



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

URČENÍ VÝŠEK BODŮ PLOŠNÉ NIVELAČNÍ SÍTĚ V AREÁLU FAST ŽIŽKOVA

DETERMINATION OF BENCH-MARK HEIGHTS IN THE FAST ŽIŽKOVA LOCAL LEVELING
NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Poštulka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav geodézie
Student: **Lukáš Poštulka**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: B0532A260001 Geodézie a kartografie

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

Určení výšek bodů plošné nivelační sítě v areálu FAST Žižkova

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nastudování měřického postupu přesné nivelace, nastudování obsluhy elektronického nivelačního přístroje. Zaměření nivelačních bodů v areálu FAST Veveří metodou přesné nivelace, výškové připojení do ČSNS, vyrovnaní měření metodou MNČ a výpočet výšek.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je určit výšky bodů plošné nivelační sítě v areálu FAST Žižkova. Výstupem práce bude mimo jiné přehledka nivelačních bodů, jejich výšky a geodetické údaje o bodech.

Seznam doporučené literatury a podklady:

1. Vyhláška č. 31/1995 Sb. (prováděcí k zákonu 200/1994 Sb.).
2. ČSN ISO 17123-2 Část 2: Nivelační přístroje
3. Návod pro správu geodetických základů, ČÚZK, Praha 2015
4. Metodický návod pro budování, obnovu a údržbu výškových bodových polí ve znění Dodatku č. 1/88 ze dne 29. 7. 1988 č.j. ČÚGK 2702/88-21
5. Metodický návod pro práce v základním výškovém bodovém poli. Zeměměřický úřad, Praha 2003.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 16. 6. 2023

L. S.

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

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je přesně určit výšky bodů plošné nivelační sítě v areálu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně na ulicích Žižkova a Veverčí. K dosažení tohoto cíle byla použita metoda přesné nivelace. Bakalářská práce se zaměřuje na popis metodiky měření, použité technologie, přípravy na měření a následně samotného měření. Dále se pak věnuje zpracování měřených hodnot, jejich vyrovnaní pomocí metody nejmenších čtverců, a také analýze přesnosti výsledků. Výsledky této práce jsou nadmořské výšky bodů, které jsou využity pro tvorbu nivelačních údajů a přehledek bodů nivelační sítě.

KLÍČOVÁ SLOVA

výšková měření, nivelační síť, přesná nivelace, vyrovnaní, analýza přesnosti

ABSTRACT

The purpose of this bachelor's thesis is to precisely determine the heights of the leveling points of the local leveling network in the premises of the Faculty of Civil Engineering of the University of Technology in Brno on Žižkova and Veverčí streets. A precision leveling method was used to achieve this goal. The bachelor's thesis focuses on the description of the measurement methodology, the technology used, the preparation for the measurement and then the measurement itself. Then it deals with the processing of the measured values, their equalization using the method of least squares, as well as the analysis of the accuracy of the results. The results of this work are the altitudes of the points that are used for the creation of leveling data and overviews of the points of the leveling network.

KEYWORDS

height measurement, leveling network, precise leveling, equalization, accuracy analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POŠTULKA, Lukáš. *Určení výšek bodů plošné nivelační sítě v areálu FAST Žižkova*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Určení výšek bodů plošné nivelační sítě v areálu FAST Žižkova zpracoval samostatně a uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně 23. 5. 2024

Lukáš Poštulka

autor

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Radovanovi Machotkovi, Ph.D. za pomoc a rady při měření a za trpělivost při zpracovávání práce. Dále pak Tomáši Peškovi za spolupráci při měření. Také bych ještě rád jmenovitě poděkoval Vladimíru Komarovovi a Natálii Bendové za pomoc při měření.

Obsah

1. ÚVOD.....	10
2. VÝŠKOVÉ BODOVÉ POLE	11
2.1. Vývoj výškových systémů v České republice.....	11
2.1.1. Období do roku 1939.....	11
2.1.2. Období druhé světové války.....	11
2.1.3. Poválečné období	12
2.1.4. Výškový systém Balt po vyrovnání	12
2.2. Výškové bodové pole	13
2.2.1. Základní výškové bodové pole.....	13
2.2.2. Podrobné výškové bodové pole (PVBP).....	15
3. METODY MĚŘENÍ VÝŠEK	16
3.1. Geometrická nivelace	16
3.1.1. Technická nivelace.....	18
3.1.2. Přesná nivelace.....	19
3.1.3. Velmi přesná a zvlášť přesná nivelace	19
3.2. Trigonometrické určování výšek.....	20
3.3. Určení výšky pomocí GNSS	20
3.4. Hydrostatická nivelace	21
4. PŘÍPRAVNÉ PRÁCE	23
4.1. Rekognoskace terénu.....	23
4.2. Použité přístroje a pomůcky	23
4.2.1. Niveláčnický přístroj Leica DNA03	23
4.2.2. Niveláčnická latě.....	24
4.3. Kontrola přístrojů a pomůcek před měřením	24
4.3.1. Kontrola přístroje	24
4.3.2. Kontrola latí.....	25

5. MĚŘICKÉ PRÁCE	27
5.1. Metodika měření	27
5.2. Rozložení nivelačních tahů	27
6. POSOUZENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ	29
6.1. Posouzení rozdílů mezi měřením tam a zpět.....	29
6.2. Posouzení uzávěrů jednotlivých uzavřených tahů	30
6.3. Základní střední kilometrová chyba	30
6.4. Střední chyba obousměrné nivelace pro celý nivelační pořad	31
7. ZPRACOVÁNÍ DAT	32
7.1. Export dat z nivelačního přístroje	32
7.2. Oprava o chybu laťového metru.....	32
7.3. Vyrovnání měření.....	35
7.3.1. Průběh vyrovnání zprostředkujících měření	36
7.3.2. Charakteristiky přesnosti.....	40
7.4. Ověření výšek připojovaných bodů.....	41
8. VÝSLEDKY PRÁCE.....	43
8.1. Geodetické údaje	43
8.2. Přehledky nivelační sítě	43
9. ZÁVĚR.....	44
10. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	45
11. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	47
11.1. Seznam obrázků	47
11.2. Seznam tabulek	47
12. SEZNAM PŘÍLOH	48
13. SEZNAM ZKRATEK	49

1. ÚVOD

Nivelace je základním nástrojem v oblasti geodézie a stavebnictví, který slouží k určování výšek a vytváření přesných výškových sítí. Nivelace umožňuje získat informace o terénu, což je nezbytné pro navrhování a následnou realizaci stavebních projektů. Tato bakalářská práce se zaměřuje na určení výšek bodů plošné nivelační sítě v areálu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně na ulici Veveří a Žižkova.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit přesnou a spolehlivou nivelační síť v areálu FAST Žižkova, která bude sloužit nejen pro možné budoucí stavební a inženýrské projekty, ale také pro praktické využití při výuce v předmětu Geodézie.

Úvodní část této práce se věnuje historii, vývoji a také současnému stavu nivelačních základů v České republice. Dále jsou zde vypsány druhy nejčastěji využívaných metod pro určování převýšení.

Následuje část, která se zabývá samotným měřením. Popisuje přípravu před měřením, přístrojovou techniku použitou při měření a také jaké metodiky bylo pro měření využito. Měřené hodnoty byly následně posuzovány podle kritérií pro nivelační pořady III. řádu České státní nivelační sítě (ČSNS).

Poslední část práce je věnována zpracování měřených hodnot. Je zde vysvětlen proces vyrovnaní měřených hodnot metodou nejmenších čtverců (MNČ) a také ověření výškového připojení na dva nadbytečné body ČSNS v souladu s předpisy pro nivelační pořady III. řádu.

2. VÝŠKOVÉ BODOVÉ POLE

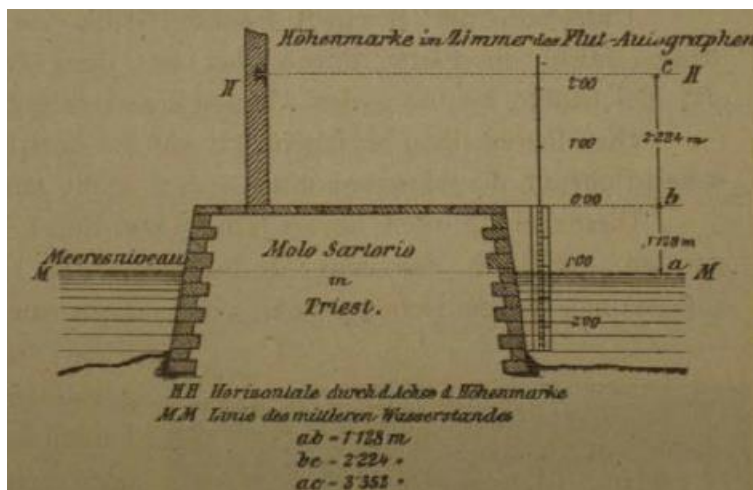
2.1. Vývoj výškových systémů v České republice

2.1.1. Období do roku 1939

V letech 1873-1896 probíhalo pomocí zásad pro velmi přesnou nivelaci zaměření sítě výškového bodového pole na území České republiky. V této době byla Česká republika součástí Rakouska-Uherska. Tuto síť budoval Rakousko-Uherský vojenský zeměpisný ústav (RUVZÚ) ve Vídni. Měřická síť byla rozdělena na tři části – západní, severovýchodní a jihovýchodní, přičemž Česká republika spadala do části západní.

Měření vycházelo od výškové hladiny Jaderského moře. Základní bod se nacházel na budově celní stráže v Molo Sartoriu v Terstu. Výška tohoto bodu byla z dlouhodobého měření na místním mareografu (Obrázek 2.1) stanovena na 3,3520 m nad střední úrovní moře. Na území České republiky byl následně stabilizován základní nivelační bod Lišov, který se nachází poblíž Českých Budějovic, a současně základní nivelační bod Strečno poblíž Žiliny na území Slovenské republiky.

Po vzniku ČSR v roce 1918 byla v roce 1920 zřízena Ústřední nivelační služba, které spadalo pod Ministerstvo veřejných prací. Později byly vybudovány další čtyři základní nivelační body: Mrač, Vrbatův Kostelec, Vlaské a Želešice. (1)



Obrázek 2.1: v Molo Sartoriu v Terstu (2)

2.1.2. Období druhé světové války

Mezi lety 1939 a 1945, když byl na území České republiky vyhlášen protektorát Čechy a Morava, a České země byly okupovány Německem, byl u nás zaveden výškový systém

Normall-Null. Tento výškový systém vycházel z bodu v Berlíně, jehož výška byla vztažena k základnímu výškovému bodu v Amsterdamu.

Nivelační pořady změřené v této době byly vyrovnány v rámci V. bloku německé nivelační sítě a byl stanoven vzájemný vztah mezi výškovými systémy Jadranský a Normall-Null. Přepočítání mezi systémy byl realizován pomocí vzorce:

$$V_{NN} = V_J - 0,2486 \text{ m} \quad (2.1)$$

V tomto období se nivelační měření realizovalo jen v menší míře a na omezeném území tehdejšího protektorátu Čechy a Morava. Výškový systém Normall-Null byl ihned po osvobození v roce 1945 zrušen. (2)

2.1.3. Poválečné období

Po válce se opět tempo nivelačních prací zrychlilo. Nově vzniklá síť byla nazvaná Československou jednotnou nivelační sítí (ČSJNS) s výchozím bodem ZNB Lišov. Výchozí nulová hodnota byla vztažena ke střední hodnotě Jaderského moře.

