



Metrologická návaznost měření v Základní geodynamické síti (N – certifikovaná metodika)

Projekt programu BETA Technologické agentury ČR č. TB05CUZK003

Vypracoval: **Ing. Jiří Lechner, CSc.** (úvod a část 2.)
 Ing. Jakub Kostecký, Ph.D. (část 1.)
 Ing. Vojtech Pálinkáš, Ph.D. (část 3.)
 Ing. Miloš Vaílko, Ph.D. (část 3.)

Datum: **25. 10. 2016**

Tato metodika byla vytvořena s finanční podporou
TA ČR v rámci projektu Beta TB05CUZ003.



Technologická agentura
České republiky



Beta |

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 3 |
| Prvky systému jakosti u zeměměřických činností | 8 |
| 1. Metrologická návaznost měření GNSS na bodech ZGS | 8 |
| 1.1 Úvod | 8 |
| 1.2 Měření GNSS na bodě ZGS | 9 |
| 1.3 Podmínky pro použití aparatury GNSS pro měření na bodě ZGS | 10 |
| 2. Metrologická návaznost pro nivelační přístroje a nivelační latě | 11 |
| 2.1 Stanovení parametrů metrologické návaznosti u nivelačních přístrojů | 12 |
| 2.1.1 Odkazy na normy a navazující předpisy | 12 |
| 2.1.2 Podmínky kalibrace | 12 |
| 2.1.3 Měření metrologických parametrů | 13 |
| 2.1.4 Vyhodnocení výsledků měření, nejistoty | 14 |
| 2.2 Stanovení parametrů metrologické návaznosti u nivelačních latí | 15 |
| 2.2.1 Odkazy na normy a navazující předpisy | 15 |
| 2.2.2 Podmínky kalibrace | 15 |
| 2.2.3 Měření metrologických parametrů | 15 |
| 2.2.4 Vyhodnocení výsledků měření, nejistoty | 16 |
| 2.3 Stanovení parametrů metrologické návaznosti pro nivelační pořad velmi přesné nivelace délky 1 km | 17 |
| 2.4 Provedení velmi přesné nivelace | 19 |
| 2.5 Stanovení doplňujících parametrů metrologické návaznosti | 21 |
| 2.6 Závěr | 22 |
| 3. Měření tíhového zrychlení a jeho určení pomocí absolutního, popřípadě relativního gravimetru | 22 |
| 3.1 Měření absolutním gravimetrem na bodě ZGS | 23 |
| 3.2 Určení tíhového rozdílu mezi absolutním bodem a bodem ZGS relativním gravimetrem | 25 |
| 3.3 Závěr | 26 |
| Literatura | 26 |

Úvod

Základní geodynamická síť České republiky (ZGS) je dle výkladu v Zeměměřickém slovníku <http://www.vugtk.cz/slovník> - soubor trvale stabilizovaných bodů, které jsou opakovaně zaměřovány nejpřesnějšími technologiemi a slouží ke sledování deformací a pohybů zemského povrchu. Základní geodynamická síť vzhledem ke kvalitě určení svých bodů (poloha, výška, tíže) spojuje geodetické základy v jeden celek a umožňuje integraci geodetických základů polohových, výškových a tíhových.

Základní geodynamická síť České republiky (ZGS) je složena z geodynamických bodů (viz tab.1 a obr. 1), které slouží ke sledování pohybů zemského povrchu. ZGS je opakovaně zaměřována metodou GNSS, velmi přesnou nivelací (VPN) a gravimetricky. Od roku 2004 jsou původní stabilizace geodynamických bodů postupně doplňovány novými

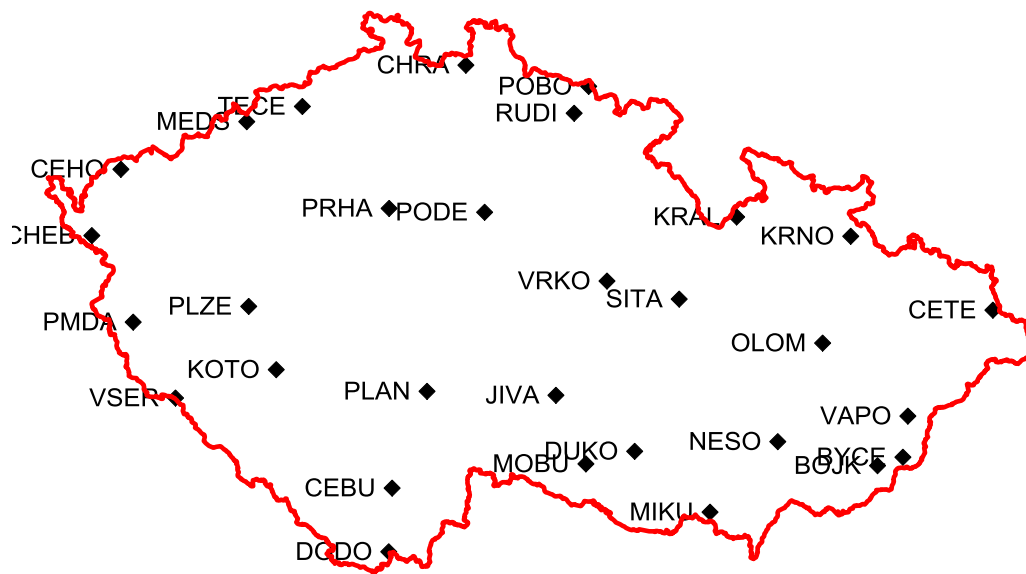
stabilizacemi, které jsou zřizovány jako excentrická stanoviště stabilizací původních. Nové stabilizace jsou založeny na hloubkové stabilizaci, která je nad zemským povrchem zakončena observačním pilířem umožňujícím měření GNSS a měření VPN. Vedle observačního pilíře je umístěn tíhový bod umožňující gravimetrické zaměření bodu. Schéma nové stabilizace ukazuje obrázek 2. Výsledky zaměření nových stabilizací ZGS byly zahrnuty do Evropské jednotné výškové GNSS sítě (EUVN) v rámci zhušťovací kampaně této sítě (EUVN_DA).

Tabulka 1

| Geodynamické body (seznam) | | | | | |
|----------------------------|------|------------------|---|------------------------------|---|
| označení bodu | | | původní stabilizace | | nová stabilizace* (excentrické stanoviště) |
| 1 | GOPE | Pecný |  | bod VÚGTK | - |
| 2 | POLO | Polom |  | Z6ab-111h | - |
| 3 | CHRA | Chrastava |  | CZ4-13.1 | CZ4-15c |
| 4 | CHEB | Cheb |  | Z11a1-7.1e | Z11a1-7.1g |
| 5 | PRHA | Praha |  | BC-24.1 | BC-24.3 |
| 6 | KOTO | Kotouň |  | HM-0.1 | HM-0.2 |
| 7 | DODO | Dolní Dvořiště |  | tíhový bod | MZ13-294.4 |
| 8 | SITA | Svitavy |  | EF-101.2 | |
| 9 | DUKO | Dukovany |  | Ocg-18.2.1 | Ocg-25.3 |
| 10 | BYCE | Bylnice |  | LZ18-87.1 | LZ18-87.1a |
| 11 | BRNO | Brno |  | KP-101 | |
| 12 | CEHO | Čertova hora |  | Z1b3-29j | Z1b3-29r |
| 13 | CEBU | České Budějovice |  | MZ14-12.2 | MZ14-14.2 |
| 14 | CETE | Český Těšín |  | GZ19-163.0.1 | GZ19-161.1 |
| 15 | JIVA | Jihlava |  | NO-77.1 | NO-77.2 |
| 16 | KRAL | Králíky |  | FZ7-8t | FZ7-8s.1 |

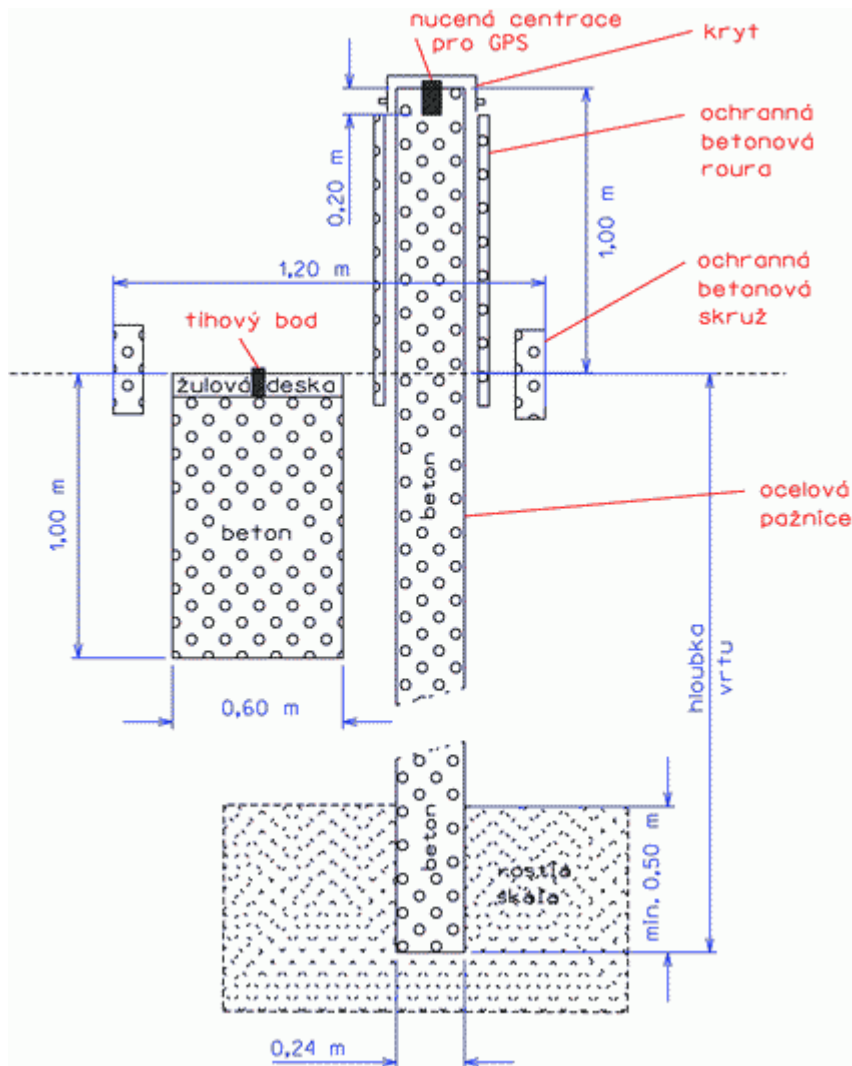
| | | | | | |
|-----|------|---------------------|---|------------------------------|-------------------------------|
| 17 | KRNO | Krnov |  | GZ9-14.0.1 | FG-115.1d |
| 18 | MEDS | Medvědí skála |  | 0504 2.3 | Z2b11-68t |
| 19 | MIKU | Mikulov |  | Pd7-12.1 | Pd7-12.2 |
| 20 | MOBU | Moravské Budějovice |  | OZ15-34.2 | OZ15-34.2.1 |
| 21 | NESO | Nesovice |  | LP-33.1 | LP-31.1.1 |
| 22 | OLOM | Olomouc |  | GL-96.4 | |
| 23 | PLAN | Planá nad Lužnicí |  | MN-114.3 | MN-114.2.1 |
| 24 | PLZE | Plzeň |  | AB-9.2 | BI-16.5 |
| 25 | PODE | Poděbrady |  | DJ-18.1 | DJ-18.1.1 |
| 26 | PMDA | Přimda |  | Z11Z12-18.1 | Z11Z12-18.0.1 |
| 27 | RUDI | Rudník |  | DZ5-106.1a | DZ5-106.1b |
| 28 | TECE | Teplice |  | VIII.ZNB-2.1 | VIII.ZNB-10 |
| 29 | VAPO | Valašská Polanka |  | LZ19-47.0.1 | |
| 30 | LOPE | Velký Lopeník |  | 5706 6 | |
| 31 | VRKO | Vrbatův Kostelec |  | Eeg-25 | Eeg-25.3 |
| 32 | RUDA | Železná Ruda |  | HZ13-12.1 | - |
| 32a | VSER | Všeruby |  | Z12bc-27 | Z12bc-26.1 |
| 33 | TUBO | Brno |  | stanice GNSS | - |
| 34 | POL1 | Polom |  | Z6ab-111g | - |
| 35 | LISO | Lišov |  | I.ZNB-2.1 | - |
| 36 | POBO | Pomezní Boudy |  | Z5a3-170a | |
| 37 | BOJK | Bojkovice |  | - | LZ18-55.4 |

