



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

ZHODNOCENÍ VHODNOSTI RŮZNÝCH GEODETICKÝCH METOD PRO ZJIŠTĚNÍ SKUTEČNÉHO TVARU POVRCHU MOSTNÍ KONSTRUKCE

EVALUATION OF DIFFERENT SURVEYING METHODS FOR DETERMINATION OF TRUE SHAPE
OF BRIDGE STRUCTURE SURFACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jonáš Smetana

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADOVAN MACHOTKA, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie, kartografie a geoinformatika
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jonáš Smetana
Název	Zhodnocení vhodnosti různých geodetických metod pro zjištění skutečného tvaru povrchu mostní konstrukce
Vedoucí práce	doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN 73 0212-1 Geometrická přesnost ve výstavbě. Kontrola přesnosti. Část 1: Základní ustanovení. ČSN, Český normalizační institut, Praha, 1996, 8 stran.

ČSN 73 0212-4 Geometrická přesnost ve výstavbě, Kontrola přesnosti, Část 4: Liniové stavební objekty. ČSN, Český normalizační institut, Praha, 1994, 14 stran.

ČSN 73 6175 - Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek. ČSN, Český normalizační institut, Praha, 2015, 32 stran.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Na vybraném mostním objektu uskutečňte měření povrchu mostní konstrukce. Povrch změřte několikrát v krátkém časovém rozmezí a to při použití různých geodetických metod (zpřesněná technická případně přesná nivelace, tachymetrie, laserové skenování, případně další).

Na základě analýzy získaných dat a zkušeností z měření zhodnoťte vhodnost uvedených metod.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je porovnání různých geodetických metod a zhodnocení využití těchto metod pro daný případ. Mezi tyto geodetické metody patří trigonometrické určování výšek, geometrická nivelace, technologie GNSS a laserové skenování. Daným případem je měření na povrchu monolitické desky mostní konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Trigonometrické určování výšek, geometrická nivelace, technologie GNSS, laserové skenování, most, porovnání

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is comparison different geodetic methods and assessment usage of these methods for the case. These geodetic methods includes trigonometrical height determination, geometric levelling, technology GNSS and laser scanning. The case is measurement on surface monolithic plate of bridge construction.

KEYWORDS

Trigonometrical height determination, geometric levelling, technology GNSS, laser scanning, bridge, comparison

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jonáš Smetana *Zhodnocení vhodnosti různých geodetických metod pro zjištění skutečného tvaru povrchu mostní konstrukce*. Brno, 2020. 61 s., 65 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Zhodnocení vhodnosti různých geodetických metod pro zjištění skutečného tvaru povrchu mostní konstrukce* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 19. 5. 2020

Jonáš Smetana
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Zhodnocení vhodnosti různých geodetických metod pro zjištění skutečného tvaru povrchu mostní konstrukce* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 19. 5. 2020

Jonáš Smetana
autor práce

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu doc. Ing. Radovanu Machotkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a konzultace. Dále bych rád poděkoval firmě Hrdlička spol. s.r.o. v zastoupení panem Ing. Pavlem Hladíkem za poskytnuté vybavení a spolupráci při měření. V neposlední řadě děkuji mé rodině za podporu během celého studia.

Obsah

1 Úvod	11
2 Uvedení do problematiky	12
2.1. Základní údaje o stavbě	12
2.1.1. Lokalizace a charakteristiky stavby	12
2.1.2. SO 202.....	13
2.2. Účel měření.....	14
3 Trigonometrické určování výšek	16
3.1. Princip metody	16
3.2. Opravy trigonometrického určování výšek.....	17
3.2.1. Oprava ze zakřivení Země q	17
3.2.2. Oprava z refrakce p	18
3.3. Přesnost určení výšky	19
4 Geometrická nivelace	21
4.1. Princip metody geometrické nivelace ze středu.....	21
4.2. Druhy geometrické nivelace ze středu.....	22
4.2.1. Technická nivelace	22
4.2.2. Přesná nivelace	23
4.2.3. Velmi přesná nivelace	24
4.2.4. Zvlášť přesná nivelace	24
4.3. Přesnost jednotlivých druhů nivelace	24
4.3.1. Střední chyba jedné sestavy m_{hi}	24
4.3.2. Střední kilometrová chyba nivelace m_0	24
4.4. Chyby při měření	25
4.4.1. Systematické chyby.....	25
4.4.2. Náhodné chyby.....	26
4.5. Niveláčnické latě	27
4.6. Niveláčnické podložky	28
5 Technologie GNSS	29
5.1. Historie GNSS	29
5.2. Princip metody GNSS.....	29
5.3. Struktura GNSS	29
5.3.1. Kosmický segment	29
5.3.2. Řídící segment.....	29
5.3.3. Uživatelský segment	30
5.4. Systémy GNSS	30

5.4.1. GPS	30
5.4.2. GLONASS	30
5.4.3. Galileo	30
5.4.4. Compass	30
5.4.5. Další systémy regionálního významu	31
5.5. Metody určení polohy pomocí GNSS.....	31
5.5.1. Dělení podle měřených veličin.....	31
5.5.2. Dělení podle pohybu při měření.....	32
6 Laserové skenování	35
6.1. Historie a vývoj laseru	35
6.2. Princip technologie pozemního laserového skenování	35
6.2.1. Možnosti měření přímé prostorové vzdálenosti	36
6.3. Druhy laserového skenování.....	36
6.3.1. Statické pozemní laserové skenování.....	36
6.3.2. Letecké laserové skenování.....	36
6.3.3. Mobilní pozemní laserové skenování.....	37
6.3.4. Ruční pozemní laserové skenování	37
7 Vlastní měření.....	38
7.1. Rekognoskace terénu	38
7.2. Bodové pole	38
7.3. Podmínky měření.....	40
7.4. Použité přístroje a pomůcky	40
7.4.1. Trimble S5.....	40
7.4.2. Trimble DiNi 0.3	40
7.4.3. Trimble GNSS R4 – 3	41
7.4.4. Trimble SX10.....	41
7.5. Průběh měření	41
7.5.1. GNSS technologie.....	41
7.5.2. Zpřesněná technická nivelace	42
7.5.3. Trigonometrické určování výšek.....	42
7.5.4. Laserové skenování	42
8 Zpracování dat a výpočty	44
8.1. Metoda RTK technologie GNSS	45
8.2. Geometrická nivelace.....	45
8.3. Trigonometrické určování výšek	46
8.4. Laserové skenování.....	46
9 Analýza a vyhodnocení výsledků	48

9.1. Absolutní porovnání	51
9.2. Relativní porovnání.....	52
10 Závěr	53
Seznam použitých zdrojů	54
Seznam použitých zkratk	56
Seznam obrázků.....	58
Seznam tabulek.....	59
Seznam grafů	60
Seznam příloh	61

1 Úvod

K zjišťování tvaru povrchu mostní konstrukce je možné využít řadu geodetických metod. Primární význam v tomto typu měření má výškový údaj v předem stanovených profilech. Nejčastěji je v praxi pro získání výškových údajů používána metoda trigonometrického určování výšek nebo geometrické nivelace. Technický vývoj ovšem umožňuje využívat i další, v současné době již konvenční metody, mezi které patří technologie GNSS či laserové skenování.

Aplikace několika daných metod na konkrétním případě praxe umožňuje relevantně vyhodnotit výsledky měření a určit nejvhodnější metody pro praxi tohoto typu.

Měření bylo uskutečněno na povrchu mostní konstrukce v etapě stavby po vyhotovení monolitické betonové desky. Veškeré měřické práce probíhaly ve spolupráci s firmou HRDLIČKA spol. s.r.o. v zastoupení panem Ing. Pavlem Hladíkem.

První část této práce se zabývá uvedením do problematiky stavby, teoretickými principy a druhy jednotlivých geodetických metod, které byly použity při měření povrchu mostní konstrukce. Mezi tyto metody patří trigonometrické určování výšek, geometrická nivelace, laserové skenování a technologie GNSS. V druhé části práce je proveden popis měřických prací, analýza výsledků měření jednotlivých metod a zhodnocení využitelnosti těchto metod v daném případě měření.

2 Uvedení do problematiky

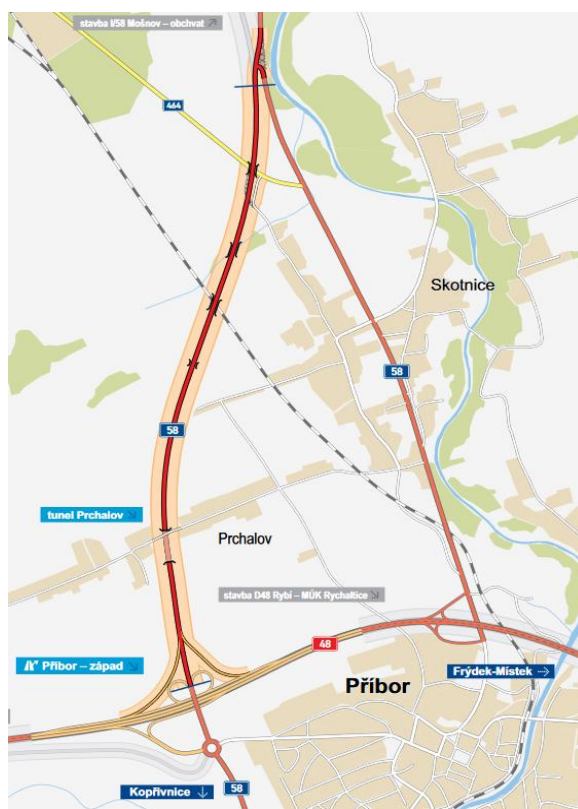
2.1. Základní údaje o stavbě

2.1.1. Lokalizace a charakteristiky stavby

Měřické práce probíhaly na povrchu mostní konstrukce stavebního objektu 202 (SO 202) na silnici I/58 přes železniční trať č. 325 Studénka – Veřovice. Stavba tohoto úseku silnice I/58 probíhá v Moravskoslezském kraji mezi Příborem a Skotnicí. Délka stavěné trasy je 2 967 m a nachází se na ní celkem 4 mostní objekty (včetně SO 202) a jeden tunel (hloubený) pod obcí Prchalov.

Tato stavba má regionální a nadregionální význam. Silnice I/58 spojuje města Rožnov pod Radhoštěm, Frenštát pod Radhoštěm a přilehlé oblasti s krajským městem Ostrava. Dále je tato silnice přivaděčem dálnice D48 a dopravním napojením mezinárodního Letiště Leoše Janáčka Ostrava.

V současné době je silnice I/58 přerušena na mimoúrovňové křižovatce s dálnicí D48. Řidiči musí dále pokračovat po dálnici D48 ve směru Frýdek-Místek a na následující křižovatce se opět napojit zpět na silnici I/58. Dále silnice probíhá oblastí obce Skotnice. Nově stavěný úsek tyto problémy vyřeší. Plánované uvedení stavby do provozu je v červnu roku 2020. [1]



Obrázek 1 – Lokalizace stavby [1]

2.1.2. SO 202

Most s označením SO 202 mimoúrovňově kříží železniční trať č. 325 mezi Studénkou a Veřovicemi ve staničení km 9,708. Výška mostu nad touto tratí je 8,247 m. Účel mostu je tedy převedení pozemní komunikace přes železniční trať.

Základní rozměry mostu:

- Délka přemostění: 66,489 m
- Délka mostu: 83,352 m
- Délka nosné konstrukce: 69,511 m
- Šířka mostu: 13,10 m
- Volná šířka mostu: 11,50 m
- Plocha mostu: 911 m²

Jedná se o trémový, spřažený betonový most o třech polích (21,0 m + 26,0 m + 21,0 m).

Horní povrch mostní konstrukce tvoří monolitická betonová deska se střešovitým příčným sklonem 2,50 %. Na obou stranách pod římsami je tvořen protispád o sklonu 4,00 %. [2]



Obrázek 2 – SO 202 [autor]

2.2. Účel měření

Hlavním účelem tohoto měření, vyjma umožnění relevantního porovnání několik geodetických metod na témže objektu, bylo kontrolní měření skutečného tvaru monolitické desky SO 202. Jednalo se tedy o přijímací kontrolu dokončení stavebních prací příslušné etapy, v našem případě monolitické desky po odbednění. Zároveň se jednalo o kontrolní měření technického dozoru stavby. [3]

U daného typu kontrolního měření monolitické desky má primární význam výškový údaj. Poloha bodů v horizontální rovině zde má význam ve smyslu, aby měření výšek jednotlivých etap (vrstev) bylo uskutečněno vždy ve stejných místech (poloze), které vytvářejí profily. Je zde ovšem dodržována přesnost v únosných mezích. Při vyhodnocování výsledků proto nejsou uvažovány souřadnice polohy X, Y ale pouze výšky daných bodů. Výšky bodů jednotlivých vrstev mají pro stavbu liniového typu stěžejní význam v její kontrole a realizaci.

Poloha bodů v souřadnicích X, Y je v průběhu stavby pro jednotlivé vrstvy neměnná, oproti výškám, které se s narůstajícími vrstvami mění. Po realizaci dané vrstvy je nutné body nejprve polohově vytyčit a dočasně signalizovat. V našem případě byly jednotlivé body profilů signalizovány křížkem s vyznačeným středem umístěným ve zvýrazňujícím kroužku. Signalizace byla realizována barvou.



Obrázek 3 – Signalizace bodu na mostní konstrukci [autor]

Jednotlivé body tvoří profily. Pro účely kontrolního měření byly vybrány 3 podélné profily. Dva podélné profily ve vzdálenosti 0,675 m od okrajů mostní konstrukce a jeden podélný profil v ose mostu. V jednotlivých podélných profilech bylo zaměřeno v rozmezí 43 až 45 příčných profilů v celé délce mostu. Podélné profily mají od sebe konstantní rozstup 5,6 m. Rozestupy v příčných profilech se mění v závislosti, zda se dané body nacházejí nad pilířem nebo v poli mimo něj. Rozstup příčných profilů je v rozmezí 0,6 – 2,0 m.

U mostních konstrukcí se také velmi frekventovaně kontroluje prostorová poloha charakteristických bodů. Poloha charakteristických bodů se kontroluje měřením odchylek v podélném a příčném směru a výšky. Kontrolní měření je vztaženo k hlavním bodům trasy a hlavním výškovým bodům. [4]

Tabulka 1 – Přesnost metod kontrolního měření prostorové polohy mostů [4]

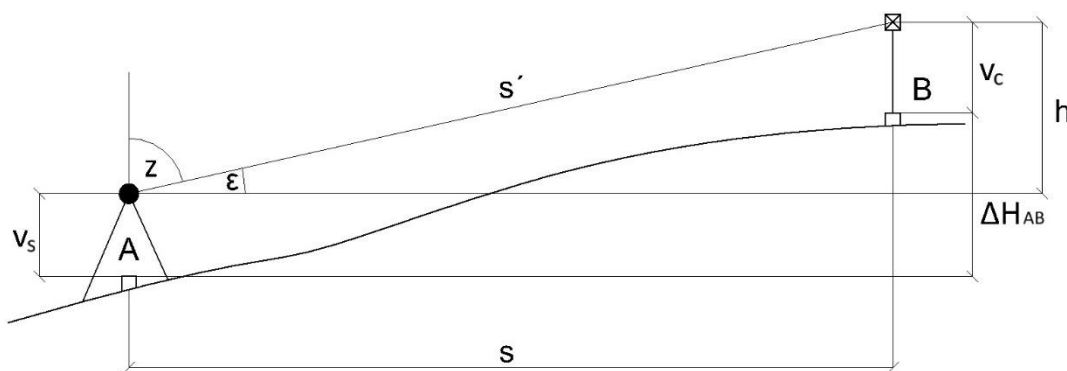
Základní střední chyba σ_x charakteristických bodů v mm		
Podélná	Příčná	Výšková
8	6	6

3 Trigonometrické určování výšek

3.1. Princip metody

Tato metoda určování výšek je založena na řešení pravoúhlého trojúhelníka. Toto řešení se realizuje pomocí goniometrických funkcí. Variabilita goniometrických funkcí umožňuje měřit šikmé, popřípadě vodorovné délky vždy s kombinací se svislým úhlem. Svislým úhlem může být zenitový úhel nebo také výškový úhel. V praxi je ovšem v současné době měřena převážně kombinace zenitového úhlu s šikmou vzdáleností. [5]

Pomocí goniometrických funkcí lze vypočítat převýšení mezi dvěma body. Skrze toto převýšení se následně vypočítá výška určovaného bodu.



Obrázek 4 – Trigonometrické určování výšek [autor]

A – výchozí bod o známé výšce

B – určovaný bod

s' – šikmá délka

s – vodorovná délka

z – zenitový úhel

ϵ – výškový úhel

v_s – výška přístroje

v_c – výška cíle

h – převýšení mezi klopnou osou dalekohledu a středem cílového znaku

Převodní vztah mezi zenitovým a výškovým, popřípadě hloubkovým úhlem

$$Z = 100 \text{ gon} - (\pm\epsilon) \quad (1) [5]$$

Výškový úhel (+ ε) je měřený od horizontálního směru na zaměřovaný bod směrem k zenitu.