V roce 1948 bylo tehdejší Československo připojeno k sovětskému bloku a později také k Varšavské smlouvě. Z vojenských důvodů bylo následně rozhodnuto přejít k výškovému systému baltskému, který se používal v Sovětském svazu. (2)

2.1.4. Výškový systém Balt po vyrovnání

Tento výškový systém je závazným referenčním systémem pro výšková měření v České republice. Byl zavedený mezi roky 1952 a 1957. Výškový systém Balt po vyrovnání (Bpv) je definovaný parametry uvedenými v nařízení vlády č. 116/1995 Sb.:

- Hodnota nadmořské výšky v systému je normální výškou podle M. S. Moloděnského, kterou určuje vzdálenost bodu zemského povrchu měřená podél tížnice normálního tíhového pole od vztažné plochy (kvazigeoid). Určuje se podle vztahu:

$$H = \frac{1}{\gamma_{m,N}} * \int g * dh, \quad (2.2)$$

kde: $\gamma_{m,N}$ je střední hodnota normálního tíhového zrychlení, g je tíhové zrychlení na zemském povrchu naměřené podél nivelačního tahu a dh je změna měřeného převýšení.

- Výchozím bodem normálních výšek systému je nula mořského vodočtu v Kronštadu, který představuje střední hladinu Baltského moře.

- Referenční rámec výškového systému Bpv na území ČR tvoří nivelační body České státní nivelační sítě I. až III. řádu.
- Kód systému Bpv v registru EPSG je 5705 (3) (4)

2.2. Výškové bodové pole

Sít' výškových (nivelačních) bodů tvoří soubor vhodně zvolených, rozmístěných a stabilizovaných bodů, jejichž výšky se následně využívají k dalším výškovým měření pro praktické účely. Z vědeckého hlediska hraje sít' velmi přesné nivelace spolu s gravimetrickou sítí důležitou roli pro určení tvaru a rozměrů Země a také pro zjišťování změn zemského povrchu.

Obsah výškového bodového pole je stanovený v bodě 1.3 přílohy vyhlášky č. 31/1995 Sb. Výšky těchto bodů jsou určeny ve výškovém systému Balt po vyrovnání z důvodu nařízení vlády č. 116/1995 Sb.

Výškové bodové pole na území České republiky se dělí (podle vyhlášky) na:

- 1) základní výškové bodové pole, které tvoří:
 - a) základní nivelační body,
 - b) body České státní nivelační sítě I. řádu,
 - c) body České státní nivelační sítě II. řádu,
 - d) body České státní nivelační sítě III. řádu.
- 2) podrobné výškové bodové pole, které tvoří:
 - a) body České státní nivelační sítě IV. řádu,
 - b) plošné nivelační sítě,
 - c) stabilizované body technických nivelací.

Pro Českou státní nivelační sít' se používá závazná zkratka ČSNS. (4) (5)

2.2.1. Základní výškové bodové pole

Základní výškové bodové pole obsahuje základní nivelační body a body České státní nivelační sítě I. - III. řádu.

Základní nivelační body

V současnosti je po území České republiky rozmístěno celkem 12 základních nivelačních bodů. Umístění každého tohoto bodu bylo voleno na základě geologických průzkumů v místech se stabilním podložím. Body nejsou přístupné pro běžné měření, neboť jsou chráněny žulovým

pomníkem. Výchozím bodem je I. ZNB Lišov. Výšky všech ZNB jsou ověřovány pomocí velmi přesné nivelace (VPN).

I. ZNB Lišov

Rok vzniku: 1877

Výška v Bpv: 564,760 m



Obrázek 2.2: I. ZNB Lišov (5)

Česká státní nivelační síť I. řádu

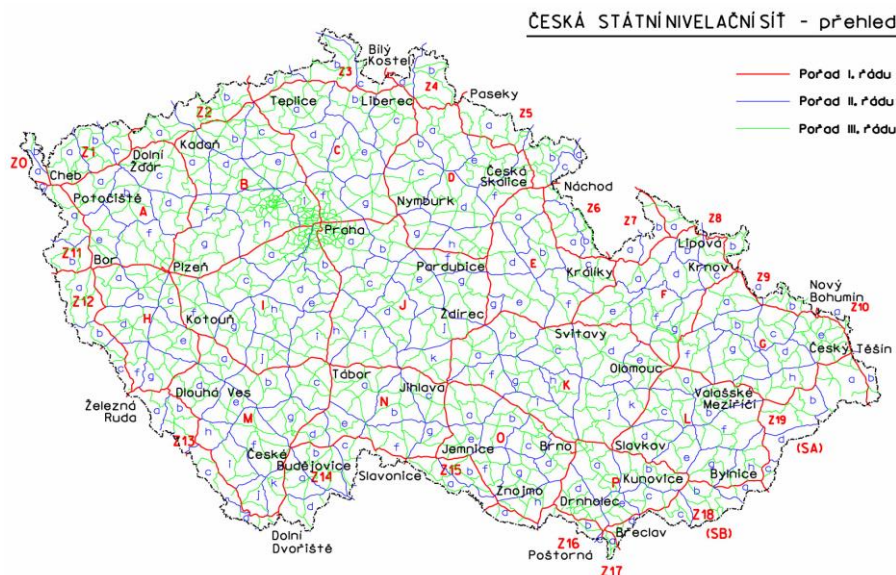
Česká státní nivelační síť prvního řádu obsahuje nivelační pořady, které dohromady tvoří nivelační polygony o průměrné délce obvodu přibližně 320 km. Tyto nivelační polygony vytvářejí nivelační oblasti I. řádu. Nivelační oblasti I. řádu jsou označovány od západu na východ a následně od severu k jihu ve vrstvách velkými písmeny. Nivelační pořady se jakožto hranice dvou oblastí označují dvojicemi velkých písmen a názvy míst počátku a konce nivelační značky. Tyto pořady jsou uzavřené s výjimkou pohraničních oblastí. Tyto pohraniční oblasti se označují písmenem Z s pořadovým číslem od nuly. (6)

Česká státní nivelační síť II. řádu

Česká státní nivelační síť druhého řádu vznikla vložením pořadů II. řádu do jednotlivých oblastí polygonů I. řádu. Tyto polygony taktéž tvoří uzavřené polygony. Jejich průměrná délka je přibližně 100 km a ohraničují přitom určitou oblast. Tyto oblasti se značí dvěma písmeny, a to prvním velkým písmenem (podle oblasti I. řádu, ve kterém leží) a jedním malým písmenem. Nivelační pořady se pak značí jedním velkým písmenem oblasti I. řádu, dvěma malými písmeny hraničních oblastí II. řádu a názvem míst počátku a konce pořadu. (6)

Česká státní nivelační síť III. řádu

Česká státní nivelační síť třetího řádu vznikla zhuštěním I. a II. řádu. Nivelační pořady se značí jedním velkým písmenem oblasti I. řádu, malým písmenem oblasti II. řádu, pořadovým číslem a názvem míst počátku a konce pořadu. (6)



Obrázek 2.3: Přehled rozdělení ČSNS (4)

2.2.2. Podrobné výškové bodové pole (PVBP)

Podrobné výškové bodové pole sestává z nivelačních sítí IV. řádu, plošných nivelačních sítí (PNS) a stabilizovaných bodů technické nivelace.

Body nivelační sítě IV. řádu

Body nivelační sítě IV. řádu tvoří nivelační pořady IV. řádu, které se označují velkým písmenem oblasti I. řádu, malým písmenem oblasti II. řádu, následně 0 s pořadovým číslem a názvem místa počátku a konce nivelačního pořadu.

Body plošné nivelační sítě (PNS)

Body plošné nivelační sítě (PNS) se vytvářejí pro potřeby v intravilánu a označují se pořadovým číslem a názvem příslušné obce.

Stabilizované body technických nivelací

Stabilizované body technických nivelací jsou body polohopisného bodového pole, jejichž výška byla určena metodou technické nivelace (TN). (6)

3. METODY MĚŘENÍ VÝŠEK

Měření výšek je klíčovou disciplínou v geodézii, stavebnictví, kartografii, a i v dalších oblastech, kde je důležité získávat přesné informace o nadmořských výškách bodů. Existuje široká škála metod, které se liší v přesnosti, způsobu provedení a použití, a také podle náročnosti. Ty nejjednodušší principy měření výšek jsou známy již po několik tisíc let a pouze s různými úpravami v technologii se používají dodnes.

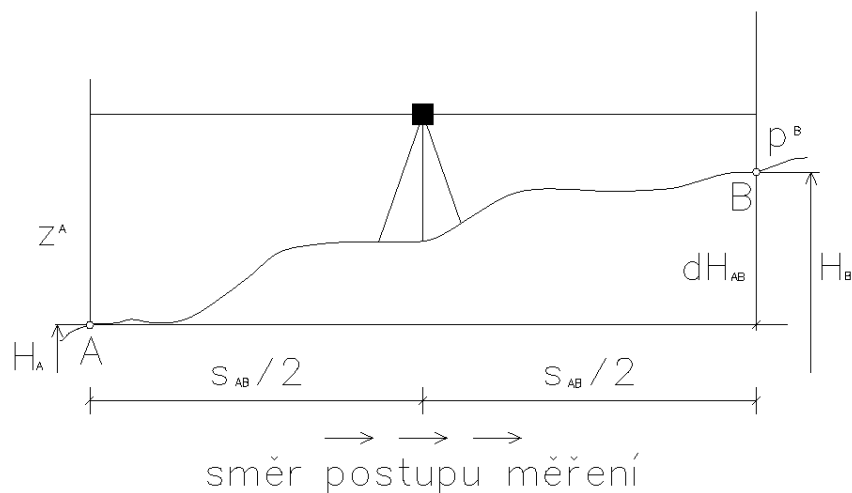
Mezi nepoužívanější metody pro měření výšek se v současnosti řadí především:

- geometrická nivelace,
- trigonometrické určování výšek,
- určení pomocí GNSS,
- hydrostatická nivelace.

3.1. Geometrická nivelace

Geometrická nivelace je jedna z nejvíce používaných metod určování převýšení, protože je přesná a zároveň jednoduchá. Je založena na principu měření pomocí vodorovné záměry na dva body (A a B) a následné určení výškového rozdílu mezi nimi. Měření se provádí pomocí nivelačního přístroje, přičemž záměry od přístroje k bodům A a B musí být stejně dlouhé, to proto, aby se omezil vliv z nevodorovnosti záměrné osy nivelačního přístroje (viz Obrázek 3.1). Na body A a B se postaví nivelační latě, na kterých je umístěna stupnice (buď číselná nebo kódová), a následně se z nich odečte čtení vzad (z) na lať A a čtení vpřed (p) na lať B. Při odečtení čtení vpřed od čtení vzad získáme výškový rozdíl h_{AB} mezi body A a B.

$$h_{AB} = H_B - H_A = z - p, \quad (3.1)$$

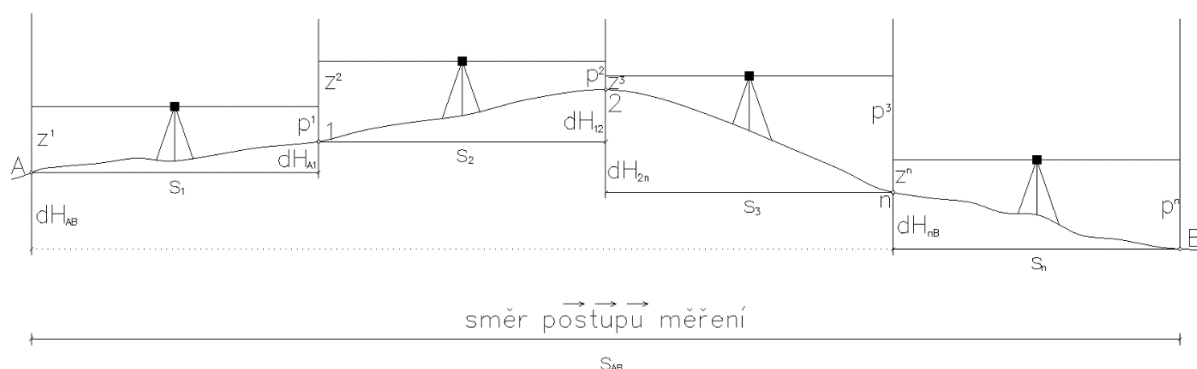


Obrázek 3.1: Nivelační sestava

Jestliže je převýšení kladné, bod B leží výš než bod A a naopak.