*) je-li u nové stabilizace namísto označení bodu prázdné pole, excentrické stanoviště bude teprve zřízeno, je-li namísto označení bodu uvedena pomlčka -, excentrické stanoviště se zřizovat nebude



Obr. 1 Rozmístění bodů ZGS

Obr. 2 Schéma nové stabilizace – excentrického stanoviště geodynamického bodu



V rámci projektu TB02CUZK003 „Integrace polohových, výškových a tíhových základních bodových polí České republiky“, jak vyplývá ze samotného názvu projektu bylo v roce 2015 definovat podmínky a postupy pro polohové, výškové a tíhové propojení bodů Základní geodynamické sítě (ZGS) a stanic národního doplnění ECGN s polohovým, výškovým a tíhovým základním bodovým polem České republiky. Vlastní metodika je popsána v [19].

Cílem bylo popsat metody pro výškové propojení bodů ZGS a stanic ECGN na základní výškové bodové pole České republiky. V kapitole 4 je definována metodika připojení bodů ZGS na základní výškové bodové pole pomocí geometrické nivelace se středem – velmi přesné nivelace (VPN). V kapitole 5 jsou popsány metody na připojení GNSS stanic CZEPOS na základní výškové bodové pole České republiky.

Prvky systému jakosti u zeměměřických činností

Je nesporné, že moderní technologie mohou mít přímý vliv na zvyšování podílu přidané hodnoty v dané ekonomice a tím na celkové konkurenční schopnosti. Tento jev je zřetelný i v příbuzných oborech oboru zeměměřictví a sice nejvíce ve stavebnictví, kde tlak konkurenceschopnosti u zahraničních investorů, ale již i u vyhlašovaných veřejných soutěží, přímo nutí jednotlivé subjekty k realizaci systému jakosti v podniku a tím zajištění systematizovaného provádění činností dle schválených metodik.

Zeměměřické činnosti prováděné v rámci správy a údržby Základní geodynamické sítě patří k činnostem prováděným ve veřejném zájmu. Z tohoto hlediska je nezbytné, aby byly při těchto činnostech splněny požadavky právních a technických předpisů, které zeměměřické činnosti určitým způsobem regulují. Jde zejména o splnění požadavků zákona o zeměměřictví a jeho prováděcí vyhlášky:

- 1) **Zeměměřické činnosti ve veřejném zájmu, vyžadující použití měřidel, mohou být vykonávány pouze s použitím těchto měřidel splňujících požadavky zvláštního právního předpisu". Tímto zvláštním předpisem je obecně závazný předpis – zákon o metrologii [4].**
- 2) **Výsledky zeměměřických činností, využívané ve veřejném zájmu orgány zeměměřictví a katastru musí být dokumentovány v závazných geodetických referenčních systémech.**

V případě, kdy je posuzována platnost certifikátů metrologické návaznosti měřidel dle této Metodiky, postupuje se v souladu s ustanovením **Metrologického řádu resortu ČÚZK, č. j. ČÚZK 1558/2009-22, účinnost od 1. 9. 2009, v platném znění [5].**

1. Metrologická návaznost měření GNSS na bodech ZGS

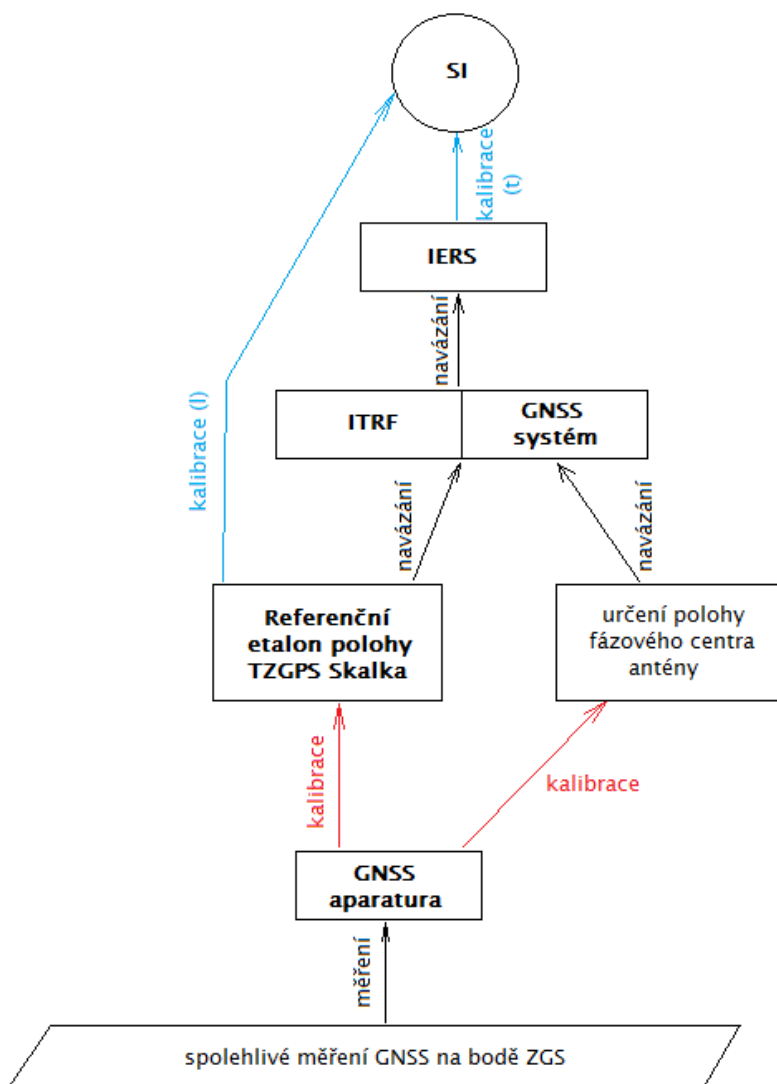
1.1 Úvod

Prostorová poloha bodů Základní geodynamické sítě (ZGS) je výhradně určována měřením GNSS. Je to jediná technika, která v současnosti umožňuje určit prostorovou polohy bodů ZGS při jejich vzájemné vzdálenosti kolem 40 km. Pro přesné měření GNSS jsou nové stabilizace bodů ZGS uzpůsobeny – vlastní bod je definován spodní částí systému nucené centrace, která je zabetonována do skalního výchozu nebo do záhlaví pilíře vyvrtného do podloží – až do rostlé skály. Při měření GNSS se do spodní části nucené centrace vkládá centrační tyč, která je zakončena šroubem se závitem 5/8". Na šroub je připevněna GNSS anténa. Zajištění správné orientace antény k severu podle pokynů výrobce je umožněno pootočením centrační tyče ve spodní části nucené centrace před dotažením tyče do centrace, čímž dojde k upevnění tyče v centraci.

V tomto textu je nejistotou měření míněna standartní nejistota měření, tj. koeficient konfidence $k=1$ (hladina významnosti 32%).

1.2 Měření GNSS na bodě ZGS

Metrologická návaznost měření GNSS na bodech ZGS je možná pouze metodou zobrazenou na obr. 1. Aparatura GNSS, použitá k měření na ZGS je kalibrována na referenčním etalonu polohy TZGPS Skalka a je určena poloha fázových center antény aparatury GNSS. Relativní prostorová poloha referenčního etalonu polohy je určena kalibrací a navázána tak na SI, absolutní prostorová poloha referenčního etalonu polohy je získána navázáním na ITRF – mezinárodní terestrický referenční rámec – a na GNSS systém. Obojí je pak navázáno na SI přes IERS – Mezinárodní službu rotace Země a referenčních systémů [5].



Obr. 3 Schéma návaznosti měření GNSS na bodech ZGS

Rozpočet nejistot pro metodu měření GNSS na bodech ZGS je v Tab. 2. Rozpočet je stanoven s přihlédnutím k technologii měření – statické měření po dobu 48 hodin dvakrát dvěma rozdílnými GNSS aparaturami. Tabulka ukazuje příspěvek vlastní technologie měření, příspěvek přesnosti referenčního etalonu polohy a přesnosti určení polohy fázového centra antény a příspěvek indukovaný vlastním měřením na bodech ZGS, ve kterém je především

vliv realizace měřeného bodu antény v nucené centraci a vliv lokálních podmínek na měření s GNSS.