Hloubkový úhel (- ε) je záporný výškový úhel měřený od horizontálního směru na zaměřovaný bod směrem k nadiru. [6]

Číslování pro výškové úhly se vyskytuje pouze u starších teodolitů. V současné praxi je to téměř vyloučeno. [5]

Možná variabilita měřených veličin pro výpočet h

$$h = s' * \cos z \quad (2)$$

$$h = s * \cotg z \quad (3)$$

$$h = s' * \sin \varepsilon \quad (4)$$

$$h = s * \tg \varepsilon \quad (5)$$

Vztah pro výpočet převýšení mezi dvěma stabilizačními znaky bodů

$$\Delta H_{AB} = h + v_S - v_C \quad (6)$$

Vztah pro výpočet výšky bodu B

$$H_B = H_A + \Delta H_{A B} \quad (7)$$

3.2. Opravy trigonometrického určování výšek

Jedná se o opravy korigující výslednou výšku určovaného bodu. Opravy p a q se zavádějí až u vzdáleností delších než 270 m. [7]

Vztah pro výpočet výšky bodu B se zavedenými opravami

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB} + q + p \quad (8)$$

3.2.1. Oprava ze zakřivení Země q

Tato oprava koriguje vypočtenou výšku určovaného bodu, která se vztahuje ke zdánlivému horizontu. Dochází tedy k zanedbání zakřivení Země. Korekce je rozdíl mezi skutečným a zdánlivým horizontem. [7]

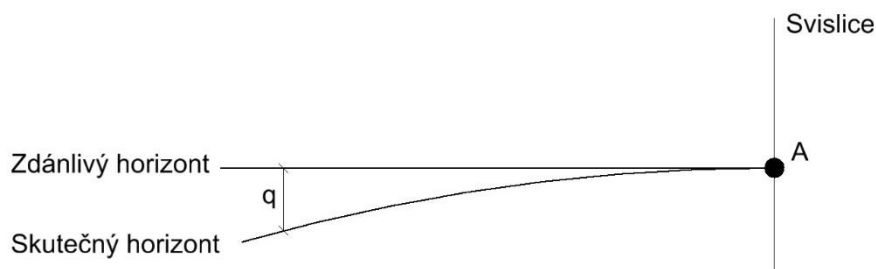
$$q = \frac{s^2}{2R} \quad (9)$$

R – poloměr náhradní koule, R = 6 380 km

s – vodorovná vzdálenost

Tabulka 2 – Opravy ze zakřivení Země [7]

s [m]	100	200	357	400	500	750	1 000	1 500	2 000
q [mm]	0,8	3,1	10	13	20	44	78	180	310



Obrázek 5 – Skutečný a zdánlivý horizont [autor]

3.2.2. Oprava z refrakce p

Refrakce neboli změna průběhu záměrné přímky v prostoru. Vzniká v důsledku různých optických vlastností v zemské atmosféře. Z pohledu optických vlastností prostředí má největší význam teplota a tlak. Je zde aplikován Fermatův princip, kdy se světlo v prostoru šíří po takové dráze, aby doba potřebná k překonání této dráhy byla co nejmenší, tedy minimální.

Hustota vzduchu zpravidla klesá s nadmořskou výškou, proto je refrakční křivka nejčastěji konkávní k zemskému povrchu. Ovšem v přízemních vrstvách nastávají krátkodobě i takové podmínky, v důsledku kterých je hustota vzduchu několik metrů nad terénem nižší než těsně nad povrchem. Jedná se o takzvané mikroklima. V tomto případě je refrakční křivka konvexní k zemskému povrchu. [5]

Určení refrakčních vlivů lze několika způsoby, jedním z nejčastějších způsobů je pomocí refrakčního koeficientu k .

$$k = \frac{R}{R'} \quad (10)$$

R – poloměr náhradní koule, $R = 6\,380$ km

R' – poloměr oblouku refrakční křivky (jeho aproximace)

Hodnota refrakčního koeficientu závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, a to i změn těchto vlastností v průběhu záměry. Střední refrakční koeficient $k_0 = 0,1306$ byl určen Gaussovým měřením, které je nazýváno Hanoverské stupňové měření. Hodnota refrakčního koeficientu odpovídá přibližně měření během dne mezi 10 – 16 hodinou za zvýšeného postavení přístroje (např. na střeše budovy).

Obecně platí, že 1-2 hodiny po východu Slunce a před západem Slunce není vhodná doba z pohledu refrakční problematiky pro trigonometrické určování výšek s vyšší přesností. [5] [6]

$$p = \frac{k_s^2}{2R} \quad (11)$$

($k_0 = 0,13$, $R = 6\,380$ km, δ_0 – refrakční úhel)

Tabulka 3 - Opravy z refrakce [7]

s [m]	100	200	313	500	750	1 000	1 500	2 000	3 000
δ_0 [mgon]	0,06	0,13	0,20	0,32	0,49	0,65	0,97	1,3	1,9
p [mm]	-0,1	-0,4	-1,0	-2,5	-5,7	-10	-23	-41	-92

3.3. Přesnost určení výšky

Přesnost určení výsledné výšky určovaného bodu závisí na přímo měřených veličinách, zejména na měřeném zenitovém úhlu. V současné praxi jsou měřeny šikmé vzdálenosti pomocí elektronických dálkoměrů, které dosahují přesností určení délky m_d . [5] [9]

$$m_d = \pm (a \text{ [mm]} + b \text{ [ppm]}) \quad (12)$$

a – konstantní složka, není závislá na velikosti měřené délky

b – proměnná složka, závislá na velikosti měřené délky

Například robotizovaná totální stanice Trimble S5 má hodnotu směrodatné odchylky (tedy přesnosti určení délky) $m_d = 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ ve standartním režimu, $m_d = 4 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ v režimu tracking při měření na odrazný hranol. [10]

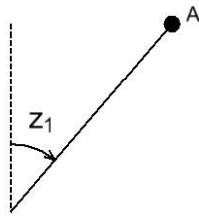
Stěžejní vliv na určení výšky má měřená veličina zenitového úhlu. Přesnost zenitového úhlu je ovlivněna mnoha faktory. Mezi tyto faktory patří chyba měřiče z cílení a proměnlivost meteorologických podmínek, které mají vliv na problematiku refrakce.

Měřením zenitového úhlu ve dvou polohách dalekohledu zjistíme indexovou chybu. Vlivem rychlé časové proměnlivosti prostředí je nutné měřit jednotlivé body postupně. Nejprve se změří jeden bod v první i ve druhé poloze dalekohledu, a až poté se přechází na další bod. Indexová chyba se vypočítá pomocí vztahu (13). Následně se daná indexová chyba přičítá k zenitovému úhlu měřeného v první poloze dalekohledu (14). [5]

$$i = \frac{(z_1 + z_2) - 4R}{2} \quad (13)$$

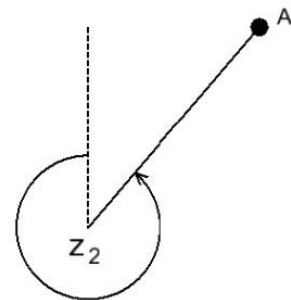
$$z = z_1 + i \quad (14)$$

I. poloha dalekohledu



Obrázek 6 – I. poloha dalekohledu [autor]

II. poloha dalekohledu



Obrázek 7 – II. poloha dalekohledu [autor]

4 Geometrická nivelace

Existují dvě základní metody geometrické nivelace. Jedná se o geometrickou nivelaci kupředu a geometrickou nivelaci ze středu.

Geometrická nivelace kupředu se využívá pouze při speciálních pracích, mezi které patří například měření v důlních oblastech, kde se nacházejí štoly ve velkém sklonu a geometrickou nivelaci ze středu by nebylo možné aplikovat. Naopak geometrická nivelace ze středu představuje nejpoužívanější nivelační metodu. Dále se budeme zabývat pouze geometrickou nivelací ze středu.

4.1. Princip metody geometrické nivelace ze středu

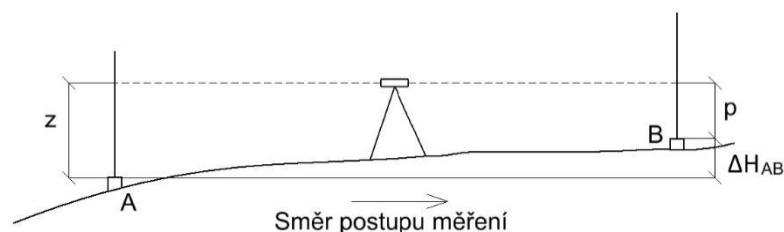
Tato metoda je v praxi nejběžnější a zároveň nejpřesnější. Nivelační přístroj je postaven přibližně doprostřed mezi stabilizovanými body, u kterých zjišťujeme převýšení. Místo, kde je postaven nivelační přístroj, se nestabilizuje. Po postavení nivelačního přístroje se na nivelačních latích umístěných na stabilizovaných bodech odečte hodnota, nejprve vzad a poté vpřed. Tento případ, tedy nivelační přístroj ve středu na spojnici stabilizovaných bodů a dvě nivelační latě tvoří nivelační sestavu. Převýšení v jedné sestavě mezi stabilizovanými body se vypočítá pomocí vztahu (15).

$$\Delta H_{AB} = z - p \quad (15)$$

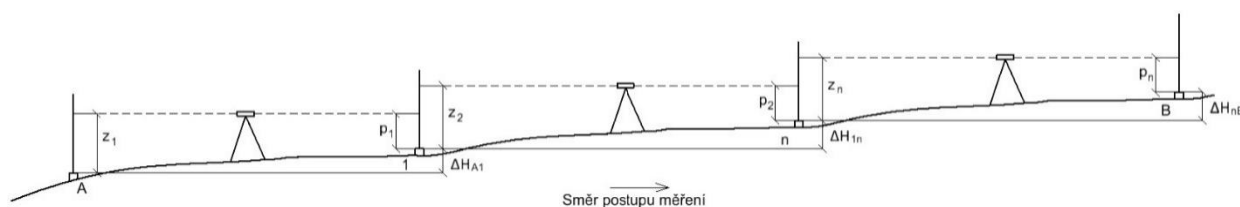
Při větších vzdálenostech nebo převýšeních je nutno úsek mezi stabilizovaný body rozdělit pomocnými body, které jsou pouze dočasně stabilizovány nivelační podložkou. Tím je vytvořeno n nivelačních sestav, které tvoří nivelační oddíl. Přístroj se opět postaví přibližně doprostřed na spojnici výchozího bodu a prvního přestavového bodu (pomocného bodu), který je dočasně stabilizován nivelační podložkou, popřípadě nivelačním hřebem. Dále se realizuje odečtení na nivelačních latích, nejprve vzad (výchozí bod) a poté vpřed na první přestavový bod. Tímto je realizována první sestava nivelačního oddílu. Pak je nivelační přístroj přemístěn na střed spojnice prvního a druhého přestavového bodu, které jsou oba dočasně stabilizovány. Po postavení přístroje je opět realizováno odečtení hodnot na nivelačních latích. Nejprve vzad na první přestavový bod, kde nivelační lat' byla ponechána z měření v předešlé sestavě a byla pouze otočena a vpřed, kde je umístěna nivelační lat' z původního výchozího bodu. Postup je analogicky realizován dále v počtu n nivelačních sestav. Jednotlivé nivelační oddíly mezi stabilizovanými body tvoří nivelační pořad. U dlouhých nivelačních pořadů může několik nivelačních oddílů tvořit nivelační úsek.

V případě, že je při měření používán pár nivelačních latí, měl by nivelační oddíl obsahovat sudý počet nivelačních sestav. Převýšení mezi stabilizovanými body se vypočítá pomocí vztahu (16). [5]

$$\Delta H_{AB} = \Sigma z - \Sigma p \quad (16)$$



Obrázek 8 – Geometrická nivelace ze středu - 1 sestava [autor]



Obrázek 9 – Geometrická nivelace ze středu - n sestav [autor]

4.2. Druhy geometrické nivelace ze středu

Geometrická nivelace ze středu se dále dělí na jednotlivé druhy nivelace odpovídající určitým nárokům na přesnost. Jednotlivé druhy nivelace jsou založeny na stejném principu, musí ovšem docílit odpovídající přesnosti vhodnými přístroji, pomůckami a také technologií měřického postupu. Technologie měřického postupu je založena na přesnějším vyměření postavení přístroje ve středu na spojnici bodů v rámci nivelační sestavy, opakováním měření nebo také velikostí nivelačních sestav ve smyslu jejich délky.

4.2.1. Technická nivelace

Jedná se o nejužívanější druh geometrické nivelace ze středu. Technická nivelace se dále dělí na dva druhy dle přesnosti.

a) Technická nivelace základní přesnosti

Tento druh technické nivelace je spojen s běžnými technickými pracemi, kdy nároky na přesnost jsou nižší. Nivelační latě mohou být skládací, zasouvací nebo také sklopné. Latě nemusí obsahovat krabicovou libelu, ta může být nahrazena například olovnicí. Délka záměr může být až 120 m, přičemž postavení přístroje doprostřed na spojnici bodů je odhadem.

Mezní odchylka (17) mezi známým (daným) převýšením a měřeným převýšením

$$\Delta h = 40 \cdot \sqrt{R} \text{ [mm]} \quad (17)$$

Mezní odchylka (18) mezi dvakrát měřeným převýšením

$$\Delta h = 0,67 \cdot 40 \cdot \sqrt{R} \text{ [mm]} \quad (18)$$

R – délka nivelačního pořadu v kilometrech

b) Technická nivelace zvýšené přesnosti

Tento druh technické nivelace se používá při vyšších nárocích na přesnost. Niveláčnické latě by měly být celistvé, opatřené krabicovou libelou. Délka záměr může být až 80 m. Postavení přístroje je krokováno v rámci sestavy. Minimální výška záměry nad terénem činí 0,3 m. Niveláčnický oddíl je nutné vždy měřit tam a zpět.

Mezní odchylka (19) mezi známým (daným) převýšením a měřeným převýšením

$$\Delta h = 20 \cdot \sqrt{R} \text{ [mm]} \quad (19)$$

Mezní odchylka (20) mezi dvakrát měřeným převýšením

$$\Delta h = 0,67 \cdot 20 \cdot \sqrt{R} \text{ [mm]} \quad (20)$$

R – délka nivelačního pořadu v kilometrech

4.2.2. Přesná nivelace

Přesná nivelace se používá pro měření v nivelačních pořadech III. a IV. řádu výškového bodového pole, dále pro měření v aplikacích inženýrské geodézie (např. deformace objektů). Přesná nivelace se dále dělí v závislosti na přesnosti, která odpovídá měření v daném nivelačním řádu.

Pro přesnou nivelaci platí obecné zásady, které platí pro oba druhy PN. Měřické práce se začínají nejdříve půl hodiny po východu Slunce a končí nejpozději půl hodiny před západem Slunce. Dále pak je v nivelačním oddíle sudý počet přestav (při použití páru nivelačních latí). Postavení přístroje je realizováno na pevném stativu a vyměřováno s přesností na 0,1 m v rámci jedné sestavy. Zároveň je maximální možná excentricita postavení přístroje od přímé spojnice bodů 0,5 m. Niveláčnický pořad se měří vždy tam a zpět v rámci jednoho dne, ale v jinou denní dobu.

a) Niveláčn pořady III. řádu

Tento druh přesné nivelace se používá pro měření niveláčnch pořadů III. řádu, které spadají do ZVBP. Niveláčn latě musí být opatřeny invarovou stupnicí, krabicovou libelou a také opěrkami, které slouží k lepší stabilizaci latě při měření. Maximální délka záměry je 40 m, přičemž minimální výška záměry nad terénem činí 80 cm. V průběhu měření musí být niveláčn přístroj chráněn slunečníkem před přímým osvětlením.

b) Niveláčn pořady IV. řádu

Tento druh PN se používá pro měření niveláčnch pořadů IV. řádu, které spadají do PVBP. Niveláčn latě musí být celistvé z jednoho kusu a opatřené krabicovou libelou. Maximální délka záměry je 50 m, minimální výška záměry nad terénem je 50 cm. [5]

4.2.3. Velmi přesná nivelace

VPN se používá pro niveláčn měření v rámci I. a II. niveláčnho řádu, které jsou součástí základního výškového bodového pole. Niveláčn pořad se měří vždy tam a zpět, ale v jiný den a v jiné denní době. Technologie měřického postupu odpovídá PN pro měření v rámci III. niveláčnho řádu, který je také součástí základního výškového bodového pole. [12]

4.2.4. Zvlášť přesná nivelace

ZPN se využívá pro měřické práce s velmi vysokými požadavky na přesnost. Mezi tyto práce patří měření vertikálních posunů zemské kůry nebo také měření pilířů, jejich náklonů a poklesů. Maximální délka záměry je 35 m. [5] [12]

4.3. Přesnost jednotlivých druhů nivelace

4.3.1. Středn chyba jedné sestavy m_{hi}

VPN v rozmezí 0,1 – 0,3 mm

PN v rozmezí 0,6 – 1,6 mm

TN > 2 mm

4.3.2. Středn kilometrová chyba nivelace m_0

Jedná se o chybu určeného převýšení tam a zpět na vzdálenost 1 km.

VPN v rozmezí 0,4 – 0,8 mm

PN v rozmezí 2,0 – 5,0 mm

TN > 5,0 mm [8]

4.4. Chyby při měření

4.4.1. Systematické chyby

Systematické chyby patří do skupiny nevyhnutelných chyb. Jsou to chyby, které jsou téměř vždy nevyhnutelně součástí nivelačního měření. Systematické chyby jsou konstantního znaménka, kladného nebo záporného.

Chyba ze zakřivení horizontu

Tato chyba vzniká v důsledku zakřivení zemského povrchu. Rozdíl mezi skutečným a zdánlivým horizontem. Záměrná přímka nivelačního přístroje je po urovnání rovnoběžná se zdánlivým horizontem. Chyba se projevuje pouze u geometrické nivelace kupředu ve velikosti 0,2 mm na vzdálenost 50 m. U geometrické nivelace ze středu je tato chyba vyloučena měřickým postupem.

Chyba ze sklonu záměrné přímky

Tato chyba vzniká v důsledku nesplnění hlavní osové podmínky $L \parallel Z$, kde Z je záměrná přímka a L osa nivelační libely. Jiný rozměr má tato chyba u libelových nivelačních přístrojů a u nivelačních přístrojů s automatickým kompenzátorem.

U nivelačních přístrojů s libelou je nesplnění osové podmínky $L \parallel Z$ způsobeno neseřízenou nivelační libelou. Velikost této chyby lze zjistit zkouškou nivelačního přístroje před měřením. Navíc je tato chyba vyloučena měřickým postupem u geometrické nivelace ze středu za podmínky stejně dlouhých záměr.

U přístrojů s automatickým kompenzátorem je nesplnění osové podmínky $L \parallel Z$ způsobeno špatnou funkcí kompenzátoru. K částečnému vyloučení této chyby dojde v případě, kdy u geometrické nivelace ze středu je v každé nivelační sestavě urovnána krabicová libela na záměru vzad. [5]

Chyba z nesprávné délky lat'ového metru

Vlivem vnějších podmínek, mezi které patří zejména teplota a vlhkost, se mění délka lat'ového metru. Působení této chyby se uvažuje pouze u přesných měřických prací a při velkých převýšeních. U těchto prací jsou využívány nivelační latě vyrobené z invaru, který má velmi nízký koeficient teplotní roztažnosti (21). V důsledku této vlastnosti nepodléhá teplotním změnám v takovém rozsahu jako ostatní kovy a slitiny. Invar je slitina železa a niklu, kterou vynalezl švýcarský fyzik Charles Edouard Guillaume, za kterou získal Nobelovu cenu v oblasti fyziky. [5] [13]

$$\alpha = 1,2 * 10^{-6} [\text{K}^{-1}] \quad (21)$$

Chyba z nesvislé polohy latě

Vznik této chyby je závislý na postavení latě během měření. Během měření musí být lať ve svislé poloze, urovnána pomocí rektifikované krabicové libely. Vyjma technické nivelace základní přesnosti, kde může být krabicová libela nahrazena například olovnicí.

