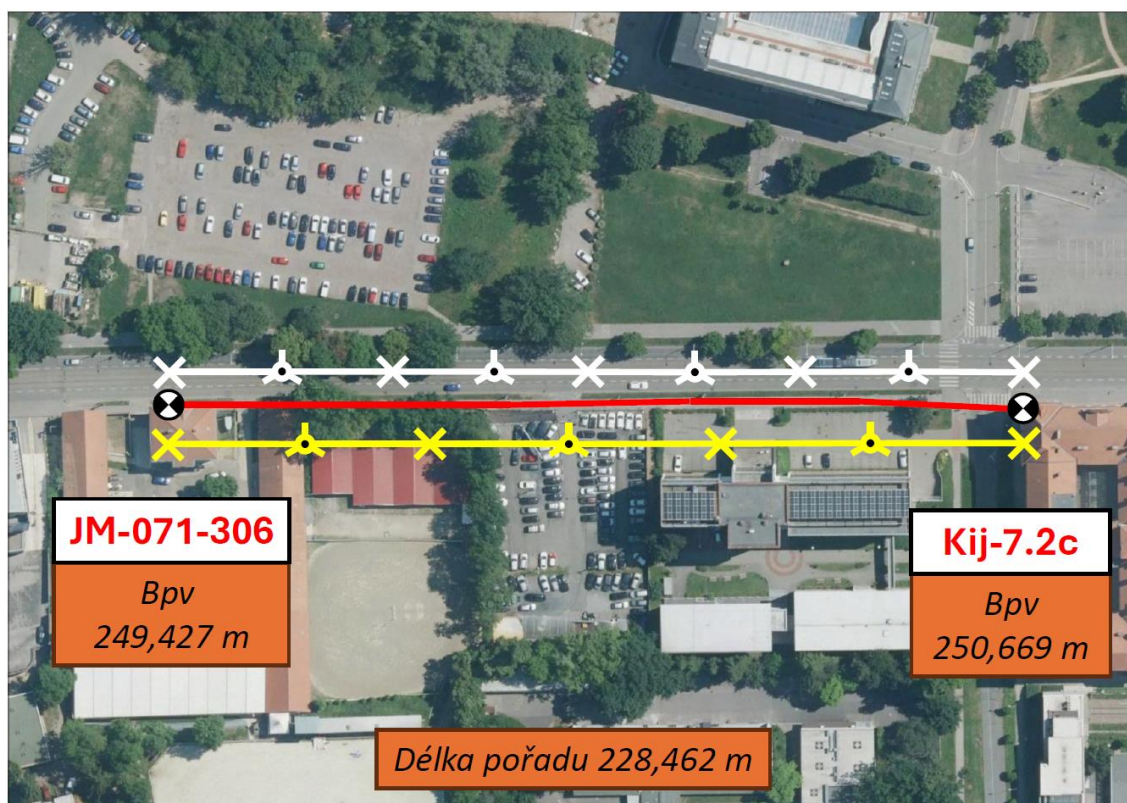
Hranol Trimble M – po korekci				
Z bodu	Na bod	Měřené převýšení [m]	Rozdíl výšek [m]	Rozdíl [mm]
Kij-7.2c	JM-071-427	24,618	24,614	-3,84
JM-071-427	JM-071-430a	27,894	27,892	-1,96
Kij-7.2c	JM-071-430a	52,514	52,506	-7,54

V důsledku zavedení korekce podle vzorce (23) se převýšení přiblížila referenčním hodnotám přibližně o 1 mm. Lze předpokládat, že při použití necentrického hranolu by byl tento vliv výraznější.

8.3 Lokalita ulice Veveří

Cílem měření bylo ověřit zanedbatelnost vlivu excentricity hranolu při záměrách s malým sklonem v téměř vodorovné rovině. Převýšení mezi body JM-071-306 a Kij-7.2c výškového bodového pole bylo měřeno dvakrát při použití různých délek záměr – konkrétně 28 m a 38 m. Naměřené hodnoty byly porovnány s rozdílem výšek převzatým

z geodetických údajů uvedených bodů. Při měření byl použit centrický minihranol Trimble M (PRI-50018) a totální stanice Trimble M3 DR – 2”.



Obr. 36: Schéma nivelačních pořadu na ulici Veveří

Tabulka 36: Výsledky měření tam a zpět

Trigonometrická nivelace			Měření tam	Měření zpět	Rozdíl [mm]
délka záměr	z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
~ 28 m	Kij-7.2c	JM-071-306	-1,246	1,247	0,68
~ 38 m	Kij-7.2c	JM-071-306	-1,244	1,247	3,21

Podle předpisu SŽ M20/MP007 byla mezní odchylka rozdílu měření v obou směrech pro danou délku pořadu stanovena na $14\sqrt{R_{km}} = 6,69 \text{ mm}$ [1]. Při zaměření na vzdálenost 28 m činil rozdíl mezi měřením tam a zpět 0,68 mm, zatímco při vzdálenosti 38 m dosáhl 3,21 mm.

Tabulka 37: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami

Hranol Trimble M					
délka záměr	z bodu	na bod	měřené převýšení [m]	rozdíl výšek[m]	Rozdíl [mm]
~ 28 m	Kij-7.2c	JM-071-306	-1,246	-1,242	4,24
~ 38 m	Kij-7.2c	JM-071-306	-1,245		3,25