Takové rozložení latí a nivelačního přístroje, jaké je znázorněno na obrázku 3.1 (Obrázek 3.1), se nazývá nivelační sestava. Jsou-li body A, B blízko sebe, lze využít jen jedné nivelační sestavy. Pokud je ale vzdálenost mezi nimi příliš velká nebo je potřeba zaměřit vícero bodů, je nutné nivelační sestavy po sobě několikrát zopakovat. Toto uskupení měření se nazývá nivelační tah a výpočetně se nejedná o nic jiného, než o rozdíl sumací čtení vzad a vpřed.

$$\begin{aligned}
 h_{AB} &= (z_1 - p_1) + (z_2 - p_2) + \dots + (z_n - p_n) \\
 &= \sum_{i=1}^n z_i - \sum_{i=1}^n p_i,
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$



Obrázek 3.2: Nivelační tah

Nivelační sestava je tedy základní prvek veškerých dalších nivelačních útvarů. Nivelačním oddílem se nazývá soubor na sebe navazujících nivelačních sestav mezi dvěma body. Několik oddílů měřených za sebou se nazývá nivelační pořad. Nivelační pořad může být na základě

např. podobného spádu části nivelačního pořadu rozdělen na nivelační úseky. Měření nivelačního pořadu může být přerušeno pouze na nivelačním bodě.

Při různých nivelačních měřeních jsou kladeny i různé nároky na přesnost. Podle přesnosti se geometrická nivelace ze středu dělí na:

- technickou nivelaci (TN),
- přesnou nivelaci (PN),
- velmi přesnou nivelaci (VPN),
- zvlášť přesnou nivelaci (ZPN).

(1) (3)

3.1.1. Technická nivelace

Nejčastěji využívanou technikou pro měření převýšení v praxi je právě technická nivelace. U přístrojů využívaných při měření technických nivelací jsou kladeny požadavky na technické parametry přesnosti. Střední chyba na kilometrové obousměrné nivelaci nesmí být větší než 5 mm. Zvětšení dalekohledu musí být aspoň šestnáctinásobné. Dále nivelační libela musí mít citlivost 60'' (na 2 mm dílek stupnice), nebo kompenzátor odpovídající přesnosti.

U technické nivelace se rozlišují 2 stupně přesnosti:

Technická nivelace základní přesnosti

Technická nivelace základní přesnosti je dána kritériem pro mezní odchylku mezi daným a měřeným převýšením:

$$\Delta h_{MAX} = 40 * \sqrt{R}, \quad (3.3)$$

kde R je délka nivelačního pořadu v kilometrech. Zbylá odchylka U_h se rozdělí mezi záměry vzad. Pro TN základní přesnosti platí, že délka záměr může být maximálně 120 m, a tyto záměry mohou být odkrokovány. Dále se mohou používat zasouvací latě bez krabicové libely.

Technická nivelace zvýšené přesnosti

Pro tento způsob měření je opět dána mezní odchylka mezi daným a měřeným převýšením:

$$\Delta h_{MAX} = 20 * \sqrt{R}, \quad (3.4)$$

kde R je délka nivelačního pořadu v km. Nivelační pořad se měří tam i zpět (pro posouzení odchylky se použije arytmičkový průměr). Délky záměr mohou být maximálně 80 m. Latě se používají celistvé s krabicovou libelou. (1)

3.1.2. Přesná nivelace

Přesná nivelace se používá při měření nadmořských výšek především v nivelačních pořadech III. a IV. řádu a v plošných nivelačních sítích, ale také při speciálních měřeních, které spadají do oblasti inženýrské geodézie a je u nich požadována vyšší přesnost (např. zdvih, pokles nebo deformace stavebních objektů).

Přístroje pro měření přesné nivelace musí splňovat určitá kritéria. Mezi tyto kritéria patří zvětšení dalekohledu, které má být minimálně dvaceti čtyřnásobné, dále pak citlivost nivelační libely musí být alespoň $20,6''$, nebo musí mít kompenzátor odpovídající přesnosti. Od nivelačních přístrojů pro PN se požaduje, aby měly konstantní délku dalekohledu. Maximální kilometrová chyba při měření obousměrné nivelace musí být maximálně 1,5 mm. Pro čtení z nivelační latě je potřeba, aby střední chyba optického mikrometru byla menší než 0,1 mm. Na rozdíl od TN se nivelační přístroj u PN musí stavět na stativ s pevnými nohami. Při měření musí být délka záměr maximálně 50 m. Délka záměr se rozměruje pásmem s přesností na 10 cm. Záměra musí procházet alespoň 0,5 m nad terénem.

Nivelační latě musí být celistvé, opatřené krabicovou libelou, s dvěma invarovými stupnicemi vzájemně posunuté o konstantu (60650 nebo 59250). Tyto stupnice jsou číslovány po 10 nebo 5 mm. Pro měření je také důležité znát průměrnou odchylku laťového metru zjištěnou komparací. Při měření je také důležité použití těžkých nivelačních podložek pro zajištění přesnosti, a také pár opěrných tyčí pro zajištění stability.

Při měření se nejdříve rozměří pásmem délky sestav a vyznačí se stanoviště přestavových bodů latí a přístroje. V sestavě se vždy prvně přečte čtení vzad z levé stupnice (z_I), poté čtení vpřed z levé stupnice (p_I), následně čtení vpřed z pravé stupnice (p_{II}) a nakonec čtení vzad z pravé stupnice (z_{II}). Je důležité kontrolovat rozdíly levé a pravé stupnice obou latí, aby se nelišily od dané konstanty o více než 2 jednotky. Tento lehce zdlouhavější postup slouží k odhalení systematických chyb. Každý pořad se niveluje dvakrát (tam a zpět). Při měření se oddíly rozdělují na sudý počet sestav tak, aby oddíly vždy začínaly a končily stejnou latí. Při měření zpět se latě vymění. (3) (6) (7)

3.1.3. Velmi přesná a zvlášť přesná nivelace

Tyto metody se nejčastěji používají při měření v základním výškovém bodovém poli (především v I. a II. řádu), nebo při speciálních měřeních s požadavkem na zvýšenou přesnost. Od TN a PN se liší hlavně přísnějšími pravidly pro měření, aby se co nejvíce minimalizovaly

systematické chyby při měření na delší vzdálenosti. Taktéž je při těchto měření nutné zavádět korekce z atmosférických a tížnicových jevů.

U velmi přesné nivelace se měření tam a zpět provádí v stejný den, ale v jinou denní dobu. Maximální délka záměry je 40 m a minimální výška záměry nad terénem 50–80 cm.

Při zvlášť přesné nivelaci probíhá měření tam v jiný den a v jinou denní dobu, než měření zpět. Největší přípustná délka záměry je v tomto případě 35 m a výška záměry nad terénem minimálně 80 cm. Zavádí se i další pravidla pro měření, jako například změna postupnosti měření nivelačních úseků, nebo jiný způsob čtení nivelačních latí, pro dosažení co možná nejvyšší přesnosti. (1)

3.2. Trigonometrické určování výšek

Metoda trigonometrického určení převýšení je jedna z nejpoužívanějších metod měření výšek bodů při běžných geodetických pracích. Využívá se napříč veškerými geodetickými měřeními, jako je například mapování polohopisu nebo při úlohách z vyšší geodézie. Při této metodě se výškový rozdíl dvou bodů vypočítá na základě řešení pravoúhlého trojúhelníku. Pro výpočet je potřeba znát vzdálenost mezi oběma body (buď šikmou nebo vodorovnou) a zenitový úhel měřený na jednom z obou bodů. Při měření na delší vzdálenost, než je několik set metrů, se výsledná přesnost odvíjí od chyby měření zenitového úhlu a od znalosti vertikální složky refrakce. Pro zmenšení chyby zenitového úhlu lze využít oboustranné měření.

Díky moderním zařízením schopným měřit délku téměř okamžitě se tak jedná o efektivní a rychlou metodu. Taktéž je oproti geometrické nivelaci umožněno měřit i velmi strmé převýšení, nebo měřit s dlouhými záměrami. Při těchto měřeních je ale zapotřebí započítat korekce z vlivu zakřivení země, refrakce, tížnicových odchylek a sbíhavosti normál.

Při dobrých podmínkách při měření, které je co nejpresnější, a zavedení všech korekcí je možné dosáhnout při této metodě přesnosti určeného převýšení 1 mm. Při běžném geodetickém měření ale stačí, aby střední chyba převýšení při správném měření nepřekročila 1 až 2 cm. (1)
(6)

3.3. Určení výšky pomocí GNSS

Určení výšky pomocí GNSS (Globálního navigačního satelitního systému) se stává stále běžnějším ve více oblastech využití díky jeho schopnosti poskytovat rychlá a poměrně přesná třírozměrná měření. Jedná se o činnost, při které se využívají signály přijímané ze satelitů k určení trojrozměrné pozice objektu na Zemi. GNSS zahrnuje systémy jako GPS (USA), GLONASS (Rusko), Galileo (Evropa) nebo BeiDou (Čína).

GNSS přijímač získává signály z několika satelitů, obvykle aspoň čtyři, aby mohl určit přesnou polohu. Přijímač používá data o čase a vzdálenosti od jednotlivých satelitů k výpočtu své polohy pomocí metody zvané trilaterace. Tento proces zahrnuje odhadování vzdáleností od každého satelitu k přijímači na základě času, který trvalo signálu, aby dosáhl přijímače. Výsledkem měření jsou vypočtené prostorové pravoúhlé souřadnice X , Y , Z v geocentrickém systému. Tyto souřadnice lze přetransformovat na geodetické souřadnice B , L , H_e . Elipsoidická výška H_e se váže k elipsoidu, zatímco výšky systému B_{pv} jsou určeny normálními Maloděnského výškami a jsou vztaženy ke kvazigeoidu. Získané elipsoidické výšky H_e je potřeba převést na normální výšky, které jsou vztaženy ke kvazigeoidu. Pro tento převod je nutné znát co nejpřesněji převýšení mezi kvazigeoidem a elipsoidem, které se v závislosti na poloze mění.

