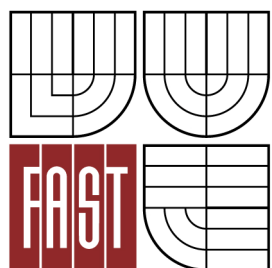




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

VYUŽITÍ PERMANENTNÍCH SÍTÍ GNSS PRO URČOVÁNÍ VÝŠEK

THE USING OF GNSS PERMANENT NETWORKS FOR HEIGHT DETERMINATION

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MICHAL KURUC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF WEIGEL, CSc.

BRNO 2013

Bibliografická citace

KURUC, Michal. *Využití permanentních sítí GNSS pro určování výšek*. Brno, 2013. 102 s., 2 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Weigel, CSc.

Abstrakt v českém jazyce

Disertační práce se zabývá zhodnocením výškové přesnosti při určování prostorové polohy technologií GNSS. V rámci práce byla realizována řada experimentálních měření zabývajících se problematikou GNSS a výšek. Prostřednictvím současného určování elipsoidických výšek určených technologií GNSS a nadmořských výšek z nivelačních měření byl modelován lokální průběh kvazigeoidu. Za účelem realizace navržených experimentálních měření byla vybudována síť výškových bodů na části území města Brna. Model kvazigeoidu určený z navržených experimentálních měření byl porovnán s vybranými modely kvazigeoidu a s lokálním modelem určeným z astronomických měření.

Jedním z dílčích výstupů této práce je návrh metodiky určování výšek pomocí současného měření technologií GNSS a nivelací. Tímto způsobem je možné určovat anebo ověřovat nadmořské výšky bodů pomocí měření technologií GNSS.

Abstrakt v anglickém jazyce

This Thesis deals with the evaluation of height accuracy of GNSS point positioning. Many experimental measurements aimed on GNSS and heights issues was realised within this work. The ellipsoidal heights were measured together with the orthometric heights and then the local Quasigeoid model was created. The network of height points was built to realisation of proposed measurements on the territory of the city Brno. The model of Quasigeoid from experimental measurement was compared with any other models of Quasigeoid and with local astronomical model.

The partial aim of this Thesis is the proposal of methodology of height determination by GNSS technology and levelling measurement together. We can determine or verify the orthometric heights by using GNSS measurement and this methodology.

Klíčová slova v českém jazyce

GNSS, RTK, výšky, nivelace, kvazigeoid

Klíčová slova v anglickém jazyce

GNSS, RTK, heights, levelling, Quasigeoid

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 8. 2013

.....

podpis autora

Poděkování:

Děkuji mému školieli doc. Ing. Josefu Weigelovi, CSc. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při vypracovávání disertační práce. Dále děkuji kolegovi Ing. Radovanu Machotkovi, Ph. D. za užitečné rady a konzultace.

V Brně dne 22. 8. 2013

.....

podpis autora

OBSAH

1	Úvod.....	7
2	Cíle práce	8
3	Současný stav.....	9
3.1	Problematika výšek	9
3.1.1	Globální model tíhového pole EGM2008.....	13
3.1.2	Moloděnského řešení	14
3.1.3	Normální výšky.....	15
3.2	Astronomicko-geodetická nivelace	16
3.3	Technologie GNSS.....	17
3.3.1	Metody měření technologií GNSS.....	18
3.3.2	Princip zpracování GNSS observací.....	19
3.3.3	RTK observace	21
3.3.4	Řešení ambiguit	22
3.3.5	Vliv troposféry a ionosféry	22
3.3.6	Vliv vícecestného šíření signálu (multipath)	24
3.3.7	Přenos korekcí RTK.....	25
3.3.8	Sít'ové RTK korekce	26
3.3.9	Doba inicializace RTK.....	27
3.4	Sítě permanentních GNSS stanic	27
3.4.1	Sít' CZEPOS.....	28
3.4.2	Sít' TopNET	29
3.4.3	Sít' Trimble VRS Now Czech.....	30
3.4.4	Mezinárodní síť permanentních GNSS stanic	31
3.4.5	Permanentní stanice TUBO	31
3.5	Modely kvazigeoidu.....	33
4	Určování průběhu kvazigeoidu na území města Brna	36
5	Testování služeb poskytovaných sítěmi permanentních GNSS stanic	38
5.1	Vyhodnocení dlouhodobé observace	38
5.1.1	Testovací měření přesnosti RTK observací.....	39
5.1.2	Zpracování statické observace	40
5.1.3	Zpracování RTK observací.....	40
5.1.4	Vyhodnocení polohové složky.....	41
5.1.5	Vyhodnocení výškové složky	42
5.1.6	Statistické vyhodnocení	45
5.1.7	Vyhodnocení observace statickou metodou	47

5.1.8	Kontrola kvality služeb sítě CZEPOS	49
5.1.9	Určování doby inicializace	50
5.2	Opakování dlouhodobé observace	52
5.2.1	Statistické vyhodnocení	55
5.2.2	Kontrola kvality služeb sítě CZEPOS	56
6	Současné určování výšek technologií GNSS a nivelací	58
6.1	Návrh držáku závěsné latě	58
6.2	Laboratorní určení výškových offsetů a testování držáku latě.....	61
6.3	Volba parametrů GNSS observace.....	63
6.4	Metodika současného měření technologií GNSS a nivelací	63
6.5	Varianty využití.....	64
6.6	Optimalizace metodiky současného měření výšek	65
6.7	Doporučený postup měření	66
7	Testování metody GNSS/nivelace	68
7.1	Sít' AGNES	68
7.1.1	Družicová měření.....	68
7.1.2	Nivelační měření.....	69
7.2	Určování kvazigeoidu	70
7.3	Porovnání s jinými modely kvazigeoidu.....	74
7.4	Testování kvazigeoidu pomocí kontrolního profilu.....	77
7.5	Příklady využití metody GNSS/nivelace ve světě	81
8	Porovnání modelu s astronomickým kvazigeoidem	83
9	Přínos práce.....	89
10	Závěr	91
	Použitá literatura	93
	Webové zdroje	96
	Seznam použitých zkratk	98
	Seznam obrázků.....	99
	Seznam tabulek	101
	Seznam příloh	102

1 ÚVOD

Svůj rozmach v současné době zažívají technologie mobilního mapování, 3D skenování a metody permanentního monitoringu staveb. Technologie globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) v současnosti přestává dominovat v popředí aktuálního vývoje, jako tomu bylo ještě v nedávné době. Nicméně většina výše zmíněných technologií v určité míře družicových měření využívá a nezřídka je určování prostorové polohy pomocí GNSS jejich nezbytnou součástí. Právě z důvodu všeobecné aplikovatelnosti technologie GNSS jsou neustále vyvíjeny nové možnosti jejího využití.

V geodetické praxi se tato technologie stala jednou z nejpoužívanějších metod při měření v terénu. To je jeden z důvodů, proč vzniká potřeba garantovat výsledky získané pomocí technologie GNSS, resp. snaha stanovit konkrétní postupy měření, které by zajistily určitou kvalitu výsledných souřadnic. Otázky související s přesností určení prostorové polohy technologií GNSS jsou díky tomu stále aktuální. Testování metod a postupů, pomocí kterých by se dalo dosáhnout zvýšení přesnosti výsledných souřadnic je i v dnešní době žádoucí.

Disertační práce se zabývá testováním přesnosti při určování výškové složky souřadnic technologií GNSS. Bylo využíváno jak měření statickou metodou, tak metodou měření v reálném čase – Real Time Kinematic (RTK), která je často využívanou metodou při měření družicovými metodami v praxi. Dále byl vyhodnocován vliv některých faktorů působících během měření, jako např. vliv denní doby, vliv použití služeb různých sítí permanentních stanic apod. Pro účely analýzy přesnosti družicových měření byly realizovány speciálně navržené experimenty, v rámci kterých byly vyhodnocovány jak dlouhodobé observace na jednotlivých bodech, tak GNSS observace na několika desítkách bodů se standardní délkou observace. Za tím účelem byly vybudovány testovací sítě, které se nacházejí na území města Brna a v jeho okolí.

2 CÍLE PRÁCE

V posledních několika letech dochází v České republice k rozvoji sítí permanentních GNSS stanic. Sice již nevznikají nové sítě, nicméně stávající sítě jsou neustále inovovány tak, aby podporovaly co nejvíce aktuálně dostupných globálních navigačních družicových systémů. Zvyšuje se počet služeb poskytovaných sítěmi permanentních stanic a také se zvyšuje kvalita těchto služeb.

Z legislativních důvodů jsou více upřednostňovány požadavky na polohovou přesnost, které jsou kladeny např. pro práci v katastru nemovitostí. Nicméně technologie GNSS je využívána i v ostatních aplikacích geodetických činností a často bývá využívána také pro určování výšek bodů. Technologie GNSS umožňuje získávat výšky bodů s nižší přesností než jejich polohu, nicméně v souvislosti s vývojem poskytovaných služeb se i kvalita určení výškové složky zvyšuje.

Tato práce si klade za cíl zhodnotit současný stav RTK služeb poskytovaných vybranými sítěmi permanentních GNSS stanic na území České republiky. Kvalita poskytovaných korekčních dat je nejčastěji charakterizována přesností, se kterou pomocí těchto dat získáme prostorové souřadnice určovaných bodů. Vedle této přesnosti lze služby rozlišovat také podle jejich dostupnosti, podle doby inicializace, podle způsobu generování korekčních dat atd. V rámci této práce byla navržena řada experimentálních měření, pomocí kterých byla testována nejen přesnost určování prostorové polohy, ale také další faktory, např. vliv dlouhodobé observace, doba inicializace dosažená pomocí vybraných RTK služeb apod.

Dále si tato práce klade za cíl doporučit na základě těchto testovacích měření optimální postup měření za účelem získání výsledků s kvalitní přesností výškové složky. K tomuto účelu a zároveň z důvodu potřeby kvalitního výškového bodového pole pro výše zmíněná testovací měření byla v rámci této práce vybudována síť výškových bodů na části území města Brna, která byla využita rovněž pro vytvoření modelu kvazigeoidu metodou GNSS/nivelace. Jedná se o lokální model kvazigeoidu pro vybranou část území města Brna. Přesnost tohoto modelu byla vyhodnocena pomocí porovnání s jinými modely dostupnými na daném území. Vedle globálních modelů kvazigeoidu, které jsou k dispozici pro území ČR, byl model porovnán také s modelem získaným z astronomických měření.

3 SOUČASNÝ STAV

Výšky bodů ve výškovém bodovém poli na území České republiky byly určovány pomocí nivelačních měření. Vedle metody geometrické nivelace existují i další metody, pomocí kterých lze určovat výšky resp. převýšení. Je to např. trigonometrické měření, hydrostatická nivelace, barometrické měření, fotogrammetrie nebo družicová měření. Zdaleka ne všechny metody však poskytují dostatečnou přesnost výsledků a také nejsou vždy vhodné pro určování výšek na rozsáhlém území států, popř. celého kontinentu.

Kromě požadavků na přesnost jsou také důležité ekonomické požadavky na měření, popř. na údržbu vybudovaných výškových bodových polí. Z tohoto pohledu již metoda nivelace nemusí být vždy tou nejvhodnější metodou. Často bývá pro určování výšek využívána některá z výše uvedených metod, v současné době je to zejména technologie GNSS. Pro některé aplikace v geodetické praxi je přesnost určování výšek pomocí družicových měření často dostačující. Výsledky získané tímto způsobem se postupem času neustále zkvalitňují v souvislosti s vývojem nových služeb, které jsou poskytovány prostřednictvím sítí permanentních GNSS stanic. Je bezesporu, že v některých případech, zejména při měření v extravilánu nebo v místech s řídkou hustotou nivelačních bodů, je oproti výše uvedeným metodám určování výšek technologie GNSS výhodnější především z hlediska menší časové náročnosti měření. Lze nalézt také lokality s vyloženě nepřístupným terénem, jako jsou bažinaté oblasti, těžko dostupné horské oblasti, popř. ostrovy vzdálené od břehu, kde nivelační měření využít ani nemůžeme.

V následujících kapitolách budou shrnuty základní charakteristiky metod určování výšek pomocí nivelace a pomocí družicových měření.

3.1 Problematika výšek

Výška je jednou ze tří souřadnic, kterými obvykle vyjadřujeme jednoznačnou polohu bodu na zemském povrchu. Jedná se o určitou vzdálenost tohoto bodu od zvolené vztažné plochy. Definice výšek proto úzce souvisí se skutečným tvarem Země. Z fyzikálního hlediska jsou výšky spjaty s tíhovým polem Země a jsou definovány pomocí odlehlosti jednotlivých hladinových ploch. Hladinová plocha je taková plocha, která spojuje místa se stejným tíhovým potenciálem W . Pro praktické výpočty bývá jedna z těchto ploch volena jako vztažná pro určování výšek a nazývá se geoid. Je to taková hladinová plocha, která se nejvíce blíží střední hladině vod oceánů. Z toho důvodu bývají výšky označovány jako nadmořské. Vzhledem k tomu, že střední hladina vod oceánů netvoří z fyzikálního hlediska hladinovou plochu s konstantním potenciálem, nelze tímto způsobem definovat vztažnou plochu jednoznačně. Prakticky bývá geoid realizován

hladinovou plochou, která prochází konkrétním zvoleným bodem. Fyzikální výšky jsou pak měřeny podél křivky, která protíná všechny hladinové plochy kolmo a nazývá se tížnice. [36]

Základní vztah mezi převýšením a tíhovým potenciálem popisuje Brunsův teorém:

$$dW = -gdh = \text{konst}, \quad (1)$$

kde dW označuje změnu tíhového potenciálu, g je velikost tíhového zrychlení v daném bodě a dh je elementární převýšení. [12]

Integrací tohoto vztahu můžeme určit odlehlost Δh konečně vzdálených hladinových ploch, měřenou podél tížnice. Tento postup výpočtu má po praktické stránce jednu nevýhodu, a sice předpokládá znalost hodnot tíhového zrychlení podél tížnice, většinou tedy pod zemským povrchem. Při praktickém výpočtu se vztah zjednodušuje zavedením hodnoty g_m , což je integrální střední hodnota tíhového zrychlení na daném úseku tížnice mezi bodem na geoidu a bodem na zemském povrchu. Tuto hodnotu nelze určit měřením, ale může být odhadnuta pomocí modelů rozložení hmot pod zemským povrchem.

Problematika výšek obecně souvisí s gravitačním účinkem Země na okolní tělesa. Z fyzikálního hlediska tento jev popisují Newtonovy gravitační zákony, které definují gravitační účinky hmotného tělesa. Číselně lze popsat velikost gravitačního vlivu prostřednictvím gravitačního potenciálu, který lze pro obecné, dokonale tuhé těleso definovat vztahem

$$V(P) = G \int_M \frac{dm}{r}, \quad (2)$$

kde G je Newtonova gravitační konstanta, M je hmotnost Země, dm je element této hmotnosti a r je vzdálenost od bodu, v němž potenciál určujeme. V případě rotujícího tělesa působí kromě gravitačního potenciálu v každém bodě také potenciál Q způsobený odstředivou silou. Výsledný tíhový potenciál W lze určit ze vztahu

$$W(P) = V(P) + Q(P). \quad (3)$$

Pro účely numerického vyjádření popisovaných hladinových ploch se používají složitější matematické modely, které mohou charakterizovat tíhové pole Země velmi detailně. Využívá se rozvoje harmonických funkcí, jejichž koeficienty jsou určovány pomocí Stokesových vzorců, popř. jejich modifikací. Tíhový potenciál potom můžeme vyjádřit v této podobě:

$$W(P) = \frac{GM}{\rho} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_0}{\rho} \right)^n (C_{nm} \cos m\Lambda + S_{nm} \sin m\Lambda) P_{nm}(\sin \Phi) + \frac{1}{3} \frac{\omega^2 \rho^3}{GM} [1 - P_{20}(\sin \Phi)] \right\}, \quad (4)$$

kde ρ je geocentrický průvodič bodu P , a_0 je velká poloosa referenčního rotačního elipsoidu, C_{nm} a S_{nm} jsou Stokesovy koeficienty, $P_{nm}(x)$ je asociovaná Legendrova funkce n -tého stupně a m -tého řádu a $\{\rho, \Phi, \Lambda\}$ jsou geocentrické (sférické) souřadnice. Podobným harmonickým rozvojem lze popsat také gravitační potenciál V . [36]

Je zřejmé, že používání skutečného tvaru Země je v praktických výpočtech značně složité. Z toho důvodu se zavádí takový popis tíhového pole, který je matematicky snáze definovatelný, a přitom co nejvíce odpovídá skutečnému tíhovému poli Země. Takové tíhové pole se nazývá normální tíhové pole a je definováno pomocí normálního tíhového potenciálu U . Vztažnou hladinovou plochou potom bývá například rotační elipsoid nebo sféroid.