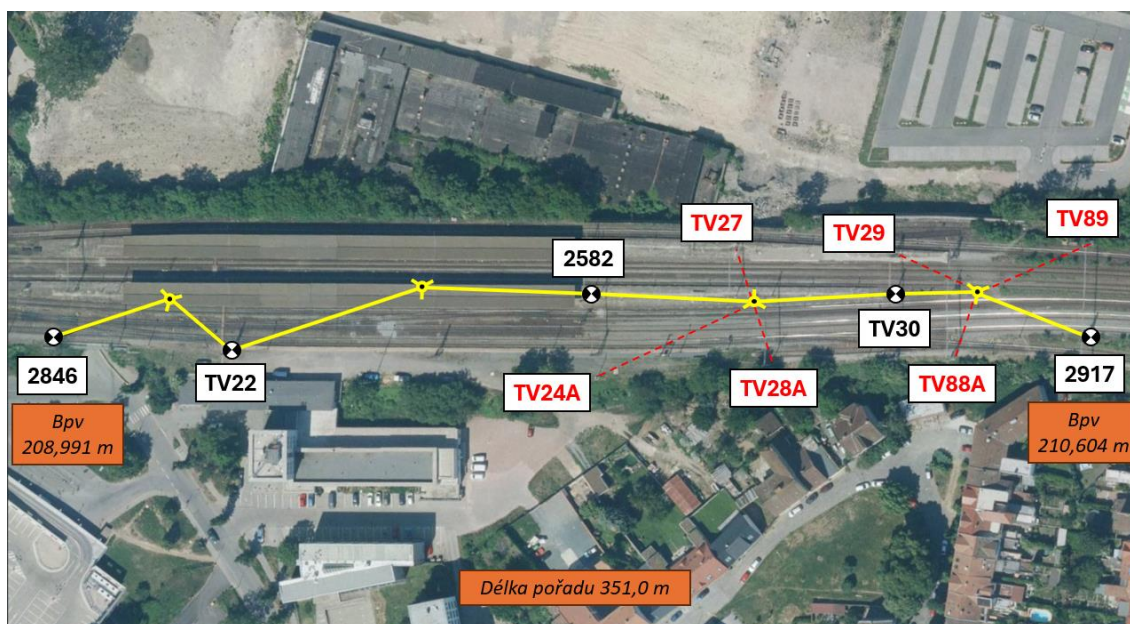
Největší zjištěná odchylka od rozdílu výšek byla 4,24 mm, což může být způsobeno zastaralými výškami bodů.

Jelikož byly svislé úhly menší než 1 gon, korekce excentricity hranolu dosahovala řádu setin milimetru, a proto byl tento vliv zcela zanedbatelný.

8.4 Lokalita Brno-Židenice

Měření bylo provedeno na železniční stanici Brno-Židenice. Byla měřena převýšení mezi body železničního bodového pole a zajišťovacími značkami. Získané výsledky byly porovnány s rozdíly výšek evidovanými v databázi Správy železnic. Poslední aktualizace těchto výšek byla provedena přibližně šest měsíců před tímto měřením.

Při měření byl použit centrický hranol Trimble M (PRI-50018) a totální stanice Trimble S8 – 0,5". Cílení na odrazný hranol bylo automatické.

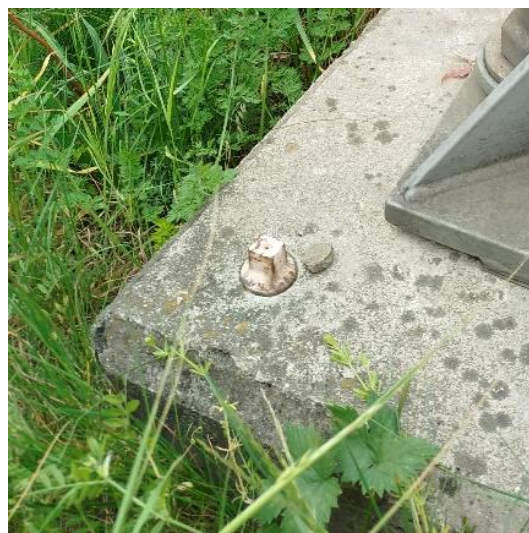


Obr. 37: Schéma nivelačního pořadu na železniční stanici Brno-Židenice

Měření probíhalo z bodu 2917 přes body TV30, 2582 a TV22 na bod 2846, následně zpětně stejnou trasou. Ze dvou stanovisek bylo bočně zaměřeno celkem deset zajišťovacích značek, z nichž čtyři nejsou ve schématu zobrazeny kvůli jejich blízkosti k ostatním bodům. Vzhledem ke zvýšenému nebezpečí při geodetických pracích v blízkosti železniční tratě probíhalo měření na základě povolení Správy železnic a za doprovodu geodeta dráhy.



Obr. 38: Konzolová zajišťovací značka



Obr. 39: Hřebová zajišťovací značka - vrtule



Obr. 40: Stabilizace bodu železničního bodového pole (ŽBP)

Tabulka 38: Výsledky měření tam a zpět – pořad trigonometrické nivelace

Trigonometrická nivelace		Měření tam	Měření zpět	Rozdíl [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
2917	TV30	-0,269	0,269	-0,66
TV30	2582	-0,303	0,302	-0,47
2582	TV22	-0,438	0,438	-0,64
TV22	2846	-0,604	0,604	0,30
Součet		-1,614	1,612	-1,47

Podle předpisu SŽ M20/MP007 byla mezní odchylka rozdílu měření v obou směrech pro danou délku pořadu stanovena na $14\sqrt{R_{km}} = 8,29 \text{ mm}$ [1]. Rozdíl převýšení při měření ve směru tam a zpět dosáhl hodnoty -1,47 mm.

Tabulka 39: Výsledky obousměrného měření – zajišťovací značky

Trigonometrická nivelace		1. měření	2. měření	Rozdíl [mm]
z bodu	na bod	převýšení [m]	převýšení [m]	
2917	TV89	-0,098	-0,099	0,52
	TV29	-0,064	-0,063	-0,69
	TV88	-0,313	-0,312	-0,30
	TV88A	-0,460	-0,460	-0,37
TV30	TV89	0,171	0,170	1,18
	TV29	0,205	0,205	-0,03
	TV88	-0,043	-0,044	0,36
	TV88A	-0,191	-0,192	0,29
TV30	TV27	0,138	0,138	-0,53
	TV28A	-0,759	-0,759	-0,41
	TV24AV	-0,310	-	-
	TV24A	-0,323	-	-
	TV26A	-0,053	-0,052	-0,58
	TV26	0,018	0,018	-0,45
2582	TV27	0,440	0,440	-0,06
	TV28A	-0,457	-0,457	0,07
	TV24AV	-0,007	-	-
	TV24A	-0,020	-	-
	TV26A	0,250	0,250	-0,10
	TV26	0,320	0,320	0,02

Zajišťovací značky byly v obou případech zaměřeny bočně, a proto k nim lze určit převýšení jak z bodu vzad, tak z bodu vpřed. Rozdíly dvojího určení převýšení byly ve většině případů nevýznamné, přičemž pouze jediný přesáhl hodnotu 1 mm.