Tab. 2 Standartní nejistota v určení prostorové polohy měřením GNSS na bodech ZGS

| Zdroj nejistoty | Příspěvek k nejistotě v měření o délce * /mm | | | Příspěvek k nejistotě v měření 2x48 hodin /mm | | |
|---|---|--------|--------|--|------------|-------------|
| | sever | východ | nahoru | sever | východ | Nahoru |
| Komponenta prostorové polohy | | | | | | |
| Nejistota referenčního etalonu polohy | 2,7 | 2,7 | 3,7 | 2,7 | 2,7 | 3,7 |
| Nejistota určení fázových center antény | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Kalibrace aparatury na etalonu (* 48 hod) | 4,0 | 3,0 | 16,0 | 2,8 | 2,1 | 11,3 |
| Měření na bodě ZGS (* 1x24 hod) | 3,9 | 3,9 | 4,5 | 2,0 | 2,0 | 2,3 |
| Celková nejistota | - | - | - | 4,4 | 4,0 | 12,1 |

Celková nejistota měření GNSS na bodech ZGS v tab. 2 obsahuje i nejistotu kalibračního etalonu – referenčního etalonu polohy – vzhledem k ITRF, vůči kterému je vztažena i prostorová poloha bodů ZGS. V tomtéž rámci je sledována i geodynamika v České republice.

1.3 Podmínky pro použití aparatury GNSS pro měření na bodě ZGS

Pro použití na měření GNSS na bodě ZGS musí aparatura GNSS splňovat následující podmínky:

- Aparatura GNSS obsahuje minimálně dvoufrekvenční geodetický přijímač zpracovávající signály minimálně navigačního systému GPS NAVSTAR,
- anténa GNSS aparatury má individuálně určenou polohu fázového centra pro všechny přijímané frekvence včetně určení závislosti polohy fázového centra na směru příjmu signálu (na azimutu a výškovém úhlu družice),
- anténa GNSS aparatury má definován referenční bod antény jako průsečík nejnižší vodorovné plochy tělesa antény se svislou osou šroubu pro připevnění antény; tento šroub musí mít závit 5/8",
- aparatura GNSS je kalibrována na referenčním etalonu polohy pro technologii měření statickou o délce 2x24 hodin.

2. Metrologická návaznost pro nivelační přístroje a nivelační latě

Nivelační připojení bodů ZGS a jejich vzájemné propojení se provádí [7] metodou velmi přesné nivelace (VPN), obousměrnou geometrickou nivelací ze středu s využitím přesných digitálních nivelačních přístrojů a nivelačních latí. VPN se provádí s přesností deklarovanou pro Nivelační síť I. řádu.

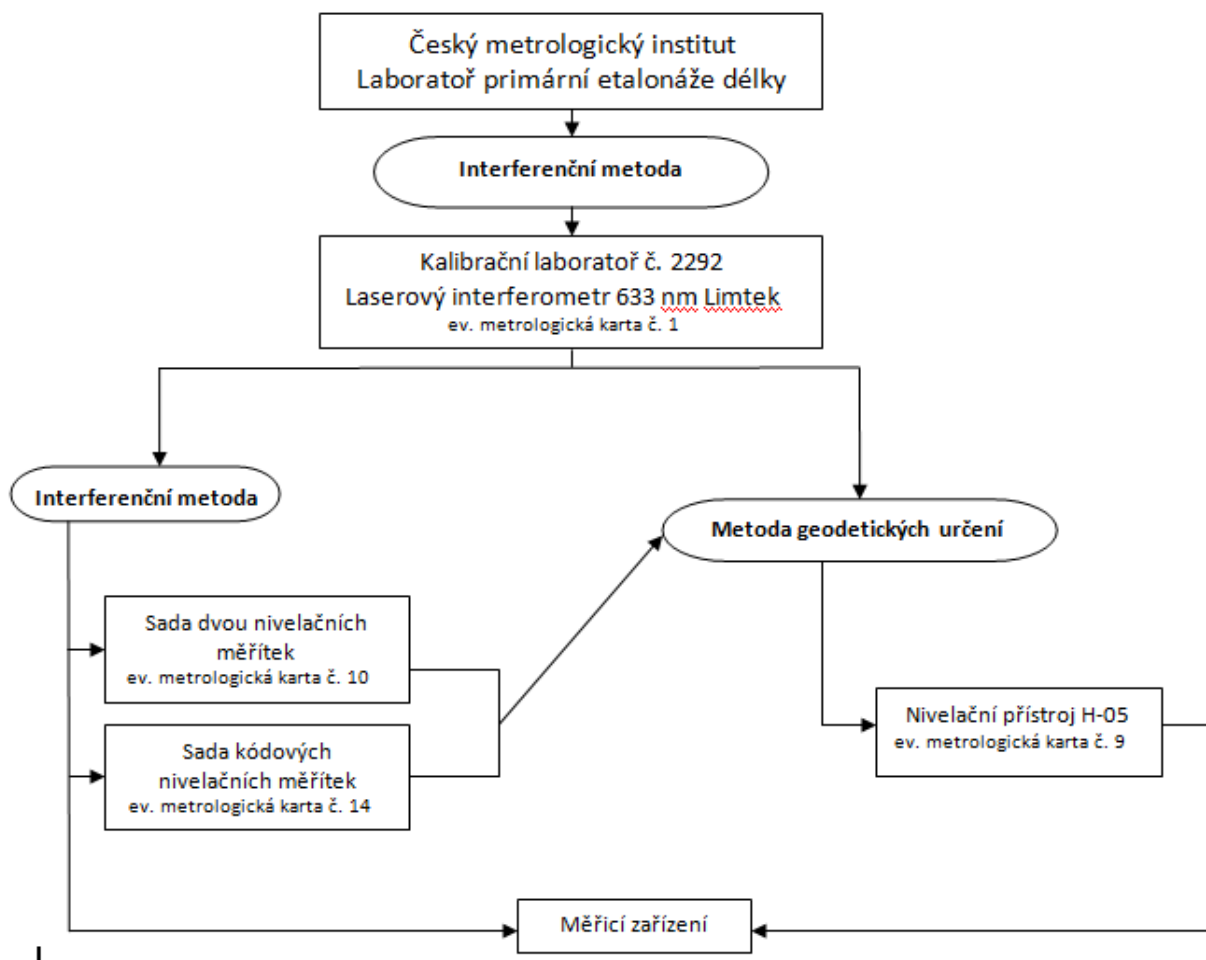
Výšky bodů ZGS, jejich excentrické gravimetrické body a body ECGN je nutné připojit vždy minimálně ze dvou nejbližších bodů základního výškového bodového pole. Konkrétní požadavky na přístrojové vybavení a metodiku měření jsou popsány v následujícím textu.

Schéma nivelačních propojení bodů ZGS je zřehledněno na internetových stránkách Zeměměřického úřadu u Databáze bodových polí. Pro vlastní propojení se využívají nivelační pořady ČSNS s ohledem na srovnatelné délky uzavřených nivelačních polygonů a polygonů Nivelační sítě I. řádu. Při tom je také zohledňováno a upřednostňováno hledisko využívání dopravně méně frekventovaných komunikací.

V literatuře [19] jsou uvedeny požadavky na parametry přístrojového vybavení pro provádění měření, tj.:

- využití nivelačního přístroje s optickým mikrometrem pro odečítání na lati se směrodatnou odchylkou menší než 0,1 mm, nebo stejně přesným registračním zařízením,
- využití 3m dlouhých invarových nivelačních latí se dvěma stupnicemi navzájem posunutými o konstantní hodnotu nebo s kódovou stupnicí s odečítáním s přesností na 0,1 mm,
- nerovnost plochy patky latě má být menší než 0,1 mm,
- délka laťového metru se zjistí porovnáním s normálním etalonem,
- před měřením nivelačních pořadů se provede přezkoušení nivelační soupravy a observátorů na nivelačním okruhu či základně,
- kalibrace nivelačního přístroje a nivelačních latí je prováděna v intervalech dle metrologického řádu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČUZK) [4].

Pro vlastní metrologickou návaznost měřidel byla v rámci řešení projektu využita Kalibrační laboratoř VÚGTK (KL VÚGTK), která má pro účely návaznosti (nivelačního přístroje a sady kódových invarových nivelačních latí) využitelný etalon, který je navázaný na etalon laboratoře primární etalonáže délky Českého metrologického institutu. Pracovním etalonem KL VÚGTK v tomto případě je laserový interferometrem Limtek 633 nm.



Obr. 4 Schema návaznosti měřidel pro provádění VPN

2.1 Stanovení parametrů metrologické návaznosti u nivelačních přístrojů

Cílem stanovení parametrů metrologické návaznosti u nivelačních přístrojů je určení splnění hlavní osově podmínky u nivelačního přístroje (úhel i) a stanovení nejistoty měření převýšení mezi kontrolovanými body daným nivelačním přístrojem. V případě, kdy hodnota úhlu i by ovlivnila splnění kritérií pro VPN, je nutné provést justáž přístroje.

2.1.1 Odkazy na normy a navazující předpisy

Záležitost kontroly správné funkce nivelačního přístroje je řešena v

ČSN ISO 17123-2 Optické nivelační přístroje – Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů – Část 2: Nivelační přístroje

2.1.2 Podmínky kalibrace

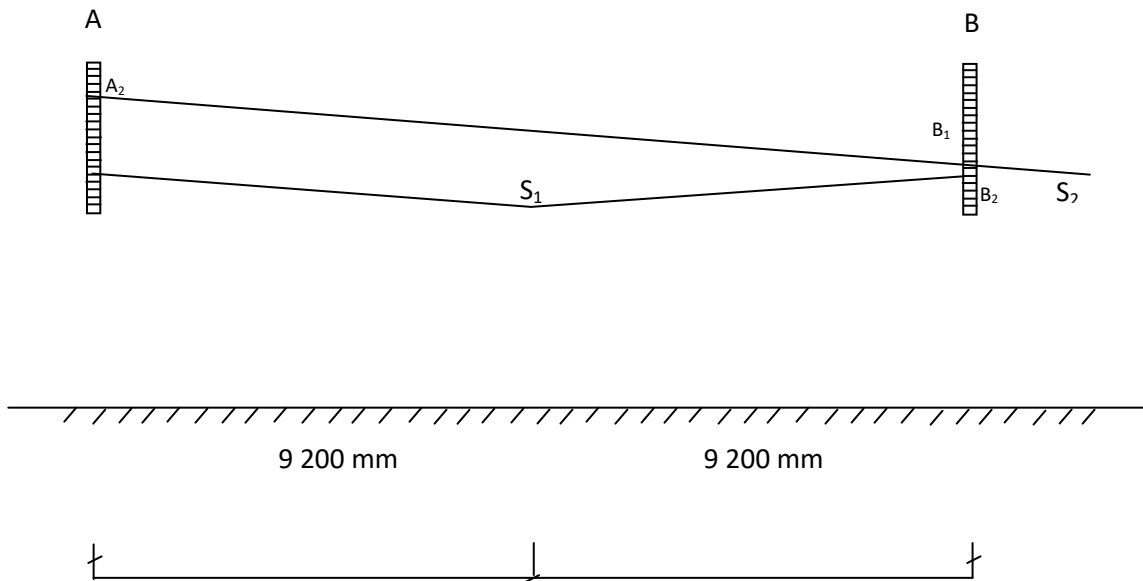
Kalibrace se provádí v klimatizované laboratoři, při teplotě $+20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Před kalibrací je měřidlo uloženo v laboratorních podmínkách min. 1 hod.