Nesvislé postavení latě může vzniknout v důsledku vybočení latě ve směru kolmém na záměru nebo ve směru záměry. Postavení latě je závislé na činnosti figuranta, ovšem vybočení latě ve směru kolmém na záměru může poznat a také na ni upozornit sám měřič. Poznat toto vybočení může měřič snadno pomocí svislé složky záměrného obrazce v dalekohledu nivelačního přístroje. [5]

4.4.2. Náhodné chyby

Stejně jako systematické chyby patří náhodné chyby do skupiny nevyhnutelných chyb, které jsou téměř vždy součástí nivelačního měření. Oproti systematickým chybám nejsou náhodné chyby konstantního znaménka.

Chyba z nepřesného urovnání nivelační libely

Tato chyba je závislá na citlivosti nivelační libely. U nivelačních přístrojů vybavených automatickým kompenzátorem je velikost této chyby mnohonásobně menší.

Chyba ze změny výšky přístroje a latě

Chyba je způsobena vnějšími podmínkami, které mění podloží pod stativem a tím mohou změnit také jeho výšku. Může se jednat například o vysouvání nohou ve směru opačném k směru gravitace z jílovité půdy.

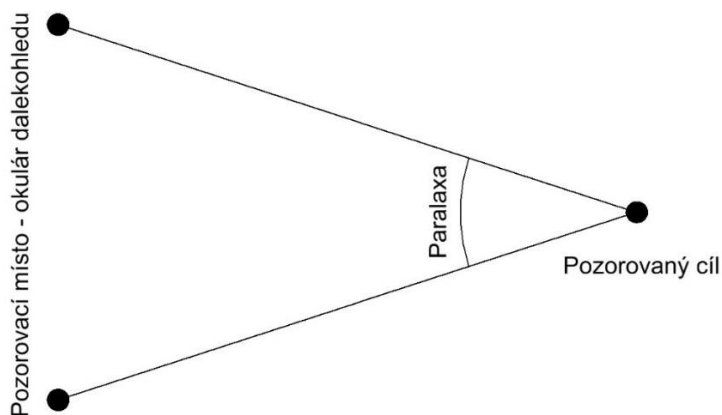
U kompenzátorových nivelačních přístrojů je tato chyba velmi eliminována oproti přístrojům s nivelační libelou. [5]

Chyba ze čtení laťové stupnice

Tato chyba je ovlivněna řadou vnějších podmínek prostředí, ale také technologickým postupem a měřickými pomůckami. Z vnějších podmínek má největší vliv chvění vzduchu, které je způsobeno promícháváním různě teplých vrstev vzduchu. [14] Technologický postup má vliv na vzdálenosti latě a přístroje, tedy velikost záměry a její průběh nad terénem, který může mít značný vliv na tuto chybu.

V neposlední řadě měřické pomůcky. U nivelačních přístrojů závisí zejména na velikosti zvětšení dalekohledu a paralaxy záměrného obrazce. Paralaxa záměrného obrazce musí být odstraněna před začátkem měření. Dalekohled zaostříme na nekonečno a následně zaostříme záměrný obrazec pomocí okuláru. Toto zaostřování je prováděno proti papíru nebo obloze, to ovšem u nivelačních přístrojů není konstrukčně možné. Zda je paralaxa odstraněna, zjistíme příčným pohybem před okulárem.

Vyloučena je tato chyba u kódových nivelačních latí opatřených čárovým kódem. [15] [5]



Obrázek 10 – Paralaxa [autor]

Chyba z dělení stupnice latě

Tato chyba vzniká v důsledku nepravidelného dělení latěové stupnice.

Chyba z přestření dalekohledu

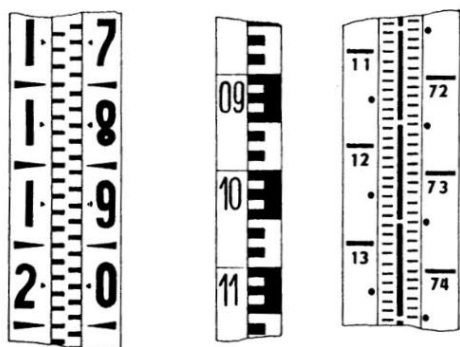
U přesných nivelačních prací vzniká tato chyba v důsledku nepřesného rozměření záměr, díky nimž musí dojít k přestření dalekohledu a tím ke změně paralaxy záměrného obrazu. [5]

4.5. Nivelační latě

Variabilita nivelačních latí odpovídá přesnosti a účelu daného měření.

Pro technickou nivelaci se používají nivelační latě s centimetrovým dělením nebo s čárovým kódem. Latě jsou vyrobeny z dobře vyschlého dřeva nebo lehkého kovu. Stupnice je poté nanášena na plechové pásy. Na spodní části latě je ocelová patka. Stupnice je tvořena centimetrovými díly a čísla označující decimetry a metry. Pětcentimetrové úseky jsou upraveny do písmena E. Dále se mění černá a červená barva označení po jednotlivých metrech. Takto je stupnice značena pro optické nivelační přístroje. Pro elektronické nivelační přístroje je stupnice značena čárovým kódem. Latě pro technickou nivelaci jsou v současné době převážně teleskopické nebo zasouvací. Výška těchto latí dosahuje standardně 4 m. [5] [7]

Pro přesnější druhy geometrické nivelace (PN, VPN, ZPN) jsou latě celistvé, a především jsou opatřeny invarovým páskem, na kterém je nanesena stupnice. Invar díky svým vlastnostem méně podléhá vlivům prostředí. Stupnice jsou na invarovém pásku vždy dvě. Tyto stupnice jsou vůči sobě posunuty o známou konstantu. Tento posun dvou stupnic má čistě kontrolní význam. Rozdíl čtení musí být vždy roven konstantě. Takto značená stupnice platí pro optické nivelační přístroje. Pro elektronické nivelační přístroje jsou latě opatřeny čárovým kódem. Pro lepší stabilitu latě ve svislé poloze při měření jsou používány opěrné tyče. [7]



Obrázek 11 – Niv. latě pro optické nivelační přístroje [16]



Obrázek 12 – Niv. lat' s čárovým kódem [17]

4.6. Nivelační podložky

Nivelační podložky slouží k dočasné stabilizaci přestavových bodů, na kterých jsou v průběhu měření umístěovány nivelační latě. Existuje řada variant nivelačních podložek plošného nebo hřbového charakteru. U plošných nivelačních podložek je různá variabilita jejich tvaru (viz obrázky 13 a 14). [7]



Obrázek 13 – Plošná, kruhová niv. Podložka [18]



Obrázek 14 – Plošná, trojúhelníková niv. Podložka [19]

5 Technologie GNSS

5.1. Historie GNSS

Global Navigation Satellite Systems česky Globální navigační satelitní systémy jsou technologie, které na základě signálů z družic určují polohu na zemském povrchu. Počátek této technologie sahá do poloviny 20. století. První aplikace byla využita v průběhu 60. let 20. století pro účely americké armády. Jednalo se o navigační systém Transit někdy také označován jako NAVSAT. [20] [21] [22]

Dalším velkým milníkem ve vývoji GNSS bylo zpřístupnění systému GPS veřejnému sektoru. V systému GPS byla od 2. května 2000 vypnuta úmyslná chyba degradující přesnost navigace. Stalo se tak na základě příkazu tehdejšího amerického prezidenta Billa Clintona, který tak umožnil civilnímu obyvatelstvu přístup k satelitní navigaci. Tento krok vedl k obrovskému vývoji v tomto odvětví, který přetrvává do současnosti. [23]

5.2. Princip metody GNSS

Globální družicové satelitní systémy umožňují skrze šíření signálů z družicové antény k přijímací anténě určit prostorovou polohu přijímací antény. Na základě měřených veličin a následných výpočtů jsou získány vzdálenosti družic a přijímače. K určení polohy bodu na zemském povrchu je potřeba minimálně čtyř družic.

5.3. Struktura GNSS

Struktura GNSS je pro jednotlivé systémy stejná. Je tvořena třemi základními segmenty.

5.3.1. Kosmický segment

Tvoří jej družice obíhající po drahách nad Zemí v přibližné výšce 20 000 km. Tyto družice vysílají signály, skrze které se určují pseudovzdálenosti. Pseudovzdálenost je měřená vzdálenost mezi přijímačem a jednotlivými družicemi. [20] [21]

5.3.2. Řídící segment

Hlavním úkolem je zajištění činnosti kosmického segmentu. Jedná se o realizaci jednotného systémového času a koordinaci celého systému. Tento segment tvoří pozemní stanice, které se skládají z hlavní řídicí stanice a několika monitorovacích stanic. Monitorovací stanice přijímají navigační signály z družic. Ty to dále přeposílají do hlavní řídicí stanice, kde jsou na jejich základě vypočítávány parametry dráhy družic a korekce hodin družic. Ty jsou následně odesílány na družice a z nich uživatelům systému jako součást tzv. navigační zprávy. [20] [21]

5.3.3. Uživatelský segment

Tento segment je tvořen pozemními přijímači, které mohou přijímat a zpracovávat signál z družic. Na základě tohoto zpracování mohou určit polohu v reálném čase. Spektrum uživatelského segmentu je velmi široké. Může se jednat například o tyto oblasti: geodézie, turistika, námořní doprava, letecká doprava, pozemní doprava, vojenství. [20] [21]

5.4. Systémy GNSS

Systémy jsou vyvíjeny jednotlivými státy nebo skupinou států. Struktura jednotlivých systémů GNSS je stejná. Jednotlivé systémy se liší pouze v charakteristikách jednotlivých struktur. Rozdílnými charakteristikami jsou myšleny různé počty družic v kosmickém segmentu nebo využívání různých frekvencí a kódů.

5.4.1. GPS

Tento GNSS systém byl vytvořen pro účely americké armády. Původní využití bylo primárně pro vojenské účely. Kosmický segment tvoří 24 družic, ovšem maximální počet družic je stanoven na 36. Systém se neustále vyvíjí a je modernizován. V současné době je přístupný také civilnímu sektoru.

5.4.2. GLONASS

Jedná se o ruský globální navigační satelitní systém. Primární využití tohoto systému je opět ve vojenské oblasti. Kosmický segment je naplánován na 24 družic, které obíhají kolem Země ve třech orbitálních rovinách. [20] [21] [22]

5.4.3. Galileo

Jedná se o vlastní evropský GNSS, který vyvíjí ESA za spolupráce s Evropskou komisí, která reprezentuje EU. Tento systém je obdobou amerického systému GPS a ruského systému GLONASS s tím rozdílem, že Galileo je od samého počátku pod civilní kontrolou. Plné spuštění tohoto systému již bylo několikrát oddáleno. Současné dokončení systému je naplánováno na rok 2020. Kompletní kosmický segment bude tvořit 30 satelitů, z toho 24 satelitů bude operačních a 6 satelitů bude náhradních. Satelity budou obíhat po oběžné dráze ve třech kruhových orbitalech ve výšce 23 222 km o orbitálním sklonu 56°. [22] [24]

5.4.4. Compass

Jedná se o globální navigační satelitní systém vyvíjen Čínskou lidovou republikou. Systém Compass nebo také BeiDou 2 navazuje na systém BeiDou. Je zde rozdíl mezi koncepcemi

systémů. Zatímco systém Beidou byl pojat jako regionální systém, tak systém Compass má globální koncept. Kosmický segment má tvořit celkově 35 družic. Dokončení systému je plánováno na rok 2020. [22]

5.4.5. Další systémy regionálního významu

Systém QZSS

Jedná se japonský systém regionálního významu. Kosmický segment je tvořen třemi družicemi. Význam QZSS je primárně podpora systému GPS. V důsledku geografických vlastností, hustotě osídlení měst a množstvím výškových budov je dostupnost navigačních systémů v některých oblastech Japonska značně omezena.

Systém IRNSS

Jedná se o indický systém regionální působnosti. Kompletní kosmický segment tvoří 7 satelitů. Tento systém je pod civilní kontrolou. [22]

5.5. Metody určení polohy pomocí GNSS

5.5.1. Dělení podle měřených veličin

Kódová měření

Každá družice vysílá PRN kód. Přijímač generuje repliku kódu, kterou poté porovnává s přijatým kódem z družice. V případě bezchybné synchronizace hodin přijímače a družice je posun mezi kódy přímo úměrný tranzitnímu času. Tranzitní čas je doba, po kterou signál překonává vzdálenost mezi družicí a pozemním přijímačem. Pomocí tranzitního času se může vypočítat pseudovzdálenost.

V realitě je ovšem pseudovzdálenost zatížena chybou, která je způsobena rozdílným chodem hodin přijímače a družice. Bez uvážení dalších vlivů (ionosféry, troposféry) je přesnost určení pseudovzdálenosti v rozmezí 0,1 – 2 m. [20]

Rovnice měřené vzdálenosti představuje vztah (23). Neznámými členy jsou $X_k, Y_k, Z_k, c\Delta t_k$.

$$\rho_i^k = \sqrt{(X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2 + (Z_k - Z_i)^2} \quad (22)$$

$$R_i^k = \rho_i^k + c\Delta t_i - c\Delta t_k + I_i^k + T_i^k \quad (23)$$

ρ_i^k – vzdálenost přijímač – družice vypočtena ze souřadnic

X_k, Y_k, Z_k – souřadnice družice (poloha družice)

X_i, Y_i, Z_i – souřadnice přijímače (poloha přijímače)

R_i^k – měřená vzdálenost

$c\Delta t_i$ – korekce hodin přijímače

$c\Delta t_k$ – korekce hodin družice

I_i^k – Ionosférická korekce

T_i^k – Troposférická korekce

k – družice, $k = 1, 2, 3, \dots$

Fázová měření

Určení polohy pomocí fázového měření je až o dva řády vyšší než určení polohy kódovým měřením za stejné synchronizace přijímače a družice. V případě 1% chyby synchronizace přijímače a družice jsme schopni určit fázový doměrek s milimetrovou přesností. Zpracování tohoto měření je zatíženo dalšími neznámými veličinami, které označujeme jako ambiguity. Ambiguity je celé číslo počtu vlnových délek mezi družicí a přijímačem. [20] [21]

Rovnice fázového měření představuje vztah (24).

$$\lambda\phi_R^k = \lambda N^k(t_0) + \rho_i^k(t) - c\Delta t_i(t) + c\Delta t_k(t) - I_i^k + T_i^k \quad (24)$$

V rovnici fázového měření vystupují stejné neznámé jako v rovnici kódového měření X_i , X_i , Z_i , $c\Delta t_i$, navíc je zde neznámá $\lambda N^k(t_0)$.

$\lambda N^k(t_0)$ – celočíselný počet vlnových délek

5.5.2. Dělení podle pohybu při měření

Základní rozdělení metod je na statické a kinematické. Při statických metodách je přijímač v průběhu celého měření bez pohybu vůči zemskému povrchu. Do statických metod patří statická metoda a rychlá statická metoda. Naopak při kinematických metodách je přijímač v průběhu měření v pohybu vůči zemskému povrchu. Do kinematických metod spadá kinematická metoda a RTK metoda.

Statická metoda

Jedná se o nejnáročnější metodu z časového hlediska. Využívá se pro ty nejpřesnější práce. Délka observace je v řádu hodin až dnů. Využití této metody se uplatňuje zejména při budování základních geodetických sítí nebo kontinentálních měřeních. Přesnost polohy určeného bodu může dosahovat $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$. Přesnost určení polohy bodu závisí na velikosti vektoru a délce doby observace.

Rychlá statická metoda

Délka observace této metody je v řádu minut. Přesnost metody dosahuje 5 mm + 1 ppm až 10 mm + 1 ppm. Využití této metody lze uplatnit při měření zhušťovací sítě nebo při hraničním měření.

Metoda Stop and Go

Metoda je kompilátem rychlé statické metody a kinematické metody. Pouze na prvním bodě měření musí přijímač setrvat tak dlouho, aby byly spolehlivě vyřešeny ambiguity. Na dalších bodech již probíhá měření v řádu sekund za předpokladu stálého příjmu signálu z družic. Po dobu měření zůstává na výchozím bodě referenční přístroj. Přesnost této metody dosahuje 1 cm + 1 ppm až 2 cm + 1 ppm. Z praktického pohledu je tato metoda již překonána.

Kinematická metoda

Přijímač je vůči zemi v pohybu. První přijímač je v pohybu, druhý přijímač je umístěn na referenčním bodě o známých souřadnicích. Existují dvě varianty měření kinematické metody. První variantou je statická inicializace, postupuje se obdobně jako u metody Stop and Go. Na prvním bodě se musí provést statické měření pro vyřešení ambiguity. Druhou variantou je vyřešení ambiguity při pohybu přijímače (on the fly). Přesnost dosahuje 1 cm + 1 ppm až 2 cm + 1 ppm. Kinematická metoda se využívá pro navigaci dopravních prostředků nebo v oblasti fotogrammetrie. [25]

RTK

Jedná se o nejnovější a v současné době také nejpoužívanější metodu. Metoda je založena na fázových měřeních. Její hlavní výhodou, oproti ostatním výše uvedeným metodám, je zpracování v reálném čase. Není tedy nutné následující zpracování (postprocessing). Měření probíhá minimálně se dvěma přijímači, z nichž jeden slouží pro vlastní měření a druhý jako referenční stanice. Je nutné, aby měření na obou přijímačích probíhalo simultánně.

Referenční stanice je umístěna na bodě o známých souřadnicích. Poskytuje svá měřená data prvnímu přijímači pro výpočet vektoru. Přenos dat mezi přijímačem, který slouží pro vlastní měření a referenční stanicí je realizován pomocí datových služeb mobilních operátorů, GSM nebo radiových datových systémů. Referenční stanice může být permanentní nebo také dočasná. Permanentní referenční stanice nepřetržitě sbírají a posílají data pro více uživatelů. Oproti tomu dočasná referenční stanice slouží pouze pro účely daného jednoho měření.

V současné praxi jsou používány permanentní referenční stanice. Na území České republiky patří mezi hlavní poskytovatele této služby státní síť CZEPOS, privátní sítě Trimble VRS Now, TopNet a GEOORBIT.