Přesnost výšek určených pomocí GNSS je nižší než přesnost určení polohy v rovinném souřadnicovém systému touto metodou. Přesnost výšky je ovlivněna mnoha faktory. Mezi tyto faktory řadíme například nevhodné rozmístění satelitů vzhledem k přijímači (přijímač přijímá signály pouze od satelitů nad horizontem), ionosférické a troposférické zpoždění signálů (chyba až 15 mm), deformace zemského povrchu, nebo již zmíněná špatná znalost výšky kvazigeoidu. Určování výšky může být problematické v oblastech s omezeným výhledem na oblohu (městské zástavby nebo lesy), protože může docházet k zastínění nebo k odrazům signálů, což vede ke zvýšení chyb. Při kvalitním měření a omezení všech možných chyb lze touto metodou dosáhnout přesnosti kolem 0,03 až 0,04 m. (1)

3.4. Hydrostatická nivelace

Hydrostatický způsob určování převýšení spočívá ve fyzikálních vlastnostech kapalin, jejichž hladina zaujímá ve spojitých nádobách stejnou hladinovou plochu. Převýšení se určuje pomocí tzv. hydrostatické soupravy (taktéž nazývána hadicová vodováha). Tuto soupravu tvoří dvě válcové nádoby spojené hadicí. Tyto nádoby se zavěsí na nivelační značku pomocí krabicových libel se vyrovnají do svislých pozic. Následně se obě nádoby do poloviny naplní kapalinou a pomocí kohoutku se uzavřou. Kapalinou se naplní i hadice, ta se poté připojí k nádobám. Po otevření kohoutků se voda spojí a vytvoří hladinovou plochu. Rozdíl mezi odečty na stupnicích umístěných na nádobách je pak výsledné převýšení. Stupnici lze odečítat s relativní přesností na 0,01 mm, avšak po eliminaci systematických chyb se reálná přesnost převýšení pohybuje okolo 0,05–0,1 mm.

Tuto metodu lze použít jako kontrolní měření, nebo pro měření ve stísněných prostorech. Hydrostatická nivelace se také používá jako stacionární měřidlo na různých stavbách (např. jaderné elektrárny nebo přehrady). (1)

4. PŘÍPRAVNÉ PRÁCE

Tato kapitola se bude zabývat veškerými úkony, které proběhly před samotným měřením. Jedná se o rekognoskaci terénu a o popis přístrojů, které byly k měření použity, a kontrolu jejich přesnosti.

4.1. Rekognoskace terénu

Rekognoskace terénu proběhla dne 9. 6. 2022 v areálu Stavební fakulty za doprovodu vedoucího bakalářské práce. V průběhu této rekognoskace byl zkontrolován stav všech bodů plošné nivelační sítě, které byly určeny k zaměření. Body byly následně pro další zpracování rozděleny mezi studenty. Tato bakalářská práce se zabývá zpracováním 9 z 23 zaměřovaných bodů, které se nachází mimo areál na ulici Veveří (tj. okolní ulice a areál na ulici Žižkova).

4.2. Použité přístroje a pomůcky

Pro měření byly použity tyto přístroje a pomůcky zapůjčené na Ústavu geodézie Stavební fakulty:

- nivelační přístroj Leica DNA03,
- pár invarových nivelačních latí Leica GPLC3,
- dřevěný stativ s pevnými nohami,
- dvě těžké nivelační podložky pod latě,
- čtyři dřevěné opěrné tyče pro stabilnější držení latí,
- měřické pásmo,
- teodolit Zeiss Theo 015B pro rektifikaci libely a ověření kolmosti osy latí a nulové plochy latí (patky).

4.2.1. Nivelační přístroj Leica DNA03

Nivelační přístroj Leica DNA03 je vysoce přesný digitální nivelační přístroj vyráběný společností Leica Geosystems. Je primárně určen pro měření přesných a velmi přesných nivelací. Přenosnost tohoto přístroje se udává 0,3 mm/km, což znamená, že při měření převýšení na vzdálenost jednoho kilometru může přístroj poskytnout údaje s přesností až na desetiny milimetru. Při měření délek záměr měří tento přístroj s přesností 5 mm/m. Přesnost je však ovlivněna různými faktory, včetně kalibrace přístroje, podmínek při měření nebo zkušeností obsluhy. Kromě modelu DNA03 se vyrábí ještě model DNA10, který však není tolik přesný a je určen pro technickou nivelaci. (8)

Technical data				
Height measurements				
Standard deviation per km double run (ISO 17123-2):				
Electronic measurement	DNA03	DNA10		
with invar staff	0.3mm	0.9mm		
with standard staff	1.0mm	1.5mm		
Optical measurement	2.0mm	2.0mm		
Distance measurement				
Standard deviation	5mm/10m			
Distance measuring range for electronic measurements				
Staff lengths ≥ 3m	1.8m - 110m			
Recommendation for 3m invar staffs	1.8m - 60m			
Staff lengths = 2.7m	1.8m - 100m			
Staff lengths = 1.82m/ 2m	1.8m - 60m			
Measuring time single measure	typically 3 sec.			
Telescope				
Magnification	24x			
Free objective diameter	36mm			
			Opening angle	2°
			Field of view	3.5m at 100m
			Min. target distance	0.6m
			Multiplication constant	100
			Addition constant	0
Level sensitivity				
			Circular level	8'/2mm
Compensator				
Magnet damped pendulum compensator with electronic range control.				
			Slope angle	± 10'
			Centering accuracy	DNA03 DNA10
			Standard deviation	0.3" 0.8"
Display				
			LC display	8 lines of 24 characters, 144 x 64 pixels
			Lighting	economic/ permanent/ circular level only

Obrázek 4.1: Technické parametry nivelačního přístroje Leica DNA03 (8)

4.2.2. Nivelační latě

Pro měření byl využit pár latí s kódovým čtením vyráběných taktéž firmou Leica Geosystems. Jedná se o latě Leica GPCL3 s výrobními čísly 26353 a 26346. Z manuálu od výrobce lze vyčíst, že latě mají délku 3,05 m a každá váží 4,9 kg. Latě mají krabicové libely s citlivostí 12'/2 mm. K těmto latím byl obstarán i kalibrační list vytvořený a poskytnutý VÚGTK, díky němuž mohly být následovně měřené údaje opraveny o odchylky z laťového metru a teplotní roztažnosti invarového pásu. (9)

4.3. Kontrola přístrojů a pomůcek před měřením

Před měřením je důležité zkontrolovat nivelační přístroj i latě, abychom zajistili jejich přesnost. Malé nepřesnosti v kalibraci nebo nastavení mohou vést k chybám měření. Kontrola taktéž pomáhá identifikovat možné problémy nebo poškození přístroje, popř. latí.

4.3.1. Kontrola přístroje

Před měřením byla provedena kontrola nivelačního přístroje. Tato kontrola se provádí tak, že se na dvě nivelační podložky vzdálené přibližně 20–40 m od sebe postaví nivelační latě. Uprostřed této vzdálenosti se postaví přístroj a přečte se čtení vzad a vpřed, stejně jako tomu je při měření. Po výpočtu výškového rozdílu $\Delta H_{AB} = z^I - p^I$ však není zřejmé, zda je nivelační přístroj zatížen chybou z nevodorovnosti záměrné přímky. Následně se přístroj přesune 3 metry za jednu z latí a měření se opakuje. Po výpočtu rozdílu čtení získáme $\Delta H'_{AB} = z^{II} - p^{II}$.

Nakonec se vypočte rozdíl mezi převýšeními a úhel φ , který svírají osy nivelační libely a záměrné přímky přístroje. (6)

$$\Delta = \Delta H_{AB} - \Delta H'_{AB} \quad (4.1)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{\Delta}{s_{AB}} \quad (4.2)$$

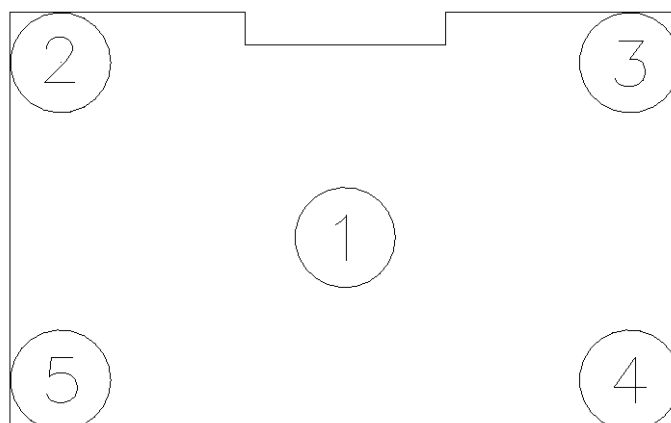
4.3.2. Kontrola latí

Před měřením je nutné provést rektifikaci libely nivelační latě. Tato rektifikace byla provedena u obou latí. Lať byla postavena kolmo na nivelační podložku na pevném povrchu. Ve vzdálenosti 14 metrů od této latě byl postaven teodolit Theo 015B. Pomocí tohoto teodolitu bylo cíleno na spodní a vrchní roh latě, a tím byly zjištěny odchylky uvedené v tabulce 4.1 (Tabulka 4.1). Tento způsob měření se nazývá optické provažování. Na základě těchto hodnot byly následně libely na jednotlivých latích zrektifikovány.

Tabulka 4.1: Naměřené odchylky svisle postavených latí

Lať č.	Náklon z pohledu měřiče	
26346	15 mm vpravo	5 mm vzad
26353	5 mm vlevo	5 mm vpřed

Dále je nutné zkontrolovat kolmost plochy patky k ose latě. Tato kontrola byla provedena podle předepsaného postupu. Nivelační lať byla postupně šestkrát položena na různé části patky na stabilizovanou nivelační značku. Místa položení na patce jsou zobrazena na obrázku 4.2 (Obrázek 4.2). Naměřené hodnoty jsou zapsané v tabulce 4.2 (Tabulka 4.2). Jestliže by rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou přesáhl 0,20 mm, bylo by nutné patku obrousit, nebo lať úplně vyřadit.



Obrázek 4.2: Schéma postavení patky na nivelační podložku při testování její kolmosti

Tabulka 4.2: Čtení na latích při kontrole kolmosti patky

	Lat' 26346 [m]	Lat' 26353 [m]
1	1,28210	1,28207
2	1,28201	1,28204
3	1,28213	1,28217
4	1,28211	1,28214
5	1,28203	1,28201
1	1,28209	1,28211
Maximální rozdíly	0,12 mm	0,16 mm

U latí se vyskytují i další chyby, jako je nerovnost latě, nesprávná délka latě a nenulová hodnota patky. Nerovnost latě je nejčastěji způsobená špatným zacházením nebo špatným skladováním. Nejjednodušším způsobem, jak tuto chybu odhalit, je napnout niť podél latě a sledovat odchýlení nitě od latě. Nesprávná délka latě je zjištěná při kalibraci a naměřené hodnoty se při zpracovávání o tuto chybu opravují. Nenulová hodnota patky se vylučuje v průběhu měření. (10)

5. MĚŘICKÉ PRÁCE

Měřické práce v rámci této bakalářské práce probíhaly v areálu Stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně. První část měření probíhalo 16. a 17. června 2022, druhá část pak 7. října téhož roku.