Rozdíl mezi skutečným a normálním tíhovým potenciálem označujeme jako poruchový potenciál T , mezi těmito veličinami platí následující vztah

$$W(P) = U(P) + T(P). \quad (5)$$

Na základě znalosti poruchového potenciálu v bodech na ploše geoidu můžeme určit odlehlost geoidu a hladinového elipsoidu $N(P)$ pomocí vztahu

$$N(P) = \frac{T(P)}{\gamma(Q_0)}, \quad (6)$$

kde $\gamma(Q_0)$ je normální tíhové zrychlení na elipsoidu. Vztah mezi výškou nad elipsoidem $h(P)$ a výškou nad geoidem $H(P)$ je potom dán vztahem

$$h(P) = H(P) + N(P). \quad (7)$$

Pro účely implementace tíhového potenciálu v globálních modelech bývá tíhový potenciál $W(P)$ rozložen do dílčích složek

$$W(P) = W^g(P) + W^t(P) + W^a(P), \quad (8)$$

kde W^g je složka odpovídající gravitačnímu potenciálu, W^t je složka zahrnující vliv topografie a W^a je složka zahrnující vliv atmosféry.

Obdobným způsobem lze rozložit také odlehlost geoidu popř. velikost tížnicových odchylek. Pomocí spektrálního rozložení, jak uvádí např. Novák [28], lze oddělit nízkofrekvenční a vysokofrekvenční složky těchto veličin. Prahová hodnota, která bývá volena v závislosti na poloměru oblasti použité pro lokální integraci Stokesových

parametrů, je označena ℓ . Odlehlost geoidu lze potom rozložit na referenční složku N_ℓ a reziduální složku N^ℓ . Referenční složku lze určit sférickou aproximací

$$N_\ell(P) = \frac{GM}{R\gamma(Q_0)} \sum_{n=2}^{\ell} T_n(P), \quad (9)$$

kde R je poloměr koule, ke které jsou redukovány sférické harmonické přírůstky koeficientů T_n . Velikost reziduální složky lze vyjádřit pomocí její složky závislé na poruchovém potenciálu $N^{g,\ell}$ a složky závislé na topografickém reliéfu $N^{t,\ell}$, přičemž

$$N^{g,\ell}(P) = \frac{R}{4\pi\gamma(Q_0)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\psi_0} \Delta g^{g,\ell}(R, \alpha, \psi) S^\ell(\psi) \sin\psi d\psi d\alpha, \quad (10)$$

$$N^{t,\ell}(P) = \frac{R^2 G \rho}{2\gamma(Q_0)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\psi_0} \mathcal{J}\left(\frac{r_s(P')}{R}, \frac{r_s(P)}{R}, \psi\right) (\psi) \sin\psi d\psi d\alpha, \quad (11)$$

kde α, ψ jsou polární souřadnice integrovaného bodu vzhledem k integračnímu centru, r_s je poloměr geoidu v daném bodě a $\mathcal{J}(\kappa', \kappa, \psi)$ je normalizované integrační jádro. Podrobnější informace lze dohledat v publikaci [28].

Výslednou hodnotu odlehlosti geoidu lze potom psát ve tvaru

$$N(P) = N_\ell(P) + N^{g,\ell}(P) + N^{t,\ell}(P). \quad (12)$$

Velikost tížnicových odchylek lze vyjádřit rovněž pomocí referenční složky a reziduálních složek. Referenční složku lze psát ve tvaru

$$\xi_\ell(R, P) = -\frac{GM}{R^2\gamma(Q_0)} \sum_{n=2}^{\ell} \frac{\partial T_n(P)}{\partial \theta}, \quad (13)$$

$$\eta_\ell(R, P) = -\frac{GM}{R^2\gamma(Q_0) \sin \theta} \sum_{n=2}^{\ell} \frac{\partial T_n(P)}{\partial \lambda}. \quad (14)$$

Residuální složky závislé na poruchovém potenciálu potom nabývají tvar

$$\xi^{g,\ell}(R, P) = \frac{GM}{4\pi\gamma(Q_0)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\psi_0} \Delta g^{g,\ell}(R, \alpha, \psi) \mathcal{M}^\ell(\psi) \sin \psi d\psi \cos \alpha d\alpha, \quad (15)$$

$$\eta^{g,\ell}(R, P) = \frac{GM}{4\pi\gamma(Q_0)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\psi_0} \Delta g^{g,\ell}(R, \alpha, \psi) \mathcal{M}^\ell(\psi) \sin \psi d\psi \sin \alpha d\alpha, \quad (16)$$

kde $\mathcal{M}^\ell(\psi)$ je sférické Vening-Meineszovo integrační jádro dané vztahem

$$\mathcal{M}^\ell(\psi) = \mathcal{M}(\psi) + \sum_{n=2}^{\ell} \frac{2n+1}{n-1} P_{n,1}(\cos \psi), \quad (17)$$

kde $\mathcal{M}(\psi)$ je sférické Vening-Meineszovo jádro.

Residuální složky závislé na topografickém reliéfu nabývají tvar

$$\xi^{t,\ell}(R, P) = -\frac{1}{R} \frac{\partial N^{t,\ell}(P)}{\partial \theta}, \quad (18)$$

$$\eta^{t,\ell}(R, P) = -\frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial N^{t,\ell}(P)}{\partial \lambda}. \quad (19)$$

Výsledné hodnoty tížnicových odchylek potom lze psát ve tvaru [28]

$$\xi(R, P) = \xi_\ell(R, P) + \xi^{g,\ell}(R, P) + \xi^{t,\ell}(R, P), \quad (20)$$

$$\eta(R, P) = \eta_\ell(R, P) + \eta^{g,\ell}(R, P) + \eta^{t,\ell}(R, P). \quad (21)$$

3.1.1 Globální model tíhového pole EGM2008

V současné době již máme k dispozici výpočetní techniku, která umožňuje dostatečně detailně modelovat tíhové pole popsané v předchozí kapitole. V červenci roku 2008 byl představen globální model tíhového pole Země EGM2008. Tento model je definován prostřednictvím Stokesových normalizovaných bezrozměrných sférických harmonických koeficientů pro gravitační potenciál. S těmito koeficienty jsou spojeny hodnoty jejich směrodatných odchylek, které jsou rovněž implementovány v modelu. Model EGM2008 je kompletní do stupně a řádu 2159 a obsahuje doplňující sférické harmonické koeficienty rozšiřující jej do stupně 2190 a řádu 2159. Model je k dispozici ve dvou modifikacích, které se liší použitým slapovým modelem (Zero Tide a Tide Free), což se projevuje různou hodnotou harmonického koeficientu druhého stupně $\bar{C}_{20}$. Prostorové rozlišení modelu EGM2008 je $5' \times 5'$. Sférické harmonické koeficienty použité v modelu EGM2008 jsou konzistentní s následujícím vyjádřením gravitačního potenciálu

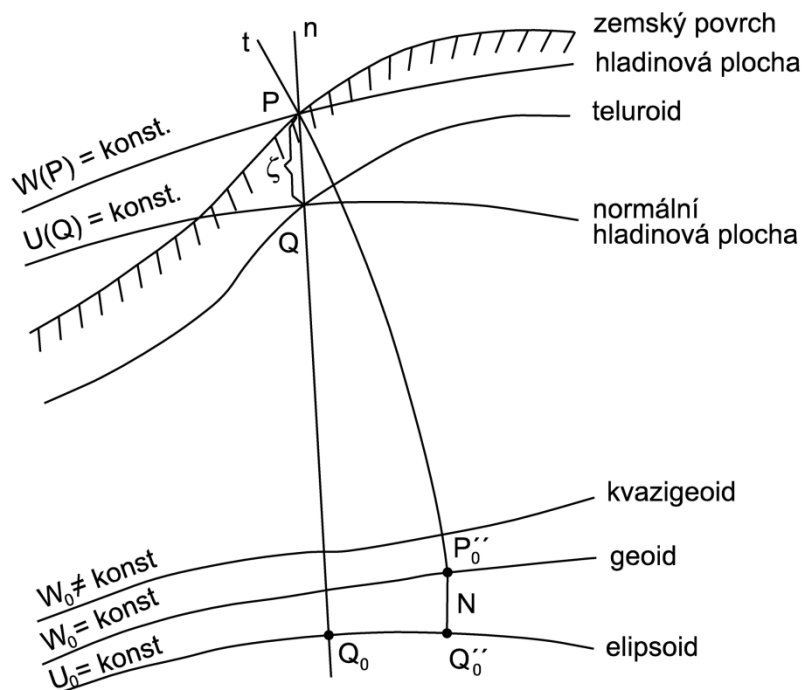
$$V(P) = \frac{GM_\oplus}{\rho} \left[1 + \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left(\frac{a_0}{\rho} \right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\Lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\Lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \Phi) \right]. \quad (22)$$

Model EGM2008 nahradil dosavadní model EGM96, který byl k dispozici do stupně a řádu 360. Jeho prostorové rozlišení bylo přibližně $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. [42]

3.1.2 Moloděnského řešení

Pokud chceme určovat výšky, které jsou přesně spjaty se skutečným tíhovým polem Země, tedy fyzikální výšky, narážíme na problém v určování hodnot tíhového zrychlení v místech mezi geoidem a zemským povrchem, popř. na problém v určení střední hodnoty g_m . Při jejich určování musíme vycházet z hypotéz o rozložení hmot pod povrchem, čímž dochází k určitým nepřesnostem oproti skutečnosti.

M. S. Moloděnskij navrhl jiný způsob určování výšek. Ve vztahu (7) zaměnil veličiny H a N , které nedokážeme přesně určit, za hodnoty H_Q a ζ , které sice nemají přímou geometrickou souvislost se skutečným tíhovým polem pod povrchem Země, ale je možné je určit na základě měření na zemském povrchu (viz obr. 1). H_Q je normální (Moloděnského) výška bodu Q a ζ je výšková anomálie. [36]



Obr. 1 – Znázornění ortometrické a elipsoidické výšky (upraveno dle [12])

Pokud budeme uvažovat, že v bodě P na zemském povrchu je tíhový potenciál $W(P)$ a normální potenciál $U(P)$, které jsou obecně různé. Na normále k hladinovému elipsoidu bude existovat bod Q takový, že $U(Q) = W(P)$. Množina všech těchto bodů Q se nazývá teluroid. Poruchový potenciál v bodě P bude potom $T(P) = W(P) - U(P)$. Výšková anomálie ζ je vzdálenost hladinové plochy $W(P)$ a odpovídající plochy $U(Q)$, z Brunsova teorému ji lze vyjádřit jako

$$\zeta = \frac{T(P)}{\gamma(Q)}, \quad (23)$$

kde $\gamma(Q)$ je normální tíhové zrychlení na teluroidu. Pokud bychom tuto výškovou anomálii vynesli nad referenční elipsoid, dostaneme se na plochu, která je blízká ke geoidu a nazývá se kvazigeoid. [12]

Odchylka tížnice od normály dosahuje prakticky hodnot v řádu několika jednotek až desítek úhlových vteřin. Pro účely určení vzájemného vztahu mezi výškou bodu P nad elipsoidem h a výškou nad kvazigeoidem H_Q můžeme tížnici a normálu ztotožnit, čímž získáme vztah podobný vztahu (7):

$$h = H_Q + \zeta. \quad (24)$$

3.1.3 Normální výšky

Normální výška v bodě A na zemském povrchu je podle Moloděnského teorie potom definována vztahem

$$H_Q^A = \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A g dh, \quad (25)$$

kde γ_m^A je střední hodnota normálního tíhového zrychlení. Pomocí úpravy, kdy nahradíme hodnotu g výrazem $g = \gamma_m^A + (g - \gamma_m^A)$ a dále $g = \gamma + (g - \gamma)$ dostaneme vztah

$$H_Q^A = \int_0^A dh + \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (g - \gamma_m^A) dh = \int_0^A dh + \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (\gamma - \gamma_m^A) dh + \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (g - \gamma) dh, \quad (26)$$

kde druhý člen posledního výrazu je normální ortometrická korekce (korekce sbíhavosti hladinových ploch normálního tíhového pole) a obsah závorky třetího členu je v podstatě tíhová anomálie na volném vzduchu.