Využití této metody se uplatňuje při měření podrobných bodů nebo při vytyčování bodů. [6]
[21]

6 Laserové skenování

Jedná se bezkontaktní metodu určování prostorových souřadnic bodů. Laserové skenování tvoří pouze podmnožinu aplikace 3D skenerů. Ačkoliv laserové skenování patří k poměrně nové metodě používané v geodetické praxi, tak se v současné době jedná o běžnou a dostupnou technologii. Využití laserového skenování pokrývá řadu různých aplikací.

6.1. Historie a vývoj laseru

Historie laseru sahá do počátku 20. století. Albert Einstein položil fyzikální základy jevu, který je základem laseru. Jedná se o stimulovanou emisi záření, což je úmyslně vyvolané vyzáření kvant z atomů. Těmito kvanty jsou fotony, které takto pojmenoval americký chemik Gilbert Newton Lewis. První funkční laser byl sestaven až v 60. letech 20. století. Za vynález laseru obdrželo několik vědců Nobelovu cenu. Mezi tyto vědce patří Charles Hard Townes, Nikolaj Genadijevič Basov a Alexandr Michajlovič Prochorov.

Potenciál a využití této technologie je obrovský. Proto je laser neustále předmětem výzkumné činnosti a vývoje. V samotné České republice, a dříve také v Československu, byl značný aktivní vývoj této technologie. V současné době se v České republice nachází několik výzkumných center zabývajících se problematikou laseru. Mezi tato centra patří ELI Beamlines nebo HiLASE. [26]

Samotný vývoj 3D skenerů započal na konci 20. století. Na začátku 21. století začala být tato technologie využívána odbornou veřejností. Z počátku zejména v letecké aplikaci pro tvorbu digitálních modelů povrchu a v pozemní aplikaci pro mapování zařízení složitých tvarů (např. potrubí). V současné době pokračuje dynamický vývoj této technologie. Stále se zvyšují dosahy, frekvence a další významné vlastnosti 3D skenerů. [27]

6.2. Princip technologie pozemního laserového skenování

Technologie pracuje na principu přímého měření vzdálenosti („ranging scanner“). Tato vzdálenost je určena na základě doby letu laserového paprsku („time of flight“) nebo na základě fázového rozdílu vyslané a přijaté vlny.

Laserové skenery jsou dále opatřeny zrcátkem nebo hranolem. Skrze tento prvek je paprsek odkloněn (rozmítán) o určitý úhel ve vertikálním směru. V horizontální rovině určuje směr paprsku motorická jednotka, která se otáčí v pravidelném kroku. Bod v prostoru je určen na základě prostorové vzdálenosti, vertikálního a horizontálního úhlu. Z geodetického hlediska se jedná o prostorovou polární metodu. Výsledkem je mračno bodů. [27] [28]

6.2.1. Možnosti měření přímé prostorové vzdálenosti

Čas letu laserového pulzu

Jedná se o dobu mezi vysláním a zpětným přijmutím odraženého laserového pulzu. Na základě rychlosti šíření laserového pulzu prostorem je určena prostorová vzdálenost mezi skenerem a příslušným bodem daného objektu.

Rozdíl fází

Vzdálenost mezi skenerem a bodem daného objektu je určena na základě fázového posunu mezi vyslanou a přijatou vlnou. Paprsek je formován harmonickou vlnou. [27]

6.3. Druhy laserového skenování

6.3.1. Statické pozemní laserové skenování

Laserový skener je umístěn na stativu. Určení souřadnic bodů, tak aby byly součástí geodetického souřadnicového systému, lze dvěma způsoby. První variantou je určit souřadnice stanoviště. To lze klasickým geodetickým způsobem (např. metoda volné polární stanoviště). Druhou variantou je použití vlčivovacích bodů, které představují rovinné reflexní terče nebo malé objekty charakteristického tvaru (např. kužel nebo polokoule). Následně je provedeno georeferencování souřadnic mračna bodů. Celé mračno je transformováno do geodetického souřadnicového systému. [28] [29]

Rychlost pozemních skenerů je menší než u leteckých laserových skenerů. Dosah skenerů je závislý na odrazivosti ploch. Využití pozemních laserových skenerů představuje širokou škálu aplikací, mezi které patří:

- zaměření stavebních objektů
- archeologické zaměření
- zaměření památkových staveb
- zaměření technologických zařízení [29]

6.3.2. Letecké laserové skenování

Skenery jsou pevně spojeny s leteckým prostředkem, letadlem nebo vrtulníkem. K určení souřadnic bodů, které jsou georeferencovány, je potřeba určit prostorovou polohu a orientaci laserového skeneru v průběhu letu. K tomuto účelu je laserový skener propojen s navigačním zařízením IMU (inerciální měřicí jednotkou) a GNSS. Jedná se o dva komponenty, které se doplňují. IMU poskytuje relativní informace o poloze pomocí gyroskopu a akcelerometru.

GNSS technologie poskytuje absolutní údaje o poloze. V případě výpadku signálu GNSS nebo nedostatečné aktualizace polohy pomáhá IMU překonávat tyto situace. [6] [29]

Pomocí laserové skeneru získáváme, vyjma prostorové polohy bodů, také údaje o intenzitě odraženého paprsku. Na základě intenzity odraženého paprsku lze určit informace o typu povrchu. Při průniku laserového paprsku vegetací vzniká několikanásobný odraz. Na základě prvního a poslední odrazu můžeme určit výšku vegetačního pokryvu.

Využití leteckého laserového skenování lze v mnoha aplikacích:

- tvorba DMR a DMT
- měření výšky porostu a vegetace
- mapování pobřežních oblastí
- měření elektrického vedení [30]

6.3.3. Mobilní pozemní laserové skenování

Laserový skener je součástí mobilního mapovacího systému. Celý systém se skládá z několika dílčích komponentů. Mezi tyto komponenty patří digitální kamery, odometer (počítadlo kilometrů), přijímač GNSS a IMU. Celý systém je upevněn na dopravní prostředek, mezi který může patřit automobil, loď nebo drezína.

Mobilní mapovací systém se využívá pro mapování dopravní infrastruktury, sběr geoprostorových dat nebo inventarizaci nemovitostí. [6]

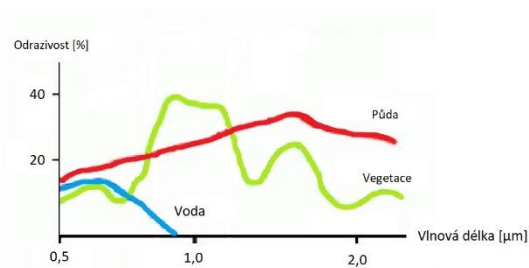
6.3.4. Ruční pozemní laserové skenování

Jedná se o laserový skener nesený v ruce. Využití potenciálu těchto skenerů je zejména v malých prostorech nebo pro skenování špatně dostupných míst. V současné době existují produkty umožňující v reálném času pozorovat na tabletu vznikající mračno bodů.

Jedna z technologií tohoto typu pracuje na principu algoritmu SLAM. Algoritmus SLAM řeší pohyb v neznámém prostředí na základě postupné tvorby mapy prostředí. Na základě údajů z IMU je známá relativní poloha skeneru. Jednotlivé skenery jsou pomocí umělé inteligence korigovány do mračna bodů. [31]

7 Vlastní měření

Vlastní měření probíhalo na povrchu monolitické desky mostní konstrukce SO 202. Měření většiny metod probíhalo v jeden den, a to za účelem dosažení podobných měřických podmínek. Použití metody trigonometrického určování výšek, geometrické nivelace a technologie GNSS proběhlo v jeden den (5.11. 2019). Z časových důvodů bylo nutné vybrat metodu, která bude využita v jiný den. V průběhu celého dne 5.11. 2019 přetrvával déšť. Povrch, který je pokryt vodou snižuje odrazivost (viz Obrázek 15). Proto byla vybrána právě metoda laserové skenování pro měření v jiný den, kdy budou z tohoto hlediska lepší podmínky.



Obrázek 15 – Odrazivost ploch

7.1. Rekognoskace terénu

Před samotným zahájením měřických prací byla provedena podrobná rekognoskace terénu v okolí mostní konstrukce a na samotné monolitické desce. Během této rekognoskace byly zvoleny dva body lokální vytyčovací sítě (6032 a 6034), které se při následném měření využily k orientaci a výškovému připojení. Volba bodů byla striktně stanovena okolnostmi. Z důvodu umístění stavby na vysokém násypu a pokračování stavebních prací na mostní konstrukci nebyla možnost jiné varianty. Již během rekognoskace byl na bod č. 6032 umístěn odrazný hranol na pilíř s nucenou centrací.

Během rekognoskace byla také prohlédnuta betonová monolitická deska. Na této desce již byly vyznačeny body profilů po předešlé zeměměřické činnosti dozoru stavby. Následně byly vybrány 3 podélné profily (viz kapitola 2.2.).

7.2. Bodové pole

Bodové pole stavby tvoří základní vytyčovací síť (ZVS). Ze základní vytyčovací sítě vychází lokální vytyčovací síť (LVS), jedná se o mikrosíť mostu. Souřadnicovým systémem sítě je S-JTSK, výškový systém představuje Bpv.

Nejbližšími body ZVS, resp. LVS od SO 202 jsou 4031, 4032, 4033, 4034 resp. 6031, 6032, 6033, 6034. Pro účely našeho měření byly využity body 6032 a 6034 (viz kapitola 7.1.). Při registraci měřených dat bylo využito označení bodů pro LVS. [2]

Body ZVS jsou stabilizovány těžkou stabilizací. U bodu č. 6032 je tato stabilizace realizována pilířem s nucenou centrací a výškovou čepovou značkou umístěnou z boku pilíře. Nucená centrace je mechanický způsob centrování, kdy měřicí přístroj nebo odrazný hranol zaujme vždy totožnou polohu na stabilizační značce pilíře. Tato totožnost je dána upnutou centrační podložkou k pilíři. [6] K bodu č. 6032 jsou vztaženy dvě výšky. První výška je vztažena k nivelační čepové značce a druhá k nucené centraci pilíře. Bod č. 6034 je realizován těžkou stabilizací pomocí mikropilotu. Mikropiloty sahají přibližně do hloubky 4 m. Dále je bod č. 6034 chráněn betonovou skruží stejně jako bod č. 6032.



Obrázek 17 – Těžká stabilizace bodu č. 6032 [autor]



Obrázek 16 – Čepová niv. značka bodu č. 6032 [autor]



Obrázek 19 – Ochrana bodu č. 6034 [autor]



Obrázek 18 – Těžká stabilizace bodu č. 6034 [autor]

7.3. Podmínky měření

Převážná část měřických prací probíhala dne 5.11. 2019. Teplota během měření dosahovala v rozmezí 11 °C až 12 °C. Během celého dne bylo zataženo, bezvětří a slabý déšť.

Laserové skenování mostní konstrukce probíhalo dne 19.11. 2019. Teplota během měření dosahovala v rozmezí 10 °C až 13 °C. Bylo polojasno až oblačno bez srážek. Povrch mostní konstrukce byl suchý bez pokryvu vody.

7.4. Použité přístroje a pomůcky

Veškeré materiálové zajištění poskytla firma Hrdlička spol. s.r.o. Jednalo se o totální stanici, nivelační přístroj, GNSS přijímač, laserový skener a ostatní příslušenství (nivelační lať, výtyčka, odrazné hranoly).

7.4.1. Trimble S5

Jedná se o robotizovanou totální stanici pracující na technologii automatického cílení na základě sledování pohybu odrazného hranolu. Během měření dochází k ověřování ID odrazného hranolu, díky tomu nemůže dojít k záměně s jiným cílem. Tato technologie je u tohoto typu totální stanice označována jako MultiTrack. Její dosah je 800 m. Přesnost měření vzdáleností v režimu standard a tracking je popsána v kapitole 3.3. Přesnost úhlového měření závisí na konfiguraci daného přístroje. Dle výrobce je možná konfigurace, kdy směrodatná odchylka je rovna $1'' = 0,0003$ gon, $2'' = 0,0006$ gon, $3'' = 0,0010$ gon nebo $5'' = 0,0015$ gon. Podle kalibračního listu použité totální stanice dosahuje úhlová směrodatná odchylka těchto hodnot:

Směrodatná odchylka vodorovného směru měřeného v obou polohách $m_{\phi} = 0,3$ mgon

Směrodatná odchylka vodorovného úhlu měřeného v obou polohách $m_{\omega} = 0,4$ mgon

Směrodatná odchylka svislého úhlu měřeného v obou polohách $m_{\omega} = 0,3$ mgon

[10] [32] [33]

7.4.2. Trimble DiNi 0.3

Jedná se o digitální nivelační přístroj, který je tvořen optikou Carl Zeiss se zvětšením dalekohledu 32x. Přístroj je opatřen kompenzátorem. Přesnost dosahuje $m_0 = \pm 0,3$ mm. Tato přesnost odpovídá 1 km oboustranné nivelace, jedná se tedy o střední kilometrovou chybu. [32]

7.4.3. Trimble GNSS R4 – 3

Jedná se o GNSS přijímač 3. generace. Umožňuje sledování družic GPS, GLONASS, Galileo a Compass. Přesnost RTK metody dosahuje v poloze 10 mm + 1 ppm a ve výšce 20 mm + 1 ppm. Přijímač obsahuje technologii Trimble R-Track, která slouží ke sledování družic. [34]

7.4.4. Trimble SX10

Jedná se o totální stanici a laserový skener v jednom. Technologicky se jedná o kompilát robotizované totální stanice a vysokorychlostního laserového skeneru. Využití tohoto přístroje je velmi univerzální, protože ho lze využít jak pro běžné geodetické úlohy, tak pro laserové skenování se zachováním vysoké přesnosti. Veškeré ovládání tohoto přístroje probíhá skrze tablet, a to i při klasických geodetických úlohách, protože přístroj nedisponuje okulárem. Trimble SX10 má zabudovanou kameru, skrze kterou můžeme na tabletu vše pozorovat. [32]

Rychlost skenování je 26,6 kHz. Při skenování lze nastavit vzdálenost mezi body celého mračna bodů. Tato vzdálenost může být nastavena na 6,25 mm, 12,5mm, 25 mm nebo 50 mm. Samotné laserové skenování může probíhat ve dvou režimech. Prvním režimem je Standard scan. Doba skenování je 6 minut, přičemž zorné pole v horizontálním směru je 90° a ve vertikálním směru 45°. Druhým režimem je Coarse scan. V tomto režimu je doba skenování 12 minut. Horizontální úhel skenování je 360° a ve vertikální rovině je pokrytí skenování 300°. Úhlová přesnost skenování dosahuje 5'' = 1,5 mgon, přesnost 3D polohy 2,5 mm. [35]

7.5. Průběh měření

Metody byly použity chronologicky v pořadí GNSS technologie, technická nivelace zvýšené přesnosti, trigonometrické určování výšek a laserové skenování. Z nichž metoda laserového skenování byla použita v jiný den.

7.5.1. GNSS technologie

Nejprve byl přijímač postaven na známé body, které byly při rekognoskaci zvoleny jako orientace. Při kontrolním měření na těchto bodech (6034 a 6032) bylo zjištěno, že se hodnoty výškových údajů liší v průměru o -0,049 m. Posléze bylo provedeno metodou RTK měření ve zvoleném intervalu 5 s na bodech profilů. Interval 5 s, byl zvolen z důvodu rychlosti měření, aby metoda mohla časově konkurovat ostatním metodám.

7.5.2. Zpřesněná technická nivelace

Nivelační přístroj byl umístěn přibližně do středu monolitické desky. Nejbližším bodem ve vzdálenosti 2,630 m od postavení přístroje byl bod 20271325. Následně proběhlo nivelační měření jednotlivých bodů profilů z jednoho stanoviska nivelačního přístroje.

Bod 20271325 byl zaměřen na počátku a na konci měření, aby byl vyloučen posun přístroje během měření. Rozdíl mezi měřeným údajem na počátku a na konci měření na bod 20271325 činí 0,00027 m, což je submilimetrový rozdíl. Vyhodnocování výsledků a jejich zpracování probíhalo na milimetry. Následovalo výškové připojení od čepové nivelační značky bodu č. 6032. Na mostní konstrukci byl zvolen bod 20271402 k výškovému připojení. Toto výškové připojení bylo realizováno pomocí uzavřeného nivelačního pořadu. Bod 20271402 byl v tomto pořadu zaměřen dvakrát pro vyloučení hrubé chyby v určení tohoto bodu.

7.5.3. Trigonometrické určování výšek

Z měřického hlediska se jednalo de facto o tachymetrii. Ale z pohledu výpočtů dat, které byly následně analyzovány, se jednalo o trigonometrické určování výšek. U metody tachymetrie jsou vyhodnocovány nejen výškové údaje, ale také polohové údaje. Tachymetrie zpracovává data spíše kvantitativně než kvalitativně. Proto je v tomto kontextu vhodnější pojmenování metody jako trigonometrické určování výšek.

Stanovisko bylo umístěno v severovýchodním rohu monolitické desky směrem na Skotnici. Jednalo se o volné polární stanovisko. Jako orientace byly využity body č. 6032 a č. 6034. Měření na body č. 6032 a č. 6034 proběhlo ve dvou polohách dalekohledu. Následně bylo uskutečněno měření v první poloze dalekohledu na jednotlivé body profilů. Při měření bodů profilů byla použita výtyčka v případě umožňujících okolností na výšku 0,049 m, tak aby došlo k co nejmenšímu odklonu odrazného hranolu od svislice.

Na závěr měření bylo provedeno kontrolní zaměření bodu č. 6032 v první poloze dalekohledu. Rozdíl v měřené délce činil 0,000 m, v horizontálním směru 0,00016 g a v zenitovém směru 0,00017 g. Jedná se o rozdíly zanedbatelné velikosti pro dané měření.

7.5.4. Laserové skenování

Postavení a orientace přístroje byla stejná jako u robotizované totální stanice. Tato shodnost byla úmyslná z toho důvodu, aby mohly být metody trigonometrického určování výšek a laserového skenování vůči sobě relevantně porovnány. Ačkoliv by bylo pro laserový skener

vhodnější postavení minimálně na dvou místech mostní konstrukce, tak byla ponechána varianta jednoho stanoviska z výše zmíněných důvodů.