Tabulka 40: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami – pořad trigonometrické nivelace

Trigonometrická nivelace				
z bodu	na bod	Průměr [m]	Reference [m]	Rozdíl [mm]
2917	TV30	-0,269	-0,269	-0,15
TV30	2582	-0,302	-0,299	3,33
2582	TV22	-0,438	-0,441	-2,98
TV22	2846	-0,604	-0,604	0,03
Součet		-1,613	-1,613	0,22

Tabulka 41: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami – zajišťovací značky

Trigonometrická nivelace				
z bodu	na bod	Průměr [m]	Reference [m]	Rozdíl [mm]
2917	TV89	-0,099	-0,097	1,55
	TV29	-0,063	-0,063	0,47
	TV88	-0,312	-0,311	1,41
	TV88A	-0,460	-0,459	1,29
TV30	TV89	0,170	0,172	1,70
	TV29	0,205	0,206	0,62
	TV88	-0,044	-0,042	1,56
	TV88A	-0,191	-0,190	1,44
TV30	TV27	0,138	0,140	2,11
	TV28A	-0,759	-0,758	1,00
	TV24AV	-0,310	-0,309	0,74
	TV24A	-0,323	-0,322	0,88
	TV26A	-0,052	-0,049	3,29
	TV26	0,018	0,021	3,13
2582	TV27	0,440	0,439	-1,22
	TV28A	-0,457	-0,459	-2,32
	TV24AV	-0,007	-0,010	-2,82
	TV24A	-0,020	-0,023	-2,68
	TV26A	0,250	0,250	-0,04
	TV26	0,320	0,320	-0,20

S ohledem na skutečnost, že změny výšek menší než 5 mm nejsou Správou železnic evidovány, lze konstatovat, že dosažené výsledky vyhovují tomuto kritériu.

Korekce excentricity hranolu dosahovala řádu setin milimetru, a proto byl tento vliv zcela zanedbatelný. Výsledky měření mohly být mírně ovlivněny provozem na stanici. Při průjezdu vlaku vedle stativu dochází k vibracím, které mohou ovlivnit postavení přístroje a přesnost cílení.

9 Automatizace výpočtů pomocí skriptu v programovacím jazyce Python

Automatizace výpočtů byla realizována pomocí skriptu v programovacím jazyce Python za využití knihovny OpenPyXL. OpenPyXL je knihovna s otevřeným kódem pro Python, která slouží k čtení a zápisu souborů Microsoft Excel [19].

Vstupním souborem programu je zápisník ve formátu MAPA2, doplněný o číslici označující typ záměry: 1 – vzad, 2 – vpřed, 3 – bočně. Tato číslice může být přidána jako prefix nebo sufix k číslu bodu, případně uvedena v poznámce.

```
Zakazka:Brno-Zidenice
9999
999999999
100001
1
3
0
2
1 4001 0.0000
2917 39.7122 1.5500 399.9850 99.2942 *1
2917 39.7168 1.5500 199.9967 300.7033 *1
89 40.2887 2.5500 350.1355 97.8792 *2
89 40.2858 2.5500 150.1323 302.1188 *2
29 27.7068 1.5500 203.6046 99.1340 *2
29 27.7085 1.5500 3.6023 300.8605 *2
88 15.4220 1.5500 175.0598 99.4709 *2
88 15.4288 1.5500 375.0750 300.5188 *2
88A 21.4669 1.5500 95.7134 100.0579 *2
88A 21.4641 1.5500 295.7102 299.9336 *2
30 26.1395 1.5500 175.0947 99.5818 *3
30 26.1486 1.5500 375.0884 300.4114 *3
30 45.8302 1.5500 336.7335 99.9884 *1
30 45.8294 1.5500 136.7346 300.0065 *1
27 17.8537 1.5500 217.8891 99.4805 *2
27 17.8538 1.5500 17.8886 300.5084 *2
28A 20.7159 1.5500 23.0498 102.3090 *2
28A 20.7128 1.5500 223.0518 297.6815 *2
24A 55.7215 1.5500 111.3760 100.3454 *2
```

Obr. 41: Ukázka vstupního souboru

Dalším čteným souborem je konfigurační soubor s příponou .ini, ve kterém lze nastavit přesnost směrů a délek pro použitou totální stanici, výšky počátečního a koncového bodu pořadu, informaci o tom, zda bylo měřeno tam i zpět, zda je potřeba generovat textový

soubor pro případné vyrovnaní výškové sítě ve vyrovnávacím softwaru G-Net a název zápisníku.

```
[nastaveni]
VyskaPocatku=210.604
VyskaKonce=208.991
PresnostSmeru=0.15
PresnostDelekMM=1
PresnostDelekPPM=2
MereniTamAZpet=True
GenerovatTextovySoubor=True
NazevZapisniku=zapisnik.asc
```

Obr. 42: Ukázka konfiguračního souboru

Výstupními soubory programu jsou záznam ve formátu Excel a textový soubor obsahující převýšení pro případné vyrovnaní výškové sítě ve vyrovnávacím softwaru G-Net. Obr. 43 zobrazuje zjednodušený vývojový diagram programu.



Obr. 43: Vývojový diagram programu

V rámci první etapy byly importovány potřebné knihovny a moduly – zejména *openpyxl*, *math* a *configparser*. Pomocí knihovny OpenPyXL byl vytvořen prázdný Excelový soubor sloužící jako šablona. Byly sloučeny buňky potřebné pro vytvoření hlavičky záznamu, vloženy požadované texty a aplikováno formátování textu a ohraničení buněk.

V rámci druhé etapy byly načteny zápisník měření a konfigurační soubor. Na základě importovaných dat bylo připraveno pět seznamů: seznam obsahující názvy bodů, seznam se šikmými délkami, seznam se zenitovými úhly, seznam s výškami cílů a seznam s typy záměr.