Prakticky bývají výšky určovány na základě převýšení z nivelačních měření, přičemž je určován rozdíl výšek mezi koncovými body A , C nivelačního oddílu. Rozdíl normálních výšek získáme ze vztahu $\Delta H_Q^{AC} = H_Q^C - H_Q^A$, tedy

$$\begin{aligned} \Delta H_Q^{AC} = & \left(\int_0^C dh - \int_0^A dh \right) + \left(\frac{1}{\gamma_m^C} \int_0^C (\gamma - \gamma_m^C) dh - \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (\gamma - \gamma_m^A) dh \right) + \\ & + \left(\frac{1}{\gamma_m^C} \int_0^C (g - \gamma) dh - \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (g - \gamma) dh \right). \end{aligned} \quad (27)$$

Vzhledem k tomu, že jsou velikosti korekčních členů malé, můžeme místo hodnot γ_m^A a γ_m^C dosadit jejich střední hodnotu $\gamma_m = (\gamma_m^A + \gamma_m^C)/2$. Zjednodušeně můžeme normální převýšení vyjádřit pomocí vztahu

$$\Delta H_Q^{AC} = \Delta H_{niv}^{AC} + K_\gamma^{AC} + K_{\Delta g}^{AC} = \Delta H_{niv}^{AC} + K_Q^{AC}. \quad (28)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že normální převýšení získáme, když opravíme převýšení z nivelačních měření o normální ortometrickou korekci a o korekci z vlivu tíhových anomálií. [36]

3.2 Astronomicko-geodetická nivelace

Lokální průběh geoidu můžeme určovat na základě tížnicových odchylek. Budeme-li uvažovat principy Moloděnského teorie, získáme tímto způsobem průběh kvazigeoidu. Pro výpočet budou dále používány povrchové tížnicové odchylky definované dle Moloděnského teorie. Vzájemná závislost tížnicové odchylky a odlehlosti kvazigeoidu od referenčního elipsoidu je definována vztahem

$$d\zeta = -\bar{\varepsilon}ds, \quad (29)$$

kde $\bar{\varepsilon} = \bar{\xi} \cos \alpha + \bar{\eta} \sin \alpha$ je složka povrchové tížnicové odchylky podél spojnice bodů A a C , jejíž azimut je α . Hodnoty tížnicových odchylek se počítají z astronomických a geodetických souřadnic identických bodů podle vztahů

$$\bar{\xi} = \varphi - \bar{B}, \quad (30)$$

$$\bar{\eta} = (\lambda - \bar{L}) \cos \bar{B}, \quad (31)$$

přičemž $\bar{\xi}$ je meridiánová a $\bar{\eta}$ je příčná složka tížnicové odchylky, φ a λ jsou astronomické souřadnice, B je geodetická zeměpisná šířka na elipsoidu a $\bar{B}$, $\bar{L}$ jsou geodetické souřadnice na zemském povrchu opravené o vliv zakřivení tížnice podle vztahů

$$\bar{B} = B + \Delta B, \quad (32)$$

$$\bar{L} = L, \quad (33)$$

kde $\Delta B = -0,00017''h \sin 2B$ a h je nadmořská výška v m. [26]

Budeme-li předpokládat, že se velikost tížnicové odchylky $\bar{\varepsilon}$ mění lineárně a stejně tak hodnota tíhové anomálie na spojnici blízkých bodů $A - C$, dostaneme obecně používaný vzorec astronomické nivelace

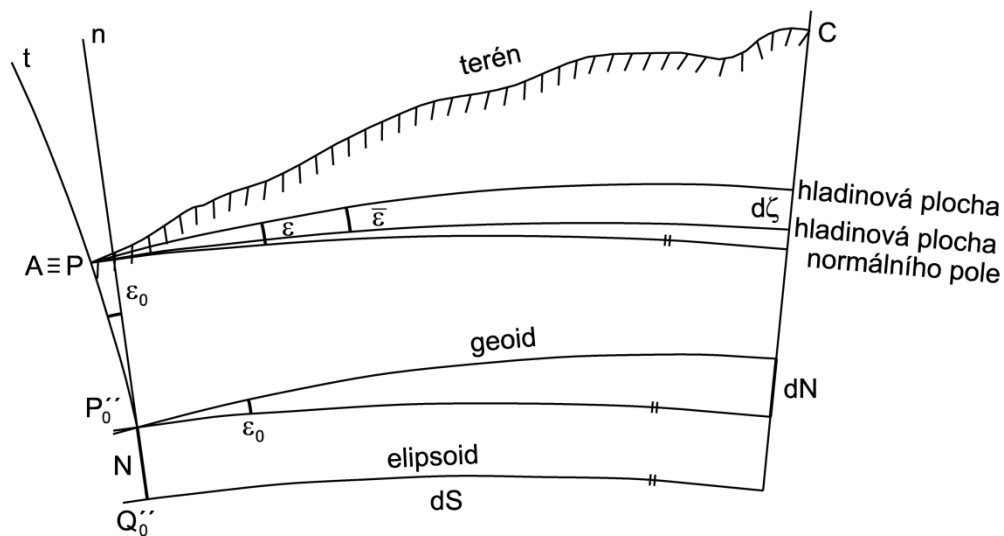
$$\zeta_C - \zeta_A \cong -\frac{\bar{\varepsilon}(A) + \bar{\varepsilon}(C)}{2} s_{A,C} - \frac{\Delta g(A) + \Delta g(C)}{2\gamma} \Delta h_{A,C}, \quad (34)$$

vyjadřující rozdíl výšky kvazigeoidu mezi dvěma blízkými body A , C . [26]

Odlehlost geoidu N_C v bodě C lze potom vyjádřit

$$N_C = N_A - \int_A^C \varepsilon_0 ds, \quad (35)$$

kde ε_0 je tížnicová odchylka v bodě P''_0 na geoidu. Grafické znázornění principu astronomické nivelace je uvedeno na obrázku 2.



Obr. 2 – Princip astronomické nivelace (upraveno dle [26])

3.3 Technologie GNSS

V současné době je v provozu několik družicových navigačních systémů, které dokáží určovat polohu kdekoli na Zemi. Tyto systémy jsou navíc vzájemně nezávislé a trendem výrobců GNSS aparatur je využívat při měření co nejvíce dostupných družic z různých družicových systémů.

Od 70. let 20. století byl vyvíjen americký navigační systém Navstar GPS (NAVigation Signal Timing And Ranging Global Positioning System), který je plně provozuschopný s kompletní konstelací 24 družic od roku 1994. Kromě těchto družic byly postupně na jednotlivé oběžné dráhy trvale umístěny záložní družice, což roku 2010 vedlo k rekonfiguraci systému na rozšířený stav, takzvaný „Expandable 24“, který má zajistit zvýšení dostupnosti tohoto systému. Záložní družice ve třech oběžných drahách byly zahrnuty do základní konfigurace. V červnu roku 2011 bylo dokončeno přemístění celkem šesti družic, čímž došlo k rozšíření základní konfigurace na stav „24 + 3“, tedy celkem 27 družic. Na oběžné dráhy byly i poté vypouštěny další družice, naposledy byla v průběhu května 2013 vynesena družice PRN 27. Navigační systém GPS v současné době obsahuje celkem 32 družic. [45]

Ruský systém GLONASS byl poprvé v plné provozuschopnosti s kompletní konstelací družic v prosinci roku 1995, ovšem vzhledem ke špatné ekonomické situaci Ruska bylo za několik let v provozu pouze 8 družic. Opět byl tento systém uveden do plné provozuschopnosti v prosinci roku 2011 a od té doby se mu daří mít v provozu minimálně 22 družic z celkového počtu 24. Včetně záložních družic a družic, které jsou aktuálně v údržbě, se na oběžných drahách v polovině roku 2013 nachází 29 družic [41]. Pokus o vynesení dalších tří družic 2. července 2013 skončil neúspěšně.

V letech 2005 a 2008 vypustila Evropská kosmická agentura dvě testovací družice systému Galileo. Je to další globální navigační systém, jehož provoz zajišťuje Evropská unie. Začátkem roku 2013 jsou v provozu kromě dvou testovacích družic Giove A a Giove B další čtyři družice Galileo. Celkem bude mít tento systém 30 družic v plném operačním režimu (27 družic na třech oběžných drahách doplněné třemi záložními družicemi). [39]

V Číně bylo v roce 2000 zahájeno vypouštění družic systému BeiDou. Od roku 2005 je vyvíjen navigační systém Compass, který také bývá označován jako BeiDou-2. Na rozdíl od předchozích systémů využívá tento navigační systém nejen družic se střední oběžnou dráhou (MEO – medium Earth orbit), ale i družic geostacionárních. Po dokončení se bude systém Compass skládat celkem z 35-ti družic, z nichž bude pět geostacionárních, tři se skloněnou geosynchronní dráhou (IGSO – inclined geosynchronous orbit) a 27 se střední oběžnou dráhou (MEO).

Zajímavostí systému BeiDou je tzv. dvoucestné určování vzdálenosti. Princip spočívá v tom, že operační centrum vyše prostřednictvím jedné družice průzkumný signál vybrané podskupině uživatelů. Tito uživatelé zareagují na tento signál tak, že odešlou signál alespoň dvěma (ze tří) geostacionárním družicím systému BeiDou. Na základě doby přenosu tohoto signálu je určeno zpoždění signálu mezi operačním centrem, družicovým segmentem a uživatelským segmentem. [16]

V následujících podkapitolách bude podrobněji pojednáno o základních principech družicových měření. Uvedené vztahy jsou zapsány ve tvaru, v jakém jsou aplikovány při použití navigačního systému Navstar GPS. Podobným způsobem platí popisované principy také při použití ostatních navigačních systémů. Všechny uvedené systémy přenášejí rádiové signály o vlnových délkách spadajících do mikrovlnné části elektromagnetického spektra. Z fyzikálního hlediska na ně působí veškeré vlivy na základě podobných zákonitostí.

3.3.1 Metody měření technologií GNSS

Prostorovou polohu bodu lze pomocí technologie GNSS určovat dvěma způsoby:

- absolutním určováním polohy,
- relativním určováním polohy.

V obou případech lze metody rozdělit podle typu měřených dat do dvou kategorií:

- kódová měření,
- fázová měření.

Pro geodetické účely se používá především relativní určování polohy bodu, při kterém registrujeme fázová měření. Při použití relativních metod je určována vzájemná poloha dvou bodů, na kterých probíhají současně družicové observace. Jedna aparatura observuje na bodě o známých geocentrických souřadnicích (reference) a druhá na bodě,

jehož prostorovou polohu určujeme (rover). Při zpracování se využívá toho, že obě aparatury přijímají signály z několika stejných družic, následkem čehož mohou být určována a vyhodnocována diferencovaná data, ve kterých jsou eliminovány některé systematické chyby působící v průběhu měření (viz kap. 3.3.2).

Z relativních metod je v praxi často využívána metoda RTK. Jedná se v dnešní době o moderní metodu, která na rozdíl od jiných metod dokáže určovat polohu určovaného bodu v téměř reálném čase. Tato metoda využívá korekcí měřených veličin poskytovaných z referenční stanice, které jsou do měřicí aparatury přenášeny prostřednictvím radiového vysílání anebo pomocí datových mobilních přenosů. Využívá se předpokladu, že chyby v měřených veličinách ze stejných družic dvěma nepříliš vzdálenými přijímači jsou silně korelované a lze tedy korekce měřených veličin určené na referenční stanici aplikovat při určení polohy roveru. V rámci zkvalitňování a zpřesňování služeb poskytujících korekce RTK se v současné době využívá nejen korekcí z jedné (zpravidla nejbližší) referenční stanice, ale zejména tzv. síťové řešení, v rámci kterého jsou generovány korekce na základě observací několika referenčních stanic. Přesnost určení polohy touto metodou je řádově centimetrová. [31]

3.3.2 Princip zpracování GNSS observací

V rámci družicových navigačních systémů GPS a GLONASS se využívá dvou typů měření, a sice kódových měření a fázových měření. Při zpracování se z měřených veličin určuje tzv. pseudovzdálenost. Jedná se o vzdálenost mezi přijímačem a příslušnou družicí, přičemž tato vzdálenost je při určování ovlivněna systematickou chybou hodin družice, chybou hodin přijímače a dalšími systematickými vlivy (např. zpoždění signálu způsobené průchodem atmosférou).

Pseudovzdálenost P_k^i lze definovat vztahem

$$P_k^i = c(T_R - T_{Ti}), \quad (36)$$

kde T_R je čas v okamžiku příjmu signálu přijímačem a T_{Ti} je čas v okamžiku vyslání signálu družicí SV_i . [16]

Pomocí observace družicových signálů z dostatečného počtu družic lze určit chybu hodin přijímače a získat pseudovzdálenost, která je opravena o chybu hodin družice a chybu hodin přijímače:

$$P_k^i = c((t + \delta_k) - (t - \tau + \delta^i)), \quad (37)$$

kde t je čas v okamžiku příjmu signálu, τ je doba šíření signálu z družice k přijímači, δ_k je chyba hodin přijímače v čase t a δ^i je chyba hodin družice v okamžiku vyslání signálu. [8]

Geodetické aparatury umožňují realizovat také fázová měření, která jsou nutná k dosažení přesnosti potřebné pro geodetické aplikace. Fázový doměrek určený z fázových měření lze v základním tvaru vyjádřit pomocí vztahu

$$\psi_{Fk}^i(t) = \phi_{Fk}(t) - \phi_{Fk}^i(t - \tau) + n_{Fk}^i, \quad (38)$$

kde $\psi_{Fk}^i(t)$ je fázový doměrek (v cyklech) pro frekvenci F v okamžiku t , $\phi_{Fk}(t)$ je fáze generovaná oscilátorem přijímače v okamžiku přijetí signálu t , $\phi_{Fk}^i(t - \tau)$ je fáze nosné vlny v okamžiku vyslání signálu a n_{Fk}^i je neznámý počet celých cyklů (ambiguity). [8]

Tento vztah lze upravit pomocí Taylorova rozvoje na tvar

$$\psi_{Fk}^i(t) = \phi_{Fk}(t) - \phi_{Fk}^i(t) + \tau f_F + n_{Fk}^i, \quad (39)$$

kde f_F je frekvence nosné vlny.

Rozdíl $\phi_{Fk}(t) - \phi_{Fk}^i(t)$ by v případě ideálního oscilátoru byl nulový. Pokud vezmeme v úvahu chybu hodin družice a přijímače, získáme vztah ve tvaru

$$\psi_{Fk}^i(t) = (\delta_k - \delta^i) f_F + \tau f_F + n_{Fk}^i. \quad (40)$$

Vynásobíme-li tuto hodnotu vlnovou délkou λ_F , získáme fázový doměrek L_{Fk}^i v metrech

$$L_{Fk}^i = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + \lambda_F n_{Fk}^i. \quad (41)$$

Družicové observace jsou rovněž ovlivňovány různými systematickými vlivy. Mezi ty nejvýznamnější patří chyby v určení dráhy družice, chyby hodin družice a přijímače, chyby způsobené vlivem prostředí, vlivem relativistických efektů a vlivem variace fázového centra antény. Některé systematické vlivy lze určit měřením, některé můžeme pouze modelovat (s omezenou přesností) a některé můžeme eliminovat vhodnou metodou zpracování, např. pomocí diferencí měřených veličin. [8]

Diferencování měřených veličin se provádí použitím observací ze dvou přijímačů, které přijímají signály vysílané ze stejných družic. Jednoduché difference (single-difference) se získají jako rozdíl měřených veličin získaných ze dvou přijímačů (k, l) a jsou definovány vztahem

$$L_{Fkl}^i = L_{Fk}^i - L_{Fl}^i. \quad (42)$$

Dále jsou definovány dvojité difference (double-difference), které získáme jako rozdíl jednoduchých diferencí vztahujících se k dvojici přijímačů (k, l) a dvojici satelitů (i, j). Dvojité difference jsou dány vztahem

$$L_{Fkl}^{ij} = L_{Fkl}^i - L_{Fkl}^j. \quad (43)$$

Jsou to právě dvojité diferencovaná data, která jsou zpracovávána některými softwary pro postprocessing (např. Bernese GNSS Software). Observační rovnice při zpracování dat lze potom psát ve tvaru

$$P_{1kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} + I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij}, \quad (44)$$

$$P_{2kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij}, \quad (45)$$

$$L_{1kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij} + \lambda_1 n_{1kl}^{ij}, \quad (46)$$

$$L_{2kl}^{ij} = \varrho_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\varrho_{kl}^{ij} + \lambda_2 n_{2kl}^{ij}, \quad (47)$$

kde $\Delta\varrho_{kl}^{ij}$ je chyba způsobená troposférickou refrakcí a I_{kl}^{ij} je chyba způsobená vlivem ionosférické refrakce.