8 Zpracování dat a výpočty

Nejprve byly u jednotlivých metod vypočítány výškové údaje. U metod, které to umožňovaly, byly vypočítány také souřadnice polohy bodů profilů. Pro další zpracování se již tyto údaje neuvažovaly, jejich význam byl čistě kontrolní. Dále se již zpracovávaly pouze výškové údaje. Následně došlo k relativnímu a absolutnímu porovnání výškových údajů. Relativní porovnání v sobě zahrnuje porovnání jednotlivých metod vůči sobě. Pro relativní porovnání byla jako porovnávací metoda zvolena metoda trigonometrického určování výšek. Byla vybrána tato metoda, protože se v současné době jedná o nejužívanější metodu praxe. Relativní porovnání nám umožnilo srovnat metody vůči skutečnému tvaru monolitické desky. V tomto případě byla trigonometrická metoda považována za bezchybnou, a tím nemohlo dojít k jejímu vyhodnocení. Absolutní porovnání v sobě zahrnuje srovnání jednotlivých použitých metod vůči projektovaným výškovým hodnotám. Umožňuje srovnat všechny použité metody vůči projektovaným hodnotám, které se mohou značně lišit oproti skutečnosti. Jednotlivá porovnání (relativní a absolutní) byla následně využita pro různé případy analýzy a srovnání metod z různých úhlů pohledu.

Srovnání metod bylo realizováno pomocí charakteristik přesnosti. Danou charakteristikou přesnosti představuje směrodatná odchylka. Charakteristiky přesnosti byly v obou případech porovnání (relativním a absolutním) určovány z rozdílů výškových údajů jednotlivých bodů profilů. Tento rozdíl výšek představoval testovaný soubor. Základní soubor je tvořen všemi body jednotlivých profilů. Výběrový soubor je tvořen body jednotlivých podélných profilů, které jsou označeny jako Profil 200, Profil 300 a Profil 400. Z těch jsou Profil 200 a 400 okrajovými podélnými profily a Profil 300 je podélným profilem v ose mostní konstrukce. U každého testovaného souboru byla určena základní směrodatná odchylka a výběrové směrodatné odchylky. Základní směrodatná odchylka charakterizuje všechny body profilů. Výběrová směrodatná odchylka charakterizuje jednotlivé podélné profily. Výpočet směrodatných odchylek byl realizován v tabulkovém software Excel pomocí funkce STDEPVA (základní směrodatná odchylka) a DEVPA (výběrová směrodatná odchylka).

Směrodatná odchylka v sobě zahrnuje náhodné vlivy (chyby). Náhodné chyby zatěžují výsledek měření v závislosti na náhodě. U těchto chyb nelze předvídat ani určit znaménko a velikost. Náhodná chyba je náhodnou veličinou, proto se řídí zákony pravděpodobnosti. Na teoretické úrovni mají náhodné chyby normální rozdělení pravděpodobnosti. [36]

8.1. Metoda RTK technologie GNSS

Jelikož se jedná o metodu získání dat v reálném čase, tak nebylo nutné další zpracování (postprocessing) pro získání výškových údajů bodů profilů. Bylo nutné pouze naměřená data exportovat. Výsledkem exportování je protokol GNSS (viz Příloha 1).

Pro porovnávací výpočty v rámci metody RTK figurovaly 2 typy výšek, výšky přímo měřené (uvedené v protokolu GNSS) a výšky korigované o konstantu +0,049 m. Tato korekce byla určena na základě měření na známých bodech č. 6032 a č. 6034 (viz kapitola 7.5.1.). Následně byly vypočítány charakteristiky přesnosti. Pro výpočet charakteristik byla využita data z relativního porovnání. Relativní porovnání bylo vybráno z důvodu značného působení systematického vlivu mezi metodou RTK a ostatními použitými metodami. Směrodatná odchylka základního souboru byla v relativním porovnání u obou výšek GNSS shodná. Rozptyl měření byl neměnný i po zavedení korekce, kterou lze uvažovat jako systematický vliv. U tohoto porovnání v rámci RTK metody byla vypočítána také střední chyba, která v sobě zahrnuje nejen náhodné, ale také systematické vlivy. Oproti směrodatné odchylce není střední chyba u obou výšek shodná. Je to způsobeno právě systematickým vlivem. Ona zavedená korekce přibližuje výšky GNSS technologie k metodě trigonometrického určování výšek a snižuje tím systematický vliv. Tuto skutečnost ukazuje přiblížení hodnoty střední chyby a směrodatné odchylky. Při nulovém působení systematického vlivu se musí směrodatná odchylka a střední chyba sobě rovnat. V uvedeném případě je zavedením korekce eliminován systematický vliv. Výpočet uveden v Příloze 2.

Výpočet střední chyby představuje vztah (22).

$$m = \frac{\sum d*d}{n} \quad (22)$$

8.2. Geometrická nivelace

U geometrické nivelace se nejprve jednalo o výpočet a vyrovnání uzavřeného nivelačního pořadu z bodu č. 6032. V rámci tohoto nivelačního pořadu byla určena výška bodu 20271402, který byl výchozím výškovým bodem pro vlastní měření na monolitické desce SO 202. Výšky bodů profilů byly určeny pomocí bočních záměr z uzavřeného nivelačního pořadu z bodu 20271402. Výpočet uveden v Příloze 3.

8.3. Trigonometrické určování výšek

Nejprve bylo vypočítáno volné polární stanovisko. Jako orientace byly použity body č. 6032 a č. 6034, na které bylo uskutečněno měření v obou polohách dalekohledu. Samotný výpočet výškových údajů proběhl ve dvou variantách.

V jedné z variant výpočtu byla zavedena korekce indexové chyby. Tato indexová chyba byla vypočtena z měření ve dvou polohách dalekohledu na bod č. 6032. Bod č. 6032 byl zvolen díky jeho signalizaci. Signalizaci tvořil odrazný hranol umístěný na pilíři s nucenou centrací. Jednalo se o velmi stabilní signalizaci. Na bodě č. 6034 z důvodu jeho stabilizace (mikropilot), bylo nutno použít výtyčku nastavenou na výšku 1,298 m. Proto pro výpočet indexové chyby nebylo uvažováno měření na bod č. 6034. Vypočítaná korekce byla připočtena ke všem měřeným zenitovým úhlům v první poloze dalekohledu na body profilů. Následně byl realizován v software Groma výpočet výšek bodů pomocí polární metody dávkou. Výpočet byl realizován u obou variant stejně, pouze s rozdílným vstupem zenitových úhlů na body profilů (viz Příloha 4).

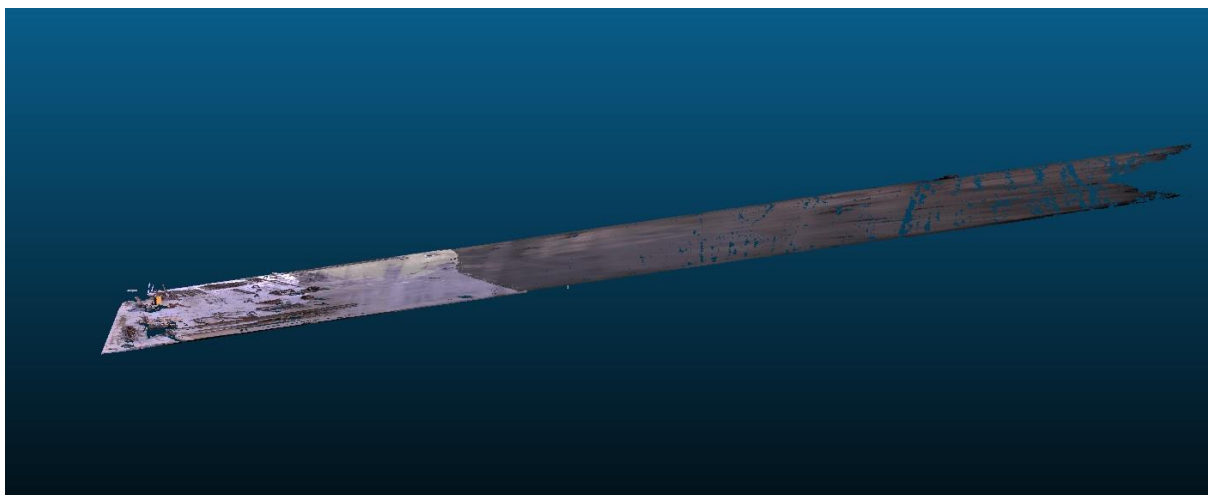
Rozdíly ve výsledných výškách jednotlivých bodů mezi těmito dvěma variantami dosahují maximálně 1 mm. Velikost indexové chyby činí $i = -0,00028$ g. U nejdelší měřené záměry velikosti 68,639 m působí vliv této indexové chyby ve výškovém údaji -0,3 mm. Tento vliv je pro účely daného typu měření zanedbatelný. Proto dále již tato varianta a zavedení korekce není uvažováno a do dalšího zpracování vstupují pouze výškové údaje vypočtené bez zavedení této korekce. Vliv indexové chyby na výsledné výšky uveden v Příloze 5.

8.4. Laserové skenování

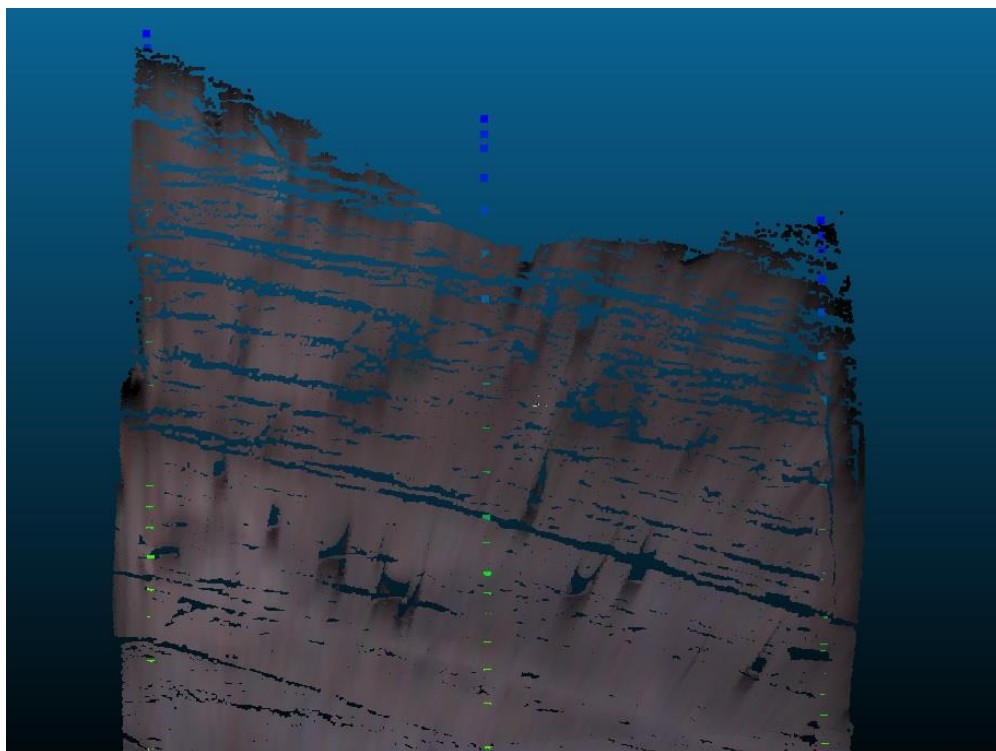
Určení výškových údajů z mračna bodů bylo realizováno v software CloudCompare. Do tohoto softwaru bylo nahráno nejen mračno bodů, ale také referenčně souřadnice bodů profilů získané trigonometrickou metodou. Souřadnice trigonometrické metody, zejména polohy YX byly stěžejní, protože zde reálně probíhalo měření všech ostatních metod. Proto pro referenční body nebyly využity projektované souřadnice bodů profilů, protože ty mohly být polohově posunuty (maximálně v řádu cm) oproti skutečnému místu měření. Tento polohový posun mezi projektovanou polohou a skutečnou nebyl stěžejní, důležitým faktorem bylo dodržení, aby všechny metody byly měřeny polohově na stejném místě, které bylo terénu signalizováno.

Následně byl vybrán vždy ten bod z mračna bodů, který byl půdorysně nejbližší danému referenčnímu bodu profilu. Tímto postupem v software CloudCompare byly získány prostorové souřadnice konkrétních bodů z celého mračna bodů.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 7.5.4., monolitická deska byla skenována pouze z jednoho stanoviska. Při zpracování se projevila nevýhoda tohoto jednoho postavení laserového skeneru. Na opačném konci mostní konstrukce (od postavení přístroje) nastaly situace, kdy nebylo možné vybrat bod z naskenovaného mračna bodů, protože bylo řídké nebo úplně chybělo (viz Obrázek 21). Proto u 7 bodů profilů nemohlo vůbec dojít k určení souřadnic z mračna bodů.



Obrázek 20 – Mračno bodů v prostřední programu CloudCompare



Obrázek 21 – Nedostatečné mračno bodů pro vyhodnocení

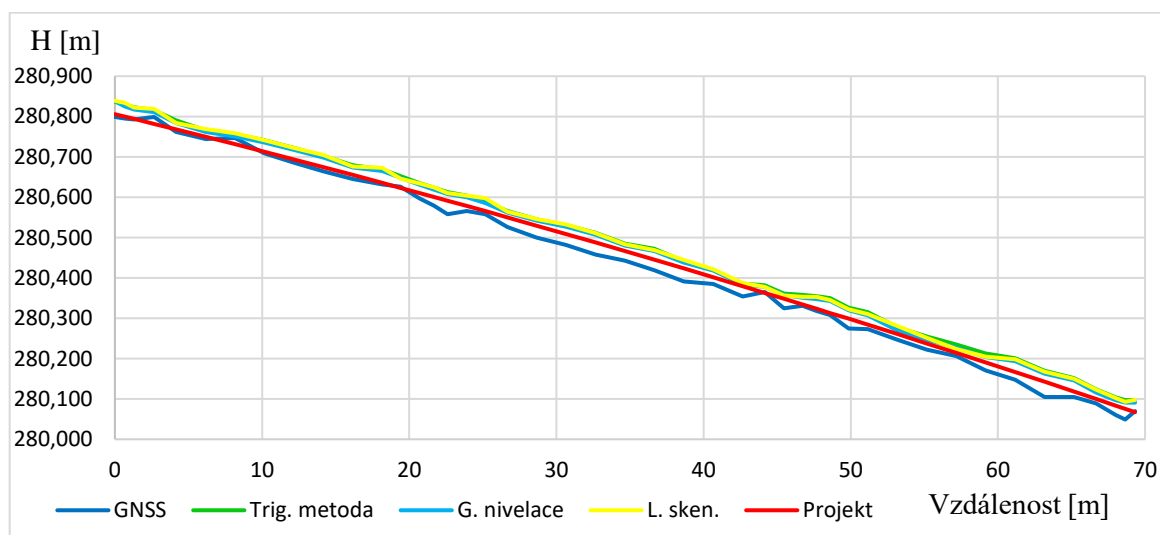
9 Analýza a vyhodnocení výsledků

Na základě charakteristik přesnosti jsou určeny nejvhodnější metody a nejméně vhodné metody pro daný typ měření. Veškerá výšková data a z nich vypočtené charakteristiky přesnosti, na základě kterých bylo provedeno vyhodnocení, jsou uvedeny v Příloze 6.

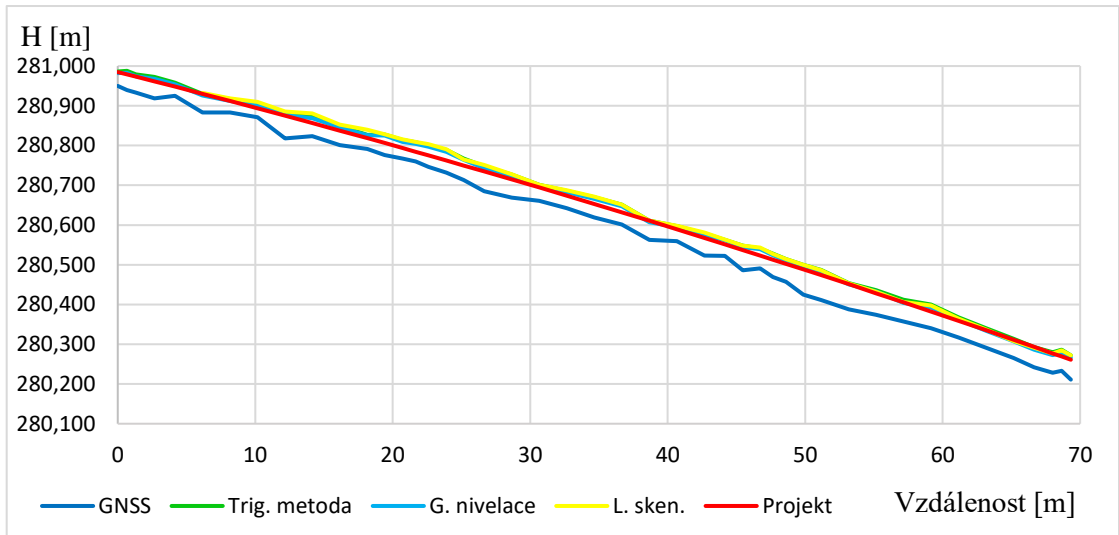
Před samotným porovnáním jednotlivých charakteristik přesnosti bylo zřejmé, že metoda RTK technologie GNSS v použité konfiguraci je pro tento typ měření nevhodná. Měření s intervalem 5 s je nedostatečné. Existují další varianty této technologie (viz kapitola 5.5.2.), které dosahují vyšší přesnosti, ale jejich zejména časová náročnost by byla neakceptovatelná. Použitá metoda RTK s intervalem měření 5 s je časově konkurenceschopná vůči ostatním použitým metodám, ale už ne s ohledem na potřebnou přesnost. Z grafů 1, 2 a 3, které představují podélné profily jednotlivých použitých metod je zřejmé, že měření touto metodou je zřetelně odchýleno od ostatních metod. Naopak ostatní metody poskytují vzájemně si blízké výsledky. U každé z metod proběhlo nezávislé měření. Proto můžeme považovat výsledky metod trigonometrického určování výšek, geometrické nivelace a laserové skenování za ověřené. Výsledky každé jednotlivé metody jsou ověřeny podobnými výsledky dvou dalších metod. Při zavedení korekce $\Delta H = + 0,049$ m k získaným výškovým údajům metody RTK se takto korigované výšky relativně přibližují k výškovým údajům získaných ostatními metodami. Tato situace je demonstrována na podélném Profilu 300 (viz Graf 4). Avšak rozptyl měření, který představují směrodatné odchylky, je u metody RTK vyšší než u ostatních metod, zejména u relativního porovnání, kde vůči sobě porovnáváme dva výškové údaje skutečného tvaru monolitické desky. Technologie GNSS ve zvolené konfiguraci je vyhodnocena jako nevhodná pro daný typ měření, proto se v dalším vyhodnocování nebude uvažovat. Pokud je v dalším textu souhrnné označení ostatní metody, není metoda RTK uvažována mezi nimi.