Jak je uvedeno v Metodickém návodu pro práci v ZVBP, nivelační tahy musí být oboustranně připojené na body tahů stejného nebo vyššího řádu. Pro připojení měření této bakalářské práce byl využit bod ČSNS II. řádu Kij-7.2f. Kromě ověření totožnosti pomocí místopisu poskytnutého ČÚZK, je nutné ověřit výškovou stabilitu použitých bodů. K tomuto kontrolnímu měření byly využity body Kij-7.2c a Kij-7.2d. Výšky těchto bodů byly určeny v roce 2008 v rámci prvního odbočného tahu z bodu Kij-7.2, který se nachází na budově Finančního úřadu na Štefánikové ulici. (3)

5.1. Metodika měření

Pro měření byla použita metoda přesné geometrické nivelace ze středu. Na základě povolení vedoucího bakalářské práce byla u dvou ze tří tahů použita pouze jedna lať (č. 26353).

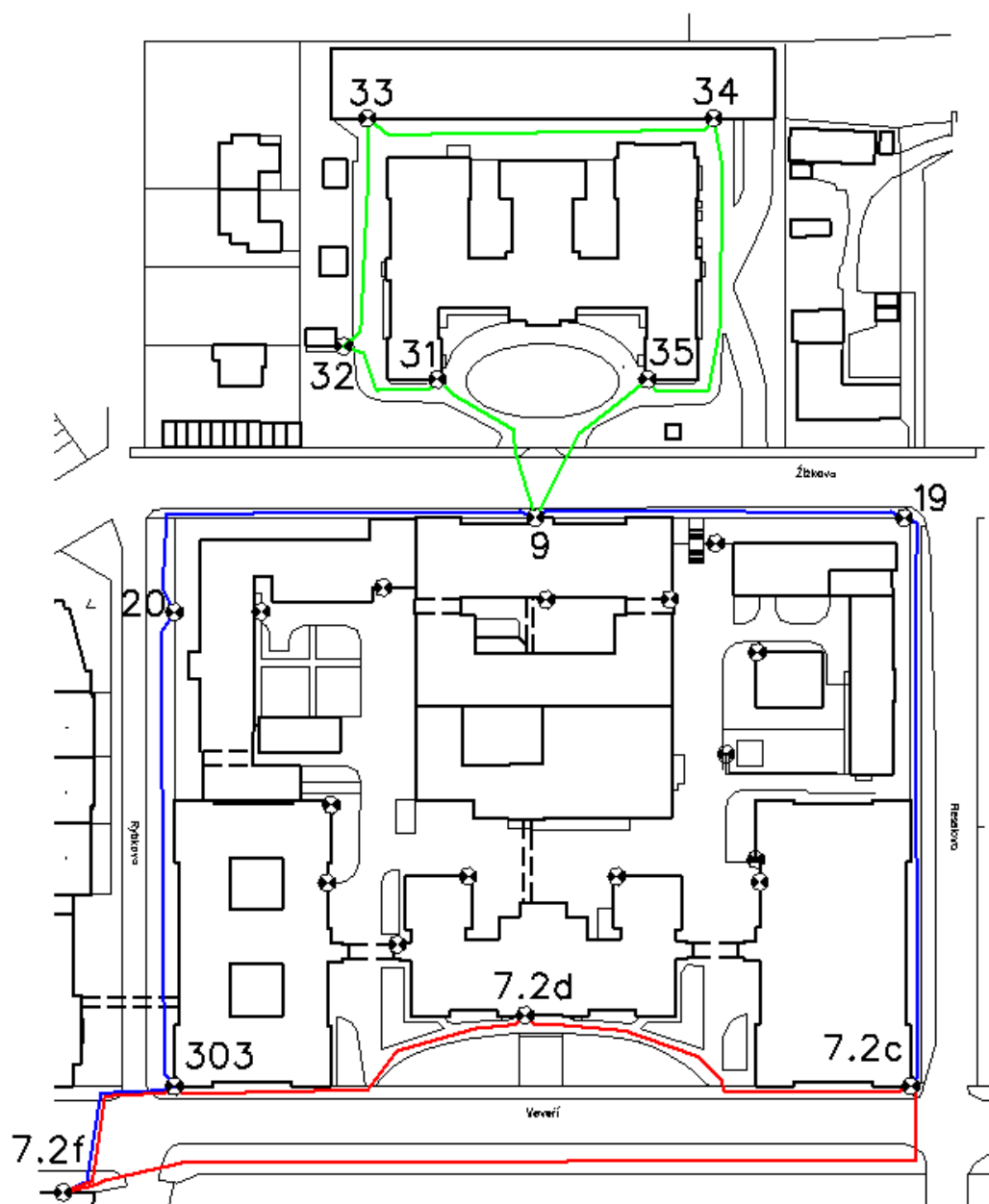
Při přesné nivelaci je podmínkou, aby záměra vedla alespoň 0,5 m nad povrchem země. Důvodem je omezení vlivu refrakce na čtení, protože blíže k zemi je největší. Digitální přístroj však neměří pouze v jedné záměrné přímce, jako je tomu u lidského oka, ale snímá ve 2° úhlu část kódu na lati a podle toho výsledné čtení. Když je však záměra příliš dlouhá a přístroj tím pádem přečte menší část lati, refrakce může ovlivnit dolní část čtení a tím i výslednou naměřenou hodnotu. Proto byla vedoucím práce stanovena maximální délka záměry 20 m i přes to, že je povolené měřit až na vzdálenost 50 m.

Všechny tahy byly měřené tam i zpět. V Metodickém návodu pro práci v ZVBP se uvádí, že se měření tam může provádět ve stejný den jako měření tam, ale mělo by být vykonáno v jinou denní dobu. Toto opatření se uvádí z důvodu omezení vlivu vlnění zemské kúry a vlivu refrakce při dlouhých nivelačních tazích. Při konzultaci s vedoucím práce se však dospělo k závěru, že pro nivelační práce v rozsahu této bakalářské práce je vliv tohoto opatření minimální. (3)

5.2. Rozložení nivelačních tahů

Pro zaměření bodů okolo hlavního areálu na ulici Veveří byl využit volný nivelační tah z bodu Kij-7.2f na bod Kij-7.2c. Původně mělo jít o pořad vetknutý, protože výška bod Kij-7.2c je známá, nicméně na pokyn vedoucího bakalářské práce je výška tohoto bodu

považována za neznámou a slouží pro ověření homogenity výškových bodů. Jelikož jsou však všechny pořady měřeny oboustranně, jsou de facto uzavřené. Další tah vedl z bodu 9 přes areál na ulici Žižkova. Později bylo měření doplněné o třetí tah z bodu Kij-7.2f propojující body Kij-7.2c a Kij-7.2d. Tento pořad slouží zvláště k propojení s bodem Kij-7.2c, ale také k ověření výšky bodu Kij-7.2d. Ve výpočtech jsou všechna měření vztažena k bodu Kij-7.2f. Schéma průběhu nivelačních tahů je zobrazeno na obrázku 5.1 (Obrázek 5.1).



Obrázek 5.1: Schéma nivelačních tahů

6. POSOUZENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ

Postup pro posouzení přesnosti měření je stanoven v Návodu pro správu ZVBP. K posouzení se využívají 4 hlavní kritéria, která jsou dále popsána v následujících bodech. Na základě pokynu vedoucího práce bylo měření posuzováno podle požadavků pro nivelační tahy III. řádu. (3) (11)

6.1. Posouzení rozdílů mezi měřením tam a zpět

Rozdíly mezi převýšením v oddílu při měření tam a zpět jsou posuzovány podle maximální odchylky pro tento rozdíl. Tato maximální hodnota se pro tahy III. řádu určí podle následujícího vztahu:

$$\Delta_{MAX} = 3,00 * \sqrt{R}, \quad (6.1)$$

kde R je délka oddílu v kilometrech a 3,00 je konstanta využívaná ve výpočtech pro III. řád, která je proměnná v závislosti na řádu měření. Výsledné mezní hodnoty jsou v milimetrech a pro všechny oddíly v měření byly splněny (viz Tabulka 6.1).

Tabulka 6.1: Posouzení odchylek mezi měřením tam a zpět

Měřená převýšení	Tam [m]	Zpět [m]	R [km]	Rozdíl [mm]	Mezní odchylka [m]	Vyhodnocení
$h_{Kij-7.2F, 303}$	0,42138	-0,42107	0,049499	0,31	0,67	Splňuje
$h_{303, 20}$	5,53616	-5,53583	0,122498	0,33	1,05	Splňuje
$h_{20, 9}$	2,32736	-2,32727	0,110266	0,09	1,00	Splňuje
$h_{9, 19}$	0,47979	-0,48020	0,090881	0,41	0,90	Splňuje
$h_{19, Kij-7.2C}$	-8,25779	8,25842	0,145279	0,63	1,14	Splňuje
$h_{9, 31}$	2,81197	-2,81186	0,053913	0,11	0,70	Splňuje
$h_{31, 32}$	1,53580	-1,53589	0,029098	0,09	0,51	Splňuje
$h_{32, 33}$	2,82503	-2,82499	0,057420	0,04	0,72	Splňuje
$h_{33, 34}$	-0,04677	0,04704	0,088655	0,27	0,89	Splňuje
$h_{34, 35}$	-4,29386	4,29413	0,086160	0,27	0,88	Splňuje

$h_{35, 9}$	-2,83184	2,83186	0,049229	0,02	0,67	Splňuje
$h_{Kij-7.2F, 303}$	0,42135	-0,42155	0,062837	0,20	0,75	Splňuje
$h_{303, Kij-7.2D}$	1,29557	-1,29542	0,102201	0,15	0,96	Splňuje
$h_{Kij-7.2D, Kij-7.2C}$	-1,21084	1,21101	0,101782	0,17	0,96	Splňuje
$h_{Kij-7.2C, Kij-7.2F}$	-0,50612	0,50620	0,240672	0,08	1,47	Splňuje

6.2. Posouzení uzávěrů jednotlivých uzavřených tahů

Podobně jako posuzování rozdílů mezi měřeními tam a zpět u jednotlivých oddílů, určuje se i mezní odchylka pro rozdíly u obousměrného měření uzavřených tahů.

$$\Delta_{MAX} = 3,00 * \sqrt{F}, \quad (6.2)$$

kde F je opět délka v kilometrech, ale v tomto případě délka celého uzavřeného tahu.

V tabulce 6.2 (Tabulka 6.2) jsou uvedené uzávěry všech třech měřených tahů a jejich posouzení. V tabulce 6.3 (Tabulka 6.3) je uvedeno posouzení odchylky zkompletovaného měřeného tahu z bodu Kij-7.2f, který prochází přes všechny zjišťované body.

Tabulka 6.2: Posouzení uzávěrů nivelačních tahů

Tah z bodu	F [km]	Uzávěr [mm]	U_{MAX} [mm]	Vyhodnocení
Kij-7.2f_1	0,75910	0,26	2,61	Splňuje
9	0,36448	0,02	1,81	Splňuje
Kij-7.2f_2	0,50749	0,14	2,14	Splňuje

Tabulka 6.3: Posouzení uzávěru kompletního tahu

Tah z bodu	F [km]	Uzávěr [mm]	U_{MAX} [mm]	Vyhodnocení
Kij-7.2f	1,12357	0,28	3,18	Splňuje

6.3. Základní střední kilometrová chyba

Přesnost nadmořských výšek nivelačních bodů je určena podle základní střední kilometrové chyby nivelačního převýšení (obousměrné nivelace):

$$\bar{m}_0 = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{1}{n_R} * \sum_{i=1}^n \frac{\rho^2}{R}}, \quad (6.3)$$

kde n_R je počet oddílů a ρ jsou jejich rozdíly určených z obousměrného měření.