Rozdílem dvojitých diferencí ze dvou různých časových okamžiků dostaneme trojitou difference (triple-difference), které jsou definovány vztahem

$$L_{1kl}^{ij}(t_2) - L_{1kl}^{ij}(t_1) = \varrho_{kl}^{ij}(t_2) - \varrho_{kl}^{ij}(t_1) - (I_{kl}^{ij}(t_2) - I_{kl}^{ij}(t_1)), \quad (48)$$

$$L_{2kl}^{ij}(t_2) - L_{2kl}^{ij}(t_1) = \varrho_{kl}^{ij}(t_2) - \varrho_{kl}^{ij}(t_1) - \frac{f_1^2}{f_2^2} (I_{kl}^{ij}(t_2) - I_{kl}^{ij}(t_1)). \quad (49)$$

V těchto rovnicích předpokládáme, že se mezi okamžiky t_1 a t_2 nezmění počet ambiguit n_{1kl}^{ij} a n_{2kl}^{ij} . Tímto se ze zpracování vyloučí neznámý počet ambiguit, což je hlavní výhoda při použití třetích diferencí. Tento postup je možné použít pouze tehdy, pokud nedojde ke ztrátě příjmu signálu ze satelitu mezi okamžiky t_1 a t_2 . [8]

3.3.3 RTK observace

V případě použití metody RTK lze vyjádřit observační rovnice ve tvaru

$$P_k^i = \rho_k^i + c(\delta_k - \delta^i) + \delta_{orb} + \varrho_k^i + I_k^i + \delta_{mult/F} + \varepsilon(P_F), \quad (50)$$

$$L_F = \rho + c(\delta_k - \delta^i) + \delta_{orb} + \varrho_k^i - I_k^i + \lambda_i n_i + \lambda_i(\phi_r(t_0, L_i) - \phi_s(t_0, L_i)) + \delta_{mult/L_F} + \varepsilon(L_F), \quad (51)$$

kde δ_{orb} je chyba v určení dráhy družice, δ_{mult/L_F} je chyba způsobená vlivem vícecestného šíření signálu k přijímači, $\phi_r(t_0, L_i)$ je počáteční fáze oscilátoru přijímače, $\phi_s(t_0, L_i)$ je počáteční fáze oscilátoru družice a ε je náhodná chyba měření. [11]

3.3.4 Řešení ambiguit

Určení počtu celých cyklů nosné vlny je klíčovým krokem při zpracování fázových měření v rámci přesného určování polohy. Existují různé přístupy k tomuto řešení podle toho, jestli se jedná o dlouhý nebo krátký vektor, statickou nebo kinematickou observaci anebo měření v reálném čase či post-processing. Obecně lze tento problém řešit pomocí metody nejmenších čtverců s použitím Kalmanova filtru. [35]

Prakticky se celočíselný počet ambiguit určí na základě určitého výpočetního postupu a následně se uskuteční statistické ověření, jestli je toto řešení správné a unikátní. Výpočetních postupů a ověřovacích metod existuje několik, mezi nejznámější patří tyto: Ambiguity Function Method (AFM), Fast Ambiguity Resolution Approach (FARA), Least Squares Ambiguity Search Technique, Cholesky Decomposition, Fast Ambiguity Search Filter (FASF), Least Square AMBiguity Decorrelation Adjustment (LAMBDA) a Integrated Ambiguity Resolution Method.

3.3.5 Vliv troposféry a ionosféry

Signály navigačních systémů vysílané z družic jsou před jejich přijetím GNSS aparaturou ovlivněny průchodem atmosférou, přičemž největší vliv mají následující vrstvy atmosféry:

- troposféra – nižší část atmosféry sahající od povrchu Země do maximální výšky 8 až 18 km v závislosti na zeměpisné šířce,
- ionosféra – vyšší část atmosféry rozkládající se ve výšce přibližně 70 až 1000 km nad povrchem Země, která obsahuje elektricky nabitě částice.

Nejprve se budeme zabývat vlivem troposféry. Průchod signálu troposférou je závislý na teplotě, tlaku a hustotě nasycení vodními parami. Zpoždění signálu způsobené troposférickou refrakcí, tzv. ZPD (zenith path delay) dosahuje hodnot přibližně 8 ns (asi 2,3 m) pro přijímač v úrovni moře za standardních atmosférických podmínek. [8]

Troposférické zpoždění rovněž závisí na vzdálenosti, kterou signál urazí během průchodu troposférou, a je tedy závislé na zenitovém úhlu z příslušné družice. Pro vyjádření závislosti troposférického zpoždění na zenitovém úhlu jej lze definovat pomocí hodnoty troposférického zpoždění signálu přicházejícího ze zenitu $\Delta\varrho_0$ a takzvané mapovací funkce $f(z)$

$$\Delta\varrho = f(z)\Delta\varrho_0 . \quad (52)$$

Nejjednodušší aproximací mapovací funkce je její vyjádření ve tvaru

$$f(z) = \frac{1}{\cos z} . \quad (53)$$

Výpočetní programy pro postprocessingové zpracování naměřených dat často nabízejí více možností jak modelovat vliv troposféry. Jedním z častějších způsobů určení

troposférického zpoždění je výpočet pomocí modelu Saastamoinen, který je definován na základě vlastností ideálního plynu. Lze jej vyjádřit pomocí vztahu

$$\Delta\varrho = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - \tan^2 z \right], \quad (54)$$

kde p je atmosférický tlak, e je parciální tlak vodních par a T je teplota.

Rovněž je často používána troposférická mapovací funkce formulovaná Niellem. Ta je definována zvlášť pro suchou a vlhkou složku troposféry. [8]

Druhá z uvedených vrstev atmosféry – ionosféra – je charakterizována výskytem volných elektronů a iontů, které ovlivňují šíření radiových vln. Výskyt elektricky nabitých částic je způsoben fotochemickými procesy a tzv. nárazovou ionizací. K fotochemické ionizaci dochází především vlivem ultrafialového, příp. měkkého rentgenového záření Slunce a částečně vlivem jiného kosmického záření. Nárazová ionizace je způsobena srážkami s částicemi dopadajícími do atmosféry. Vlivem těchto procesů je ionosféra rozdělena na dílčí vrstvy, které obsahují různé množství iontů. Počet elektricky nabitých iontů lze vyjádřit v závislosti na nadmořské výšce, takové znázornění se nazývá Chapmanův profil.

Vzhledem k tomu, že významný vliv na šíření signálů vysílaných z družic má Slunce, mění se vliv ionosféry v závislosti na tom, jestli observace probíhá ve dne nebo v noci. Navíc solární aktivita Slunce není dlouhodobě konstantní, ale její intenzita kolísá. Její maxima se opakují s přibližnou periodou 11 let, přičemž posledního maxima dosáhla na přelomu let 2012 a 2013. V souvislosti s touto proměnlivostí se rovněž mění také vliv ionosféry na vysílané signály. V případě, že bychom při zpracování družicových měření zanedbali vliv působení ionosféry, projevilo by se to zdánlivou kontrakcí výsledných vektorů. Toto systematické zkreslení je úměrné celkovému počtu elektronů, který je označován jako TEC (Total Electron Content) a bývá vyjádřen v jednotkách TECU (TEC Unit). Jedná se o počet elektronů vztažený na jeden metr čtvereční, který je obsažený v rotačním válci, jehož osu tvoří spojnice mezi družicí a přijímačem.

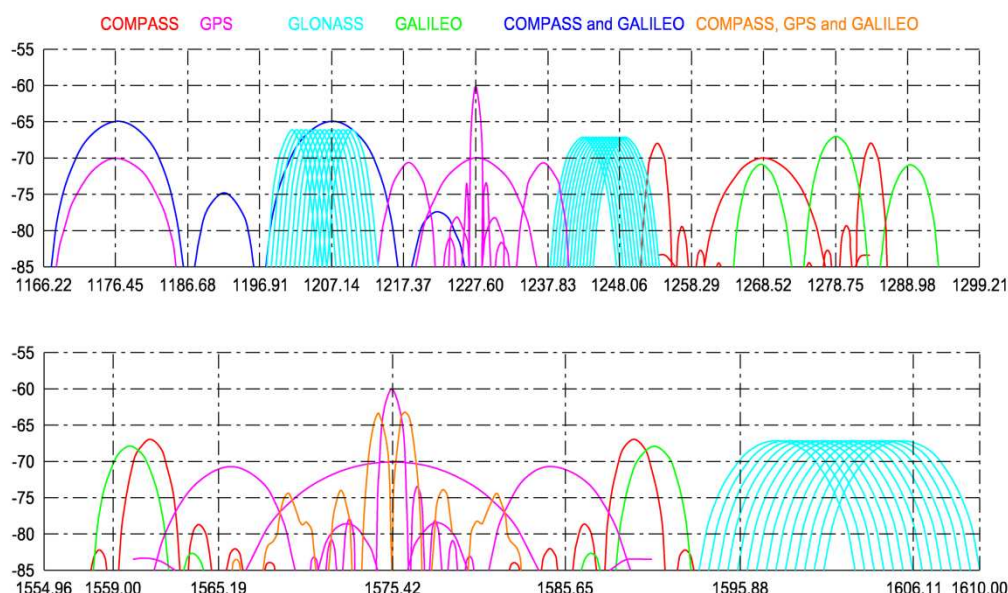
Na rozdíl od troposféry je ionosféra pro radiové vlny disperzní prostředí. To znamená, že velikost ionosférické refrakce vysílaného radiového signálu je závislá na frekvenci tohoto signálu. Výsledný efekt ionosférické refrakce na fázové měření můžeme zapsat ve tvaru

$$\Delta\varrho_I = \int_s (n_I - 1) ds = -\frac{aE}{f^2}, \quad (55)$$

kde $a = 4,03 \cdot 10^{17} \text{ m s}^{-2} \text{ TECU}^{-1}$, E je hodnota TEC v šikmém směru a n_I je koeficient ionosférické refrakce. V observačních rovnicích v kap. 3.3.2 je definován člen I_k^i , který vyjadřuje zpoždění způsobené vlivem ionosféry závislé na příslušné frekvenci, např. pro L1 platí vztah

$$I_k^i = \frac{aE}{f_1^2}. \quad (56)$$

Uvedené vztahy jsou zapsány ve tvaru, v jakém jsou aplikovány při použití navigačního systému Navstar GPS. V případě použití jiného z uvedených navigačních systémů by popisované vlivy působily obdobným způsobem, neboť vysílají signály ve stejné části spektra elektromagnetického záření (viz obr. 3).



Obr. 3 – Frekvenční spektra signálů GNSS (upraveno dle [40])

Vliv ionosféry lze při zpracování družicových měření eliminovat více způsoby. Pokud přijímač systému GPS registruje signály na obou vysílaných frekvencích L1 a L2, lze vliv ionosféry nejjednodušeji odstranit pomocí řešení na frekvenci, která je lineární kombinací frekvencí L1 a L2. Nejčastěji bývá používána frekvence L3, která je označována jako „ionosphere-free“. Toto řešení ovšem není vhodné pro jakoukoliv délku měřeného vektoru.

Další možnost eliminace vlivu ionosféry je prostřednictvím modelů ionosféry, na základě kterých se určí korekční parametry potřebné do observačních rovnic. Vedle globálních modelů ionosféry, které jsou implementovány v jednotlivých výpočetních softwarech je možné během zpracování určit vliv ionosféry z vlastních registrovaných dat.

3.3.6 Vliv vícecestného šíření signálu (multipath)

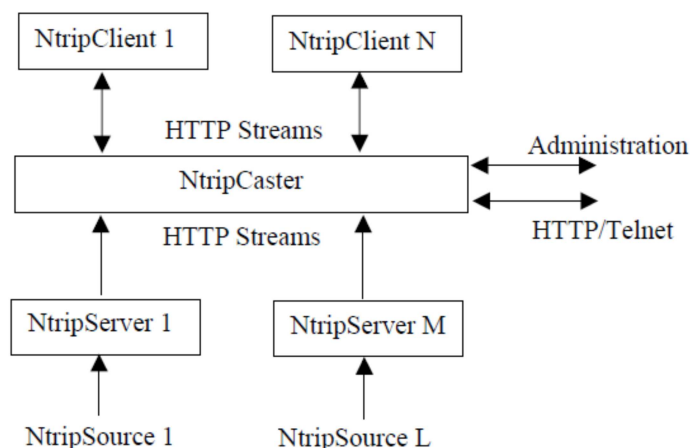
Dalším systematickým vlivem, který působí na vysílané signály je jev, kdy se signál přicházející do antény GNSS přijímače nešíří pouze po přímé spojnici, ale také prostřednictvím odrazů od okolních předmětů. Anténa všechny tyto odražené signály vyhodnotí společně s přímým signálem jako signál z příslušné družice a z jejich výsledné

kompozice získá kódová a fázová měření. Tento vliv je označován jako vícecestné šíření signálu, neboli multipath. V observačních rovnicích (50), (51) je vyjádřen členem .

Efekt multipath je způsoben především odrazy od objektů v okolí antény GNSS, z tohoto důvodu jej nelze nijak jednoduše modelovat. Jeho vliv se neodstraní ani použitím diferencovaných měření. Hardwarově lze odfiltrovat signály odražené od terénu pomocí speciální konstrukce antény, která dokáže eliminovat signály přicházející ze směru s nižším elevačním úhlem než 0° . Tento způsob vyžaduje speciální typ antény, která kvůli své větší hmotnosti a robustnosti není vždy vhodná pro použití při běžném terénním měření. [8]

3.3.7 Přenos korekcí RTK

Základním principem metody RTK je přenos korekčních dat od referenční stanice k měřicí aparatuře. Korekční data jsou vysílána ve formátu RTCM (the Radio Technical Commission for Maritime Services), který je navržen pro přenos dat pomocí radiového vysílání. Díky zvyšující se dostupnosti mobilního připojení k internetu v terénu, byl navržen rovněž způsob přenosu dat pomocí komunikace přes internet. Komunikace na internetu probíhá prostřednictvím protokolu HTTP (HyperText Transfer Protocol), který je přenášen pomocí TCP/IP spojení. Protokol HTTP je primárně používán pro přenášení velkého množství dat, kde každý objekt má přesně definovaný svůj začátek a konec. Vysílané RTK korekce však mají charakter radiového vysílání, které na rozdíl od obvyklého přenosu souborů probíhá kontinuálně. Za účelem přenosu těchto korekcí prostřednictvím internetu byl navržen způsob přenosu korekčních dat nazývaný NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). Systém přenosu dat je realizován pomocí tří aplikací: NtripClient, NtripServer a NtripCaster (viz obr. 4), které spolu komunikují prostřednictvím protokolu HTTP 1.1.



Obr. 4 – Systém Ntrip [37]

Jako reálný HTTP server pracuje aplikace NtripCaster, která komunikuje s aplikacemi NtripServer a NtripClient. Vzájemná komunikace probíhá pomocí jednotlivých datových paketů, které jsou posílány nepřetržitě za sebou a označují se jako datový proud (datastream). [20]

NtripSource generuje RTK datastreamy pro danou lokalitu na základě GNSS observace na bodě o známých geocentrických souřadnicích. Každý NtripSource je jednoznačně identifikován pomocí specifického označení jako tzv. „mountpoint“. NtripServer posílá datastreamy z příslušného NtripSource do NtripCasteru. NtripCaster je v tomto systému hlavní poskytovatel, který NtripClientům (GNSS přijímačům) distribuuje data z jednotlivých NtripServerů.

Vzájemná komunikace mezi jednotlivými složkami probíhá na základním principu server – klient, kde NtripCaster je datový server a NtripClient, příp. NtripServer jsou aplikace typu HTTP klient. NtripClient si vybere zdrojová data z příslušného NtripServeru pomocí příkazu vyžadujícího konkrétní mountpoint. Za tím účelem poskytuje NtripCaster zdrojovou tabulku všech dostupných mountpointů, tzv. „SourceTable“. Každý záznam v této zdrojové tabulce obsahuje popis parametrů jednotlivých datastreamů. [20]

3.3.8 Síťové RTK korekce

S rozvojem permanentních GNSS stanic, které nepřetržitě registrují signály navigačních satelitních systémů, se rozvíjí přesnost poskytovaných RTK korekcí použitím dat z více stanic. Obecně lze síťové RTK korekce používat pomocí dvou základních principů:

- princip generování virtuální referenční stanice (VRS),
- princip přenosu vysílaných korekcí.

Hlavní rozdíl těchto dvou způsobů je v tom, že při použití VRS módu jsou korekční data aplikována na síťovém serveru, zatímco vysílané korekce jsou aplikovány v aparatuře rover. V současné době jsou používány v sítích permanentních stanic dvě různé metody pro vytváření síťového řešení:

- VRS (Virtual Reference Station),
- FKP (Flächenkorrekturparameter – plošné síťové korekce).