Před vlastní kalibrací se provede vzhledová kontrola stavu měřidla, provede se prověření správné funkce krabicové libely, alhidádové libely popř. kompenzátoru a provede se případná

rektifikace. V případě nesprávné funkce přístroje, popř. jeho dílčí části se přístroj před vlastní kalibrací předá do servisu k opravě a seřízení.

2.1.3 Měření metrologických parametrů

Stabilizace bodů pro ustavení přístroje je přizpůsobena požadavku zachování stejných vzdáleností mezi přístrojem a nivelačními stupnicemi způsobem nucené centrace na 2 pilířích v kalibrační laboratoři. Rozmístění pilířů S_1 a S_2 , resp. nivelačního přístroje vzhledem k nivelačním stupnicím č. 1(A) a 2(B) je patrné z obrázku č. 5.



Obr. 5

Přístroj se urovná podle krabicové libely na bodě S_1 , zacílí se na nivelační stupnici č. 2 a odečte se údaj B_1 . Dalekohled se otočí kolem svislé osy přístroje, zacílí se na nivelační stupnici č. 1 a odečte se údaj A_1 . Poté se přístroj přemístí a urovná na bodě S_2 . Zacílí se na nivelační stupnici č. 2 a odečte se údaj B_2 a po otočení dalekohledu a zacílení na stupnici č. 1 se odečte údaj A_2 . Veškeré údaje se zaznamenávají do měřického zápisníku

KP3_zapisnik_nivelační_přístroj.docx. Tato část měření se provede minimálně 6x. V měřickém zápisníku se provede vyhodnocení dle předepsaných úkonů, tj. vypočte se rozdíl $\Delta_1 = B_1 - A_1$ a $\Delta_2 = B_2 - A_2$ pro všechna měření a zaznamená do tabulky. Dále se provede výpočet aritmetického průměru z hodnot Δ_1 a Δ_2 , tj. $\bar{\Delta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^6 \Delta_{1i}}{6}$ a $\bar{\Delta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^6 \Delta_{2i}}{6}$.

Jednotlivé hodnoty veličiny Δ_1 , popř. Δ_2 se nesmí lišit od $\bar{\Delta}_1$ a $\bar{\Delta}_2$ o více než 0,5 mm. V případě, překročení této limitní hodnoty se měření od počátku opakuje. Poté se vypočte mezní rozdíl hodnot $\delta = \bar{\Delta}_1 - \bar{\Delta}_2$ [mm]. Výsledná hodnota vlivu nesplnění hlavní podmínky nivelačního přístroje na měřené převýšení $k = \delta : 18,4$ [mm], která vyjde v rozměru mm/m záměry. Tato odchylka je vyjádřena se znaménkem korekčního charakteru, tj. při vyhodnocení nivelačních měření se zavádí s uvedeným znaménkem pro delší záměry. Do zápisníku se provede zaznamenání podmínek během měření: teplota ovzduší.

V případě kalibrace digitálního nivelačního přístroje se provede optické měření úhlu \underline{i} , jak je popsáno výše a poté se provede elektronické určení úhlu \underline{i} dle návodu na použití přístroje. Elektronické určení se provede min. 3x. Podmínky z návodu se musí dodržet, neboť jsou zakomponovány do software přístroje a liší se dle typu přístroje.

2.1.4 Vyhodnocení výsledků měření, nejistoty

Tabulka 3

| Zdroj nejistoty X_i | Velikost standardní nejistoty $u(x_i)$ | Jednotka | Pravdě- podobnostní rozdělení | Citlivostní koeficient c_i | Příspěvek k adiční části nejistoty $u_i(y)$ (mm) | Příspěvek k multiplikační části nejistoty $u_i(y)$ (mm/m) |
|--|---|----------|-------------------------------------|------------------------------------|---|--|
| etalonů - nivelační přístroj | 0,01 | mm/m | normální | 1 | | 0,01 |
| etalonů - stupnice č.1 | 0,0035 | mm | normální | 1 | 0,0035 | |
| etalonů - stupnice č.2 | 0,0035 | mm | normální | 1 | 0,0035 | |
| Navedení/odečtení hodnoty na stupnici č. 1, popř. č. 2 pomocí optiky nivelačního přístroje | 0,055 | mm/m | normální | 1 | | 0,0055 |
| Vliv zůstatkového neurovnání do vodorovné roviny záměrné přímky u libelových nivelačních přístrojů | 2" | /m | normální | 1 | | 0,003 |
| Celková nejistota | | | | | 0,005 | 0,012 |

Standardní nejistota $u = Q(0,005; 0,012 \cdot L_{[m]})$ mm

Rozšířená nejistota $U = k \cdot u = Q(2 \cdot 0,005; 2 \cdot 0,012 \cdot L_{[m]})$ mm = $Q(0,010; 0,024 \cdot L_{[m]})$ mm

U digitálního nivelačního přístroje Leica DNA 03, výr. č. 334168, byla stanovena metrologická návaznost před provedením nivelačních prací v terénu s tím, že korekce z nevdorovnosti záměrné přímky byla určena v hodnotě -0,002 mm/1m s rozšířenou nejistotou $U=0,03$ mm/1m, viz KL č. 39833/2016 v Příloze č.1.

Metrologická návaznost byla opětovně určena (kontrolována) po provedených polních pracích. Korekce z nevdorovnosti záměrné přímkou byla určena v hodnotě $-0,013 \text{ mm/1m}$, viz KL 40191/2016 v Příloze č. 2 s rozšířenou nejistotou $U=0,03 \text{ mm/1m}$.

S uvážením těchto dvou hodnot pro úhel i – splnění hlavní podmínky nivelačního přístroje před a po provedených nivelačních prací vyplývá, že v době provedené VPN nedošlo k zásadní změně hodnoty úhlu i a hodnota se nachází pod hranicí hodnoty pro přístroj, kdy by bylo potřebné z hlediska vlastní technologie VPN provést rektifikaci přístroje. Při uvážení rozdílu délek záměr pro VPN max. 0,5 m lze uvažovat max. vliv úhlu i v poloviční hodnotě výše uvedených charakteristik.

2.2 Stanovení parametrů metrologické návaznosti u nivelačních latí

Výsledkem kalibrace páru třímetrových invarových nivelačních latí Leica GPCL3 vyr. č. 33140 a 33383 pro délková čárková a koncová měřidla, skládací a výsuvné nivelační latě je určení délkových odchylek měřidla od nominálních délek případně konvečně pravých hodnot v průběhu celého měřicího rozsahu měřidla, tj. v délce 3m s vyloučením intervalů nevyužívaných pro technologii velmi přesné nivelace.

Výsledkem kalibrace pro jednodílné nivelační latě je určení hodnoty délky průměrného laťového metru, střední odchylky laťového metru a nahodilé odchylky dělení latě.

2.2.1 Odkazy na normy a navazující předpisy

DIN 18 703 Nivelací latě

DIN 18 717 Velmi přesné nivelační latě

ČSN 25 11 01 Priame oceľové dĺžkové meradlá. Všeobecná ustanovenia

2.2.2 Podmínky kalibrace

Kalibrace se provádí v klimatizované laboratoři, při teplotě $+20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Před kalibrací je měřidlo uloženo v laboratorních podmínkách min. 4 hod.

Před vlastní kalibrací se provede vzhledová kontrola stavu měřidla, provede se prověření správné funkce krabicové libely a provede se případná rektifikace. V případě nesprávné funkce měřidla, popř. jeho dílčí části se měřidlo před vlastní kalibrací předá do servisu k opravě a seřízení.

2.2.3 Měření metrologických parametrů

Nivelační latě se kalibrují s využitím nosičů latí ve vodorovné, popř. ve svislé poloze. Pomocí sady podložek se lať vyrovná a vykompenzuje se případná prohnutí. Dále se lať směrově vyrovná do přímkou rovnoběžné se směrem laserového paprsku, resp. do přímkou rovnoběžné s osou pojezdu měřicího vozíku na lavici. Měření probíhá cílením na příslušný dílek kontrolovaného úseku (dílkou) měřidla. Po najetí pojezdového vozíku délkové základny na kontrolované místo, jeho urovnání a zacílení dvojrysky dalekohledu na měřený dílek, se provede odečet hodnoty délky (konvenčně pravé délky) na vyhodnocovacím zařízení a zapíše se do záznamu měření. Toto se provádí na všech kontrolovaných místech měřidla a opakuje se při měření zpět. U prvního měření tam se navíc v řídicí aplikaci laserinterferometru nastaví

nulová hodnota. Pomocí mikroskopu odečítacího zařízení se měří v 0,2 až 0,5 m úsecích dělení nivelační latě od počátku až do konce a zpět (dle příslušného zápisníku měření), přičemž rozdíl měření tam a zpět se nesmí lišit o hodnotu větší než 0,015 mm. V případě invarových nivelačních latí se měření provádí v intervalu 20 cm a v místech laťového metru po 10 cm (např. dělení 10, 30, 50, 70, 90, 100, 110, 130, 150, 170, 190, 200, 210, 230, 250, 270, 290).

Vyhodnocení měření se provede pomocí software pro vyrovnání měřených údajů s využitím vyrovnávací přímky. Výsledkem je hodnota délky průměrného laťového metru pro danou lať a pro sestavení páru latí, střední odchylka laťového metru a nahodilá odchylka dělení latí a sestavení páru latí.