Její mezní hodnota (v mm) se pro III. řád vypočítá pomocí vztahu:

$$0,60 + \frac{1,06}{\sqrt{n_R}} \quad (6.4)$$

Výsledné hodnoty m_0 a m_{0MAX} jsou zobrazené v tabulce 6.4 (Tabulka 6.4).

6.4. Střední chyba obousměrné nivelace pro celý nivelační pořad

Hodnotu střední chyby obousměrné nivelace pro celý tah vypočítáme podle vzorce uvedeného níže, kde L je délka celého tahu v kilometrech. Její hodnota pro měření je taktéž uvedená v tabulce 6.4 (Tabulka 6.4).

$$m_L = \bar{m}_0 * \sqrt{L} \quad (6.5)$$

Tabulka 6.4: Základní střední kilometrová chyba a střední chyba obousměrné nivelace pro celý nivelační pořad

Základní střední kilometrová chyba
$\bar{m}_0 = 0,42 \text{ mm}$
Mezní hodnota základní střední kilometrové chyby
$\bar{m}_{0MEZ} = 0,87 \text{ mm}$
Střední chyba obousměrné nivelace pro celý nivelační pořad
$m_L = 0,50 \text{ mm}$

7. ZPRACOVÁNÍ DAT

7.1. Export dat z nivelačního přístroje

Pro lepší přehlednost při měření a následujícím exportu dat byly nivelační body číslovány od tisícovky (tzn. 1009–1035).

Při exportu dat z nivelačního přístroje Leica DNA03 je možné využít formátu GEO seriál interface (GSI), který je běžně využíván v přístrojích od společnosti Leica. Export je možné provést ve dvou variantách (GSI8 nebo GSI16), které se od sebe příliš neliší. V obou případech jsou data ukládána znaky ASCII. Data jsou uspořádána tak, aby každý řádek odpovídal právě jednomu měření. Každý řádek je pak složen z několika sloupců. Počet znaků v jednotlivých sloupcích je to, co varianty GSI8 a GSI16 od sebe odlišuje. Pro nivelaci se nejdůležitější data nachází v prvních třech sloupcích. V prvním sloupci se nachází číslování jednotlivých měřických sestav a tím pádem i číslování jednotlivých nivelačních bodů. V druhém sloupci se ve třech řádcích pod sebou nachází postupně délka záměry vzad, délka záměry vpřed a rozdíl mezi těmito délkami. Ve sloupci třetím se dále pod sebou nachází čtení vzad, čtení vpřed a délka jedné celé sestavy (viz Obrázek 7.1).

```
110302+00007.2F 32...8+00547168 331.28+00126659 390...+00000003 391.28+00000000
110303+00000001 32...8+00552498 332.28+00136275 390...+00000003 391.28+00000002
110304+00000001 573..8-00005330 574..8+01099665 83..28+25006584

110302+000000000007.2F 32...8+000000000547168 331.28+000000000126659 390...+000000000000003 391.28+000000000000000
110303+0000000000000001 32...8+0000000000552498 332.28+000000000136275 390...+000000000000003 391.28+000000000000002
110304+0000000000000001 573..8-00000000005330 574..8+0000000001099665 83..28+0000000025006584
```

Obrázek 7.1: 1. nivelační sestava ve formátech GSI8 a GSI16

Data ze souboru ve formátu GSI8 byla zredukována, přepsána do programu Microsoft Excel a naměřené hodnoty byly převedeny na metry (viz Obrázek 7.2).

Bod	Čtení na lati		Délky záměr	
	Zpět [m]	Vpřed [m]	Zpět [m]	Vpřed [m]
7.2F	1,26659		5,47168	
1		1,36275		5,52498

Obrázek 7.2: Měřená data převedená do Microsoft Excel

7.2. Oprava o chybu laťového metru

Vyexportovaná měřená převýšení byla následně opravena o chybu z nesprávné délky laťového metru. Informace o nesprávné délce latí jsou uvedené v kalibračním listu z roku 2020 vystaveným VÚGTK. V kalibračním listu jsou pro jednotlivé latě uvedeny následující odchylky:

- délka průměrného laťového metru latě č. 26346: 1 m -20 μm ,
- délka průměrného laťového metru latě č. 26353: 1 m -11 μm ,
- délka průměrného laťového metru při střídavém použití obou latí: 1 m -16 μm .

Kalibrace probíhala v laboratorních podmínkách při teplotě $20,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. I přes to, že je stupnice z málo roztažného invaru, je potřeba při opravě počítat i s touto nenulovou roztažností. Výsledná správná délka laťového metru se spočítá podle následujícího vzorce:

$$L_t = 1\text{ m} + \alpha + \beta * (t - t_0), \quad (7.1)$$

kde α je konstantní odchylka od správné délky, β je lineární koeficient teplotní roztažnosti invaru, t je teplota při měření a t_0 je teplota při kalibraci.

Lineární koeficient teplotní roztažnosti invaru je $0,16\text{ K}^{-1}$ a teplota vzduchu se pohybovala při prvním měření v průměru kolem $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ při druhém měření. Přesné teploty použité pro stanovení laťového metru byly staženy z referenční stanice TUBO, která se nachází na střeše budovy B a poskytuje teplotní údaje z každé minuty dne. Při druhém měření však došlo k výpadku stanice TUBO, a tak byla data o teplotě stažena z meteorologické stanice na Kraví hoře. V tabulkách níže (Tabulka 7.1 a Tabulka 7.2) jsou uvedené časy měření jednotlivých oddílů, k nim odpovídající teploty, vypočtené laťové metry a opravená měřená převýšení.

Tabulka 7.1: Oprava měřených převýšení o laťový metr – 1. měření

17. 6. 2022				
Převýšení	Čas (přibližný)	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Laťový metr [m]	Opravené převýšení [m]
$h_{\text{Kij-7.2F}, 303}$	9:20-9:40	20,7	0,999985	0,42137
$h_{303, 20}$	9:40-10:00	20,7	0,999985	5,53608
$h_{20, 9}$	10:00-10:25	21,5	0,999986	2,32733
$h_{9, 19}$	10:25-10:45	21,5	0,999986	0,47978
$h_{19, \text{Kij-7.2C}}$	10:45-11:05	22,2	0,999987	-8,25769
$h_{\text{Kij-7.2C}, 19}$	11:05-11:30	22,2	0,999987	8,25832
$h_{19, 9}$	11:30-11:50	22,5	0,999988	-0,48019

$h_{9, 20}$	11:50-12:15	22,5	0,999988	-2,32724
$h_{20, 303}$	12:15-12:40	23,2	0,999989	-5,53577
$h_{303, Kij-7.2F}$	12:40-13:05	23,2	0,999989	-0,42107
$h_{9, 31}$	14:00-14:25	23,6	0,999995	2,81195
$h_{31, 32}$	14:25-14:35	23,6	0,999995	1,53579
$h_{32, 33}$	14:35-14:50	23,6	0,999995	2,82501
$h_{33, 34}$	14:50-15:05	23,6	0,999995	-0,04677
$h_{34, 35}$	15:05-15:20	23,6	0,999995	-4,29384
$h_{35, 9}$	15:20-15:35	23,6	0,999995	-2,83182
$h_{9, 35}$	15:35-15:55	23,6	0,999995	2,83184
$h_{35, 34}$	15:55-16:10	23,5	0,999994	4,29411
$h_{34, 33}$	16:10-16:25	23,5	0,999994	0,04704
$h_{33, 32}$	16:25-16:40	23,5	0,999994	-2,82497
$h_{32, 31}$	16:40-16:55	23,5	0,999994	-1,53588
$h_{31, 9}$	16:55-17:10	23,0	0,999994	-2,81184

Tabulka 7.2: Oprava měřených převýšení o laťový metr – 2. měření

7. 10. 2022				
Převýšení	Čas (přibližný)	Teplota [°C]	Laťový metr [m]	Opravené převýšení [m]
$h_{Kij-7.2F, 303}$	9:20-9:35	10,3	0,999973	0,42134
$h_{303, Kij-7.2D}$	9:35-9:55	10,3	0,999973	1,29554
$h_{Kij-7.2D, Kij-7.2C}$	9:55-10:20	12,5	0,999977	-1,21081
$h_{Kij-7.2C, Kij-7.2F}$	10:15-11:00	15,6	0,999982	-0,50611
$h_{Kij-7.2F, Kij-7.2C}$	11:00-11:40	15,6	0,999982	0,50619

$h_{Kij-7.2C, Kij-7.2D}$	11:40-12:00	16,7	0,999984	1,21099
$h_{Kij-7.2D, 303}$	12:00-12:20	16,7	0,999984	-1,29540
$h_{303, Kij-7.2F}$	12:20-12:45	16,7	0,999984	-0,42154

7.3. Vyrovnání měření

Ve vyrovnání se používá princip, který se zakládá na metodě nejmenších čtverců (MNC). Pro metodu nejmenších čtverců platí vztah:

$$\underline{v}^T * \underline{P} * \underline{v} = \sum \underline{P} * \underline{v}^2 = \min, \quad (7.2)$$

kde $\underline{v}$ je vektor oprav a $\underline{P}$ je matice vah.

Aby mohlo dojít k vyrovnání, musí být počet měřených veličin (n) větší, než je počet neznámých veličin (k), tzn. $n > k$.

Ve vyrovnávacím počtu existují tři základní způsoby vyrovnání:

- vyrovnání přímých měření,
- vyrovnání zprostředkujících měření,
- vyrovnání podmínkových měření.

Vyrovnání zprostředkujících měření bylo vybráno z toho důvodu, že změřené převýšení pomocí přesné nivelace zprostředkovává určení neznámých výšek nivelačních značek. Převýšení v jednotlivých obousměrně měřených oddílech byla před vyrovnáním zprůměrována. Pro jednodušší výpočet byla použita maticová podoba vyrovnání za využití programů Microsoft Excel a Scilab. Skript použitý v programu Scilab je uvedený na obrázku 7.3 (Obrázek 7.3). Jednotlivé výrazy jsou podrobněji rozebrány v následujících bodech.

```

1 N=A'*P*A
2 y=A'*P*l'
3 dx=(-1)*inv(N)*y
4 v=A*dx+l'
5 K=N*dx+y
6 m0=((v'*P*v)/4)^(0.5)
7 cx=m0^2*inv(N)
8 cl=m0^2*inv(P)
9 clv=m0^2*A*inv(N)*A'
10 cv=m0^2*(inv(P)-A*inv(N)*A')

```

Obrázek 7.3: Výpočetní skript

7.3.1. Průběh vyrovnaní zprostředkujících měření

Stanovení dimenzí úlohy

Při stanovování dimenzí úlohy se určuje, jaký je počet všech měření (značí se n), jaký je počet nutných měření, tzn. jaký je počet neznámých (značí se k) a následně počet nadbytečných měření (značí se r a vypočítá se jako rozdíl n a k).

V případě této bakalářské práce bylo změřeno 15 nivelačních oddílů (tedy $n = 15$). Počet bodů s určenou výškou je 11 ($k = 11$). Počet nadbytečných měření jsou tedy 4 ($r = 4$).