Tyto dva způsoby generování korekcí RTK se liší zejména způsobem zavádění korekcí vlivu troposféry a ionosféry. V závislosti na vzdálenosti od referenční stanice může aparatura rover přijímat signály z příslušných družic pod jiným elevačním úhlem, než je přijímá referenční stanice. Zároveň se mohou tyto dvě aparatury nacházet v různé nadmořské výšce. V případě korekcí VRS jsou do roveru odeslána z nejbližší referenční stanice data, na která byly aplikovány troposférické korekce určené z modelu používaném na síťovém serveru generujícím síťové řešení a geometrický posun do pozice virtuální

stanice. Při použití korekcí FKP je vliv troposféry opravován v roveru, přičemž nemusí být použit stejný model troposféry, který je používán na síťovém serveru. Tím mohou vznikat chyby v určení polohy, jejichž velikost narůstá se vzdáleností roveru od nejbližší referenční stanice a s jejich vzájemným převýšením.

Dalšími faktory působícími při zpracování jsou rovněž atmosférické podmínky, tedy teplota, tlak a relativní vlhkost v místě měření. Tento vliv může způsobovat několikamilimetrové odchylky od skutečných hodnot, ovšem aparatury rover zpravidla nemají možnost jej korigovat, neboť nebývají vybaveny čidly pro měření těchto veličin. Při „běžných“ vzdálenostech aparatury rover od referenční stanice (do 50 km) nezpůsobí tento vliv chyby v určení polohy větší než 1 mm. [20]

3.3.9 Doba inicializace RTK

Kromě charakteristik přesnosti výsledné prostorové polohy je jedním z ukazatelů, kterými lze charakterizovat kvalitu služeb poskytovaných sítí permanentních stanic GNSS, doba inicializace. Jedná se o čas potřebný k dosažení fixního řešení od okamžiku, kdy byl z roveru odeslán požadavek k odběru korekčních dat. Tento parametr není závislý pouze na použitých družicových navigačních systémech, ale i na rychlosti zpracování dat na zpracovatelském serveru sítí permanentních stanic, na jeho vytíženosti, na parametrech použitého připojení k internetu a v neposlední řadě i na rychlosti zpracování dat aparaturou rover. Prakticky dosahuje doba inicializace hodnot od několika sekund po několik desítek sekund. Doba inicializace byla analyzována např. v síti SKPOS na území sousedního Slovenska. Na základě přístupů uživatelů RTK v letech 2007 až 2011 byla zjištěna průměrná doba inicializace 36 s [9].

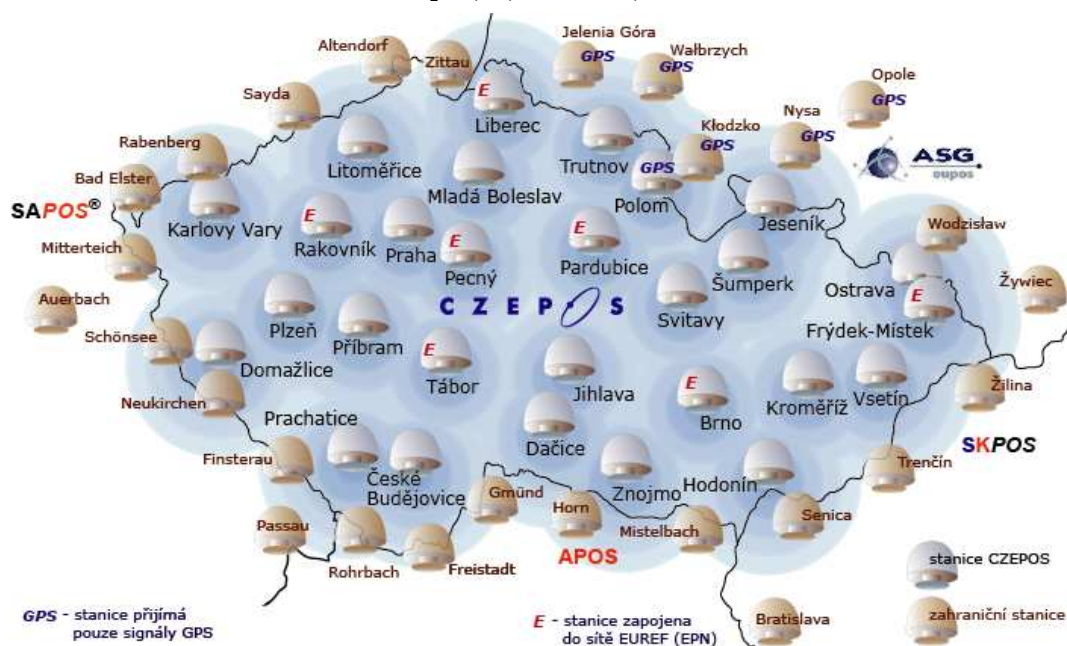
3.4 Síť permanentních GNSS stanic

Struktura družicových navigačních systémů je obecně popisována pomocí rozdělení do čtyř segmentů. Vedle kosmického, řídicího a uživatelského segmentu se uvádí také podpůrný segment, ve kterém jsou zahrnuty systémy pro zpřesnění navigační polohy, jako např. systém SBAS (WAAS, EGNOS apod.). Do tohoto segmentu lze zahrnout také síť permanentních GNSS stanic, které poskytují služby pro zvýšení přesnosti polohy v reálném čase.

Na území České republiky je provozováno několik sítí permanentních GNSS stanic. Některé působí lokálně na menších, zájmových územích (např. síť by/S@T byla jednou z prvních sítí permanentních GNSS stanic působící ve středočeském kraji), jiné globálně na území celé republiky (síť CZEPOS, TopNET, Trimble VRS Now Czech). Některé permanentní stanice výše uvedených sítí jsou zároveň součástí některých evropských anebo celosvětových sítí permanentních GNSS stanic.

3.4.1 Sít' CZEPOS

Sít' permanentních GNSS stanic CZEPOS je provozována Zeměměřickým úřadem v Praze jako součást geodetických základů ČR. V současné době (rok 2013) se tato sít' skládá z 28 permanentních GNSS stanic na území České republiky a 27 příhraničních GNSS stanic permanentních sítí sousedních států (Německo: SAPOS, Rakousko: APOS, Slovensko: SKPOS, Polsko: ASG Eupos), (viz obr. 5). [38]



Obr. 5 – Přehled permanentních GNSS stanic sít' CZEPOS [38]

Sít' CZEPOS poskytuje několik typů služeb, jejichž výčet je uveden v tabulce 1. Pro účely určování polohy v reálném čase jsou poskytovány korekce DGPS a korekce RTK. Korekce RTK jsou poskytovány buď ze zvolené permanentní stanice anebo určené ze sít'ového řešení. V případě korekcí ze sít'ového řešení poskytuje sít' CZEPOS dva druhy dat, korekce typu FKP určované prostřednictvím aplikace GNSMART společnosti Geo++ a korekce typu VRS (služby MAX3C a iMAX3C) získávané pomocí systému Leica GNSS Spider. Stručný popis těchto typů korekčních dat byl uveden v kapitole 3.3.8. Kromě těchto služeb poskytuje sít' CZEPOS také data ve formátu RINEX pro určení polohy pomocí následného zpracování dat při použití statické metody měření. [38]

Přesnost výsledků získaných pomocí korekcí RTK byla v minulosti několikrát testována [31], [19]. Dle výsledků testování z roku 2006 [31] byla zjištěna přesnost výškové složky $m_h = 4,5$ cm pro korekce RTK ze zvolené permanentní stanice (resp. vnitřní přesnost $m_h = 3,2$ cm určená z dvojic měření). Oproti tomu výsledky permanentního testování vykazují střední chybu ve výškové složce často i větší než 10 cm (např. výsledky z listopadu 2012, viz obr. 23). V současné době je v provozu permanentní kontrola přesnosti sít'ového řešení, která využívá aplikace MLS (Mervart-Lukeš Software).

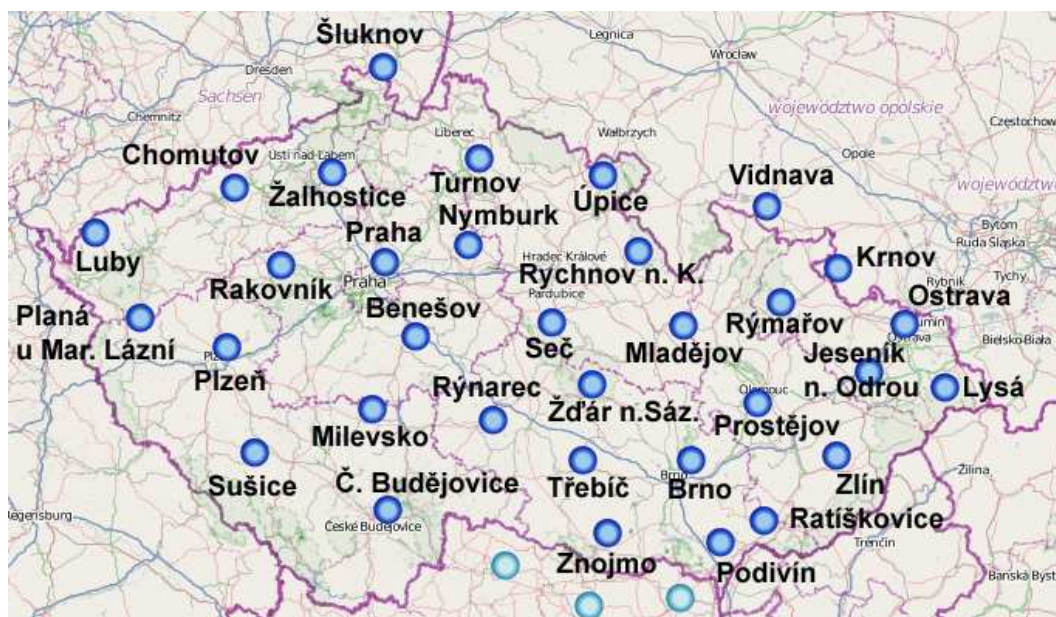
Na webových stránkách sítě CZEPOS lze nalézt ke každému dni polohové a výškové odchylky a střední chyby výsledků získaných pomocí jednotlivých sledovaných služeb.

Tabulka 1 – Přehled služeb sítě CZEPOS

služba	název služby	popis
DGPS	DGPS	diferenční GPS korekce
RTK	RTK RTK3-NS RTK3-GG	korekce ze zvolené stanice korekce z nejbližší stanice korekce z nejbl. stanice (GPS + GLONASS)
	RTK-PRS RTK-FKP VRS3-MAX, VRS3-iMAX	korekce z pseudoreferenční stanice korekce s plošnými parametry virtuální ref. stanice – koncept MAC, virtuální ref. stanice – individualizovaný MAC
	VRS3-MAX-GG, VRS3-iMAX-GG	virtuální ref. stanice (GPS + GLONASS)
RINEX	RINEX	observovaná data ze zvolené stanice
	virtuální RINEX	observovaná data z virtuální stanice

3.4.2 Sít' TopNET

Roku 2004 začala vznikat sít' permanentních stanic TopNET, kterou provozuje společnost Geodis Brno, spol. s r.o. V současné době se skládá z 32 permanentních GNSS stanic, které registrují signály systémů GPS a GLONASS (viz obr. 6).



Obr. 6 – Přehled permanentních GNSS stanic sítě TopNET [43]

Tato sít' poskytuje obdobné služby, jako výše popsaná sít' CZEPOS. Pro zpracování statického měření pomocí postprocessingu poskytuje data ve formátu RINEX z jednotlivých permanentních stanic. Pro účely určování souřadnic v reálném čase poskytuje tato sít' korekce RTK a DGPS. Korekce RTK poskytuje jak z jednotlivých stanic, tak z virtuální stanice generované pomocí síťového řešení (služby NVR2, NVR3 a VRS3). V případě služeb NVR2 a NVR3 je virtuální referenční stanice generována

ve vzdálenosti 5 km od roveru ve směru k nejbližší permanentní stanici, služba VRS3 generuje polohu virtuální referenční stanice přímo v pozici roveru. Prostřednictvím služeb NAU2, popř. NAU3 je možno přijímat korekce z takové permanentní stanice, která se nachází nejbližší k aktuální pozici uživatele. Přehled poskytovaných služeb je uveden v tabulce 2. [43]

Tabulka 2 – Přehled služeb sítě TopNET

služba	název služby	popis
DGNSS	TBRB, TCBD, TJED, ... NDGS	diferenční GNSS korekce z jednotlivých stanic dif. GNSS korekce z nejbližší stanice
RTK	TBRN, TPRA, TBEN, TCBU, ... NAU2, NAU3, NAUC	korekce ze zvolené stanice korekce z nejbližší stanice (ve formátech RTCM2.3, RTCM3.0 a CMR+)
	NVR2 NVR3 VRS3	korekce z virtuální ref. stanice (RTCM2.3) korekce z virtuální ref. stanice (RTCM3.0) korekce z virtuální ref. stanice (RTCM3.0)
RINEX	RINEX	observovaná data ze zvolené stanice

3.4.3 Sít' Trimble VRS Now Czech

Ve druhé polovině roku 2009 byl spuštěn provoz sítě permanentních stanic Trimble VRS Now Czech, která je spravována firmou Geotronics Praha, s.r.o. V současné době sít' zahrnuje 24 permanentních GNSS stanic (viz obr. 7)



Obr. 7 – Přehled permanentních GNSS stanic sítě Trimble VRS Now Czech [46]

Prostřednictvím této sítě jsou taktéž poskytována data pro zpracování statického měření a korekce RTK a DGPS. Tato sít' využívá navigační systémy GPS i GLONASS. Korekce RTK jsou k dispozici nejen ve formátu RTCM, ale i ve formátu CMR+ a CMRx.

V rámci této sítě jsou poskytovány výhradně korekce získané prostřednictvím síťového řešení VRS Trimble. Názvy poskytovaných služeb odpovídají formátu korekcí, v jakém jsou vysílány. Přehled poskytovaných služeb je uveden v tabulce 3. [46]

Tabulka 3 – Přehled služeb sítě Trimble VRS Now Czech

služba	název služby	popis
DGNSS	TVN_DGPS	diferenční GNSS korekce
RTK	TVN_RTCM_23	korekce z virtuální ref. stanice (RTCM2.3)
	TVN_RTCM_31	korekce z virtuální ref. stanice (RTCM3.0)
	TVN_RTCM_31_GPS_Only	korekce z virtuální ref. stanice (RTCM3.0)
	TVN_CMR_PLUS	korekce z virtuální ref. stanice (CMR+)
	TVN_CMR_X	korekce z virtuální ref. stanice (CMRx)
RINEX	RINEX	observovaná data ze zvolené stanice

3.4.4 Mezinárodní síť permanentních GNSS stanic

Některé z permanentních GNSS stanic výše uvedených sítí permanentních stanic jsou zároveň součástí evropské sítě permanentních stanic EPN (EUREF Permanent Network). Jedná se o síť permanentních stanic v Evropě, pomocí které je definován, realizován a udržován referenční systém ETRS-89 (European Terrestrial Reference System). V této síti je zahrnuto přes 200 permanentních GNSS stanic, z nichž 12 se nachází na území České republiky. Jsou to stanice BISK, GOPE, MARJ, POUS, TUBO, VACO, KUNZ, CFRM, CLIB, CPAR, CRAK a CTAB.

Geodetická observatoř Pecný provozuje jednu z těchto permanentních stanic (GOPE) a slouží také jako jedno z 16-ti lokálních analytických center (GOP) sítě EPN, které zpracovává naměřená data z příslušných permanentních GNSS stanic této sítě.