V rámci třetí etapy byla importovaná data vložena do příslušných buněk v Excelovém souboru. Na základě počtu bodů s typem záměry 1 a 3 byl stanoven počet sestav. Soubor byl následně rozdělen na měření tam a měření zpět se stejným počtem sestav. Do jednotlivých řádků byly postupně vkládány vzorce pro výpočet aritmetického průměru šikmých délek, pro výpočet zenitových úhlů z měření ve dvou polohách dalekohledu ($z = z_1 + \frac{400 - z_1 - z_2}{2}$) a následně také pro výpočet převýšení od horizontu přístroje, výšky horizontu přístroje, výšek bodů a nakonec i pro výpočet přesnosti určeného převýšení od horizontu podle vzorce (8). Tento poslední výpočet vycházel z hodnot přesnosti délek a úhlů zadaných v konfiguračním souboru.

Na konci části měření ve směru tam byl stanoven rozdíl mezi vypočtenou a zadanou (pokud je výška známa; pokud není známa počáteční nebo koncová výška, vyrovnání na dané výšky se neprovádí) výškou posledního bodu. Tento rozdíl byl následně rozdělen rovnoměrně podle počtu záměr na představové body. Vypočtená korekce byla následně aplikována na převýšení od horizontu přístroje tak, že byla odečtena od převýšení určených ze záměr vzad a přičtena k převýšením určeným ze záměr vpřed.

Stejný postup byl následně uplatněn i pro měření ve směru zpět. Poslední řádek záznamu obsahuje odchylku mezi měřením tam a zpět před zavedením korekcí a její mezní hodnotu, která byla vypočtena na základě přesnosti přístroje.

Tímto způsobem program nevkládá do záznamu přímo vypočtené hodnoty převýšení a přesnosti, ale vzorce pro jejich výpočet, což by mělo usnadnit orientaci v datech a umožnit jejich případnou kontrolu či úpravu. Inspirací pro návrh šablony záznamu byl zápisník pro technickou nivelaci.

✕ ✓ f_x ✓

=F9*COS(D9*PI()/200)-0

C	D	E	F	G	H	I
---	---	---	---	---	---	---

Záznam trigonometrick

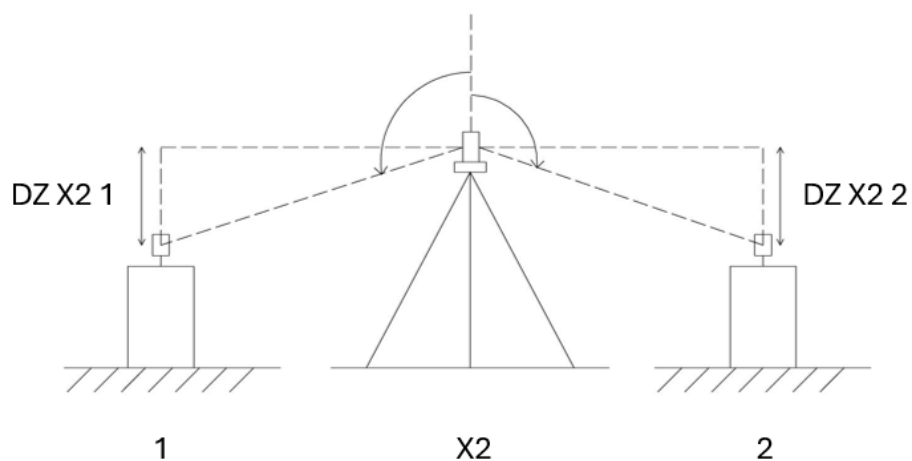
Zenitový úhel [g]		Šikmá délka [m]		Převýšení od horizontu [m]		
I. poloha	výsledný	I. poloha	výsledná			
II. poloha	úhel	II. poloha	délka	vzad	vpřed	bočně
99,4949	99,5012	2,991	2,991	0,023		
300,4926		2,991				
133,6370	133,6501	3,247	3,247		-1,637	
266,3369		3,246				
90,0682	90,0746	3,230	3,230	0,502		
309,9190		3,231				
108,0367	108,0499	2,747	2,747		-0,346	
291,9369		2,747				
Σ				0,525	-1,984	

Obr. 44: Ukázka vloženého vzorce pro výpočet převýšení od horizontu přístroje

V rámci čtvrté etapy byly veškeré výpočty provedeny znovu s využitím knihovny *math*. Výsledky byly následně exportovány do textového souboru ve stanoveném formátu požadovaném pro vyrovnávací software G-Net. Každý řádek tohoto souboru obsahuje pět položek: označení typu veličiny (v tomto případě převýšení), číslo bodu vzad, číslo bodu vpřed, hodnotu převýšení a jeho střední chybu vypočtenou na základě přesnosti měřidla podle vzorce (8).

VELICIN_01.EXP – Poznámkový blok				
Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda
DZ	X1	4001	-1.2056	0.00027
DZ	X1	1	-1.8325	0.00027
DZ	X2	1	-1.3828	0.00026
DZ	X2	2	-1.8768	0.00027
DZ	X3	2	-1.3552	0.00027
DZ	X3	3	-1.6862	0.00027
DZ	X4	3	-1.3884	0.00027
DZ	X4	4002	-1.1824	0.00028
DZ	X5	4002	-1.1827	0.00028
DZ	X5	4	-1.3903	0.00027
DZ	X6	4	-1.6987	0.00027
DZ	X6	5	-1.3731	0.00027
DZ	X7	5	-1.7878	0.00027
DZ	X7	6	-1.2800	0.00027
DZ	X8	6	-1.7542	0.00027
DZ	X8	4003	-1.1333	0.00026

Obr. 45: Ukázka výstupního souboru pro vyrovnání v softwaru G-Net



Obr. 46: Ukázka principu záznamu převýšení

Převýšení jsou vždy zaznamenávána od horizontu přístroje a ve směru ze stanoviště na bod.