2.2.4 Vyhodnocení výsledků měření, nejistoty

Tabulka 4

| Zdroj nejistoty X_i | Velikost standardní nejistoty $U(x_i)$ | Jednotka | Pravděpodobnostní rozdělení | Citlivostní koeficient c_i | Příspěvek k adiční části nejistoty $u_i(y)$ (μm) | Příspěvek k multiplikační části nejistoty $u_i(y)$ ($\mu\text{m}/\text{m}$) |
|---|--|------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|---|
| <i>Δl etalonu – adiční část Výchozí vliv nejistoty etalonu</i> | 0,005 | μm | normální | 1,0 | 0,005 | |
| <i>Δl etalonu – multif. část Výchozí vliv nejistoty etalonu</i> | 0,65 | $\mu\text{m}/\text{m}$ | rovnoměrné | 1,0 | | 0,65 |
| <i>$\Delta l \Delta t$ etalonu (vliv na vyhodnocenou délku etalonem za změnu teploty prostředí při nejistotě určení teploty, popř. její změně o $\pm 0,3^\circ\text{C}$) – multif. část</i> | 0,15 | $\mu\text{m}/\text{m}$ | rovnoměrné | 1,0 | | 0,15 |
| <i>$\Delta l \Delta t$ pásky při $\Delta t=0,3^\circ\text{C}$ vliv nejistoty za teplotní roztažnost invarové pásky při změně teploty měřidla o $0,3^\circ\text{C}$</i> | 0,6 | $\mu\text{m}/\text{m}$ | rovnoměrné | 1,0 | | 0,6 |
| <i>Δl navedení</i> | 7 | μm | normální | 1,0 | 7 | |
| <i>Δl koincidence</i> | 5 | μm | normální | 1,0 | 5 | |

| | | | | | | |
|---|-------|------------------------|------------|-----|-----|-------|
| <i>Δl Δp etalonu (vliv na vyhodnocenou délku etalonem za změnu tlaku) – multif. část</i> | 0,134 | $\mu\text{m}/\text{m}$ | normální | 1,0 | | 0,134 |
| <i>Δl vliv nevodorovnosti základny na úseku 3 m</i> | 0,014 | $\mu\text{m}/\text{m}$ | normální | 1,0 | | 0,014 |
| <i>Δl vliv nevodorovnosti měřidla (max. 0,5 mm)</i> | 0,014 | $\mu\text{m}/\text{m}$ | rovnoměrné | 1,0 | | 0,014 |
| <i>Δl vliv příčné odchylky v zařazení měřidla 2 mm/3m</i> | 0,22 | $\mu\text{m}/\text{m}$ | normální | 1,0 | | 0,22 |
| <i>Celková nejistota</i> | | | | | 8,6 | 1,0 |

Rozšířená nejistota $U = 2 \cdot u = Q(18,0; 2,0 \cdot L_{[m]}) \mu\text{m}$

U páru třímetrových invarových nivelačních latí Leica GPCL3 výr. č. 33140 a 33383 byla stanovena metrologická návaznost před provedením nivelačních prací v terénu s tím, že délky průměrných laťových metrů byly stanoveny v hodnotách $-4 \mu\text{m}$ a $+3 \mu\text{m}$ pro lať ve výše uvedeném pořadí, určené se středními odchylkami laťového metru, nahodilými odchylkami dělení latí a rozšířenou nejistotou měření viz. KL č. 39849/2016 v Příloze č. 3.

Opakovaná kalibrace byla provedena po provedení VPN a délky průměrných laťových metrů byly stanoveny pro pořadí výše uvedených nivelačních latí v hodnotách $+2 \mu\text{m}$ a $-1 \mu\text{m}$, viz. KL 40171/2016 v Příloze č. 4.

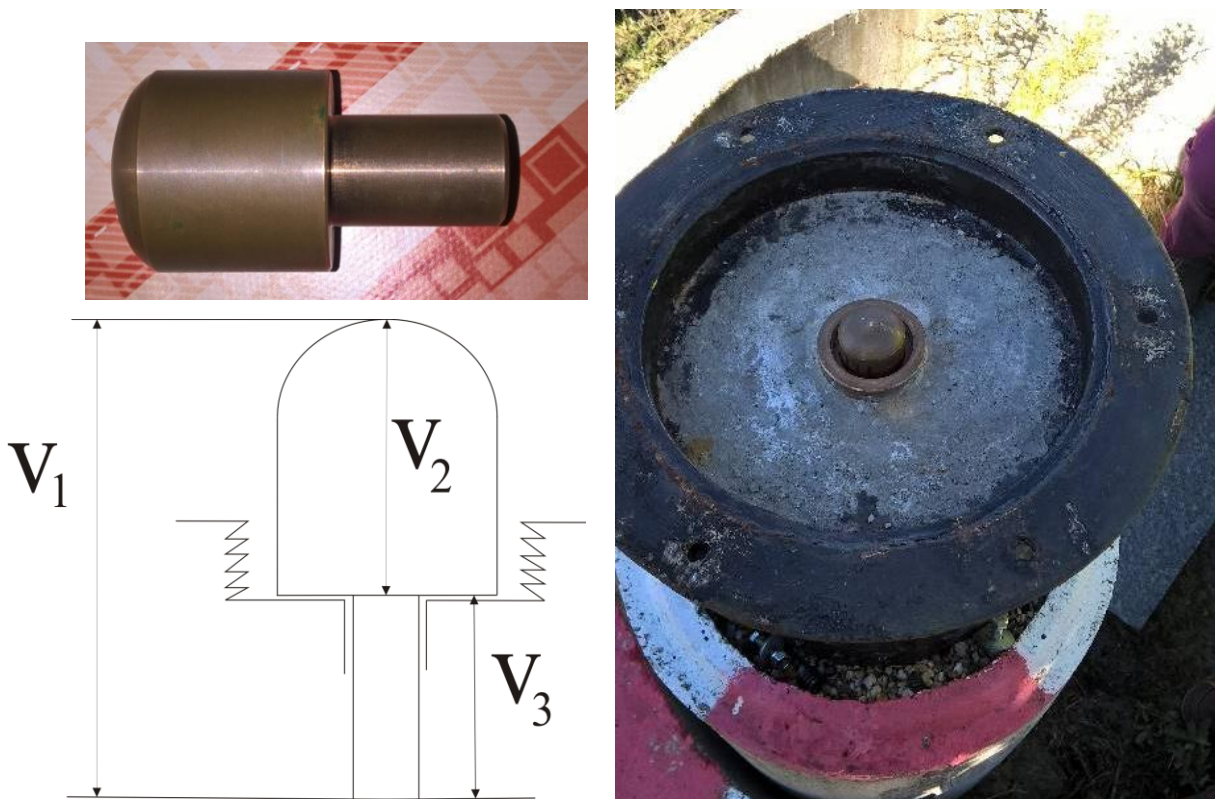
Rozšířená nejistota měření je při tom dána hodnotou $U = Q(18,0; 2,0 \cdot L_{(m)}) \mu\text{m}$.

Provedená opakovaná metrologická návaznost - kalibrace, hovoří o dobré a vyhovující stálosti délkových charakteristik obou nivelačních latí po dobu prováděné VPN pro 2 body ZGS.

2.3 Stanovení parametrů metrologické návaznosti pro nivelační pořad velmi přesné nivelace délky 1 km

V souvislosti s řešením programu a s konkrétními přípojovacími podmínkami u 2 vybraných bodů ZGS (Praha, Plzeň), délky přípojovacích měření převyšují v obou případech délku 1 km a sice 2,6 a 3,4 km, jsou pro další hodnocení využity oba nivelační pořady.

Nivelovanou výšku nucené centrace je nutné redukovat o výšku v_2 příslušného přípravku pro nivelaci, viz. obr. 5. Ke každému bodu ZGS (jeho nucené centrace) je v páru příslušná centrační tyč a přípravek pro nivelaci. Proto je nutné znát výšku v_2 příslušného přípravku pro nivelaci pro každý bod ZGS.



Obr. 5 Přípravek pro nivelaci bodu ZGS Plzeň (nucená centrace).

Pro práce ve výškovém poli 1. řádu jsou stanovena následující kritéria přesnosti:

- 1) Odchylka mezi nivelačním měřením ve směru tam a zpět nesmí v nivelačním oddílu překročit hodnotu

$$\rho^{\max} = 1,5 \sqrt{R}, \quad (1)$$

kde R je délka nivelačního oddílu v km a výsledek je vyjádřen v mm. Při překročení stanoveného kritéria se opakuje měření v obou směrech.

- 2) Kvalitu měření charakterizuje základní směrodatná kilometrová odchylka obousměrné nivelace

$$m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{n_R} \sum \frac{\rho^2}{R}}, \quad (2)$$

kde n_R je počet oddílů a ρ je rozdíl naměřených převýšení ve směru tam a zpět

$$\rho = \Delta H^T + \Delta H^Z.$$

- 3) Mezní hodnotu směrodatné odchylky m lze vypočítat ze vztahu

$$\bar{m} = 0,40 + \frac{0,71}{\sqrt{n_R}}. \quad (3)$$

Mezní hodnoty byly stanoveny na základě výsledků vyrovnání původních nivelací I. řádů ČSJNS z let 1939-1948. V současné době probíhá nivelace v nesrovnatelně

obtížnějších podmínkách (asfaltový povrch silnic, dopravní frekvence na silnicích, atd.) a uvedené mezní hodnoty je již prakticky obtížné dodržet. Tato okolnost je zohledněna při připuštění překročení mezní hodnoty odchylky, avšak maximálně o 15%.

- 4) Střední směrodatná odchylka obousměrné nivelace pro celý nivelační pořad či úsek je stanovena

$$m_L = m \sqrt{L}, \quad (4.6)$$

kde L je délka nivelačního pořadu či úseku v km.

- 5) Odchylka mezi daným a nově změřeným převýšením kontrolně měřeného oddílu nesmí překročit hodnotu

$$2,0 + 1,5 \sqrt{R}, \quad (4.7)$$

kde R je délka kontrolně měřeného oddílu v km a výsledek je vyjádřen v mm.

2.4 Provedení velmi přesné nivelace

Pro vlastní metodiku výškového propojení bodů ZGS, stanic CZEPOS a stanic národního doplnění ECGN je využita schválená metodika vypracovaná autory : Martin Pitoňák, Michal Šprlák a Pavel Novák, jako výstup řešení TB02CUZK003V005, tj. 2. etapy řešení projektu TB02CUZK003 „Integrace polohových, výškových a tíhových základních bodových polí České republiky“, vytvořené na Západočeské univerzitě v Plzni, na Fakultě aplikovaných věd v roce 2015 s finanční podporou Technologické agentury ČR, programu BETA.

V uvedené metodice je pro připojení bodů ECGN a ZGS na základní výškové bodové pole ČR jako nejvhodnější pro použití uvedena metoda geometrické nivelace ze středu, konkrétně velmi přesná nivelace (VPN).

VPN při dodržení určitých zásad má vysokou vnitřní přesnost (řádově 0,1 mm). Principem nivelace je určení výškového rozdílu ΔH dvou nepříliš vzdálených bodů A a B určením odečítáním polohy vodorovné přímky na latích s dělením.

Výšky bodů ZGS, jejich excentrické gravimetrické body a body ECGN se připojují vždy minimálně ze dvou nejbližších bodů základního výškového bodového pole.

Metrologická návaznost měřidel musí splňovat podmínky stanovené Metrologickým řádem Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČUZK) [5].