V rámci realizace mezinárodního referenčního systému ITRS (International Terrestrial Reference System) je provozována společností IGS (International GNSS Service) síť více než 400 permanentních stanic po celém světě. Od roku 2005 je kromě systému ITRS realizován také referenční systém IGS05. Z permanentních stanic na území ČR je do této sítě zahrnuta stanice GOPE.

3.4.5 Permanentní stanice TUBO

Roku 1994 byl vybudován na střešní terase Fakulty stavební VUT v Brně bod TUBO (Technical University of Brno). Jedná se o pilíř, který vznikl přestavbou astronomického pilíře až do úrovně střechy původní astronomicko-geodetické observatoře. Pro zajištění co nejlepší stability bodu je pilíř osazen v nosném zdivu budovy. V horní části je pilíř vybaven nucenou centrací pro jednoznačné umístění měřicí aparatury.

Bod TUBO je zahrnut do celé řady geodetických sítí. Je součástí sítě DOPNUL, která vznikla zahuštěním sítě NULRAD a společně tvoří geodetické základy vybudované výhradně technologií GNSS. V roce 2001 byla stanice TUBO zahrnuta do evropské sítě

permanentních stanic EPN. Od roku 2005 je tato stanice součástí sítě permanentních stanic CZEPOS. Dále je stanice TUBO zahrnuta do dalších sítí zabývajících se zkoumáním geodynamických jevů, do výzkumných sítí zaměřených obecně na využití technologie GNSS a v neposlední řadě je využívána také v účelových sítích lokálního charakteru.

Permanentní stanice TUBO vznikla v počátcích rozmachu technologie GNSS. Po celou dobu provozu permanentní stanice existovala snaha udržovat přístrojové vybavení této stanice na úrovni odpovídající aktuálnímu stavu přístrojové techniky. Vzhledem k neustálému vývoji nových GNSS aparatury, byla rovněž aparatura observující na bodě TUBO několikrát inovována. V roce 2001 byla na stanici TUBO instalována GNSS aparatura Trimble 4700. Po zahrnutí stanice do sítě CZEPOS roku 2005 byla tato aparatura nahrazena aparaturou Leica GRX1200PRO. Ta byla v roce 2011 vyměněna za aparaturu Leica GRX1200+GNSS, která umožňuje přijímání signálů družicových systémů GPS i GLONASS.

V rámci výměn družicových aparatur docházelo rovněž k výměnám GNSS antény instalované na bodě TUBO. V roce 2001 byla na bodě použita anténa Trimble TRM29659.00, která byla v roce 2005 nahrazena anténou Leica LEIAT504 LEIS. Ta byla roku 2011 vyměněna za anténu Leica LEIAR25.R4 LEIT, která je na bodě dodnes. V souvislosti s těmito změnami byla také aktualizována výška antény nad referenčním bodem, což vedlo ke změnám v určované výšce. V tabulce 4 jsou uvedeny souřadnice stanice TUBO, které byly platné v dílčích etapách provozu této stanice.

Tabulka 4 – Souřadnice bodu TUBO v systému ETRS89

Platnost souřadnic	φ	λ	h
od 12. 12. 2011 dosud	49° 12' 21.21026"	16° 35' 34.20396"	324.272
od 2. 1. 2011 do 12. 12. 2011	49° 12' 21.21026"	16° 35' 34.20396"	324.272
od 15. 6. 2010 do 1. 1. 2011	49° 12' 21.21002"	16° 35' 34.20403"	324.274
od 5. 10. 2009 do 14. 6. 2010	49° 12' 21.21004"	16° 35' 34.20399"	324.252
od 20. 7. 2007 do 4. 10. 2009	49° 12' 21.21009"	16° 35' 34.20379"	324.289
od 15. 12. 2005 do 20. 7. 2007	49° 12' 21.20976"	16° 35' 34.20421"	324.374

Souřadnice stanice platné od 12. 12. 2011 jsou shodné se souřadnicemi z předchozího období. Změna v tomto datu souvisí se změnou GNSS antény, při které došlo ke změně výšky antény.

Současně docházelo v průběhu provozu stanice ke změnám používaných referenčních systémů a k přeúčtování souřadnic permanentních GNSS stanic. Stanice TUBO byla zahrnuta např. do kampaně Czech, v rámci které byly v roce 2011 její

souřadnice přeurčeny. Tato kampaň se zabývá ověřováním polohy a monitoringem kvality dat a polohy permanentních stanic GNSS sloužících k určování polohy technologií GNSS v závazných referenčních souřadnicových systémech.

Výsledky jednotlivých experimentů popisovaných v kapitolách 4 až 8, které byly vázány na souřadnice stanice TUBO, byly v rámci této práce přepočítány tak, aby byly při vyhodnocování použity shodné souřadnice referenční stanice.

3.5 Modely kvazigeoidu

Model kvazigeoidu lze vytvářet pomocí několika metod. Mezi ty nejčastěji používané lze zařadit tyto metody:

- gravimetrická metoda,
- astronomicko-geodetická nivelace,
- GNSS/nivelace.

Výsledkem nejpřesnějších z nich (astronomicko-geodetické nivelace, gravimetrické metody) je buď relativní model kvazigeoidu, popřípadě geoid vztažený k referenčnímu elipsoidu, jehož střed je totožný s těžištěm Země. Pro praktické využití se používají modely vztažené k referenčním elipsoidům v běžně užívaných souřadnicových systémech, např. WGS84. Jednou z metod určování odlehlosti kvazigeoidu ζ vzhledem k elipsoidu WGS84 je právě metoda GNSS/nivelace. Je sice náročnější z hlediska měřických prací, ovšem v konkrétních měřených bodech nám přímo dává odlehlost kvazigeoidu od elipsoidu WGS84. Tato metoda bývá často použita pro absolutní umístění relativních modelů kvazigeoidu určených pomocí jiných metod anebo pro ověřování modelů kvazigeoidu, kdy umožňuje ve vybraných bodech nezávisle určit hodnotu převýšení kvazigeoidu nad elipsoidem.

Některé státy rovněž využívají jako vztažnou plochu pro své národní výškové systémy plochu kvazigeoidu. Ten je v některých případech určován metodou GNSS/nivelace anebo bývá jeho průběh tímto způsobem ověřován. Jedním z příkladů je výškový systém v Austrálii, pro jehož definici je použita jak plocha geoidu, tak kvazigeoidu. Také např. v Norsku využili metodu GNSS/nivelace k vytvoření vhodné výpočetní plochy pro převod výšek určených technologií GNSS na normální výšky. K tomuto účelu bylo využito měření na více než 1700 bodech. Výsledná plocha byla určena kombinací těchto dat s gravimetrickým kvazigeoidem [10] a [27].

Pro praktické použití existují numerické modely kvazigeoidu, které lze implementovat do výpočetních softwarů a použít při transformaci prostorových souřadnic při určování nadmořských výšek. Na území České republiky je k dispozici několik modelů kvazigeoidu. Když vynecháme globální modely definované pro celou zeměkouli (viz kap. 3.1.1), tak pro území naší republiky existují např. tyto modely kvazigeoidu:

- CR2005,
- dřívější modely určené VÚGTK.

Přesnou transformaci normálních a elipsoidických výšek nabízí kromě jiných služeb aplikace InGeoCalc poskytovaná prostřednictvím webové aplikace na stránkách VÚGTK. Konkrétně se jedná o aplikaci hTrans, která nabízí uživateli výběr ze čtyř modelů kvazigeoidu:

- EGM2008 – globální gravimetrický model,
- lokální gravimetrický model (vyvinutý prof. Novákem),
- InGeoCalc geometrický model (vyvinutý Ing. Kadlecem),
- InGeoCalc kombinovaný model – model kombinovaný z globálních i lokálních tíhových dat přizpůsobený českému výškovému systému Balt po vyrovnání na bodech výběrové údržby (vyvinutý Ing. Kadlecem).

Globální model EGM2008 je blíže popsán v kapitole 3.1.1. Lze jej upravit na transformační plochu mezi systémy WGS84 a Balt po vyrovnání jeho rektifikací na body GNSS/nivelace. Na základě odchylek převýšení kvazigeoidu určených pomocí modelu EGM2008 a hodnot určených z měření na bodech GNSS/nivelace byla zjištěna směrodatná odchylka těchto rozdílů 0,035 m. Touto hodnotou lze charakterizovat přesnost modelu na území ČR. Pro účely absolutního porovnání jednotlivých modelů je v aplikaci InGeoCalc uložen tento model ve své původní nerektifikované podobě, což má za následek, že výsledné výšky jsou systematicky odchýlené o hodnotu přibližně 0,39 m. Tato odchylka je způsobena použitím různých referenčních hladin použitých tíhových a výškových systémů.

Lokální gravimetrický model vyvinutý prof. Novákem pro území ČR v roce 2006 (někdy označován jako „gravimetrický kvazigeoid Novák 2006“) vznikl kombinací dlouhovlnné složky z globálního modelu EGM96 a krátkovlnné složky určené na základě terestrických gravimetrických měření. V aplikaci InGeoCalc je ponechán v podobě gravimetrického řešení, aby byla zachována možnost porovnání jednotlivých systémů. Z toho důvodu vykazuje při transformaci výšek systematický posun přibližně 0,40 m oproti systému Balt po vyrovnání, podobně jako v předchozím případě.

Geometrický kvazigeoid InGeoCalc označovaný jako IGC-GEOM 2011 byl určen interpolací na základě hodnot převýšení kvazigeoidu na bodech, jejichž výšky byly určeny jak v systému ETRS89 pomocí družicových měření, tak v systému Bpv prostřednictvím nivelačních měření. Jednalo se o body bodových polí evidované v databázi ČÚZK. Ověření přesnosti bylo provedeno metodou crossvalidace, kdy byla opakovaně provedena interpolace vždy s vynecháním jednoho bodu, který byl následně vyinterpolován. Tímto způsobem byla určena směrodatná odchylka 0,040 m charakterizující rozdíly měřených a interpolovaných hodnot. Z důvodu použití metody interpolace nedává tento model

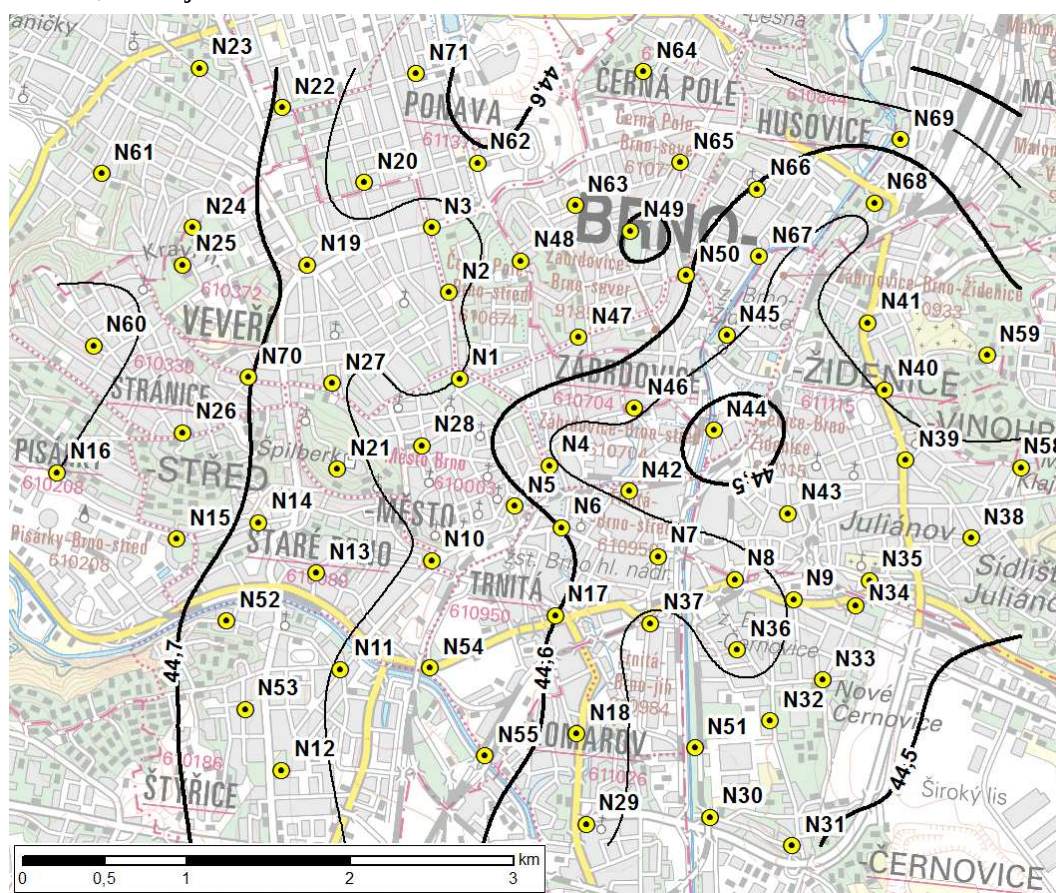
spolehlivé výsledky za hranicemi území ČR a i v jejich okolí, neboť zde může vlivem konfigurace bodů docházet k extrapolaci namísto interpolace.

Kombinovaný kvazigeoid InGeoCalc označovaný jako IGC-GRAV 2011 vychází z podrobného gravimetrického modelu Novák 2006, který byl rektifikován na bodech GNSS/nivelace použitých u předchozího modelu. Přesnost tohoto modelu byla opět určena metodou crossvalidace a lze ji vyjádřit směrodatnou odchylkou 0,029 m. V současné době lze tento model považovat za nejpodrobnější a nejpřesnější model kvazigeoidu pro území ČR. [30]

4 URČOVÁNÍ PRŮBĚHU KVAZIGEOIDU NA ÚZEMÍ MĚSTA BRNA

Jedním z hlavních cílů této práce je analýza přesnosti výškové složky při určování prostorové polohy bodů technologií GNSS. Tato problematika je v této práci řešena pomocí modelování průběhu kvazigeoidu metodou GNSS/nivelace. Tímto způsobem je možné porovnávat výsledky měření realizovaných technologií GNSS vzhledem k výsledkům nivelačních měření, která mají teoreticky řádově lepší přesnost při určování výšek.

Za tímto účelem byla na území města Brna vybudována síť výškových bodů, na kterých byla realizována potřebná měření. V roce 2006 byla započata testovací měření metodou GNSS/nivelace, přičemž elipsoidické výšky bodů byly určovány družicovými observacemi pomocí statické metody a nadmořské výšky byly určovány technickou nivelací. V roce 2008 tato síť obsahovala celkem 71 výškových bodů a pokryla část území města Brna, které je znázorněno na obrázku 8.



Obr. 8 – Model kvazigeoidu na části území města Brna z roku 2008, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

Body testovací sítě byly voleny tak, aby byly co nejbližší vybraným nivelačním bodům, a proto byly označovány písmenem „N“. Z obrázku je patrné, že průběh vytvořeného modelu kvazigeoidu není tak plynulý, jak bychom očekávali. To je způsobeno především dvěma faktory. Prvním z nich je přesnost výšek určených družicovými metodami, tuto přesnost lze charakterizovat směrodatnou odchylkou dosahující hodnoty několika centimetrů. Výškovou přesnost lze do jisté míry zlepšit vhodným postupem měření, čemuž jsou věnovány kapitoly 5 a 6. Druhým faktorem ovlivňujícím kvalitu modelu kvazigeoidu je přesnost nadmořských výšek. Nivelační měření, které bylo prováděno metodou technické nivelace, lze charakterizovat řádově milimetrovou přesností. Větší odchylky dosahující až několika centimetrů však mohou být způsobeny vlivem odchylek výchozích výškových bodů. Tyto odchylky je možno eliminovat pomocí nivelačních měření, kterými se výšky výchozích bodů ověří. Této problematice je věnována kapitola 7.1.2.