Záznam trigonometrické nivelace

Číslo bodu		Zenitový úhel [g]		Šikmá délka [m]		Převýšení od horizontu [m]			Nadmořská výška horizontu stroje [m]	Nadmořská výška bodu [m]		Střední chyba převýšení od horizontu [mm]
přestavovacího	bočního	I. poloha	výsledný úhel	I. poloha	výsledná délka	vzad	vpřed	bočně		přestavovacího	bočního	
2917		99,2942 300,7033	99,2955	39,712 39,717	39,715	-1,111			211,715	210,604		mΔh2917 = 0,09
	TV89	97,8792 302,1188	97,8802	40,289 40,286	40,287			-0,209			211,506	mΔhTV89 = 0,10
	TV29	99,1340 300,8605	99,1368	27,707 27,709	27,708			-2,174			209,540	mΔhTV29 = 0,07
	TV88	99,4709 300,5188	99,4761	15,422 15,429	15,425			-2,423			209,292	mΔhTV88 = 0,04
	TV88A	100,0579 299,9336	100,0622	21,467 21,464	21,466			-1,571			210,144	mΔhTV88A = 0,05
TV30		99,5818 300,4114	99,5852	26,140 26,149	26,144		-1,380			210,335		mΔhTV30 = 0,06
TV30		99,9884 300,0065	99,9910	45,830 45,829	45,830	-1,544			211,879	210,335		mΔhTV30 = 0,11
	TV27	99,4805 300,5084	99,4861	17,854 17,854	17,854			-1,406			210,473	mΔhTV27 = 0,04
	TV28A	102,3090 297,6815	102,3138	20,716 20,713	20,714			-2,303			209,576	mΔhTV28A = 0,06
	TV24AV	100,3454 299,6525	100,3465	55,722 55,719	55,720			-1,853			210,025	mΔhTV24AV = 0,13
	TV24A	100,3538 299,6435	100,3552	56,706 56,706	56,706			-1,866			210,012	mΔhTV24A = 0,13
	TV26A	100,0570 299,9398	100,0586	50,019 50,017	50,018			-1,596			210,283	mΔhTV26A = 0,12
	TV26	99,9696 300,0277	99,9710	52,944 52,945	52,945			-1,526			210,353	mΔhTV26 = 0,12
2582		100,3789 299,6182	100,3804	49,549 49,551	49,550		-1,846			210,033		mΔh2582 = 0,12
2582		100,0229 299,9736	100,0247	58,447 58,452	58,449	-1,573			211,605	210,033		mΔh2582 = 0,14
TV22		100,4501 299,5472	100,4515	65,006 65,006	65,006		-2,011			209,595		mΔhTV22 = 0,15
TV22		100,3788 299,6121	100,3834	26,211 26,211	26,211	-1,708			211,303	209,595		mΔhTV22 = 0,06
2846		101,2288 298,7662	101,2313	39,384 39,383	39,384		-2,312			208,991		mΔh2846 = 0,10

Σ -5,935 -7,548 ΔH [mm] = 0,00 ΔhTAM [m] = -1,613

Původní odchylka výšky na bodě 2846 činila: 0,917 mm

Pro její eliminaci byla ke každému převýšení aplikována korekce: 0,115 mm

Obr. 47: Ukázka výstupního souboru Excel – měření ve směru tam

Záznam trigonometrické nivelace

Číslo bodu	Zenitový úhel [g]	Šikmá délka [m]		Převýšení od horizontu [m]			Nadmořská výška horizontu stroje [m]	Nadmořská výška bodu [m]		Střední chyba převýšení od horizontu [mm]
		I. poloha II. poloha	výsledný úhel	I. poloha II. poloha	výsledná délka	vzad vpřed bočně		přestavového	bočního	
2846		101,2287 298,7656	101,2316	39,392 39,385	39,388	-2,312	211,303	208,991		mΔh2846 = 0,10
TV22		100,3797 299,6134	100,3832	26,211 26,212	26,211	-1,708		209,595		mΔhTV22 = 0,06
TV22		100,4599 299,5353	100,4623	56,197 56,195	56,196	-1,958		209,595		mΔhTV22 = 0,13
2582		99,9708 300,0265	99,9722	67,677 67,678	67,677	-1,520	211,553	210,033		mΔh2582 = 0,16
2582		100,3738 299,6209	100,3765	44,673 44,655	44,664	-1,814		210,033		mΔh2582 = 0,11
	TV26A	100,0173 299,9778	100,0198	45,125 45,124	45,125	-1,564	211,847		210,283	mΔhTV26A = 0,11
	TV26	99,9236 300,0722	99,9257	48,056 48,060	48,058	-1,494			210,353	mΔhTV26 = 0,11
	TV27	99,3309 300,6577	99,3366	16,907 16,902	16,904	-1,374			210,473	mΔhTV27 = 0,04
	TV28A	102,0397 297,9504	102,0447	22,447 22,446	22,447	-2,271			209,576	mΔhTV28A = 0,06
TV30		99,9506 300,0460	99,9523	50,718 50,722	50,720	-1,512		210,335		mΔhTV30 = 0,12
TV30		99,9156 300,0798	99,9179	36,389 36,388	36,389	-1,503		210,335		mΔhTV30 = 0,09
	TV29	99,5664 300,4280	99,5692	37,291 37,285	37,288	-1,298	211,838		210,541	mΔhTV29 = 0,09
	TV88A	100,3461 299,6474	100,3494	26,359 26,361	26,360	-1,695			210,144	mΔhTV88A = 0,06
	TV88	99,9885 300,0044	99,9921	25,666 25,665	25,665	-1,547			210,292	mΔhTV88 = 0,06
	TV89	99,5548 300,4391	99,5579	31,191 31,193	31,192	-1,333			210,505	mΔhTV89 = 0,07
2917		99,3356 300,6579	99,3389	30,369 30,385	30,377	-1,234		210,604		mΔh2917 = 0,07

Σ -7,587 -5,974 ΔH [mm] = 0,00 ΔhZPĚT [m] = 1,613

Původní odchylka výšky na koncovém bodě činila: 0,496 mm

Pro její eliminaci byla ke každému převýšení aplikována korekce: 0,062 mm

Rozdíl měření TAM - ZPĚT před zavedením korekcí: -1,41 mm

Mezní odchylka: 0,87 mm

Obr. 48: Ukázka výstupního souboru Excel – měření ve směru zpět

Výšky zajišťovacích značek, které byly určovány bočními měřeními, byly zjišťovány opakovaně a obsahují nadbytečná měření. Jejich finální výšky by bylo možné následně vypočítat například vyrovnaním metodou nejmenších čtverců.