Z jednotlivých grafů je dále patrné, že naměřené hodnoty se liší od projektovaných hodnot. Jedná se o skutečnost, která na daném mostním objektu nastala. Danou skutečností je fakt, že betonová vrstva tvořící monolitickou desku je vyšší, než jsou projektované údaje. Z praktického hlediska se jednalo o hlavní podstatu tohoto měření, aby byly zjištěny a následně také mohly být řešeny nesrovnalosti vůči projektové dokumentaci. Možných řešení dané situace je celá řada, jedním z nich může být zbroušení betonové monolitické desky do požadovaných mezí oproti projektu. To ovšem není předmětem této práce, proto se dále touto problematikou zabývat nebudeme. Je však nutné tuto skutečnost zmínit, a to z důvodu uvedení provedeného měření do kontextu jeho praktického využití. Praktickým využitím je kontrolně zjistit a eliminovat nesrovnalosti vůči projektové dokumentaci. To je daným typem měření.

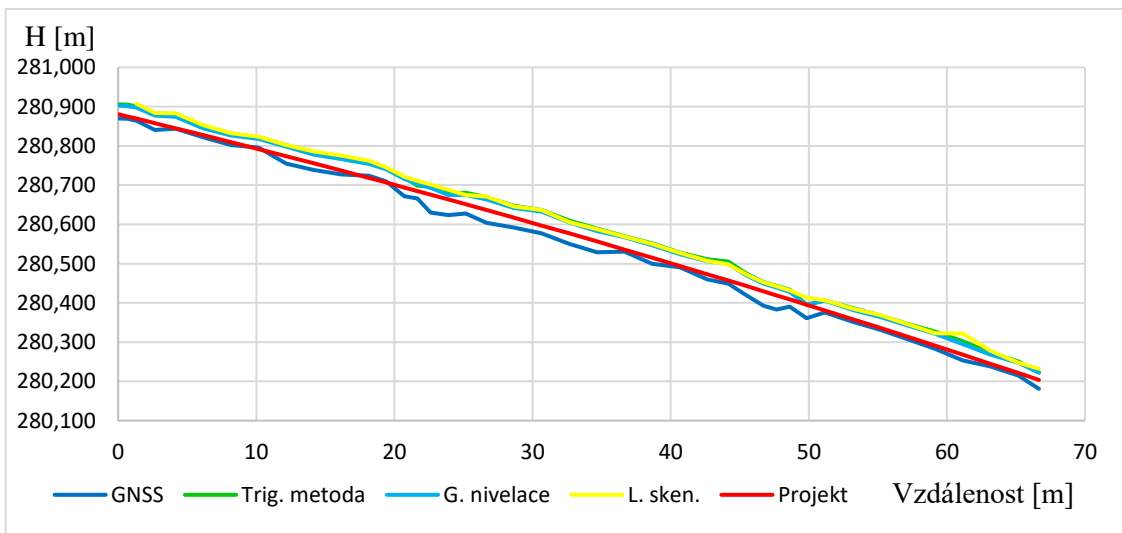
Z grafů, které vizuálně zobrazují jednotlivé podélné profily, lze dále vidět rozdíl mezi okrajovými podélnými profily (Profil 200 a Profil 400) a středovým podélným profilem (Profil 300). Naměřené výškové údaje jednotlivých metod středového Profilu 300 se výrazně méně liší od projektovaných hodnot. Naopak okrajové podélné profily se liší více od projektovaných hodnot. Důvodem vzniku tohoto rozdílu mezi okrajovými podélnými profily a středovým podélným profilem může představovat samotná realizace monolitické betonové desky. Monolitická deska má být vyhotovena o určitém sklonu od osy mostní konstrukce (viz kapitola 2.1.2), což při samotné betonáži nemusí být snadno realizováno. Proto jsou na okrajových profilech naměřeny vyšší výškové hodnoty oproti projektovaným. Středový profil ležící v ose mostu tvoří horní hranu, z toho důvodu vůči projektovaným hodnotám (vizuálně) vyhovuje mnohem lépe.



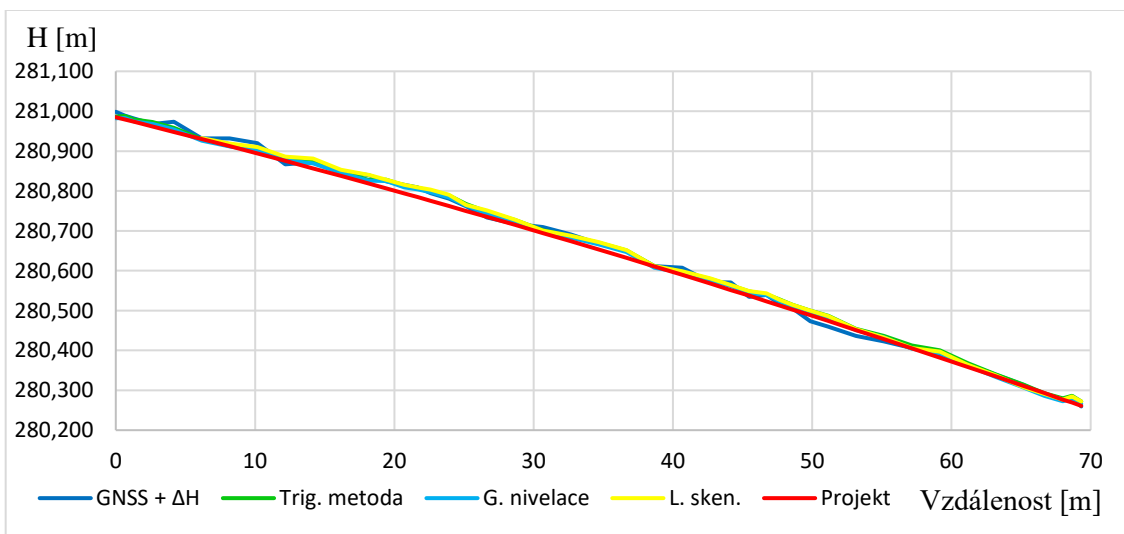
Graf 1 – Podélný Profil 200



Graf 2 – Podélný Profil 300



Graf 3 – Podélný Profil 400



Graf 4 – Podélný Profil 300 $H_{GNSS} + \Delta H$

9.1. Absolutní porovnání

Dle vypočtených charakteristik přesnosti absolutního porovnání, které představují rozptyly měření, lze považovat metodu trigonometrického určování výšek, technické nivelaci zvýšené přesnosti a laserového skenování při daném typu měření za přesnosti sobě rovnými. Žádná z těchto metod se výrazně (o určitý řád) neodlišuje skrze dosaženou charakteristiku přesnosti od ostatních. Jsou zde určité nuance mezi charakteristikami jednotlivých metod, které se projevují až na dalších desetinných místech, které jsou nad rámec přesnosti měření. Dle těchto rozdílů je tou nejvhodnější metodou metoda zpřesněné technické nivelace, následně metoda trigonometrického určování výšek a poté metoda laserového skenování (viz Příloha 6).

Nejpřesnější metodou je metoda technická nivelace zvýšené přesnosti (geometrická nivelace). Jedná se o časově poměrně rychlou metodu, z tohoto hlediska srovnatelnou s metodou trigonometrického určování výšek. Nevýhodou geometrické nivelace je nemožnost určit polohu, která má sice v tomto typu měření pouze kontrolní význam, ale ne zcela zanedbatelný. Další a velmi významnou nevýhodou této metody je potřeba minimálně dvojice pracovníků (figuranta a měřiče). Jedná se o jedinou z použitých metod, která potřebuje pro svou realizaci minimálně dva pracovníky.

Trigonometrická metoda určení výšek je druhou nejpřesnější metodou. V současné době jednoznačně nejpoužívanější metoda praxe, proto byla také využita pro relativní porovnání. Výhodou této metody je časová nenáročnost, možnost určení také polohy a schopnost měření pouze za účasti jednoho pracovníka při použití robotizované totální stanice.

Metoda laserového skenování je na základě dosažených charakteristik přesnosti absolutního porovnání třetí nejpřesnější metodou. Tato metoda je ze všech použitých metod nejrychlejší. Měření technické nivelace zvýšené přesnosti trvalo 2 hodiny a měření metodou trigonometrického určování výšek 1 hodinu. Oproti tomu laserové skenování trvalo celkově pouze 30 minut. Nejedná se o zanedbatelný časový rozdíl. Dosažená přesnost skrze charakteristiky přesnosti se oproti konvenčním metodám liší až na dalších desetinných místech. Lze tedy tuto metodu považovat z hlediska přesnosti za rovnou technické nivelaci zvýšené přesnosti a metodě trigonometrického určování výšek. Určitý problém, který musí řešit nejen tato metoda, ale také ostatní metody, ovšem ne v takové rozsahu, je stavební materiál nebo jiné překážky na měřeném území. V případě ostatních metod se může daný předmět přesunout nebo realizovat měření skrze něj. To u laserového skenování nelze. Veškeré předměty, které nejsou předmětem vlastního měření, jej znehodnocují.

Ve srovnání s ostatními metodami je pro laserové skenování nedostatečné pouze jednoho postavení přístroje. S narůstající vzdáleností klesá hustota mračna bodů. Proto by bylo vhodné na objektech podobné velikosti a rozměrů jako SO 202 minimálně dvojího postavení laserového skeneru tak, aby nedošlo k situaci popsané v kapitole 8.4. a znázorněné na Obrázku 21.

Mírně zavádějící mohou být velikosti směrodatných odchylek absolutního porovnání. Jejich velikost je ovlivněna neshodností realizace s projektovou dokumentací. Zde může být matoucí nabývání hodnot charakteristik přesnosti GNSS technologie, která díky svému systematickému posunu o $-0,049$ m se přibližuje projektovým hodnotám, ne však k reálným výškovým hodnotám. Pro odhad směrodatných odchylek metod je lepším ukazatelem relativní porovnání. Rozptyly měření absolutního porovnání jsou znázorněny v Příloze 7.

9.2. Relativní porovnání

Dle vypočtených charakteristik přesnosti představující rozptyl měření vůči trigonometrické metodě určování výšek se žádná z ostatních vyhodnocovaných metod (vyjma RTK metody) výrazně neodlišuje skrze dosaženou charakteristiku.

Metoda technické nivelace zvýšené přesnosti má zcela minimální rozptyl. Tento ukazatel potvrzuje absolutní porovnání, že se jedná o nejpřesnější metodu (spolu s trigonometrickou metodou).

Stejně jako v absolutním porovnání je metoda laserového skenování, z pohledu rozptylu měření konkurenceschopná technické nivelaci, nedosahuje však její přesnosti.

Metoda trigonometrického určování výšek nemůže být vyhodnocena, protože se jedná o porovnávací metodu a je považována v tomto srovnání za bezchybnou, poskytující údaje o skutečném tvaru monolitické desky.

Výběrové směrodatné odchylky u okrajových podélných profilů jsou větší než výběrové směrodatné odchylky středového podélného profilu. Rozptyl měření mezi jednotlivými metodami je větší na okrajových částech mostu než v jeho středu. Jedná se o srovnání skutečných naměřených dat. Důvodem vzniku tohoto rozdílu mezi okrajovými podélnými profily a středovým podélným profilem nacházejícím se v ose mostní konstrukce může být důsledkem vnějších podmínek, působících na mostní konstrukci. Tato vnější působení mají na okrajových částech betonové mostní konstrukce větší vliv, než ve středu mostní konstrukce.

V Příloze 8 jsou skrze histogramy znázorněny rozptyly měření relativního porovnání.

10 Závěr

Aplikace několika daných metod na konkrétním případě praxe umožnila relevantně vyhodnotit výsledky, které jsou využitelné pro praxi tohoto typu.

Metody trigonometrického určování výšek, technické nivelace zvýšené přesnosti a laserového skenování lze považovat z pohledu rozptylu měření za sobě odpovídající. Proto pro daný typ měření může být použita kterákoli z nich za dodržení podmínky, že výsledné výškové údaje budou získány v požadované přesnosti. Naopak technologie GNSS ve zvolené konfiguraci je pro daný typ měření nevhodná.

Velkou neznámou, která do této práce vstupovala, byla metoda laserového skenování. Ostatní metody jsou již konvenčně známé, ale tato metoda je stále považována za inovativní řešení geodetických úloh. Na základě získaných výsledků této práce můžeme konstatovat, že metoda laserového skenování je z pohledu přesnosti získaných výškových údajů pro daný případ na stejné úrovni jako běžné geodetické metody. Vystává zde mnoho dalších otázek, které bude nutno dále řešit. Jedná se zejména o postprocessing, jak nejefektivněji získat souřadnice konkrétních bodů z celého mračna. Bude se muset jednat o řešení skrze určitou automatizaci v daném softwaru.

Tradiční geodetické metody, mezi které patří trigonometrické určování výšek a geometrická nivelace mají stále své místo v řešení geodetických úloh. Ovšem stálý vývoj nových technologií, které v geodetické praxi představuje laserové skenování mohou v budoucnu z velké části nahradit konvenční geodetické metody. Důvodem bude zejména časová nenáročnost, která je již v současné době mnohonásobně menší.

Přílohy v rozmezí 1-5 včetně jsou v elektronické podobě na přiloženém CD, které je součástí tištěné formy bakalářské práce.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Informační leták. Ředitelství silnic a dálnic ČR [online]. [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: https://mapapp.rsd.cz/Upload/Stavby/352/infoletak_s58-pribor-skotnice.pdf
- [2] Technická zpráva RDS - Objekt SO 202, poskytnuta zástupcem firmy Hrdlička spol. s.r.o., zhotovitel ENVIROAD s.r.o.
- [3] ČSN 730212-1. *Geometrická přesnost ve výstavbě. Kontrola přesnosti. Část 1: Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [4] ČSN 730212-4. *Geometrická přesnost ve výstavbě. Kontrola přesnosti. Část 4: Liniové stavební objekty*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [5] BLAŽEK, Radim a Zdeněk SKOŘEPA. *Geodézie 3: Výškopis*. Třetí. Praha: ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04358-5.
- [6] *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovník/index.php>
- [7] NEVOSÁD, Zdeněk a Josef VITÁSEK. *Geodézie III*. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1774-9.
- [8] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *Inženýrská geodézie I: GE16 modul 03 Návod ke cvičení*. Brno, 2006.
- [9] ŘÍHA, Jan. *Moderní přístrojová technika: Totální stanice, Digitální nivelační přístroje, Laserové skenování* [online]. Praha, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/1364/Moderni-pristrojova-technika-TS-Niv-LS.pdf>
- [10] *Technický popis: Totální stanice Trimble S5* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-03/Datasheet%20-%20Trimble%20S5%20Total%20Station%20-%20Czech%20-%20Screen.pdf>
- [11] NEVOSÁD, Zdeněk a Josef VITÁSEK. *Geodézie II: Modul 03 Průvodce předmětem Geodézie II*. Brno, 2004.
- [12] *Geodézie 3: Geometrická nivelace* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GD3/gd3_pred_2.pdf
- [13] Invar. *DBpedia* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://cs.dbpedia.org/page/Invar>
- [14] Dalekohled. *Hvězdný Tábor* [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.cas100geo.cz/ukaz-dalekohled/>
- [15] FORAL, Jakub. *Geodézie I: Modul 01 geodetická cvičení I*. Brno, 2004.
- [16] *Určování výšek II: Nivelační přístroje - optické* [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~kremen/pred_9_GUI.pdf
- [17] Přesné měřítko s čárovým kódem pro Trimble DiNi. *Geoshop* [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://geoshop.cz/vsechny-produkty/geodezie/nivelace/presne-meritko-s-carovym-kodem-pro-trimble-dini-05-m-%5BBCS-50Z%5D?ItemIdx=10>
- [18] Nivelační podložka. *Geoshop* [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://geoshop.cz/vsechny-produkty/geodezie/nivelace/nivelacni-podlozka-%5B7078030000000%5D?ItemIdx=1>

- [19] Nivelační podložka. *Geoteam* [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.geoteam.cz/eshop/nivelacni-podlozka-zaba-3-kg>
- [20] KRATOCHVÍL, Vlastimil. *Geodézie III: Globální navigační satelitní systémy (GNSS)*. Brno, 2012.
- [21] ŘÍHA, Jan. *Moderní přístrojová technika: GNSS* [online]. Praha, 2014 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/1363/Moderni-pristrojova-technika-GNSS.pdf>
- [22] ŠEBESTA, Jiří. *Globální navigační systémy*. Brno, 2012. ISBN 978-80-214-4500-0.
- [23] KURUC, Jiří. GPS slaví 10 let od vypnutí záměrné chyby. *Navigovat.cz* [online]. 1. května 2010 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://navigovat.mobilmania.cz/clanky/gps-slavi-10-let-od-vypanuti-zamerne-chyby/sc-265-a-1314515>
- [24] Galileo. *European Space Agency* [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo
- [25] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Josef WEIGEL a Radovan MACHOTKA. *Seminář GPS: Metodika GPS měření a vyhodnocení*. Brno, 2007.
- [26] Historie laseru. *ELI Beamlines* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.eli-beams.eu/cs/60-let-laseru/historie-laseru-u-nas-i-ve-svete/>
- [27] PAVELKA, Karel a Jindřich HODAČ. *Fotogrammetrie 3: Digitální metody laserového skenování*. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03978-6.
- [28] FIALA, Radek. *Laserové skenování - principy* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://old.gis.zcu.cz/projekty/Geomatika_multimedialne/FGM/fgm-lls-principy.pdf
- [29] HANZL, Vlastimil. *Fotogrammetrie: Teoretické základy fotogrammetrie*. Brno, 2006.
- [30] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 20*. Druhé. Praha: ČVUT, 2006.
- [31] *3Dtechnologie* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://3dtechnologie.cz/>
- [32] *Geotronics Praha* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://geotronics.cz/>
- [33] *Kalibrační list totální stanice S5*. Praha. Výzkumný ústav geodetický, topografický a, 2019. Poskytnut zástupcem firmy Hrdlička spol. s.r.o.
- [34] *Trimble R4 GNSS systém: Technický popis* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: http://www.geotronics.sk/wp-content/uploads/2014/10/CZE_TrimbleR4GNSS_DS.pdf
- [35] *Trimble SX10: Datasheet* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-03/Datasheet%20-%20SX10%20Scanning%20Total%20Station%20-%20English%20A4%20-%20Screen.pdf>
- [36] WEIGEL, Josef. *Teorie chyb a vyrovnávací počet I: Měřické chyby*. Brno, 2004.