S rozvojem sítí permanentních GNSS stanic byl posléze navržen postup měření, který využíval pro určování elipsoidických výšek metody RTK. V této souvislosti byla realizována testovací měření, při kterých byly porovnávány výsledky získané prostřednictvím vybraných služeb jednotlivých sítí permanentních GNSS stanic. Popis a výsledky těchto testovacích měření jsou obsaženy v kapitole 5.

V návaznosti na výše popsaná testovací měření byl navržen projekt, v rámci kterého byl vytvořen model kvazigeoidu pomocí navrženého postupu měření metodou GNSS/nivelace. K tomu účelu bylo přistoupeno k rozšíření sítě bodů, které byly použity pro určování průběhu kvazigeoidu. Nově vznikla síť bodů AGNES (Astronomicko-GNSS-Nivelační Experimentální Síť), na kterých byla realizována potřebná měření.

Model určený metodou GNSS/nivelace byl následně ověřen pomocí kontrolního profilu na trase Velká Bíteš – Brno a především pomocí plošného porovnání na území města Brna s modelem kvazigeoidu určeného astronomickou metodou.

Na základě výsledků výše uvedených testovacích měření byl navržen specifický postup měření metodou GNSS/nivelace, při kterém dochází k určování elipsoidické i nadmořské výšky měřeného bodu současně, což přináší určité výhody. Popis navrženého způsobu měření, je uveden v kapitole 6.

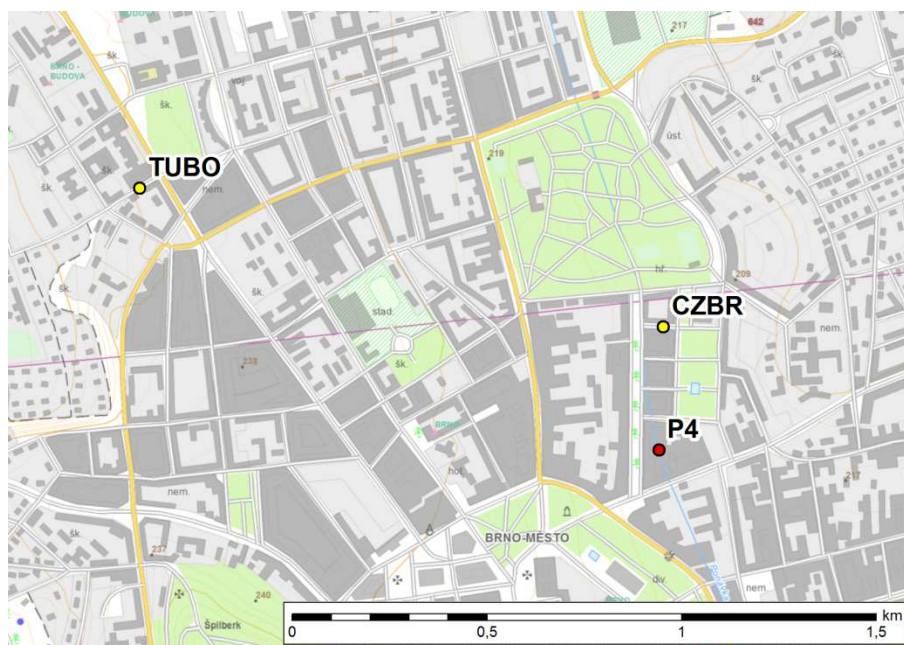
Experimentální měření byla navržena tak, aby bylo možné z naměřených dat vyhodnocovat přesnost výškové složky určované prostorové polohy v závislosti na zvolených parametrech. Především bylo sledováno, jak závisí tato přesnost na denní době, na délce observace, na zdroji použitých RTK korekcí aj. Také byla porovnávána přesnost výsledků získaných prostřednictvím RTK korekcí od různých poskytovatelů.

5 TESTOVÁNÍ SLUŽEB POSKYTOVANÝCH SÍTĚMI PERMANENTNÍCH GNSS STANIC

5.1 Vyhodnocení dlouhodobé observace

Za účelem testování přesnosti určování prostorové polohy bodu metodou RTK bylo navrženo experimentální měření, jehož cílem bylo zhodnotit přesnost opakovaného určení prostorové polohy bodu během jednoho dne (opakovatelnost). Opakovatelnost je definovaná jako těsnost shody mezi výsledky měření provedených při stejných podmínkách, tj. za použití stejné měřické metody, týmž pozorovatelem, týmž měřidlem, na stejném místě, za přibližně stejných pracovních podmínek a opakovaně po krátkém časovém úseku. Pro experimentální měření byly využity služby dvou vybraných sítí permanentních GNSS stanic – síť CZEPOS a síť Trimble VRS Now Czech.

Testovací měření se uskutečnilo na terase Střední průmyslové školy stavební, Kudelova 8 v Brně ve dnech 31. 8. a 1. 9. 2010. Na obrázku 9 je znázorněna vzájemná poloha testovacího bodu vůči nejbližším permanentním stanicím zvolených GNSS sítí. Pro měření bylo zvoleno stabilní postavení antény, tedy postavení aparatury na pilíři s nucenou centrací. K tomu účelu byl zvolen pilíř P4. Nucená centrace umožnila stabilní postavení GNSS antény po celou dobu observace, čímž byly eliminovány případné chyby opakované centrace.



Obr. 9 – Znázornění testovacího bodu a nejbližších permanentních GNSS stanic (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

5.1.1 Testovací měření přesnosti RTK observací

Při měření byly testovány vybrané služby jednotlivých sítí permanentních GNSS stanic poskytované v reálném čase. Pro získání srovnatelných výsledků byly vybrány odpovídající si služby. Obě sítě poskytují RTK korekce v různých formátech a různých variantách. V rámci testovacího měření byly zvoleny služby VRS3-MAX sítě CZEPOS a TVN_RTCM_31 sítě Trimble VRS Now Czech. Oba tyto typy RTK korekcí jsou generovány na základě síťového řešení i z ostatních stanic příslušné sítě a oba typy korekcí jsou poskytované ve formátu RTCM verze 3.1.

Měřický experiment byl navržen tak, aby splňoval podmínky opakovatelnosti – měření v jednom místě, v krátkém časovém úseku, stejnou metodou a stejnými přístroji. Cílem experimentu bylo zhodnotit přesnost opakovaného určení prostorové polohy bodu metodou RTK během 24 hodin a určit statistické rozložení odchylek vzhledem ke vztažné poloze bodu určené statickou metodou. Z toho důvodu byla současně s RTK observací registrována také statická data. Pro realizaci tohoto měření bylo použito speciální zapojení aparatur. K jedné GNSS anténě byly pomocí anténního rozdělovače připojeny tři GNSS přijímače (viz obr. 10) – první zaznamenával statická data, druhý přijímal RTK korekce sítě CZEPOS (služba VRS3-MAX) a třetí přijímal korekce sítě Trimble VRS Now Czech (služba TVN_RTCM_31).

Zapojení všech přijímačů ke stejné anténě umožnilo, že aparatury přijímaly totožné signály. Výsledky prostorové polohy pomocí jednotlivých aparatur byly tudíž získány za shodné konfigurace družic, se stejnými vlivy z nepřesnosti parametrů fázového centra antény a za shodného působení všech systematických vlivů v průběhu observace. Obě aparatury přijímající korekce RTK byly připojeny k internetu prostřednictvím stejného mobilního operátora a jednalo se o stejný model aparatury Leica System 1200. Jediný faktor, ve kterém se měření jednotlivými aparaturami lišilo, byl poskytovatel korekcí RTK a typ přijímaných korekcí.



Obr. 10 – a) zapojení GNSS aparatur, b) anténní rozdělovač signálu

Všechny aparatury observovaly po dobu 24 hodin. RTK pozice se shodně ukládaly v 1sekundovém intervalu. Pro měření byly použity dvě aparatury Leica System 1200 a jedna aparatura Leica System 500. Přijímače byly připojeny k anténě Leica AX 1202GG (viz obr. 10). Ukázka záznamu registrovaných dat je obsahem přílohy č. 1.

5.1.2 Zpracování statické observace

Výchozí souřadnice bodu P4, vůči kterým byly vztahovány výsledky měření metodou RTK, byly určeny statickou metodou. Na testovacím bodě P4 bylo získáno přibližně 20 hodin statických dat. Jako referenční stanice byly vybrány brněnské stanice obou použitých sítí – TUBO (CZEPOS) a CZBR (Trimble VRS Now Czech) (viz obr. 9).

Vztažné souřadnice byly vypočteny zvlášť pro síť CZEPOS a zvlášť pro síť Trimble VRS Now Czech z referenčních bodů TUBO a CZBR. Pro oba případy tedy byla určena odpovídající vztažná poloha určovaného bodu. Výpočet byl proveden v programu Leica Geo Office verze 5. Při výpočtu byly nastaveny následující parametry:

- typ řešení: GPS,
- frekvence: L1 a L2,
- elevační maska: 15 °,
- model troposféry: Saastamoinen,
- model ionosféry: standardní.

Poloha bodu P4 určená pomocí připojení na bod TUBO se od připojení na bod CZBR lišila v řádu milimetrů. S ohledem na přesnost určení polohy touto metodou nelze konstatovat žádný nesoulad vzájemné homogenity použitých sítí permanentních stanic.

5.1.3 Zpracování RTK observací

Jednotlivá měření metodou RTK byla registrována s intervalem záznamu dat 1 s. Celkem bylo naměřeno téměř 98 tisíc prostorových souřadnic každou aparaturou, která zaznamenávala RTK observace. Ukázalo se, že přijímače neměly po celou dobu experimentu dostupné připojení k internetu, a tedy nepřijímaly RTK korekce (pravděpodobně z důvodu přetížení mobilní datové sítě GPRS). V souboru se díky tomu vyskytovala nezafixovaná řešení, která byla značně odlehlá a do zpracování nebyla zahrnuta.

Při praktickém měření se pro určení souřadnic bodu nepoužívají observace s délkou pouze 1 s. Např. pro účely určování souřadnic bodu pro katastr nemovitostí je stanoveno registrovat minimálně pět odečtů souřadnic. Při testování přesnosti sítě CZEPOS z roku 2006 [31] byly vyhodnocovány 20s, 40s a 60s observace, přičemž ve výsledcích se zvýšení přesnosti použitím observací delších než 20 s výrazně neprojevovalo. Z toho důvodu byly v rámci popsaného experimentu z 1sekundových dat vypočteny 5sekundové

a 20sekundové klouzavé průměry bez překrytí průměrovaných hodnot. Tím došlo k určitému vyhlazení a získání informace o přesnosti průměrovaných měření. Následně bylo provedeno statistické vyhodnocení 1sekundových, 5sekundových a 20sekundových řešení pro obě použité služby zvlášť.

5.1.4 Vyhodnocení polohové složky

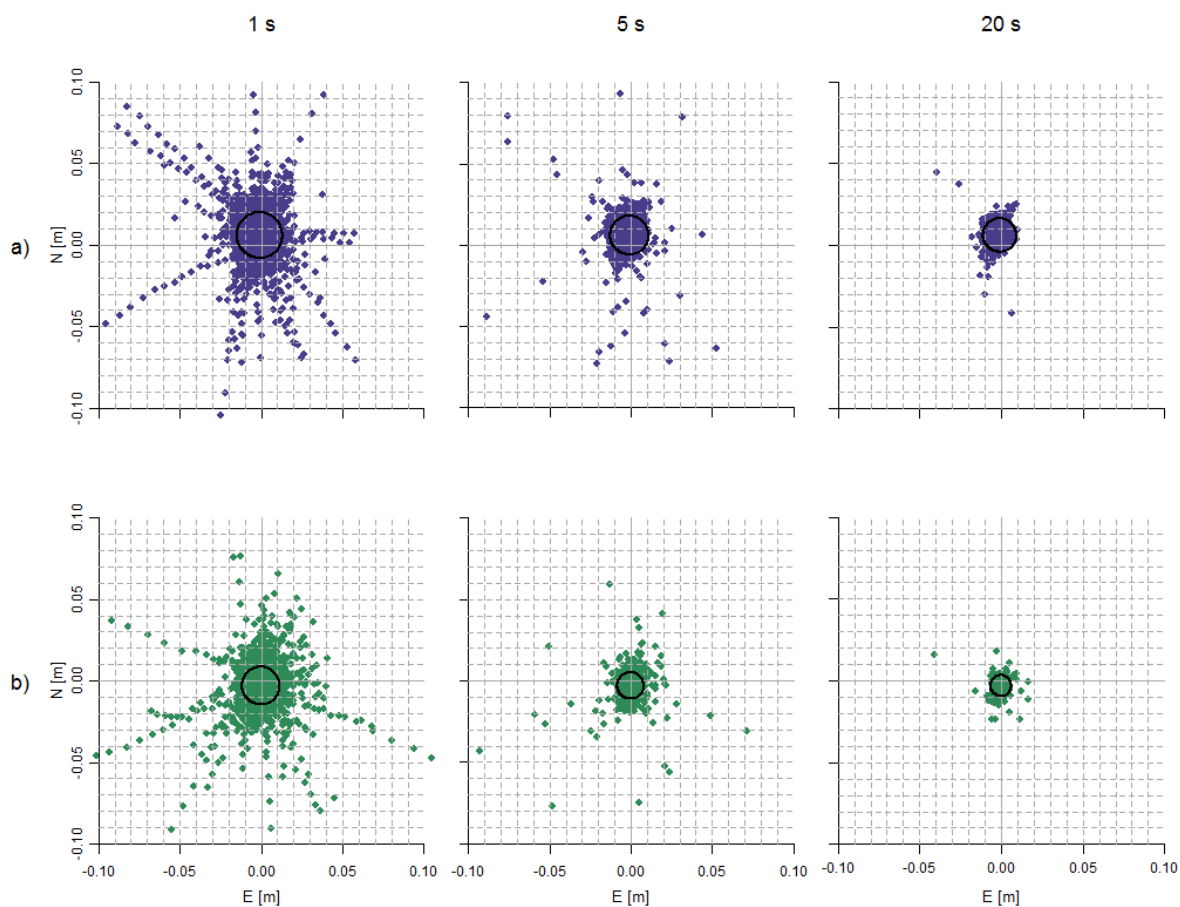
Vztažné souřadnice pro výpočet souřadnicových odchylek byly vypočteny zvlášť pro síť CZEPOS a zvlášť pro síť Trimble VRS Now pomocí postprocessingového zpracování statických dat. Jako referenční stanice byly použity stanice TUBO a CZBR pro řešení prostorové polohy v rámci příslušné sítě permanentních stanic.

Za účelem vyhodnocení polohové přesnosti určení bodu byly z naměřených prostorových souřadnic v systému ETRS-89 (B , L , h) vypočteny jejich odchylky od vztažné polohy určené statickou metodou. Tyto odchylky byly převedeny na odchylky ve směrech N (sever), E (východ), U (nahoru). Z nich byla odvozena přesnost polohové složky. Parametry přesnosti polohové složky jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 – Empirické charakteristiky polohové složky

síť	data	Střední polohová chyba [m]
CZEPOS	1s	0,007
	5s	0,006
	20s	0,006
Trimble VRS Now Czech	1s	0,006
	5s	0,004
	20s	0,003

Polohové odchylky 1sekundových, 5sekundových a 20sekundových řešení jsou znázorněny na obrázku 11.