Použití navrženého skriptu výrazně zvyšuje rychlost a efektivitu zpracování naměřených dat. Je však nezbytné, aby byl vstupní zápisník před použitím očištěn od případných chybných nebo nekompletních záznamů.

10 Zhodnocení výsledků

Cílem této práce byla analýza použitelnosti trigonometrické nivelace. V rámci provedené analýzy bylo využito celkem pět totálních stanic a šest typů odrazných hranolů. Úhlová přesnost použitých přístrojů se pohybovala na úrovni 2" a vyšší. Například při délce záměry 60 m odpovídá tato úhlová přesnost nejistotě přibližně 0,6 mm, což je výsledek lepší než u technické nivelace, kde se výškové rozdíly odhadují v milimetrech nezávisle na délce záměry.

Pro každou soustavu „přístroj – hranol“ byla určena součtová konstanta hranolu. Ukázalo se, že tato konstanta je při použití různých přístrojů proměnlivá, a nelze se proto spolehlivě opírat o hodnotu udávanou výrobcem.

Následně byla provedena kalibrace přístrojů za účelem korekce vlivu excentricity hranolu při strmých záměrných přímkách. Ukázalo se, že toto vyhodnocení je nutné provést samostatně pro každou soustavu „přístroj – hranol“, neboť získané korekční rovnice se mezi jednotlivými kombinacemi výrazně lišily.

Bylo provedeno měření převýšení na výškové základně budovy B Fakulty stavební VUT. Ukázalo se, že při výjimečně strmých záměrných přímkách jsou výsledná převýšení zatížena systematickou chybou, která je způsobena vlivem excentricity hranolu. Při použití běžného minihranolu dosahovala tato chyba v jednotlivých záměrech hodnot několika milimetrů, což vedlo k výsledné odchylce celkového převýšení až v řádu centimetrů. Při použití centrického hranolu byl tento vliv mnohem méně výrazný, nicméně stále patrný.

Během měření v reálných podmínkách byly používány výhradně centrické hranoly. Ukázalo se, že při strmosti záměrných přímek kolem 10 gonů se začíná projevovat vliv excentricity hranolu, nicméně v této fázi ještě nemá výrazný dopad na výsledné převýšení. U pořadu délky 850 m, tvořeného 11 sestavami, vedla aplikace korekce na základě tohoto vlivu ke zlepšení výsledného převýšení o 1 mm. Lze tedy předpokládat, že při použití necentrického hranolu by byl tento vliv za stejně strmých podmínek výraznější a mohl by významně ovlivnit výsledky měření. Lze konstatovat, že při absenci výrazně strmých záměrů a při měření na centrický minihranol je vliv excentricity hranolu na výsledné převýšení zcela zanedbatelný, a proto není nezbytné zavádět korekci tohoto

vlivu. Přesnost metody dosahovala úrovně lepší technické nivelace, avšak nedosahovala úrovně přesné nivelace.

Dále lze konstatovat, že použití kratších záměr vede k přesnějším výsledkům. Při délkách záměr do 100 m není nutné zavádět korekce na vliv zakřivení Země a atmosférické refrakce, neboť tyto jevy mají při takto krátkých vzdálenostech zanedbatelný vliv. Za předpokladu obdobných podmínek měření dochází navíc k jejich částečné eliminaci díky přibližně stejným délkám záměr vzad a vpřed. Tato skutečnost byla potvrzena během provedených měření.

Během jednoho z měření byl odhadnut koeficient atmosférické refrakce. Ukázalo se, že tento koeficient závisí na aktuálních podmínkách teploty a tlaku a v průběhu času se mění. Z toho důvodu není možné při zavádění korekce na vliv atmosférické refrakce spoléhat na běžně používanou hodnotu koeficientu 0,13.

Výpočty naměřených dat lze automatizovat. Ukázalo se, že zpracování pomocí výpočetního skriptu je výrazně rychlejší a efektivnější než manuální zpracování. Pro bezproblémový chod automatizace je však nezbytné dodržovat jednotný formát vstupních záznamů.

Závěr

Metoda trigonometrické nivelace splňuje požadavky na přesnost podle metodického předpisu SŽ M20/MP007 [1]. Během ověřovacích měření byla dosažena odchylka v rámci stanovených limitů.

Klíčové pro udržení vysoké přesnosti je zvolit hranol s co nejmenší excentricitou. Analýza různých typů hranolů ukázala, že i drobné odchylky geometrického středu mohou při větším počtu sestav vést k akumulaci chyb řádu jednotek milimetrů. Volbou centricky konstruovaného hranolu lze minimalizovat nutnost zavedení korekce a zároveň snížit nejistotu výsledků.

Pro strmé záměry je nezbytné zavádět korekce měřených převýšení. Bez úprav by chyby způsobené vertikální složkou excentricity mohly při sklonu nad deset gonů zkreslit naměřené hodnoty. Zařazení lineárních korekcí získaných z kalibrace zajišťuje, že výsledné převýšení zůstane v rámci požadované tolerance, a zároveň odstraňuje rozdíly mezi měřeními nad a pod horizontem.

Přesnost určení převýšení je nepřímě úměrná délce záměry: čím delší je měřená vzdálenost, tím větší nejistotu má výsledné převýšení. Toto zjištění zdůrazňuje význam optimálního výběru referenční vzdálenosti – přímé zkrácení záměrné přímky vede k přesnějším výsledkům.

Je výhodné používat totální stanici s možností automatického cílení. Tato funkce nejen zvyšuje efektivitu práce, ale zároveň eliminuje chyby způsobené lidským faktorem při manuálním zaostřování.