Volba neznámých

Po stanovení dimenzí úlohy se určí neznámé parametry v počtu k :

$$\underline{\hat{X}}^T = (\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_k) \quad (7.3)$$

Sestavení funkčních vztahů

Dalším krokem je určení zprostředkujících rovnic určených vyrovnaných parametrů, které jsou funkcí vyrovnaných měřených veličin:

$$\begin{aligned} \hat{L}_1 &= f_1(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_k) \\ \hat{L}_2 &= f_2(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_k) \\ &\vdots \\ \hat{L}_n &= f_n(\hat{X}_1, \hat{X}_2, \dots, \hat{X}_k) \end{aligned} \quad (7.4)$$

Příkladem vyrovnaného funkčního vztahu je převýšení mezi bodem Kij-7.2f a 303:

$$\hat{h}_{7.2f,303} = \hat{H}_{303} - \hat{H}_{7.2f}$$

Tyto rovnice lze převést do maticového zápisu:

$$\underline{\hat{L}} = (\hat{L}_1, \hat{L}_2, \dots, \hat{L}_n)^T = \underline{f}(\underline{\hat{X}}^T) \quad (7.5)$$

Vyrovnané hodnoty měřených veličin se získají tak, že se k měřeným hodnotám přičte jejich vektor oprav:

$$\underline{\hat{L}} = \underline{L} + \underline{v} \quad (7.6)$$

Rovnice oprav

Úpravou vzorce uvedeného výše vychází tzv. původní rovnice oprav:

$$\underline{v} = \underline{\hat{L}} - \underline{L} = \underline{f}(\underline{\hat{X}}^T) - \underline{L} \quad (7.7)$$

Linearizace

Jestliže je systém zprostředkujících rovnic nelineární, musí být nejdříve linearizován. To se provede tak, že se určí přibližné neznámé, které se vypočtou pomocí některých vhodně zvolených měřených veličin $\underline{X}^0 = (X_1^0, X_2^0, \dots, X_k^0)^T$ a jejich přírůstky $\underline{dX}$, které jsou však neznámé:

$$\underline{\hat{X}} = \underline{X}^0 + \underline{dX} \quad (7.8)$$

Po dosazení do rovnice oprav získáme přetvořené rovnice oprav:

$$\begin{aligned} \underline{v} &= \underline{f}(\underline{\hat{X}}^T) - \underline{L} = \underline{f}[(\underline{X}^0 + \underline{dX})^T] - \underline{L} \\ &= \underline{f}(\underline{X}^{0T}) + \frac{\partial f(\underline{\hat{X}}^T)}{\partial \underline{X}^T} * \underline{dX} - \underline{L} \end{aligned} \quad (7.9)$$

Využitím Taylorova rozvoje získáme:

$$\underline{v} = \underline{A} * \underline{dX} + \underline{L}^0 - \underline{L} = \underline{A} * \underline{dX} + \underline{L}' = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T, \quad (7.10)$$

kde $\underline{A}$ je matice plánu a $\underline{L}'$ je vektor rozdílů přibližných hodnot měřených veličin a naměřených hodnot.

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \hat{x}_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \hat{x}_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial \hat{x}_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial \hat{x}_k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & \dots & k_1 \\ a_2 & b_2 & \dots & k_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & b_n & \dots & k_n \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

	303	20	9	19	31	32	33	34	35	Kij-7.2C	Kij-7.2D
	A										
Kij-7.2F,303	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
303, 20	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20, 9	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9, 19	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
19, Kij-7.2C	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
9, 31	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0
31, 32	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
32, 33	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
33, 34	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
34, 35	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
35, 9	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0
Kij-7.2F, 303	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
303, Kij-7.2D	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Kij-7.2D, Kij-7.2C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
Kij-7.2C, Kij-7.2F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0

Obrázek 7.4: Matice A

Tabulka 7.3: Porovnání naměřených a vypočtených převýšení

Naměřená převýšení – h [m]	Vypočtená převýšení – h ₀ [m]	Rozdíl – h' [m]
0,421220	0,421220	0,000000
5,535923	5,535923	0,000000
2,327285	2,327285	0,000000
0,479989	0,479724	-0,000265
-8,258001	-8,258001	0,000000
2,811898	2,811898	0,000000
1,535837	1,535837	0,000000
2,824995	2,824995	0,000000
-0,046905	-0,046923	-0,000019
-4,293971	-4,293971	0,000000
-2,831835	-2,831835	0,000000
0,421441	0,421220	-0,000221
1,295467	1,295688	0,000221
-1,210901	-1,210757	0,000144
-0,506151	-0,506151	0,000000

U nivelace je systém rovnic již sám o sobě lineární, není tedy třeba jej linearizovat. I přes to, že je tento krok nadbytečný, provádí se z formálního hlediska (tzn. zavádí se přibližné výšky a jejich přírůstky i přes to, že to není potřebné).

Volba vah

Každé měření je určeno s určitou přesností. Proto se stanovují pro každé měření jednotlivé váhy, které jsou závislé na zvolené hodnotě $\bar{m}_0^2$:

$$p_i = \frac{\bar{m}_0^2}{\bar{m}_i^2} \quad (7.12)$$

V případě vyrovnání nivelace se pro výpočet vah používá následující vztah:

$$p_i = \frac{1}{R_i}, \quad (7.13)$$

kde R_i je délka jednotlivých nivelačních oddílů získaná zprůměrováním z obousměrného měření. Výsledné váhy jednotlivých měření byly následně vloženy do matice vah $\underline{P}$ v Excelu.

$$\underline{P} = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & p_n \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

	P													
20,2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	8,1634	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	9,0689	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	11,0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	6,8833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	18,5484	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	34,3663	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	17,4155	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	11,2797	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,6063	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,3130	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,9142	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,7847	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,8249	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1550

Obrázek 7.5: Matice vah

Aplikace metody nejmenších čtverců

Protože v rovnicích oprav jsou 2 neznámé ($\underline{dx}$ a $\underline{v}$), je potřeba využít MNČ, díky níž ze všech možných řešení budou nalezeny takové, pro které bude $\underline{\Omega} = \underline{v}^T * \underline{P} * \underline{v} = \sum \underline{P} * \underline{v}^2 = \min$. Pro nalezení minima funkce $\underline{\Omega}$, položíme její první derivaci rovnu nule:

$$\frac{\partial \underline{\Omega}}{\partial \underline{dx}} = \frac{\partial (\underline{v}^T * \underline{P} * \underline{v})}{\partial \underline{dx}} = \left(\frac{\partial \underline{v}}{\partial \underline{dx}^T} \right)^T * 2 * \underline{P} * \underline{v} = \underline{A}^T * 2 * \underline{P} * \underline{v} = 0 \quad (7.15)$$

Z toho získáme tzv. normální rovnice ve zkráceném tvaru:

$$\underline{A}^T * \underline{P} * \underline{v} = 0 \quad (7.16)$$

Po dosazení přetvořených rovnic oprav za matici $\underline{v}$ získáme:

$$\underline{A}^T * \underline{P} * (\underline{A} * \underline{dx} + \underline{l}') = 0 \quad (7.17)$$

Lehkou úpravou pak dostaneme:

$$\underline{A}^T * \underline{P} * \underline{A} * \underline{dx} + \underline{A}^T * \underline{P} * \underline{l}' = 0 \quad (7.18)$$

Jestliže výraz $\underline{A}^T * \underline{P} * \underline{A}$ zapíšeme zkráceně jako matici $\underline{N}$ a výraz $\underline{A}^T * \underline{P} * \underline{l}'$ jako matici $\underline{y}$, získáme zkrácený zápis normální rovnice:

$$\underline{N} * \underline{dx} + \underline{y} = 0 \quad (7.19)$$

Řešení normálních rovnic

Existuje vícero způsobů řešení normálních rovnic, nejjednodušší způsobem je ale řešení pomocí inverzní matice:

$$\underline{dx} = -\underline{N}^{-1} * \underline{y} = -(\underline{A}^T * \underline{P} * \underline{A})^{-1} * \underline{A}^T * \underline{P} * \underline{L} \quad (7.20)$$

Kontrola výpočtu

Následně byla provedena kontrola dosazením přírůstků $\underline{dx}$ do normální rovnice (tato kontrola je ve výpočetním skriptu označena jako matice K):

$$\underline{K} = \underline{N} * \underline{dX} + \underline{y} = \underline{0} \quad (7.21)$$

Výpočet vyrovnaných neznámých

Pomocí přírůstků můžeme spočítat vyrovnané neznámé:

$$\underline{\hat{X}} = \underline{X}^0 + \underline{dX} \quad (7.22)$$

Výpočet oprav z přetvořených rovnic oprav

Díky známým přírůstkům taktéž získáme opravy měřených hodnot:

$$\underline{v} = \underline{A} * \underline{dX} + \underline{L}' \quad (7.23)$$

Výpočet vyrovnaných měření

Následně se vypočítají vyrovnané hodnoty měření:

$$\underline{\hat{L}} = \underline{L} + \underline{v} \quad (7.24)$$

Je důležité mít na vědomí, že kontrola při vyrovnaní pouze odhalí chyby způsobené špatným výpočtem, ale nezjistí se chyby ze špatného sestavení funkčních vztahů. (12)

7.3.2. Charakteristiky přesnosti

Pro kvalitativní zhodnocení vyrovnaných veličin slouží aposteriorní střední chyby. Základním prvkem tohoto vyhodnocení je aposteriorní jednotková střední chyba, která se z maticového zápisu vypočítá podle vztahu:

$$m_0^{APO} = \sqrt{\frac{v^T * P * v}{n - k}} \quad (7.25)$$

Díky této střední chybě mohou být dále spočítány i další charakteristiky přesnosti:

- Střední chyba vyrovnaných neznámých (ve skriptu označeno jako cx)

$$C_{\hat{x}\hat{x}} = (m_0^{APO})^2 * N^{-1} = \begin{pmatrix} m_{\hat{x}_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{\hat{x}_2}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{\hat{x}_k}^2 \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

- Střední chyba měřených veličin (ve skriptu označeno jako cl)

$$C_{ll} = (m_0^{APO})^2 * P^{-1} = \begin{pmatrix} m_{l_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{l_2}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{l_n}^2 \end{pmatrix} \quad (7.27)$$

- Střední chyba oprav (ve skriptu označeno jako cv)

$$C_{vv} = (m_0^{APO})^2 * (P^{-1} - A * N^{-1} * A^T) = \begin{pmatrix} m_{v_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{v_2}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{v_n}^2 \end{pmatrix} \quad (7.28)$$

- Střední chyba vyrovnaných měření (ve skriptu označeno jako clv)

$$C_{\hat{l}\hat{l}} = (m_0^{APO})^2 * A * N^{-1} * A^T = \begin{pmatrix} m_{\hat{l}_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{\hat{l}_2}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{\hat{l}_n}^2 \end{pmatrix} \quad (7.29)$$

(12)

7.4. Ověření výšek připojovaných bodů

Vyrovnaná převýšení z bodu Kij-7.2f na body Kij-7.2c a Kij-7.2d bylo nutné porovnat s převýšeními za využití výšek uvedených v nivelačních údajích na portále ČÚZK (viz Tabulka 7.4).

Tabulka 7.4: Měřené výšky a výšky z ČÚZK

Bod	Výška z měření [m]	Výška z ČÚZK [m]
Kij-7.2c	250,6681	250,6690
Kij-7.2d	251,8789	251,8780
Kij-7.2f	250,1620	250,1620

Pro vyhodnocení rozdílů mezi vypočtenými výškami a výškami získanými z portálu ČÚZK byl použit vztah pro určení maximální odchylky kontrolně měřených oddílů pro III. řád:

$$\Delta_{MAX} = 2,0 + 3,0 * \sqrt{R}, \quad (7.30)$$

kde R je délka oddílu v kilometrech, přičemž výsledná maximální odchylka je vyjádřena v milimetrech. Výsledné posouzení je uvedeno v tabulce 7.5 (Tabulka 7.5).