Seznam použitých zkratek

Spol. s.r.o.	Společnost s ručením omezeným
SO	Stavební objekt
GNSS	Global Navigation Satellite System
ppm	Parts per milion
TN	Technická nivelace
PN	Přesná nivelace
VPN	Velmi přesná nivelace
ZVN	Zvlášť přesná nivelace
ZVBP	Základní výškové bodové pole
PVBP	Podrobné výškové bodové pole
NAVSAT	Navy Navigation Satellite System
ESA	European Space Agency
EU	Evropská unie
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
PRN	Pseudo random noise
GSM	Global System for Mobile communications
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation
IMU	Inerciální měřicí jednotka
DMR	Digitální model reliéfu
DMT	Digitální model terénu
SLAM	Simultánní lokalizace a mapování
S-JTKS	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

Bpv	Balt po vyrovnání
ZVS	Základní vytyčovací síť
LVS	Lokální vytyčovací síť
RDS	Realizační dokumentace stavby

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Lokalizace stavby [1]	12
Obrázek 2 – SO 202 [autor].....	13
Obrázek 3 – Signalizace bodu na mostní konstrukci [autor].....	14
Obrázek 4 – Trigonometrické určování výšek [autor].....	16
Obrázek 5 – Skutečný a zdánlivý horizont [autor]	18
Obrázek 6 – I. poloha dalekohledu [autor]	20
Obrázek 7 – II. poloha dalekohledu [autor].....	20
Obrázek 8 – Geometrická nivelace ze středu - 1 sestava [autor].....	22
Obrázek 9 – Geometrická nivelace ze středu - n sestav [autor]	22
Obrázek 10 – Paralaxa [autor]	27
Obrázek 11 – Niv. latě pro optické nivelační přístroje [16]	28
Obrázek 12 – Niv. lať s čárovým kódem [17]	28
Obrázek 13 – Plošná, kruhová niv. Podložka [18]	28
Obrázek 14 – Plošná, trojúhelníková niv. Podložka [19]	28
Obrázek 15 – Odrazivost ploch	38
Obrázek 16 – Čepová niv. značka bodu č. 6032 [autor].....	39
Obrázek 17 – Těžká stabilizace bodu č. 6032 [autor]	39
Obrázek 18 – Těžká stabilizace bodu č. 6034 [autor]	39
Obrázek 19 – Ochrana bodu č. 6034 [autor]	39
Obrázek 20 – Mračno bodů v prostřední programu CloudCompare	47
Obrázek 21 – Nedostatečné mračno bodů pro vyhodnocení	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Přesnost metod kontrolního měření prostorové polohy mostů [4]	15
Tabulka 2 – Opravy ze zakřivení Země [7]	18
Tabulka 3 - Opravy z refrakce [7]	19

Seznam grafů

Graf 1 – Podélný Profil 200.....	49
Graf 2 – Podélný Profil 300.....	50
Graf 3 – Podélný Profil 400.....	50
Graf 4 – Podélný profil 300 $H_{GNSS} + \Delta H$	50

Seznam příloh

Příloha 1	Protokol GNSS (RTK)
Příloha 2	Výpočty GNSS
Příloha 3	Geometrická nivelace
Příloha 4	Protokol o výpočtu metody trigonometrického určování výšek
Příloha 5	Vliv indexové chyby
Příloha 6	Výsledné porovnání
Příloha 7	Histogramy absolutního porovnání
Příloha 8	Histogramy relativního porovnání

Bod	H_{GNS} [m]	H_{trig. met.} [m]	H_{niv.} [m]	H_{l. sken.} [m]	H_{Projekt} [m]
20271202	280,799	280,837	280,838	280,839	280,806
20271203	280,795	280,830	280,825	280,834	280,800
20271204	280,793	280,823	280,817	280,822	280,794
20271205	280,799	280,816	280,811	280,819	280,782
20271206	280,762	280,790	280,784	280,784	280,768
20271207	280,744	280,766	280,762	280,769	280,750
20271208	280,747	280,756	280,751	280,759	280,731
20271209	280,709	280,741	280,736	280,741	280,713
20271210	280,686	280,722	280,717	280,722	280,694
20271211	280,664	280,702	280,698	280,705	280,675
20271212	280,645	280,679	280,674	280,676	280,655
20271213	280,632	280,669	280,665	280,673	280,636
20271214	280,626	280,652	280,648	280,646	280,623
20271215	280,597	280,635	280,631	280,634	280,610
20271216	280,579	280,624	280,619	280,624	280,601
20271217	280,558	280,613	280,608	280,610	280,591
20271218	280,566	280,604	280,600	280,604	280,578
20271219	280,558	280,589	280,586	280,597	280,566
20271220	280,526	280,566	280,562	280,564	280,550
20271221	280,500	280,545	280,542	280,546	280,530
20271222	280,482	280,531	280,527	280,533	280,509
20271223	280,458	280,512	280,507	280,511	280,488
20271224	280,443	280,485	280,480	280,483	280,467
20271225	280,419	280,472	280,467	280,469	280,445
20271226	280,391	280,441	280,438	280,444	280,424
20271227	280,385	280,420	280,418	280,421	280,402
20271228	280,354	280,386	280,384	280,387	280,380
20271229	280,365	280,382	280,378	280,378	280,363
20271230	280,325	280,361	280,358	280,357	280,348
20271231	280,331	280,358	280,351	280,353	280,334
20271232	280,318	280,355	280,348	280,353	280,324
20271233	280,308	280,350	280,343	280,345	280,313
20271234	280,275	280,326	280,320	280,322	280,299
20271235	280,273	280,315	280,307	280,310	280,284
20271236	280,247	280,278	280,270	280,281	280,261
20271237	280,222	280,255	280,247	280,252	280,238
20271238	280,206	280,235	280,227	280,224	280,214
20271239	280,171	280,213	280,204	280,205	280,190
20271240	280,148	280,201	280,194	280,198	280,167
20271241	280,105	280,170	280,163	280,167	280,143
20271242	280,105	280,152	280,146	280,150	280,118
20271243	280,089	280,124	280,116	280,123	280,100
20271244	280,060	280,104	280,097	280,103	280,083

20271245	280,049	280,097	280,091	280,093	280,075
20271246	280,070	280,097	280,091	280,097	280,067
20271302	280,950	280,986	280,982	bez mračna	280,985
20271303	280,940	280,988	280,983	bez mračna	280,979
20271304	280,933	280,979	280,974	bez mračna	280,973
20271305	280,919	280,973	280,968	bez mračna	280,961
20271306	280,925	280,958	280,954	bez mračna	280,948
20271307	280,883	280,930	280,926	280,932	280,930
20271308	280,883	280,917	280,912	280,919	280,912
20271309	280,871	280,906	280,901	280,910	280,894
20271310	280,818	280,881	280,877	280,886	280,875
20271311	280,824	280,874	280,869	280,881	280,856
20271312	280,801	280,849	280,845	280,853	280,838
20271313	280,791	280,827	280,826	280,840	280,818
20271314	280,776	280,828	280,825	280,828	280,806
20271315	280,767	280,814	280,809	280,815	280,794
20271316	280,760	280,808	280,804	280,809	280,784
20271317	280,746	280,800	280,797	280,804	280,775
20271318	280,732	280,789	280,784	280,790	280,762
20271319	280,713	280,767	280,764	280,765	280,750
20271320	280,685	280,748	280,743	280,751	280,735
20271321	280,669	280,727	280,723	280,728	280,715
20271322	280,661	280,701	280,698	280,701	280,694
20271323	280,642	280,686	280,683	280,688	280,674
20271324	280,619	280,670	280,666	280,672	280,653
20271325	280,601	280,651	280,647	280,651	280,632
20271326	280,563	280,611	280,607	280,611	280,611
20271327	280,559	280,597	280,595	280,598	280,589
20271328	280,523	280,579	280,575	280,581	280,568
20271329	280,522	280,563	280,562	280,564	280,552
20271330	280,486	280,548	280,544	280,549	280,537
20271331	280,491	280,541	280,539	280,543	280,523
20271332	280,469	280,528	280,524	280,527	280,513
20271333	280,457	280,514	280,510	280,514	280,502
20271334	280,425	280,500	280,496	280,500	280,489
20271335	280,411	280,487	280,482	280,486	280,474
20271336	280,388	280,454	280,451	280,453	280,451
20271337	280,374	280,436	280,433	280,432	280,428
20271338	280,357	280,412	280,404	280,406	280,405
20271339	280,340	280,400	280,393	280,397	280,382
20271340	280,317	280,368	280,362	280,364	280,359
20271341	280,291	280,340	280,334	280,337	280,335
20271342	280,265	280,314	280,307	280,308	280,311
20271343	280,242	280,293	280,286	280,291	280,293
20271344	280,228	280,280	280,273	280,277	280,277
20271345	280,233	280,286	280,279	280,285	280,269
20271346	280,211	280,272	280,266	280,272	280,261
20271402	280,870	280,906	280,903	bez mračna	280,881

20271403	280,869	280,905	280,901	bez mračna	280,875
20271404	280,864	280,901	280,898	280,908	280,870
20271405	280,841	280,882	280,877	280,884	280,858
20271406	280,844	280,879	280,874	280,883	280,845
20271407	280,822	280,850	280,845	280,853	280,828
20271408	280,802	280,832	280,827	280,833	280,810
20271409	280,796	280,822	280,818	280,823	280,792
20271410	280,755	280,802	280,798	280,802	280,774
20271411	280,739	280,783	280,778	280,786	280,756
20271412	280,727	280,770	280,766	280,775	280,737
20271413	280,724	280,757	280,754	280,763	280,718
20271414	280,709	280,743	280,740	280,745	280,707
20271415	280,672	280,720	280,716	280,721	280,694
20271416	280,666	280,699	280,704	280,711	280,685
20271417	280,630	280,696	280,693	280,702	280,676
20271418	280,624	280,679	280,675	280,688	280,664
20271419	280,628	280,681	280,675	280,675	280,651
20271420	280,604	280,669	280,664	280,671	280,637
20271421	280,592	280,647	280,642	280,646	280,617
20271422	280,577	280,637	280,633	280,637	280,597
20271423	280,550	280,610	280,605	280,606	280,577
20271424	280,529	280,589	280,583	280,587	280,556
20271425	280,531	280,570	280,567	280,569	280,536
20271426	280,500	280,552	280,547	280,550	280,515
20271427	280,491	280,528	280,524	280,528	280,494
20271428	280,460	280,511	280,506	280,507	280,473
20271429	280,449	280,505	280,500	280,498	280,457
20271430	280,420	280,475	280,470	280,473	280,443
20271431	280,393	280,453	280,449	280,453	280,430
20271432	280,383	280,443	280,439	280,443	280,419
20271433	280,390	280,434	280,428	280,432	280,409
20271434	280,361	280,395	280,395	280,413	280,395
20271435	280,376	280,406	280,406	280,407	280,381
20271436	280,352	280,387	280,382	280,386	280,359
20271437	280,332	280,368	280,364	280,369	280,336
20271438	280,307	280,346	280,342	280,346	280,314
20271439	280,283	280,327	280,321	280,323	280,291
20271440	280,253	280,302	280,295	280,322	280,268
20271441	280,238	280,273	280,268	280,278	280,245
20271442	280,215	280,251	280,248	280,248	280,221
20271443	280,181	280,223	280,222	280,232	280,204

Relativní porovnání			
Bod	H _{trig.} - H _{GNSS} [m]	H _{trig.} - H _{niv.} [m]	H _{trig.} - H _{l. sken.} [m]
20271202	0,038	-0,001	-0,002
20271203	0,035	0,005	-0,004
20271204	0,030	0,006	0,001
20271205	0,017	0,005	-0,003
20271206	0,028	0,006	0,006
20271207	0,022	0,004	-0,003
20271208	0,009	0,005	-0,003
20271209	0,032	0,005	0,000
20271210	0,036	0,005	0,000
20271211	0,038	0,004	-0,003
20271212	0,034	0,005	0,003
20271213	0,037	0,004	-0,004
20271214	0,026	0,004	0,006
20271215	0,038	0,004	0,001
20271216	0,045	0,005	0,000
20271217	0,055	0,005	0,003
20271218	0,038	0,004	0,000
20271219	0,031	0,003	-0,008
20271220	0,040	0,004	0,002
20271221	0,045	0,003	-0,001
20271222	0,049	0,004	-0,002
20271223	0,054	0,005	0,001
20271224	0,042	0,005	0,002
20271225	0,053	0,005	0,003
20271226	0,050	0,003	-0,003
20271227	0,035	0,002	-0,001
20271228	0,032	0,002	-0,001
20271229	0,017	0,004	0,004
20271230	0,036	0,003	0,004
20271231	0,027	0,007	0,005
20271232	0,037	0,007	0,002
20271233	0,042	0,007	0,005
20271234	0,051	0,006	0,004
20271235	0,042	0,008	0,005
20271236	0,031	0,008	-0,003
20271237	0,033	0,008	0,003
20271238	0,029	0,008	0,011
20271239	0,042	0,009	0,008
20271240	0,053	0,007	0,003
20271241	0,065	0,007	0,003
20271242	0,047	0,006	0,002
20271243	0,035	0,008	0,001
20271244	0,044	0,007	0,001
20271245	0,048	0,006	0,004
20271246	0,027	0,006	0,000

20271302	0,036	0,004	
20271303	0,048	0,005	
20271304	0,046	0,005	
20271305	0,054	0,005	
20271306	0,033	0,004	
20271307	0,047	0,004	-0,002
20271308	0,034	0,005	-0,002
20271309	0,035	0,005	-0,004
20271310	0,063	0,004	-0,005
20271311	0,050	0,005	-0,007
20271312	0,048	0,004	-0,004
20271313	0,036	0,001	-0,013
20271314	0,052	0,003	0,000
20271315	0,047	0,005	-0,001
20271316	0,048	0,004	-0,001
20271317	0,054	0,003	-0,004
20271318	0,057	0,005	-0,001
20271319	0,054	0,003	0,002
20271320	0,063	0,005	-0,003
20271321	0,058	0,004	-0,001
20271322	0,040	0,003	0,000
20271323	0,044	0,003	-0,002
20271324	0,051	0,004	-0,002
20271325	0,050	0,004	0,000
20271326	0,048	0,004	0,000
20271327	0,038	0,002	-0,001
20271328	0,056	0,004	-0,002
20271329	0,041	0,001	-0,001
20271330	0,062	0,004	-0,001
20271331	0,050	0,002	-0,002
20271332	0,059	0,004	0,001
20271333	0,057	0,004	0,000
20271334	0,075	0,004	0,000
20271335	0,076	0,005	0,001
20271336	0,066	0,003	0,001
20271337	0,062	0,003	0,004
20271338	0,055	0,008	0,006
20271339	0,060	0,007	0,003
20271340	0,051	0,006	0,004
20271341	0,049	0,006	0,003
20271342	0,049	0,007	0,006
20271343	0,051	0,007	0,002
20271344	0,052	0,007	0,003
20271345	0,053	0,007	0,001
20271346	0,061	0,006	0,000
20271402	0,036	0,003	
20271403	0,036	0,004	
20271404	0,037	0,003	-0,007

20271405	0,041	0,005	-0,002
20271406	0,035	0,005	-0,004
20271407	0,028	0,005	-0,003
20271408	0,030	0,005	-0,001
20271409	0,026	0,004	-0,001
20271410	0,047	0,004	0,000
20271411	0,044	0,005	-0,003
20271412	0,043	0,004	-0,005
20271413	0,033	0,003	-0,006
20271414	0,034	0,003	-0,002
20271415	0,048	0,004	-0,001
20271416	0,033	-0,005	-0,012
20271417	0,066	0,003	-0,006
20271418	0,055	0,004	-0,009
20271419	0,053	0,006	0,006
20271420	0,065	0,005	-0,002
20271421	0,055	0,005	0,001
20271422	0,060	0,004	0,000
20271423	0,060	0,005	0,004
20271424	0,060	0,006	0,002
20271425	0,039	0,003	0,001
20271426	0,052	0,005	0,002
20271427	0,037	0,004	0,000
20271428	0,051	0,005	0,004
20271429	0,056	0,005	0,007
20271430	0,055	0,005	0,002
20271431	0,060	0,004	0,000
20271432	0,060	0,004	0,000
20271433	0,044	0,006	0,002
20271434	0,034	0,000	-0,018
20271435	0,030	0,000	-0,001
20271436	0,035	0,005	0,001
20271437	0,036	0,004	-0,001
20271438	0,039	0,004	0,000
20271439	0,044	0,006	0,004
20271440	0,049	0,007	-0,020
20271441	0,035	0,005	-0,005
20271442	0,036	0,003	0,003
20271443	0,042	0,001	-0,009

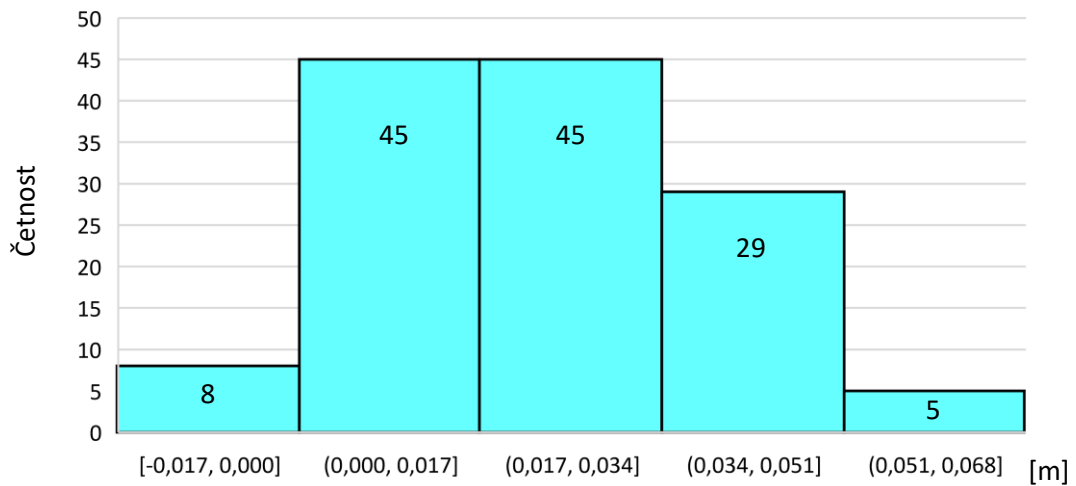
Základní σ [m]	0,0120	0,0019	0,0044
Výběr. σ [m] Profil 200	0,0111	0,0020	0,0036
Výběr. σ [m] Profil 300	0,0098	0,0016	0,0034
Výběr. σ [m] Profil 400	0,0111	0,0020	0,0057
Střední hodnota [m]	0,0440	0,0050	0,0000