Automatizace výpočtů přináší efektivní zpracování naměřených dat a odstraňuje riziko manuálních chyb při výpočtech a aplikaci korekcí. Implementace jednoduchého softwarového nástroje pro výpočet koeficientů a generování upravených i surových výsledků výrazně zkracuje dobu zpracování a zajišťuje vyšší konzistenci výstupů.

Metoda trigonometrické nivelace by mohla doplnit aktuálně používanou na železnici metodu technické nivelace.

Seznam použitých zdrojů

- [1] SPRÁVA ŽELEZNIC. *SŽ M20/MP007 Železniční bodové pole* [online]. Správa železnic, 2022. Dostupné také z: https://www.spravazeleznic.cz/edap_szdc_download/edap/download?guid=0462b811-5fe5-de18-e063-04b4630aa09d&type=file
- [2] HAUF, Miroslav. *Geodetický a kartografický obzor (GaKO) 9/78: Trigonometrická nivelace novodobými přístroji* [online]. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1978 [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://uazk.cuzk.gov.cz/mrimage/vademecum/proxy/cz/others/zeus/knih/dao/documents/0001/765daf51-ea7c-44d9-bc04-f138cbe66391.pdf>
- [3] ZHANG, Zhenglu, Zhenglu KUN, Yong DENG a Changlin LUO. Research on Precise Trigonometric Leveling in Place of First Order Leveling. *Geo-spatial Information Science* [online]. 2005, 8(4), 235-239 [cit. 2025-04-30]. ISSN 1009-5020. Dostupné z: doi:10.1007/BF02838654
- [4] WHALEN, Charles T. *NOAA Technical Report NOS 73 NGS 8: Control Leveling* [online]. Rockville, Md.: National Geodetic Survey, 1978 [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: https://geodesy.noaa.gov/library/pdfs/NOAA_TR_NOS_0073_NGS_0008.pdf
- [5] ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD. *Návod pro správu geodetických základů České republiky* [online]. Praha: ČÚZK, 2015 [cit. 2025-04-30]. ISBN 978-80-86918-86-0. Dostupné z: [https://cuzk.gov.cz/Predpisy/Resortni-predpisy-a-opatreni/Navody-CUZK/Navod_pro_spravu_geodetickych_zakladu_151086722-\(1.aspx](https://cuzk.gov.cz/Predpisy/Resortni-predpisy-a-opatreni/Navody-CUZK/Navod_pro_spravu_geodetickych_zakladu_151086722-(1.aspx)
- [6] CEYLAN, Ayhan a Orhan BAYKAL. Precise Height Determination Using Leap-Frog Trigonometric Leveling. *Journal of Surveying Engineering* [online]. 2006, 132(3), 118-123 [cit. 2025-04-30]. ISSN 0733-9453. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:3(118)

- [7] ŠTRONER, Martin. *Trigonometrické určování výškových rozdílů* [online]. Praha: Katedra speciální geodézie, České vysoké učení technické v Praze [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GD3/gd3_pred_5_TUVR_uvod.pdf
- [8] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *Inženýrská geodézie I: Modul 03 – Návod ke cvičením* [online]. Brno, 2006. Dostupné také z: <https://intranet.study.fce.vutbr.cz/studium/materialy/opory.asp>
- [9] ŠVÁBENSKÝ, Otakar a Alexej VITULA. *Inženýrská geodézie: návody ke cvičení I*. 2. vyd. Brno: PC-DIR, 1993. ISBN 80-214-0499-X.
- [10] WEIGEL, Josef. *Teorie chyb a vyrovnávací počet I: Měřické chyby* [online]. Brno: VUT v Brně, 2005, 66 s. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://intranet.study.fce.vutbr.cz/studium/materialy/opory.asp>
- [11] BÖHM, Josef, Vladimír RADOUCH a Miroslav HAMPACHER. *Teorie chyb a vyrovnávací počet*. 2. uprav. vyd. Praha: Geodetický a kartografický podnik, 1990, 416 s. ISBN 8070110562.
- [12] KŘEMEN, Tomáš. *Přednášky z geodézie pro obor Územní informační systémy pro veřejnou správu: Refrakce* [online]. Praha: Katedra speciální geodézie, České vysoké učení technické v Praze [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/~kremen/pred_10_GUI.pdf
- [13] HRADILEK, Ludvík. *Vysokohorská geodézie: Trigonometrická nivelace a trojrozměrná terestrická triangulace*. Praha: Academia, 1984.
- [14] ENGINEERSUPPLY. *Surveying prisms basics: nodal offsets and surveying prisms*. *EngineerSupply* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://www.engineersupply.com/surveying-prisms-basics.aspx>
- [15] LIKEŠ, Jiří a Josef MACHEK. *Matematická statistika*. 2. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 180 s.
- [16] ČSN ISO 17123-3 *Optika a optické přístroje: Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Část 3: Teodolity*. Praha: Český normalizační

institut, 2006. Dostupné také z: <https://csnonline.agentura-cas.cz/Detailnormy.aspx?k=74597>

- [17] ČSN ISO 17123-4 *Optika a optické přístroje: Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Část 4: Elektrooptické dálkoměry*. Praha: Český normalizační institut, 2006. Dostupné také z: <https://csnonline.agentura-cas.cz/Detailnormy.aspx?k=74596>
- [18] ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD. *Geoportál ČÚZK: Analýzy výškopisu* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.gov.cz/av/>
- [19] GAZONI, Eric a Charlie CLARK. *OpenPyXL 3.1.3 documentation* [online]. 2024 [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/>

Seznam zkratek

ČSNS	Česká státní nivelační síť
VUT	Vysoké učení technické v Brně
ŽBP	Železniční bodové pole
SŽ	Správa železnic

Seznam obrázků

Nenalezena položka seznamu obrázků.