Tabulka 7.5: Ověření připojovacích bodů

	Měřené převýšení [m]	Převýšení z ČÚZK [m]	R [km]	Rozdíl mezi převýšeními [mm]	Maximální rozdíl [mm]	Posouzení
H _{7.2f-7.2c}	0,5061	0,5070	0,2407	0,89	3,4718	Splňuje
H _{7.2f-7.2d}	1,7169	1,7160	0,1650	0,90	3,2187	Splňuje

8. VÝSLEDKY PRÁCE

Výstupem této bakalářské práce je tabulka vyrovnaných výšek určených bodů, přehledky nivelační sítě a geodetické údaje k jednotlivým nivelačním bodům.

8.1. Geodetické údaje

Na základě pokynu vedoucího bakalářské práce byly nivelační údaje vytvořeny podle vzoru nivelačního údaje pro bod Kij-7.2f tak, jak jsou poskytované portálem ČÚZK. Údaje, které s v nivelačních údajích standardně vyskytují byly částečně zredukovány vzhledem k požadavkům a možnostem měření. Nivelační údaje tak neobsahují tíhové hodnoty, které bývají uváděny v pravém dolním rohu údaje. Souřadnice Y a X v systému S-JTSK a zeměpisná délka a šířka byly určeny přibližně pomocí geoportálu ČÚZK. Místopisy byly nakreslené v programu MicroStation CONNECT Edition a jako podklad posloužila Mapa technického využití území města Brna. Nivelační údaje byly také doplněny o fotografie jednotlivých bodů focené z malé vzdálenosti pro možnost budoucího potvrzení identity bodů.

8.2. Přehledky nivelační sítě

Pro tvorbu přehledky nivelační sítě byl použit program MicroStation CONNECT Edition. Stejně jako pro vytvoření místopisu k nivelačním údajům, byla pro podklad použita Mapa technického využití území města Brna. Přehledky byly vytvořeny ve třech variantách. V první přehledce je zobrazeno 9 bodů, jejímž určením se zabývá tato bakalářská práce. Další variantou je přehledka, na které jsou pouze body v těsné blízkosti budovy Z na ulici Žižkova. Třetí a poslední variantou je kompletní přehledka zobrazující všechny body nivelační sítě FAST VUT. Všechny výše zmíněné přehledky obsahují taktéž tabulku s určenými výškami jednotlivých bodů.

Body, které jsou obsaženy v kompletní přehledce nacházející se v areálu Veverčí, nejsou předmětem této bakalářské práce. Zpracování těchto bodů je předmětem bakalářské práce Tomáše Peška. Jeho výstupy obsahují nivelační údaje a podrobnější informace o zjištění výšek těchto bodů. Taktéž jsou v nich uvedeny výšky bodů, kterými se zabývá tato práce.

9. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo určení nadmořských výšek nivelačních bodů v areálu FAST Žižkova pro účely výuky. Měření bylo podle pokynů provedeno pomocí metody přesné geometrické nivelace ze středu.

Před měřením byly všechny body zkontrolovány rekognoskací a byla ověřena jejich identita. Na začátku měření byla u veškerého vybavení zkontrolována funkčnost a použitelnost. Byla provedena zkouška nivelačního přístroje a u latí byla zkontrolována kolmost nulové plochy s osou latě, a také byla provedena rektifikace jejich libel. Následovalo měření, které proběhlo v souladu se stanovenou metodikou.

Po exportu dat z nivelačního přístroje a jejich převedení do programu Microsoft Excel, byly naměřené hodnoty opraveny o nesprávnou délku laťového metru. Měřené hodnoty byly následně posuzovány podle kritérií pro nivelační pořady III. řádu, a to podle bodu 5.1, odstavce 6, Metodického návodu pro práce v ZVBP. Poté bylo měření vyrovnáno pomocí zprostředkujícího vyrovnání za využití MNČ. Měření procházelo i přes dva kontrolní body ČSNS, na nichž byla otestována homogenita vztažné výškové sítě. Naměřené vyrovnané hodnoty výšek těchto bodů pak byly porovnány s hodnotami výšek z ČÚZK.

Po ověření splnění všech posuzovaných kritérií byly na základě vypočtených vyrovnaných hodnot výšek vyhotovené nivelační údaje a dále také přehledky plošné nivelační sítě spolu s tabulkami s výslednými výškami.

Z výše popsaného průběhu měření a následovného zpracování měření je zřejmé, že cíl této bakalářské práce byl splněn.

10. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. NEVOSÁD, Zdeněk a VITÁSEK, Josef. *Geodézie III*. Brno : VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1774-9.
2. WEIGEL, Josef. *Vyšší geodézie II: Základní výškové bodové pole*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2007.
3. *Metodický návod pro práce v základním výškovém bodovém poli*. Praha : Zeměměřický úřad, 2003.
4. Vyhláška č. 31/1995 Sb., kterou provádí zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřictví a o změně a doplnění některých zákonů související s jeho zavedením. [Online] 1995. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1995-31?text=31%2F1995>.
5. Zeměměřický úřad. Základní nivelační body. [Online] Dostupné z: https://nivelace.cuzk.cz/_znb.aspx.
6. BLAŽEK, Radim a SKOŘEPA, Zdeněk. *Geodézie 3*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03100-4.
7. WEIGEL, Josef. *GE28 - Teoretická geodézie 1 - Přednášky: Přesná nivelace 2. část*. 2020.
8. Leica Geosystems AG. Leica DNA03/DNA10 User Manual. [Online] 2006. Dostupné z: https://kb.sccssurvey.co.uk/download/104/leica-dna03-dna10/2073/_DNA030_en.pdf.
9. Leica Geosystems AG. GPLE2N/GPLE3N, GPCL2/GPCL3: user manual. [Online] 2007. Dostupné z: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/manuals%20quickguides/dna_levelling_staffs_ml-gplx-1_gple2n_gple3n_gpcl2_gpcl3_um.ashx?la=en-gb&hash=E01845922F9205D7A3605F81E444EB14.
10. SVOBODA, Jaroslav. *Nivelace: určeno inženýrům a technikům zabývajícím se nivelací v praxi*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1953.
11. Návod pro správu geodetických základů. [Online] ČÚZK, Praha, 2015. Dostupné z: [https://www.cuzk.cz/Predpisy/Resortni-predpisy-a-opatreni/Navody-CUZK/Navod_pro_spravu_geodetickych_zakladu_151086722-\(1.aspx](https://www.cuzk.cz/Predpisy/Resortni-predpisy-a-opatreni/Navody-CUZK/Navod_pro_spravu_geodetickych_zakladu_151086722-(1.aspx).
12. WEIGEL, Josef. *Teorie chyb a vyrovnávací počet I*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2004.

13. MERVART, Leoš a CIMBÁLNÍK, Miloš. *Vyšší geodézie 2*. Praha : ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01628-5.
14. VYKUTIL, Josef. *Vyšší geodézie. Díl I., Geodézie geometrická*. Brno : Vysoké učení technické, 1975.
15. WEIGEL, Josef. *GE28 - Teoretická geodézie 1 - Přednášky: Přesná nivelace 1. část*. 2020.
16. Nařízení vlády č. 116/1995 Sb., kterým se stanoví geodetické referenční systémy, státní mapová díla závazná na celém území státu a zásady jejich používání. [Online] Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1995-116>.
17. ČSN ISO 17123-2 Část 2: *Nivelační přístroje*.
18. SCHENK, Jan. Geodetické sítě, bodová pole. [Online] 2004. Dostupné z: <https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galerie-souboru/skripta/Geosite.pdf>.

11. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1. Seznam obrázků

Obrázek 2.1: v Molo Sartoriu v Terstu (2).....	11
Obrázek 2.2: I. ZNB Lišov (5)	14
Obrázek 2.3: Přehled rozdělení ČSNS (4)	15
Obrázek 3.1: Nivelační sestava	17
Obrázek 3.2: Nivelační tah.....	17
Obrázek 4.1: Technické parametry nivelačního přístroje Leica DNA03 (8)	24
Obrázek 4.2: Schéma postavení patky na nivelační podložku při testování její kolmosti	26
Obrázek 5.1: Schéma nivelačních tahů	28
Obrázek 7.1: 1. nivelační sestava ve formátech GSI8 a GSI16	32
Obrázek 7.2: Měřená data převedená do Microsoft Excel	32
Obrázek 7.3: Výpočetní skript	35
Obrázek 7.4: Matice A	37
Obrázek 7.5: Matice vah	39

11.2. Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Naměřené odchylky svisle postavených latí	25
Tabulka 4.2: Čtení na latích při kontrole kolmosti patky	26
Tabulka 6.1: Posouzení odchylek mezi měřením tam a zpět	29
Tabulka 6.2: Posouzení uzávěrů nivelačních tahů	30
Tabulka 6.3: Posouzení uzávěru kompletního tahu	30
Tabulka 6.4: Základní střední kilometrová chyba a střední chyba obousměrné nivelace pro celý nivelační pořad	31
Tabulka 7.1: Oprava měřených převýšení o laťový metr – 1. měření.....	33
Tabulka 7.2: Oprava měřených převýšení o laťový metr – 2. měření.....	34
Tabulka 7.3: Porovnání naměřených a vypočtených převýšení	38
Tabulka 7.4: Měřené výšky a výšky z ČÚZK	42
Tabulka 7.5: Ověření připojovacích bodů.....	42

12. SEZNAM PŘÍLOH

01_Tabulky výsledků

01.1_Výsledné převýšení

01.2_Výsedné výšky

01.3_Posouzení přesnosti měření

01.4_Charakteristiky přesnosti měření po vyrovnání

02_Přehledky nivelační sítě

02.1_Přehledka plošné nivelační sítě FAST Žižkova

02.2_Přehledka plošné nivelační sítě FAST – budova Z

02.3_Kompletní přehledka plošné nivelační sítě FAST

03_Nivelační údaje

03.1_Nivelační údaje pro bod 9

03.2_Nivelační údaje pro bod 19

03.3_Nivelační údaje pro bod 20

03.4_Nivelační údaje pro bod 31

03.5_Nivelační údaje pro bod 32

03.6_Nivelační údaje pro bod 33

03.7_Nivelační údaje pro bod 34

03.8_Nivelační údaje pro bod 35

03.9_Nivelační údaje pro bod 303

13. SEZNAM ZKRATEK

RUVZÚ – Rakousko-Uherský vojenský zeměpisný ústav

Bpv – Výškový systém Baltský – po vyrovnání

ČSNS – Česká státní nivelační síť

ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální

ZÚ – Zeměměřický úřad

ZVBP – Základní výškové bodové pole

PVBP – Podrobné výškové bodové pole

ČPNS – Česká podrobná nivelační síť

ZNS – Zvláštní nivelační stě

TN – Technická nivelace

PN – Přesná nivelace

VPN – Velmi přesná nivelace

ZPN – Zvlášť přesná nivelace

GNSS – Globální navigační satelitní systémy

MNČ – Metoda nejmenších čtverců

VÚGTK – Výzkumný ústav geodetický topografický a kartografický