Při vlastním provádění velmi přesné nivelace je dbáno na splnění zásad počtu jedné nebo sudého počtu sestav v nivelačním oddíle, maximální excentricity stanoviště přístroje do 0,5 m, využití dvojice (páru) nivelačních latí, s výjimkou využití jen jedné nivelační latě pro nivelační oddíl sestávající z jediné sestavy. Nivelací oddíl se měří celý najednou. Měření je možno přerušit pouze na nivelačním bodě. Pořadí nivelačních latí, které se staví na značku, se v opačném směru měření zamění. Při měření digitálním nivelačním přístrojem s kompenzátořem a nivelačními latěmi s kódovou stupnicí se postupuje podle technologie určené výrobcem, vždy se začíná čtením na zadní lati. Dle ustanovení výrobce zařízení je prováděna jednoduchá nebo vícenásobná registrace. Největší přípustná délka záměry je 40 m. Záměra má přitom být alespoň 0,8 m nad terénem. Při záměrách kratších než 20 m může

výška záměry nad terénem poklesnout úměrně délce záměry až na polovinu uvedené hodnoty. Delších záměr lze použít jen při překonávání přírodních nebo umělých překážek. Nivelační oddíl se pro měření v obou směrech rozdělí na stejný, a to sudý počet sestav.

Při provádění VPN je nutno dále dbát na využití předepsaných laťových podložek, latě stavět svisle, chránit nivelační přístroj před přímým osvětlením sluncem a před nárazy větru, měřit jen v době klidného a zřetelného obrazu, mezi dopolední a odpolední observaci vložit nejméně dvouhodinovou přestávku, začínat s měřením nejméně půl hodiny po východu slunce a končit alespoň půl hodiny před jeho západem, na nucených centracích ZGS provést přepočtení výšky o výšku redukce.

Do výsledků měření je potřebné zavádět příslušné opravy z kalibrace:

- nivelační přístroj - automatizované zavedení,
- opravu za délku laťového metru u nivelačních latí,
- opravu za vliv teploty na délku invarového pásku

a veškeré pomůcky pro měření musí vyhovovat pro provádění VPN.

Zápisník měřených převýšení pro připojení bodu ZGS Praha
Nivelační pořad BC

| Bod | čas | T | kód | h | R | přes. | datum |
|------|-------|----|------|-----------|-------|-------|-----------|
| 24.4 | 06.45 | 13 | 3120 | 0.00000 | 0.000 | 0 | 15.7.2016 |
| 24.3 | 06.50 | 13 | 3120 | 0.83915 | 0.027 | 1 | 0.0.0 |
| 24.2 | 07.00 | 13 | 3120 | -2.12429 | 0.077 | 2 | 0.0.0 |
| 24.1 | 07.00 | 13 | 3120 | -0.49093 | 0.009 | 1 | 0.0.0 |
| 24.2 | 07.05 | 13 | 3110 | 0.49083 | 0.009 | 1 | 0.0.0 |
| 24.3 | 07.15 | 13 | 3110 | 2.12443 | 0.077 | 2 | 0.0.0 |
| 24.4 | 07.25 | 14 | 3110 | -0.83914 | 0.026 | 1 | 0.0.0 |
| 24.4 | 07.30 | 14 | 3110 | 0.00000 | 0.000 | 0 | 0.0.0 |
| 25.1 | 08.00 | 14 | 3110 | -10.45687 | 0.686 | 8 | 0.0.0 |
| 26.1 | 08.20 | 14 | 3110 | -6.51021 | 0.542 | 8 | 0.0.0 |
| 27 | 09.00 | 15 | 3110 | -4.00982 | 0.791 | 10 | 0.0.0 |
| *28 | 09.15 | 15 | 3110 | 0.39291 | 0.216 | 4 | 0.0.0 |
| 28a | 09.25 | 16 | 3110 | 0.17110 | 0.065 | 1 | 0.0.0 |
| 28 | 09.30 | 16 | 3110 | -0.17151 | 0.065 | 1 | 0.0.0 |
| *27 | 09.45 | 16 | 3110 | -0.38965 | 0.217 | 4 | 0.0.0 |
| 28 | 10.00 | 16 | 3110 | 0.38960 | 0.217 | 4 | 0.0.0 |
| 27 | 10.10 | 16 | 3110 | -0.38926 | 0.217 | 4 | 0.0.0 |
| 27 | 14.45 | 18 | 3110 | 0.00000 | 0.000 | 0 | 0.0.0 |
| 26.1 | 15.15 | 18 | 3110 | 4.00903 | 0.791 | 10 | 0.0.0 |
| 25.1 | 16.15 | 18 | 3110 | 6.51057 | 0.542 | 8 | 0.0.0 |
| 24.4 | 16.10 | 17 | 3110 | 10.45552 | 0.686 | 8 | 0.0.0 |

(c)2002 program Nivelace, vygenerováno: 18.7.2016 13:52:56.

Uzávěr: +1.5 mm, 78 přestav, celková délka niv. pořadu 5.260km (2,630km)

m = 0,46 mm/km m = 0,085 mm/přestavy

**Zápisník měřených převýšení pro připojení bodu ZGS Plzeň
Nivelační pořad BI**

| Bod | čas | T | kód | h | R | přes. | datum |
|------|-------|----|------|-----------|-------|-------|-----------|
| 16.4 | 15.15 | 24 | 2110 | 0.00000 | 0.000 | 0 | 18.7.2016 |
| 16.5 | 15.35 | 24 | 2110 | 13.42519 | 0.372 | 10 | 0.0.0 |
| 16.6 | 15.40 | 24 | 2210 | -0.89539 | 0.011 | 1 | 0.0.0 |
| 17.2 | 16.00 | 24 | 2210 | -0.93923 | 0.229 | 8 | 0.0.0 |
| 17.3 | 16.25 | 24 | 2210 | 5.76136 | 0.602 | 10 | 0.0.0 |
| 18.7 | 16.50 | 24 | 2210 | -1.97430 | 0.346 | 8 | 18.7.2016 |
| 18.8 | 16.55 | 24 | 2210 | 0.41806 | 0.014 | 1 | 18.7.2016 |
| 18.7 | 17.00 | 24 | 2210 | -0.41802 | 0.014 | 1 | 0.0.0 |
| 17.3 | 17.15 | 24 | 2210 | 1.97450 | 0.346 | 8 | 0.0.0 |
| 17.2 | 17.45 | 24 | 2210 | -5.76039 | 0.602 | 12 | 0.0.0 |
| 16.6 | 18.05 | 24 | 2210 | 0.93947 | 0.229 | 8 | 0.0.0 |
| 16.5 | 18.10 | 24 | 2210 | 0.89540 | 0.021 | 1 | 0.0.0 |
| 16.4 | 18.30 | 24 | 2210 | -13.42468 | 0.372 | 10 | 0.0.0 |
| 16 | 19.15 | 23 | 1210 | -19.14990 | 0.688 | 14 | 0.0.0 |
| 16 | 06.45 | 16 | 1110 | 0.00000 | 0.000 | 0 | 19.7.2016 |
| 14.2 | 08.20 | 16 | 1110 | -3.23416 | 0.805 | 12 | 0.0.0 |
| 13.2 | 07.50 | 17 | 1110 | -8.98408 | 0.364 | 7 | 0.0.0 |
| 14.2 | 08.15 | 18 | 1110 | 8.98427 | 0.368 | 8 | 0.0.0 |
| 16 | 08.45 | 19 | 1110 | 3.23412 | 0.805 | 12 | 0.0.0 |
| 16.4 | 09.20 | 20 | 1110 | 19.15020 | 0.689 | 14 | 19.7.2016 |

(c)2002 program Nivelace, vygenerováno: 20.7.2016 13:47:16.

Uzávěr: +2.4 mm, 145 přestav, celková délka niv.pořadu 6.877km
(3,4385km)

m = 0,65 mm/km m = 0,099 mm/přestavy

2.5 Stanovení doplňujících parametrů metrologické návaznosti

Základním kritériem pro hodnocení velmi přesné nivelace je z praktického hlediska charakteristika přesnosti určení převýšení mezi dvěma body při jednom staničení přístroje, která je charakterizována empirickou hodnotou úplné střední chyby $m_1 = 0,05$ mm. Úplná střední chyba v určení převýšení pozorovaných bodů je potom $m_2 = m_1 \cdot \sqrt{2} = 0,07$ mm. Mezní chyba, která nesmí být při měření překročena, se stanoví podle výrazu $\delta \leq t \cdot m_i$, kde $t=3$ je interval konfidence (normovaná hodnota) pro podmínku, kdy odchylky nepřekročí tuto mez v 99,73 %.

V rámci řešení byla proto pozornost věnována i:

- kontrole vyhodnocení koeficientů a směrodatných odchylek pro vyrovnávací přímku pro různá modelová řešení (simulace), kdy pro vyhodnocení byly vynechány první měřené údaje na lati a charakteristiky pro latě byly vypočteny bez těchto prvních údajů na latích (0,4m od patky latě). Tato okolnost se neprojevila u obou uvedených nivelačních latí větším vlivem než hodnotou do 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ u parametru laťového metru.
- projevu četnosti měření na lati, kdy pro vyjádření vlivu četnosti měření na lati byly porovnány výsledky měření na lati v intervalu cca 5 cm a dále výsledky s intervalem 10 cm. V tomto případě se hodnota laťových metrů liší maximálně o 1 $\mu\text{m}/\text{m}$.
- koeficientu roztažnosti použitého invaru na nivelační lati. Zde je nutné konstatovat, že v závislosti na určení koeficientu teplotní roztažnosti invarových pásků u kódových 3m invarových nivelačních latí GPCL3 s výrobními čísly 33140 a 33383. Měření bylo provedeno bezprostředním určením aktuálních délek měřidla při změně teploty okolního prostředí v teplotním rozmezí 18,0°C až 49°C s využitím laserinterferometru, teplotního čidla a kamery pro navedení. Vlastní měřidla se nacházela uvnitř teplotně odstíněného prostoru s průhledy u sledovaného délkového úseku 2798,5 mm. Na základě provedených měření byly určeny koeficienty teplotní roztažnosti invaru u nivelační latě č. 33 140 v hodnotě 3,26 . $^{\circ}\text{K}^{-1}$. Standardní nejistota určení koeficientu je odhadnuta hodnotou $u_i = 0,40 . ^{\circ}\text{K}^{-1}$.
- vlivu rozdílu délky laťového metru nivelační latě při kalibraci latě v horizontální a vertikální poloze. Tato záležitost byla sledována v dřívějších letech, kdy bezprostředně po kalibraci nivelačních latí v KL Uni BW Mnichov (vertikální poloha) byl tento pár nivelačních latí kalibrován v KL VÚGTK v horizontální poloze. Rozdíl stanovených délek laťových metrů při tom nepřevyšoval 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$. Zde je nutno podotknout, že tato okolnost platí pro případ, kdy je vlastní lať v pořádku a napínací zařízení zcela funkční.