Absolutní porovnání				
Bod	H _{p.} - H _{GNS} [m]	H _{p.} - H _{trig.} [m]	H _{p.} - H _{niv.} [m]	H _{p.} - H _{skn.} [m]
20271202	0,007	-0,031	-0,032	-0,033
20271203	0,005	-0,030	-0,025	-0,034
20271204	0,001	-0,029	-0,023	-0,028
20271205	-0,017	-0,034	-0,029	-0,037
20271206	0,006	-0,022	-0,016	-0,016
20271207	0,006	-0,016	-0,012	-0,019
20271208	-0,016	-0,025	-0,020	-0,028
20271209	0,004	-0,028	-0,023	-0,028
20271210	0,008	-0,028	-0,023	-0,028
20271211	0,011	-0,027	-0,023	-0,030
20271212	0,010	-0,024	-0,019	-0,021
20271213	0,004	-0,033	-0,029	-0,037
20271214	-0,003	-0,029	-0,025	-0,023
20271215	0,013	-0,025	-0,021	-0,024
20271216	0,022	-0,023	-0,018	-0,024
20271217	0,033	-0,022	-0,017	-0,019
20271218	0,012	-0,026	-0,022	-0,026
20271219	0,008	-0,023	-0,020	-0,032
20271220	0,024	-0,016	-0,012	-0,014
20271221	0,030	-0,015	-0,012	-0,016
20271222	0,027	-0,022	-0,018	-0,024
20271223	0,030	-0,024	-0,019	-0,023
20271224	0,024	-0,018	-0,013	-0,017
20271225	0,026	-0,027	-0,022	-0,024
20271226	0,033	-0,017	-0,014	-0,021
20271227	0,017	-0,018	-0,016	-0,020
20271228	0,026	-0,006	-0,004	-0,007
20271229	-0,002	-0,019	-0,015	-0,015
20271230	0,023	-0,013	-0,010	-0,008
20271231	0,003	-0,024	-0,017	-0,019
20271232	0,006	-0,031	-0,024	-0,030
20271233	0,005	-0,037	-0,030	-0,032
20271234	0,024	-0,027	-0,021	-0,024
20271235	0,011	-0,031	-0,023	-0,026
20271236	0,014	-0,017	-0,009	-0,020
20271237	0,016	-0,017	-0,009	-0,014
20271238	0,008	-0,021	-0,013	-0,010
20271239	0,019	-0,023	-0,014	-0,015
20271240	0,019	-0,034	-0,027	-0,032
20271241	0,038	-0,027	-0,020	-0,025
20271242	0,013	-0,034	-0,028	-0,032
20271243	0,011	-0,024	-0,016	-0,023
20271244	0,023	-0,021	-0,014	-0,019
20271245	0,026	-0,022	-0,016	-0,018
20271246	-0,003	-0,030	-0,024	-0,030

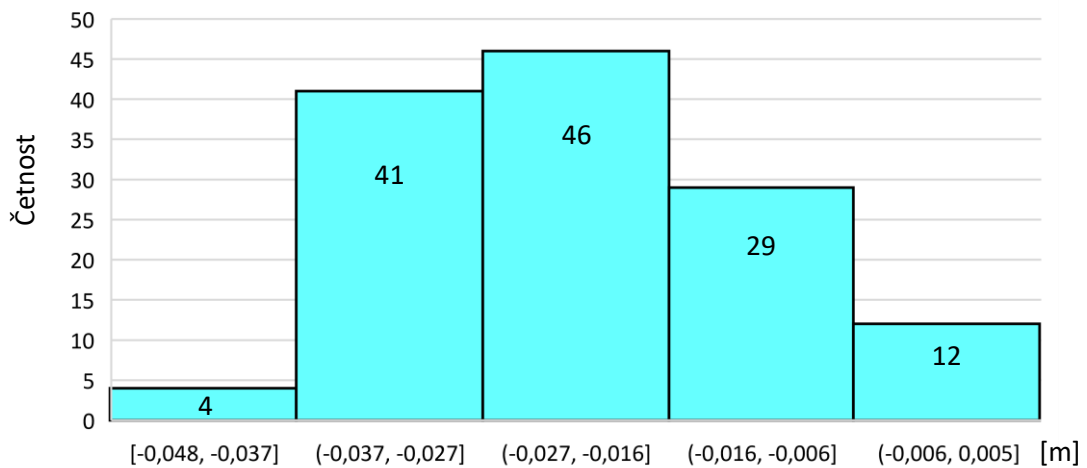
20271302	0,035	-0,001	0,003	
20271303	0,039	-0,009	-0,004	
20271304	0,040	-0,006	-0,001	
20271305	0,042	-0,012	-0,007	
20271306	0,023	-0,010	-0,006	
20271307	0,047	0,000	0,004	-0,002
20271308	0,029	-0,005	0,000	-0,007
20271309	0,023	-0,012	-0,007	-0,016
20271310	0,057	-0,006	-0,002	-0,011
20271311	0,032	-0,018	-0,013	-0,025
20271312	0,037	-0,011	-0,007	-0,015
20271313	0,027	-0,009	-0,008	-0,022
20271314	0,030	-0,022	-0,019	-0,022
20271315	0,027	-0,020	-0,015	-0,022
20271316	0,024	-0,024	-0,020	-0,024
20271317	0,029	-0,025	-0,022	-0,028
20271318	0,030	-0,027	-0,022	-0,028
20271319	0,037	-0,017	-0,014	-0,015
20271320	0,050	-0,013	-0,008	-0,016
20271321	0,046	-0,012	-0,008	-0,013
20271322	0,033	-0,007	-0,004	-0,007
20271323	0,032	-0,012	-0,009	-0,014
20271324	0,034	-0,017	-0,013	-0,019
20271325	0,031	-0,019	-0,015	-0,020
20271326	0,048	0,000	0,004	0,000
20271327	0,030	-0,008	-0,006	-0,009
20271328	0,045	-0,011	-0,007	-0,013
20271329	0,030	-0,011	-0,010	-0,012
20271330	0,051	-0,011	-0,007	-0,011
20271331	0,032	-0,018	-0,016	-0,019
20271332	0,044	-0,015	-0,011	-0,014
20271333	0,045	-0,012	-0,008	-0,012
20271334	0,064	-0,011	-0,007	-0,011
20271335	0,063	-0,013	-0,008	-0,012
20271336	0,063	-0,003	0,000	-0,002
20271337	0,054	-0,008	-0,005	-0,004
20271338	0,048	-0,007	0,001	-0,001
20271339	0,042	-0,018	-0,011	-0,015
20271340	0,042	-0,009	-0,003	-0,005
20271341	0,044	-0,005	0,001	-0,002
20271342	0,046	-0,003	0,004	0,003
20271343	0,051	0,000	0,007	0,002
20271344	0,049	-0,003	0,004	0,000
20271345	0,036	-0,017	-0,010	-0,016
20271346	0,050	-0,011	-0,005	-0,011
20271402	0,011	-0,025	-0,022	
20271403	0,006	-0,030	-0,026	
20271404	0,006	-0,031	-0,028	-0,038

20271405	0,017	-0,024	-0,019	-0,026
20271406	0,001	-0,034	-0,029	-0,038
20271407	0,006	-0,022	-0,017	-0,025
20271408	0,008	-0,022	-0,017	-0,023
20271409	-0,004	-0,030	-0,026	-0,031
20271410	0,019	-0,028	-0,024	-0,028
20271411	0,017	-0,027	-0,022	-0,030
20271412	0,010	-0,033	-0,029	-0,038
20271413	-0,006	-0,039	-0,036	-0,044
20271414	-0,002	-0,036	-0,033	-0,038
20271415	0,022	-0,026	-0,022	-0,027
20271416	0,019	-0,014	-0,019	-0,026
20271417	0,046	-0,020	-0,017	-0,025
20271418	0,040	-0,015	-0,011	-0,025
20271419	0,023	-0,030	-0,024	-0,024
20271420	0,033	-0,032	-0,027	-0,035
20271421	0,025	-0,030	-0,025	-0,029
20271422	0,020	-0,040	-0,036	-0,040
20271423	0,027	-0,033	-0,028	-0,029
20271424	0,027	-0,033	-0,027	-0,031
20271425	0,005	-0,034	-0,031	-0,033
20271426	0,015	-0,037	-0,032	-0,035
20271427	0,003	-0,034	-0,030	-0,034
20271428	0,013	-0,038	-0,033	-0,034
20271429	0,008	-0,048	-0,043	-0,041
20271430	0,023	-0,032	-0,027	-0,030
20271431	0,037	-0,023	-0,019	-0,023
20271432	0,036	-0,024	-0,020	-0,023
20271433	0,019	-0,025	-0,019	-0,023
20271434	0,034	0,000	0,000	-0,018
20271435	0,005	-0,025	-0,025	-0,026
20271436	0,007	-0,028	-0,023	-0,027
20271437	0,004	-0,032	-0,028	-0,033
20271438	0,007	-0,032	-0,028	-0,032
20271439	0,008	-0,036	-0,030	-0,032
20271440	0,015	-0,034	-0,027	-0,054
20271441	0,007	-0,028	-0,023	-0,033
20271442	0,006	-0,030	-0,027	-0,026
20271443	0,023	-0,019	-0,018	-0,029

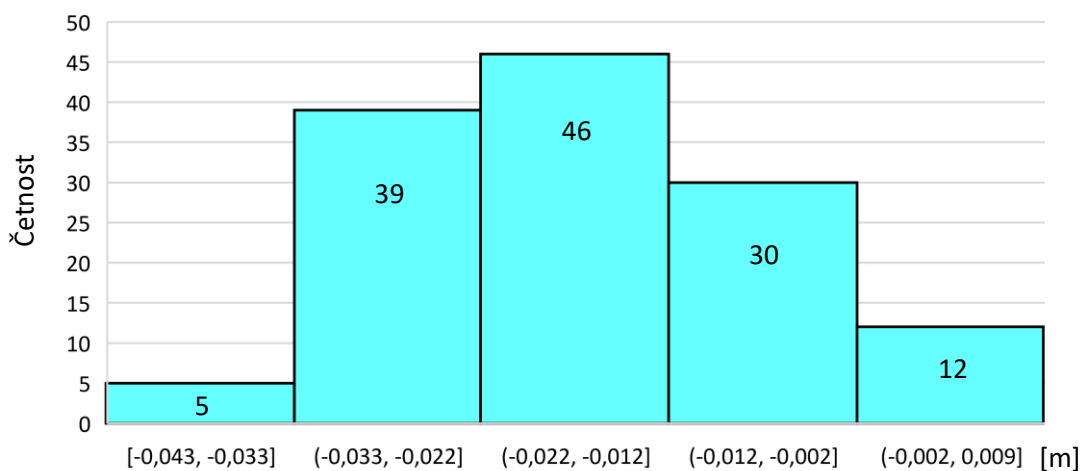
Základní σ [m]	0,0170	0,0103	0,0102	0,0106
Výběr. σ [m] Profil 200	0,0123	0,0064	0,0063	0,0074
Výběr. σ [m] Profil 300	0,0109	0,0067	0,0072	0,0083
Výběr. σ [m] Profil 400	0,0125	0,0081	0,0073	0,0069
Střední hodnota [m]	0,0234	-0,0225	-0,0182	-0,0234



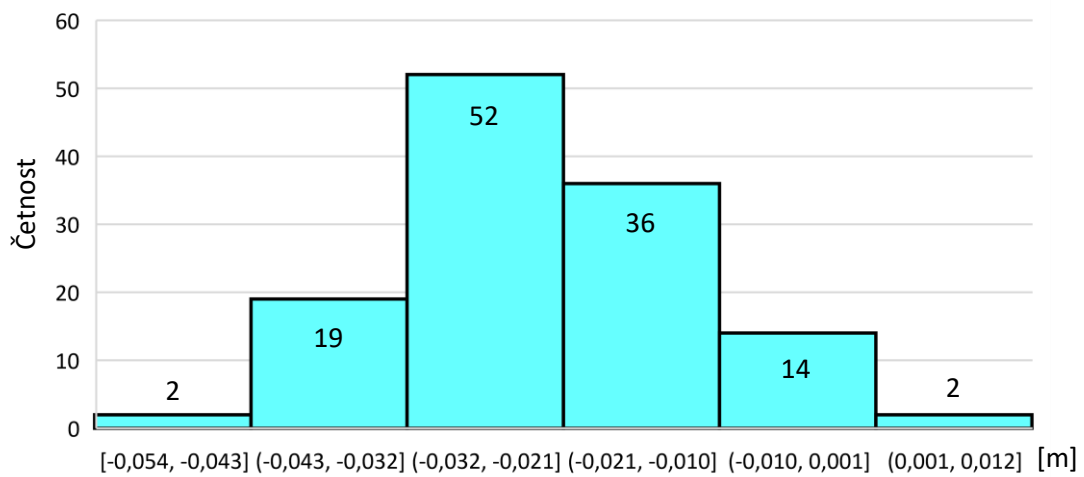
Graf 5 - Rozptyl absolutního porovnání GNSS technologie



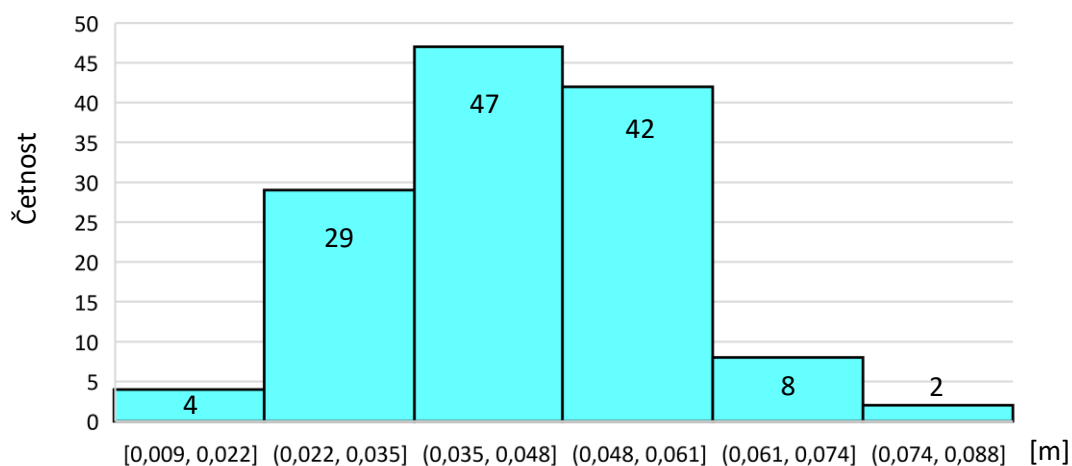
Graf 6 - Rozptyl absolutního porovnání trigonometrické metody



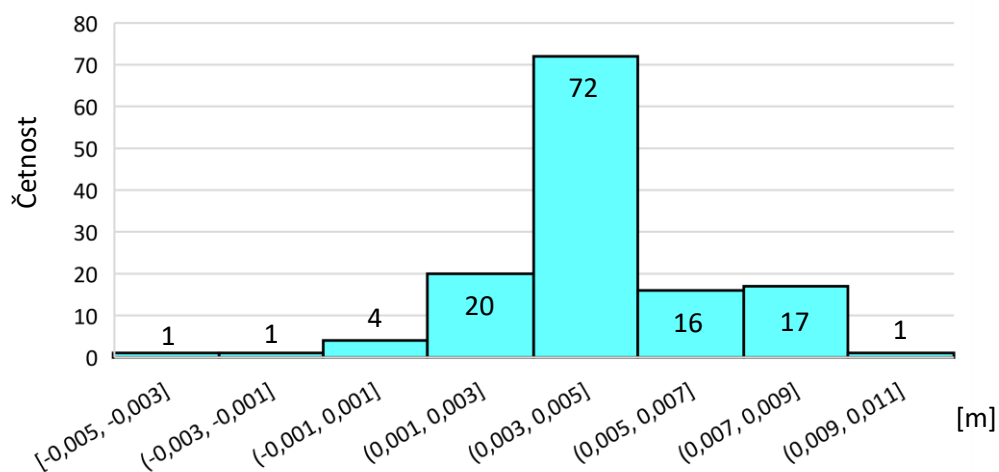
Graf 7 - Rozptyl absolutního porovnání metody geometrické nivelace



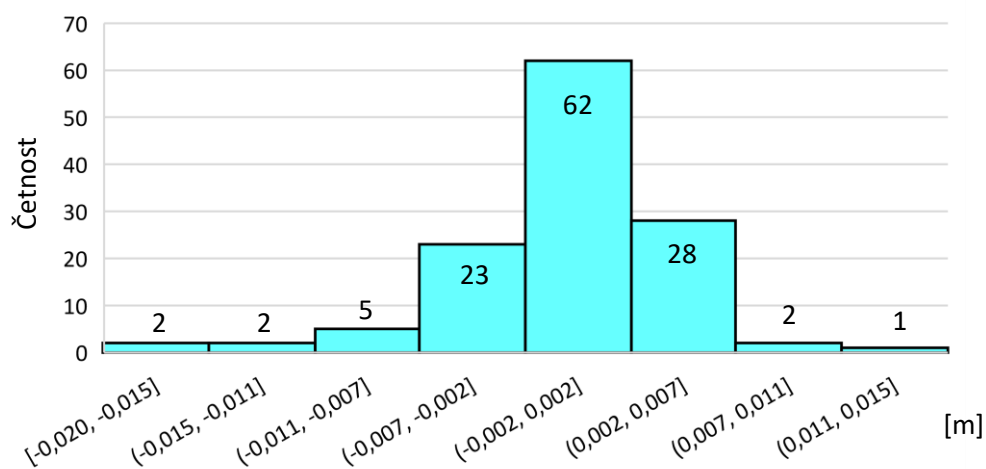
Graf 8 - Rozptyl absolutního porovnání laserového skenování



Graf 9 - Relativní porovnání trig. metody a GNSS



Graf 10 - Relativní porovnání trig. metody a geometrické nivelace



Graf 11 - Relativní porovnání trig. metody a laserového skenování