Obr. 1: Princip trigonometrického určení převýšení [7]	13
Obr. 2: Princip trigonometrické nivelace	14
Obr. 3: Oboustranně trigonometricky zaměřená strana P1P2 a ukázka vyduté refrakční křivky	17
Obr. 4: Oboustranně trigonometricky zaměřená strana P1P2 a ukázka vypuklé refrakční křivky	17
Obr. 5: Excentricita běžného hranolu – horizontální směr	19
Obr. 6: Excentricita běžného hranolu – vertikální směr	19
Obr. 7: Excentricita centrického hranolů	20
Obr. 8: Excentricita všestranného minihranolu	20
Obr. 9: Excentricita běžného minihranolu	20
Obr. 10: Excentricita běžného minihranolu	21
Obr. 11: Excentricita centrického minihranolu	21
Obr. 12: Schéma předsazeného hranolu [14]	21
Obr. 13: Schéma centrického hranolu [14]	21
Obr. 14: Použité totální stanice a odrazné hranoly	23
Obr. 15: Schéma metody měření tří úseků	31
Obr. 16: Schéma 1. základny	33
Obr. 17: Schéma kalibrační základny	34
Obr. 18: Schéma kalibračního měření	34
Obr. 19: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble M3 a hranol Leica GMP111	35
Obr. 20: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble M3 a hranol Trimble M	35
Obr. 21: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Sokkia SET a hranol Leica GMP111	36
Obr. 22: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Sokkia SET a hranol Trimble M	36

Obr. 23: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble S8 a hranol Leica GMP111	37
Obr. 24: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Trimble S8 a hranol Trimble M	38
Obr. 25: Graf závislosti velikosti korekce na svislém úhlu – přístroj Topcon GT a hranol Trimble M	38
Obr. 26: Hranoly Seco 25mm (vlevo) a Leica GRZ101 (vpravo) umístěné na bodě základny	40
Obr. 27: Hranoly Leica GMP111 (vlevo) a Trimble AK18 (vpravo) umístěné na bodě základny	41
Obr. 28: Tyč s hranolem na nivelační značce	51
Obr. 29: Tyč s hranolem na nivelační podložce	51
Obr. 30: Schéma měření převýšení mezi body základny	52
Obr. 31: Vizualizace bodů základny	52
Obr. 32: Závislost korekce převýšení na délce záměry	54
Obr. 33: Měření na výškové základně Brno-Jih	56
Obr. 34: Schéma nivelačního pořadu v lokalitě Kraví hora.....	58
Obr. 35: Výškový profil nivelačního pořadu [18].....	58
Obr. 36: Schéma nivelačních pořadu na ulici Veverí.....	60
Obr. 37: Schéma nivelačního pořadu na železniční stanici Brno-Židenice	61
Obr. 38: Konzolová zajišťovací značka	62
Obr. 39: Hřbová zajišťovací značka - vrtule	62
Obr. 40: Stabilizace bodu železničního bodového pole (ŽBP).....	62
Obr. 41: Ukázka vstupního souboru	65
Obr. 42: Ukázka konfiguračního souboru.....	66
Obr. 43: Vývojový diagram programu.....	66
Obr. 44: Ukázka vloženého vzorce pro výpočet převýšení od horizontu přístroje.....	68
Obr. 45: Ukázka výstupního souboru pro vyrovnaní v softwaru G-Net.....	68
Obr. 46: Ukázka principu záznamu převýšení	69
Obr. 47: Ukázka výstupního souboru Excel – měření ve směru tam.....	70
Obr. 48: Ukázka výstupního souboru Excel – měření ve směru zpět.....	71

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přesnost totálních stanic	23
Tabulka 2: První série měření horizontálních směru.....	25
Tabulka 3: Druhá série měření horizontálních směru	26
Tabulka 4: První série měření vertikálních úhlů	27
Tabulka 5: Druhá série měření vertikálních úhlů	28
Tabulka 6: Měření délek.....	30
Tabulka 7: Porovnání konstant hranolů.....	31
Tabulka 8: Porovnání převýšení naměřených různými hranoly	41
Tabulka 9: Rozdíly dvou měření na hranol Leica GMP111	42
Tabulka 10: Rozdíly dvou měření na hranol Trimble M.....	42
Tabulka 11: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami bez zavedení korekce	43
Tabulka 12: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami bez zavedení korekce	43
Tabulka 13: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami po zavedení korekce	44
Tabulka 14: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami po zavedení korekce	45
Tabulka 15: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami bez zavedení korekce	45
Tabulka 16: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami bez zavedení korekce	46
Tabulka 17: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami po zavedení korekce	46
Tabulka 18: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami po zavedení korekce	47
Tabulka 19: Rozdíly měření tam a zpět na hranol Leica GMP111	48
Tabulka 20: Rozdíly měření tam a zpět na hranol Trimble M	48
Tabulka 21: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami bez zavedení korekce	49

Tabulka 22: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami bez zavedení korekce.....	49
Tabulka 23: Rozdíly mezi měřením na hranol Leica GMP111 a referenčními hodnotami po zavedení korekce.....	50
Tabulka 24: Rozdíly mezi měřením na hranol Trimble M a referenčními hodnotami po zavedení korekce.....	50
Tabulka 25: Výsledky měření tam a zpět – Sokkia SET 2030 R3	53
Tabulka 26: Srovnání výsledků s referenčními hodnotami – Sokkia SET 2030 R3	53
Tabulka 27: Výsledky měření tam a zpět – Trimble S5	53
Tabulka 28: Srovnání výsledků s referenčními hodnotami – Trimble S5	54
Tabulka 29: Refrakční koeficienty určené podle vzorce 16	55
Tabulka 30: Refrakční koeficienty určené podle vzorce 18	55
Tabulka 31: Porovnání oboustranného měření převýšení	57
Tabulka 32: Výsledky oboustranného měření převýšení	57
Tabulka 33: Výsledky měření tam a zpět.....	59
Tabulka 34: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami bez zavedení korekce ..	59
Tabulka 35: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami po zavedení korekce....	59
Tabulka 36: Výsledky měření tam a zpět.....	60
Tabulka 37: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami.....	60
Tabulka 38: Výsledky měření tam a zpět – pořad trigonometrické nivelace.....	62
Tabulka 39: Výsledky obousměrného měření – zajišťovací značky.....	63
Tabulka 40: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami – pořad trigonometrické nivelace	63
Tabulka 41: Rozdíly mezi měřením a referenčními hodnotami – zajišťovací značky....	64