2.6 Závěr

V metodice jsou uvedeny způsoby určení charakteristik měřidel, jejichž hodnoty mohou ovlivnit výslednou přesnost vlastní provedení VPN. Jak bylo uvedeno v úvodu, zeměměřické činnosti prováděné v rámci správy a údržby Základní geodynamické sítě patří k činnostem prováděným ve veřejném zájmu. Z tohoto hlediska je nezbytné, aby byly při těchto činnostech splněny požadavky právních a technických předpisů, které zeměměřické činnosti určitým způsobem regulují.

3 Měření tíhového zrychlení a jeho určení pomocí absolutního, popřípadě relativního gravimetru

Tíhové zrychlení (g) je na bodech Základní geodynamické sítě (ZGS) doposud určováno pomocí relativních gravimetrů, a to určením tíhového rozdílu mezi bodem ZGS a vybraným bodem gravimetrické sítě. Stanovení geodynamických změn je ale tímto způsobem závislé i na odpovídajícím zachycení dynamiky gravimetrické sítě. Nelze předpokládat, že bude kompletní gravimetrická síť zaměřena během 2-3 let a tudíž bude možné považovat navázání přímo na gravimetrickou síť za měření "etapové" ve smyslu sledování geodynamických změn.

Gravimetrická síť je vztažena rozměrově i hladinově na absolutní body, které jsou v síti opakovaně určovány pomocí státního etalonu tíhového zrychlení (ECM 120-3/08-040,

absolutní gravimetr FG5 č. 215), případně absolutního gravimetru, který je na tento etalon navázán. Státní etalon není vhodný k měření v polních podmínkách, ale v dohledné době nelze vyloučit přímé měření gravimetrem jiného typu. Předmětem této metodiky bude stanovení metrologické návaznosti dvou typů určení tíhového zrychlení na bodech ZGS včetně odhadu odpovídajícího rozpočtu nejistot. Jedná se o následující metody určení tíhového zrychlení na bodech ZGS:

- a) přímé měření absolutním gravimetrem,
- b) určení tíhového rozdílu mezi absolutním bodem a bodem ZGS relativním gravimetrem.

Metoda zaměření sítě pouze relativními gravimetry není v této metodice záměrně uvedena, protože se jedná pro daný účel (etapové měření v celorepublikového rozsahu) o nevhodnou metodu jak z důvodu její časové náročnosti, tak z důvodu charakteru výsledků měření, kterými jsou pouze změny relativních tíží na měřených bodech.

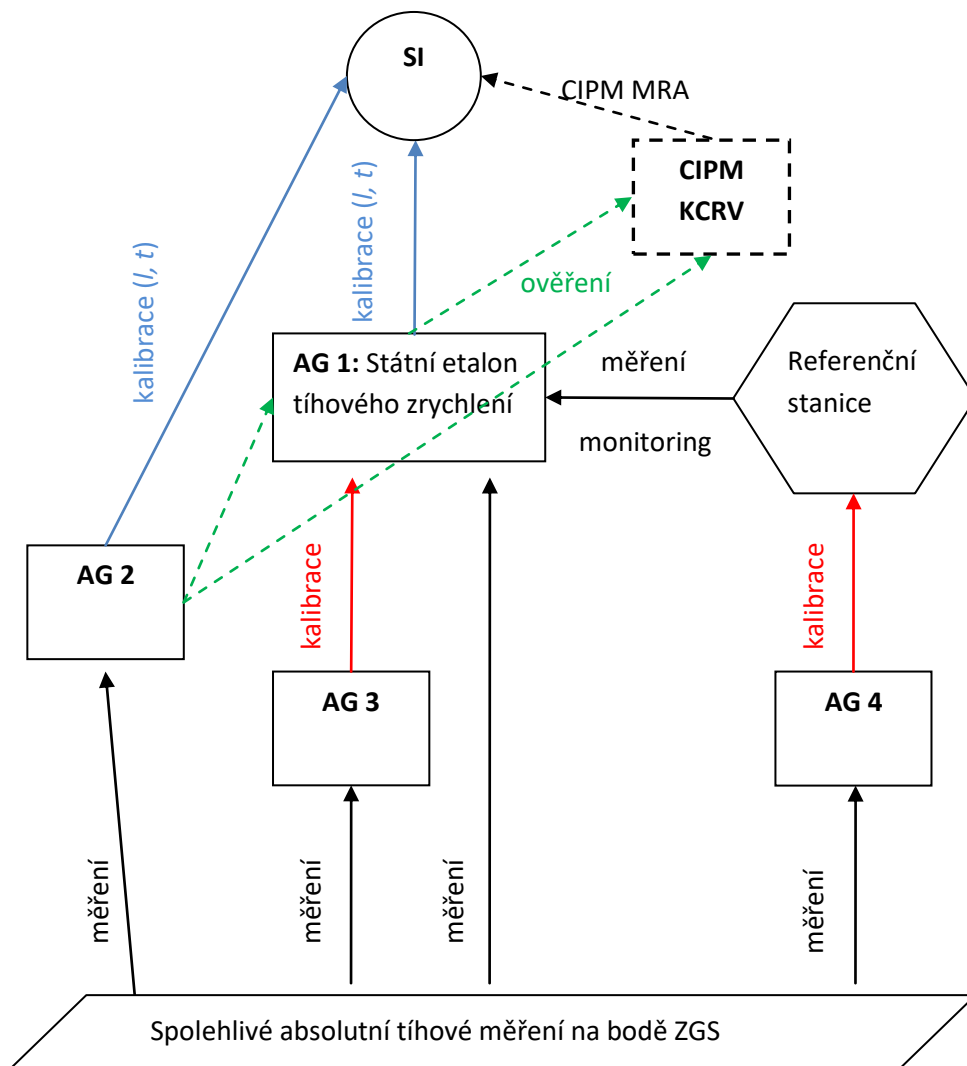
Při měření ZGS je hledaným signálem jev geodynamický a vlivy environmentální (zejména z vlivu lokální a globální hydrologie) chápeme jako signál rušivý. Z tohoto důvodu je u dvou diskutovaných metod měření ZGS "a)", "b)" potřebné kromě nejistot ze samotného měření a navázání přes řetězec kalibrací, odhadnout i nejistotu z variability environmentálních jevů v místě měření. Výsledky tíhových měření (včetně odhadů příslušných nejistot), které jsou vztaženy ke konkrétnímu datu měření, obsahují korekce z pohybu pólů, zemských slapů a anomálních atmosférických hmot [12]. Vliv globálních hydrologických vlivů lze započítat např. metodou uvedenou ve [9]. Nicméně odhad zejména lokálních hydrologických vlivů [3] je problematický a z tohoto důvodu je potřebné příslušnou časovou variabilitu výsledků zohlednit v rozpočtech nejistot při analýze opakovaných měření [13]. Lokální i globální hydrologické vlivy mají charakter sezónních variací. Zajímají-li nás změny tíhového zrychlení v důsledku regionální geodynamiky, pak lze částečně přispěvek hydrologických vlivů ve změnách g snížit např. měřeními ve stejném období v roce. Vhodné je také stanovit nejistotu z lokálních hydrologických vlivů určením citlivosti měřené stanice na proměnlivé hydrologické parametry (změna hladiny podzemní vody, půdní vlhkosti atd.) pomocí měření tíhového zrychlení v očekávaných extrémech (jaro a podzim). V níže uvedených odhadech nejistot je přispěvek nejistoty z environmentálních jevů stanoven hodnotou $3 \mu\text{Gal}$, podle [13].

V tomto textu je nejistotou měření míněna standardní nejistota měření, t.j. koeficient konfidence $k=1$ (hladina významnosti 32%).

3.1 Měření absolutním gravimetrem na bodě ZGS

Možnosti metrologické návaznosti absolutních měření jsou znázorněny formou čtyř postupů zobrazených a popsáných na obr. 1. Tyto metody jsou konzistentní s dokumentem [15], který je klíčovým při tvorbě Globálního tíhového systému podle rezoluce č. 2 IAG, 2015 [16].

Poznamenejme, že např. metoda AG 1, t.j. přímého měření státního etalonu na bodech ZGS je v současné době nerealizovatelná z důvodu větších rozměrů státního etalonu (gravimetru FG5-215) než je stabilizace gravimetrických bodů ZGS. Nicméně nelze vyloučit, že bude státní etalon eventuálně rozšířen o gravimetr FG5X-251 (nebo jiný v budoucnosti) a tedy metoda AG1 bude použitelná. Rozpočet nejistot pro jednotlivé postupy měření je v Tab. 5. Uvažováno je s nejlepší nejistotou moderních gravimetrů, která je pro státní etalon $2,4 \mu\text{Gal}$. Tabulka obsahuje i přispěvek nejistoty z vertikálního gradientu tíhového zrychlení. V případě, že je měřeno pokaždé se stejným typem gravimetru s podobnou efektivní výškou, tak je tento přispěvek bezpředmětný. V dlouhodobém horizontu to ale nelze předpokládat a rozsahy referenčních výšek gravimetrů jsou uvažovány asi do 1 m. Pro nejistotu korekce na průměrnou referenční výšku při nejistotě gradientu $2 \mu\text{Gal/m}$ tak uvažujeme s přispěvkem nejistoty $1,0 \mu\text{Gal}$.



- AG 1:** Absolutní gravimetr (státní etalon tíhového zrychlení) s návazností na jednotky SI (přes kalibrace vlnové délky laseru a frekvence atomových hodin) ověřený na klíčovém porovnání absolutních gravimetrů
- AG2:** Absolutní gravimetr s návazností na jednotky SI ověřený vůči státnímu etalonu nebo na klíčovém porovnání
- AG 3:** Absolutní gravimetr kalibrováný vůči státnímu etalonu
- AG 4:** Absolutní gravimetr kalibrováný na referenční stanici, kde je tíhové zrychlení monitorované na základě opakovaných měření státního etalonu a supravodivého gravimetru

Obr. 6 Schéma návaznosti absolutních měření tíhového zrychlení na bodech ZGS

Tab. 5 Standardní nejistota určení tíhového zrychlení absolutním gravimetrem na bodech ZGS podle postupů AG 1, AG 2, AG 3 a AG 4 definovaných na obr.6

| Zdroj nejistoty | Příspěvek k nejistotě / μ Gal | |
|------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| | AG 1 / AG 2 | AG 3 / AG 4 |
| absolutní měření na bodě ZGS | 2,4 | 2,4 |
| kalibrace gravimetru | - | 1,2 |
| vertikální gradient | 1,0 | 1,0 |
| environmentální jevy | 3,0 | 3,0 |

| | | |
|-------------------|-----|-----|
| Celková nejistota | 4,0 | 4,1 |
|-------------------|-----|-----|

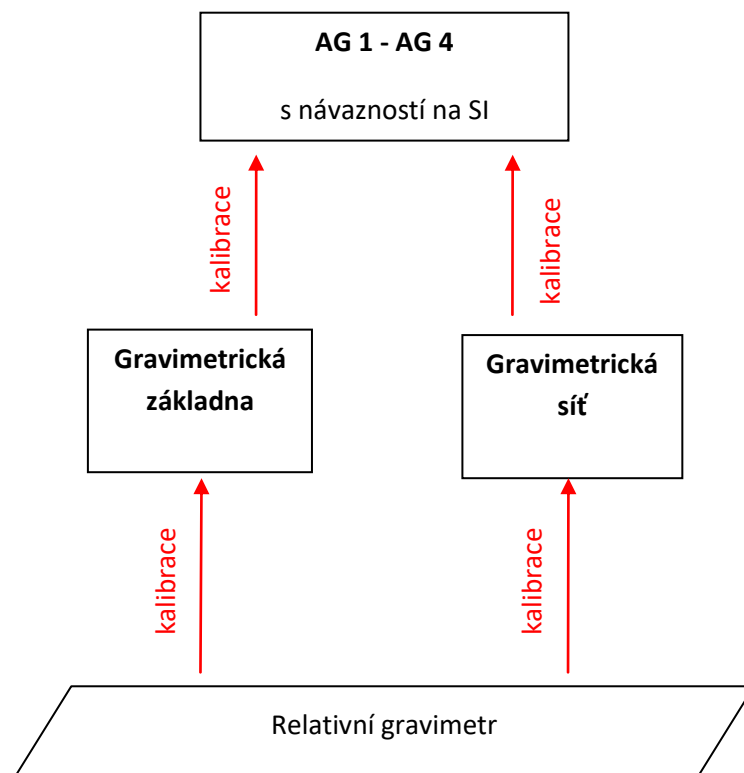
3.2 Určení tíhového rozdílu mezi absolutním bodem a bodem ZGS relativním gravimetrem

Tato metoda předpokládá 1) absolutní tíhové měření provedené podle schématu návaznosti v sekci 2 na absolutním tíhovém bodě společně s 2) měřením tíhového rozdílu mezi absolutním bodem a bodem ZGS pomocí relativního gravimetru. Návaznost relativních měření musí být zajištěna kalibrací relativního gravimetru na gravimetrické základně, nebo měřením v gravimetrické síti, viz obr. 7.

V rozpočtu nejistot je kromě nejistoty absolutního měření přirozeně potřebné zahrnout další příspěvky související s relativním měřením, které je předpokládáno provést na vzdálenosti do 50 km, čtyřnásobnou profilovou metodou. Nejistota relativních měření závisí na řadě faktorů jakými jsou kromě použitého gravimetru také podmínky měření (technický šum na měřeném bodě, teplotní variace během měření, transport gravimetru, atd.). Vnitřní přesnost měření (v rámci denního úseku) gravimetru CG5 lze podle [17] stanovit hodnotou 2,1 μGal . Nicméně vlivem dalších jevů (teplotní citlivost, mechanická hystereze, náklony atd.) uvedených v [17], které mohou působit systematicky v rámci denního úseku, byla nejistota relativního měření jedním gravimetrem vyčíslena hodnotou 4 μGal . Dále je potřebné uvážit rozdílné referenční výšky absolutního a relativního gravimetru. Hodnotu absolutního měření je potřebné vztáhnout do referenční výšky relativního měření, t.j. skrz výškový rozdíl asi 1 m, což při nejistotě gradientu 2 $\mu\text{Gal}/\text{m}$ bude mít příspěvek nejistoty 2,0 μGal . Obdobně na bodě ZGS je potřebné započít vliv gradientu, nicméně u relativních gravimetrů se bude jednat o rozdíly výšek do 0,1 m a zavedená korekce bude mít nejistotu asi 0,1 μGal . Příspěvek z nejistoty kalibrace byl vypočten z předpokladu průměrného měřeného tíhového rozdílu 30 mGal a nejistoty kalibrace 4E-5 (10 μGal na 250 mGal). Příspěvek environmentálních jevů je stejný jako v Tab.5, předpokládá se tedy, že absolutní a relativní měření proběhnou zároveň v průběhu několika dní. Nelze totiž předpokládat stejné lokální hydrologické vlivy na obou místech měření.

Tab. 6 Standardní nejistota v určení tíhového zrychlení absolutním gravimetrem na bodech ZGS podle metod definovaných v obr.6

| Zdroj nejistoty | Příspěvek k nejistotě / μGal |
|--|---|
| absolutní měření na tíhovém bodě | 2,4 |
| relativní měření 4 násobnou profilovou | 4,0 |
| kalibrace gravimetru | 1,2 |
| vertikální gradient na tíhovém bodě | 2,0 |
| vertikální gradient na bodě ZGS | 0,1 |
| environmentální jevy | 3,0 |
| Celková nejistota | 6,0 |



Obr. 7 Schéma návaznosti relativních měření tíhového zrychlení na bodech ZGS

3.3 Závěr

Vypracovány byly dvě metody návaznosti měření tíhového zrychlení na bodech ZGS včetně příslušných odhadů nejistot. Obě metody vycházejí z absolutních tíhových měření, přičemž první uvažuje o přímém měření absolutním gravimetrem na bodě ZGS. Tato metoda je v současnosti logisticky náročná (ale realizovatelná) z důvodu nutnosti přizpůsobit měření v polních podmínkách. Druhou metodou je kombinovaná metoda, kde jsou absolutní měření na bodech gravimetrické sítě doplněny o připojení bodů ZGS pomocí relativních měření. Z hlediska ověření metodiky byla provedena absolutní tíhová měření na vybraných třech bodech gravimetrické sítě, která jsou popsána a analyzována v [18]. Dosažené rozdíly v opakovaných měřeních jsou v souladu s vypočtenými nejistotami měření danými touto metodikou.

Absolutní měření tíhového zrychlení na třech bodech gravimetrické základny v roce 2016 je dokumentováno v souboru TZAG_2016_g.

Literatura:

[1] **Zákon č. 200/1994 Sb o zeměměřictví a o změně a doplnění některých zákonů souvisejících s jeho zavedením**, ve znění zákona č. 120/2000 Sb., zákona č. 186/2001 Sb. a zákona č. 319/2004 Sb., zákona č. 413/2005 Sb., zákona č. 444/2005 Sb., zákona č. 124/2008 Sb., zákona č. 189/2008 Sb., zákona č. 223/2009 Sb., zákona č. 281/2009 Sb., zákona č. 380/2009 Sb., zákona č. 350/2012 Sb. a zákona č. 257/2013 Sb.

[2] Vyhláška č. 31/1995 Sb, kterou se provádí zákon č. 200/1994 Sb., o zeměměřičství a o změně a doplnění některých zákonů souvisejících s jeho zavedením, ve znění vyhlášky č. 212/1995 Sb., vyhlášky č. 365/2001 Sb., vyhlášky č. 92/2005 Sb. a vyhlášky č. 311/2009 Sb.

[3] Nařízení vlády č. 430/2006 Sb. o stanovení geodetických referenčních systémů a státních mapových děl závazných na území státu a zásadách jejich používání, ve znění nařízení vlády č. 81/2011 Sb.

[4] Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii, který byl novelizován zákonem č. 20/1993 Sb., zákonem č. 119/2000 Sb., zákonem č. 13/2002 Sb. zákonem č. 137/2002 Sb. zákonem č. 226/2003 Sb., zákonem č. 444/2005 Sb., zákonem č. 481/2008 Sb., zákonem č. 223/2009 Sb., zákonem č. 155/2010 Sb., zákonem č. 18/2012 Sb., zákonem č. 85/2015 Sb.

[5] Metrologický řád resortu ČÚZK, č. j. ČÚZK 1558/2009-22, účinnost od 1. 9. 2009

[6] **IERS Conventions (2010)**. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). (IERS Technical Note ; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6

[7] **Návod pro správu geodetických základů České republiky** ze dne 21.9.2015, č.j. ČÚZK-10867/2015-22

[8] **ČSN 73 0415 Geodetické body (10.2010)**

[9] **DIN 18 703 Nivelační latě**

[10] **DIN 18 717 Velmi přesné nivelační latě**

[11] **ČSN 25 11 01 Priame oceľové dlžkové meradlá. Všeobecná ustanovenia**

[12] Kostecký J. (ml.), Pálinkáš V., Šimon Z. Měření tíhového zrychlení a absolutní gravimetr FG5 č. 215 na Geodetické observatoři Pecný Geodetický a kartografický obzor 48 (90), č.11, 2002, 205-214

[13] Pálinkáš V., Lederer M., Kostecký J. (ml.), Šimek J., Mojzeš M., Ferianc D., Csapó G. Analysis of the repeated absolute gravity measurements in the Czech Republic, Slovakia and Hungary from the period 1991–2010 considering instrumental and hydrological effects. Journal of Geodesy, 2013, Vol. 87, 29-42.

[14] Pálinkáš V., Kostecký J. (ml.), Dohnal M., Šanda M. Analýza hydrologických variací na Geodetické observatoři Pecný. Geodetický a kartografický obzor, ročník 56/98, 2010, číslo 5, 73-78.

[15] CCM (2015), CCM - IAG Strategy for Metrology in Absolute Gravimetry, http://www.bipm.org/wg/CCM/CCM-WGG/Allowed/2015-meeting/CCM_IAG_Strategy.pdf, http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/Travaux2015/02_Travaux_Comm_2_2015.pdf.

[16] IAG resolutions (2015), No. 1 (International Height Reference System) and No. 2 (Establishment of a Global Absolute Gravity Reference System), 2015, http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf

[17] Lederer M. Accuracy of the relative gravity measurement, Acta Geodyn. Geomater., Vol. 6, No. 3 (155), 383-390, 2009

[18] Pálinkáš V., Kostecký J. (ml.), Vařko M. Absolutní měření tíhového zrychlení na třech bodech gravimetrické základny v roce 2016. Technická zpráva č. 1256/2016, VÚGTK.

[19] Pitoňák M., Šprlák M., Novák P. Metodika pro výškové propojení bodů ZGS, stanic CZEPOS a stanic národního doplnění ECGN. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Univerzitní 8, Plzeň, 2015