Obr. 11 – Znázornění polohových odchylek a) sítě CZEPOS, b) sítě Trimble VRS Now

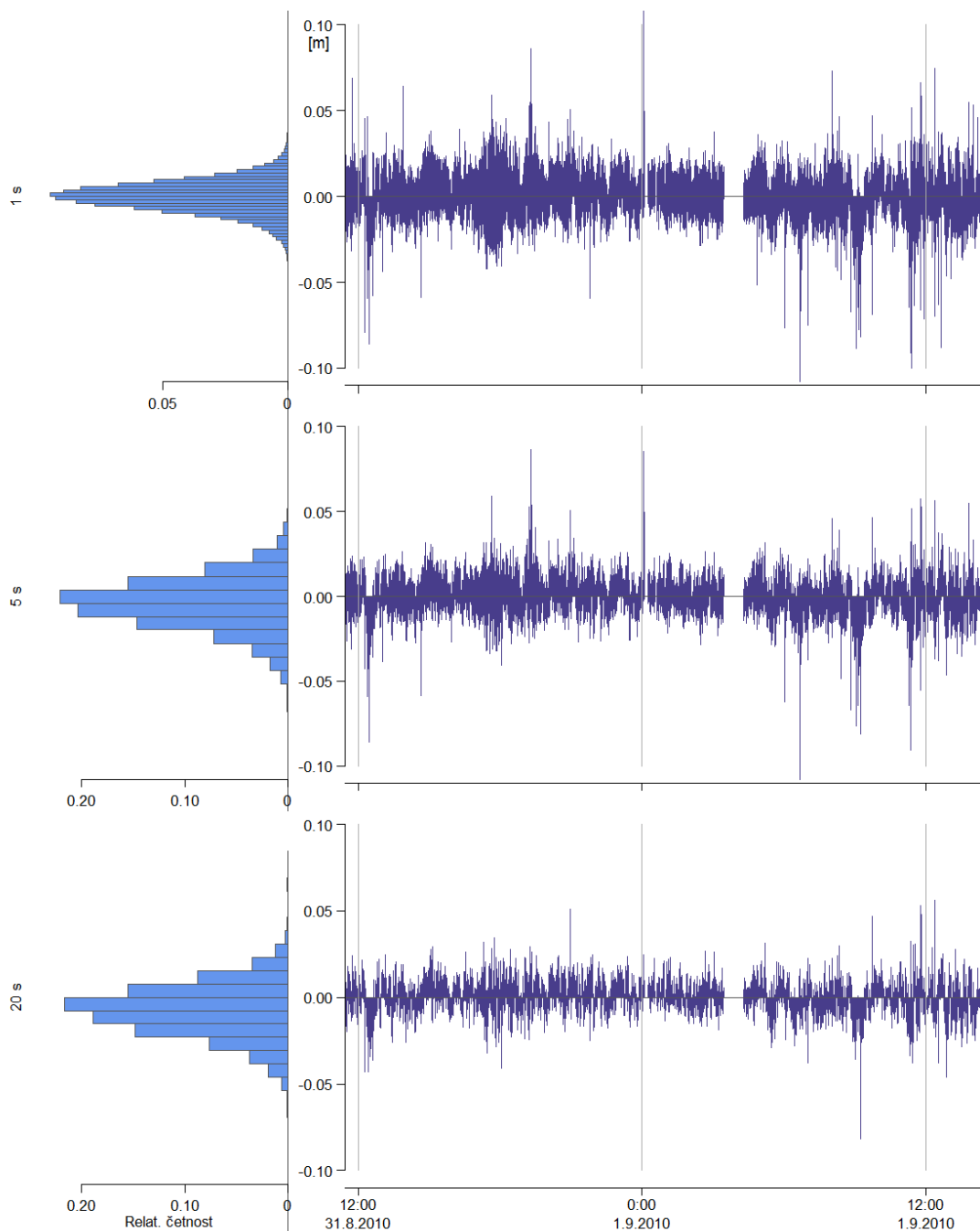
Ze znázorněných odchylek je patrná tendence zlepšující se přesnosti při použití 5sekundových nebo 20sekundových průměrů. Zároveň jsou v obrázku patrné ty observace, které byly registrovány těsně po ztrátě přijímání korekcí, kdy ještě aparatura po krátkou dobu používala pro fixování polohy „starší“ korekční data. Tyto chyby se částečně vyhladí při delších observacích, což je patrné na znázornění odchylek 5sekundových a 20sekundových observací. Kružnice v grafech vymezují oblast ohraničenou velikostí střední souřadnicové chyby znázorněných odchylek.

5.1.5 Vyhodnocení výškové složky

Při měření byly registrovány souřadnice v systému ETRS-89 (B , L , h), ze kterých byla následně vyhodnocována přesnost elipsoidické výšky h . Vzhledem k použitému postupu měření při tomto testování lze tvrdit, že vyhodnocované veličiny jsou zatíženy pouze systematickými chybami GNSS observace a chybami spojenými s přenosem RTK korekcí.

Aby bylo srovnání jednotlivých sledovaných faktorů vzájemně relevantní, bylo provedeno vyhodnocení v časovém intervalu, ve kterém byly k dispozici RTK korekce

z obou použitých sítí permanentních stanic. Ty byly k dispozici po dobu téměř 23 hodin. Na obrázku 12 je znázorněn časový průběh výškových odchylek od jejich střední hodnoty, který byl získán pomocí korekcí ze sítě CZEPOS. Pro lepší názornost objemu registrovaných dat jsou na obrázku znázorněny také histogramy relativní četnosti výškových odchylek.

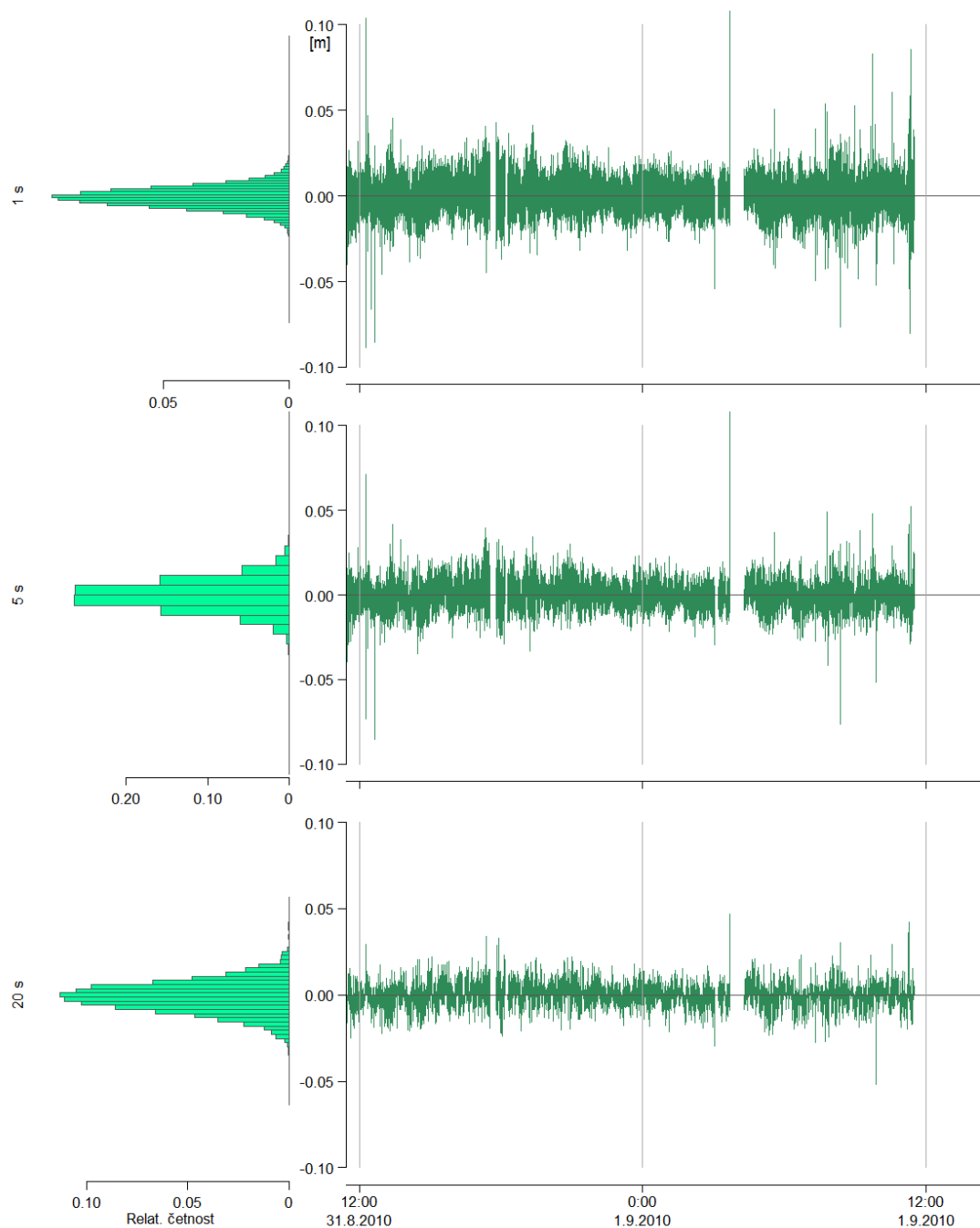


Obr. 12 – Časový průběh výškových odchylek – CZEPOS

Z obrázku je patrné jakých hodnot nabývají výškové odchylky v průběhu celého měření. Kromě odchylek od střední hodnoty měřených veličin byly vyhodnoceny také odchylky jednotlivých hodnot výšky h od výšky získané zpracováním statickou metodu.

Tím byla prověřena homogenita poskytovaných dat jednotlivých sítí permanentních stanic prostřednictvím korekcí RTK a prostřednictvím dat ve formátu RINEX poskytovaných pro zpracování postprocessingu.

Časový průběh výškových odchylek, který byl získán pomocí korekcí ze sítě Trimble VRS Now Czech, je zobrazen na obrázku 13.



Obr. 13 – Časový průběh výškových odchylek – Trimble VRS Now

V případě výsledků získaných pomocí korekcí obou sítí došlo po výpočtu 5sekundových a 20sekundových průměrů k vyhlazení odchylek, směrodatné odchylky jednotlivých souborů dat se výrazně nesnižovaly. Spíše bylo patrné výraznější vyhlazení

odlehlejších hodnot. Při zpracování odchylek byly rovněž porovnány střední hodnoty výšky určené metodou RTK z celé délky observace se vztažnými souřadnicemi ze statické metody. Jak pro síť CZEPOS, tak pro síť Trimble VRS Now Czech byla průměrná poloha určená metodou RTK odchýlena od vztažných souřadnic určených statickou metodou nejvýše o 0,002 m. Tím byla ověřena správnost nastavení výpočetních parametrů při postprocessingu, nastavení parametrů použitých antén, popř. jiných systematických vlivů.

Empirické směrodatné odchylky ve výškové složce zjištěné v rámci tohoto zpracování jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 – Empirické střední hodnoty a směrodatné odchylky výškových odchylek

síť	data	střední hodnota H [m]	směrodatná odchylka [m]
CZEPOS	1s	270,556	0,011
	5s	270,556	0,009
	20s	270,556	0,008
Trimble VRS Now Czech	1s	270,552	0,010
	5s	270,552	0,008
	20s	270,552	0,006

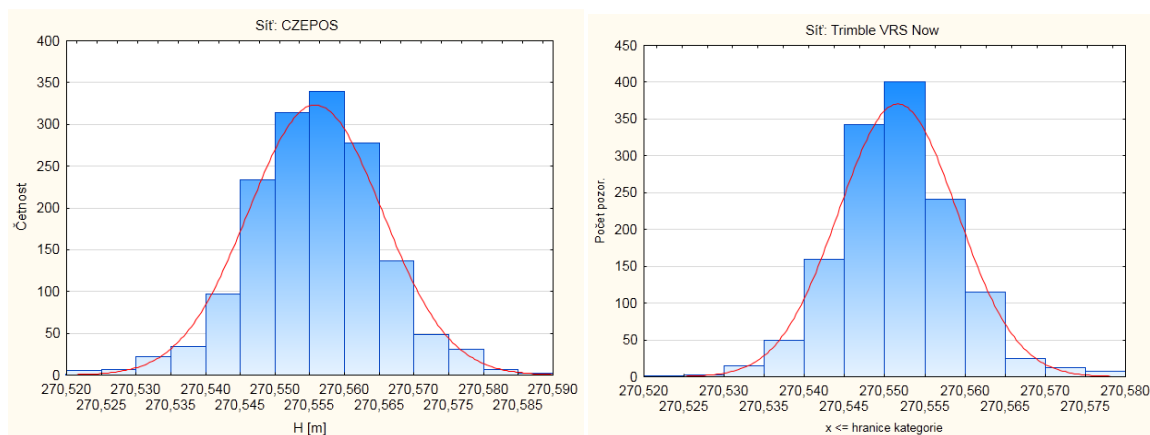
Rozdíl výšek určených pomocí korekcí jednotlivých sítí permanentních GNSS stanic může být způsoben vzájemnou nehomogenitou při určení souřadnic jednotlivých referenčních stanic. Obdobná odlehlost vyšla i ze zpracování statické observace. Nicméně vzhledem k přesnosti, s jakou jsou výšky určeny, tato odchylka neproказuje systematický posun mezi výsledky získanými pomocí vybraných sítí permanentních GNSS stanic.

5.1.6 Statistické vyhodnocení

Před vyhodnocením charakteristik přesnosti měřených veličin byl soubor zpracovávaných odchylek podroben statistickému testování. V rámci testování bylo ověřeno, že odchylky neobsahují systematicky odlehlé hodnoty, a že se jedná o výběr s normálním rozdělením. Statistické testování bylo provedeno v programu STATISTICA 10 společnosti StatSoft. Na testované soubory odchylek byl nejprve aplikován test normality a následně byly určovány jednotlivé statistické charakteristiky naměřených dat.

Původní soubor získaný z observace delší než 24 h obsahoval téměř 98 tisíc registrovaných hodnot pro každou z použitých sítí permanentních stanic. Statistický software deklaruje, že testy normality nemá smysl používat při „příliš velkém“ množství dat, protože mají tendenci zamítnout hypotézu, že testovaný vzorek splňuje normální

rozdělení na základě nepatrných a nepodstatných odchylek [47]. Z toho důvodu byly z jednotlivých testovaných souborů (1s data, 5s data, 20s data) vytvořeny náhodné výběry, které obsahovaly pouze několik desítek hodnot. Na základě statistických testů normality (Lilieforsovy modifikace Kolmogorov-Smirnovova testu a Shapiro-Wilkova testu) byly postupně zamítnuty hypotézy, že jednotlivé vzorky neodpovídají normálnímu rozdělení na hladině statistické významnosti 5 %. Lze tedy s uvedeným rizikem konstatovat, že testované výběrové soubory splňují normální rozdělení (viz obr. 14). O normálnosti rozdělení původního souboru odchylek lze rozhodnout pomocí grafického zhodnocení histogramů četnosti souborů se všemi registrovanými daty, pomocí grafického vyhodnocení průběhu grafu distribuční funkce a tzv. kvantil-kvantilového grafu. Na základě průběhu těchto grafů lze konstatovat, že odpovídají očekávanému normálnímu rozdělení (viz. obr. 12 a obr. 13).



Obr. 14 – Histogramy četností výškových odchylek určených pomocí sítě CZEPOS a Trimble VRS Now

Dále byla na těchto testovaných souborech zjišťována míra korelace výsledné nadmořské výšky H a vybraných vlivů (použitá síť permanentních stanic, denní doba). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.

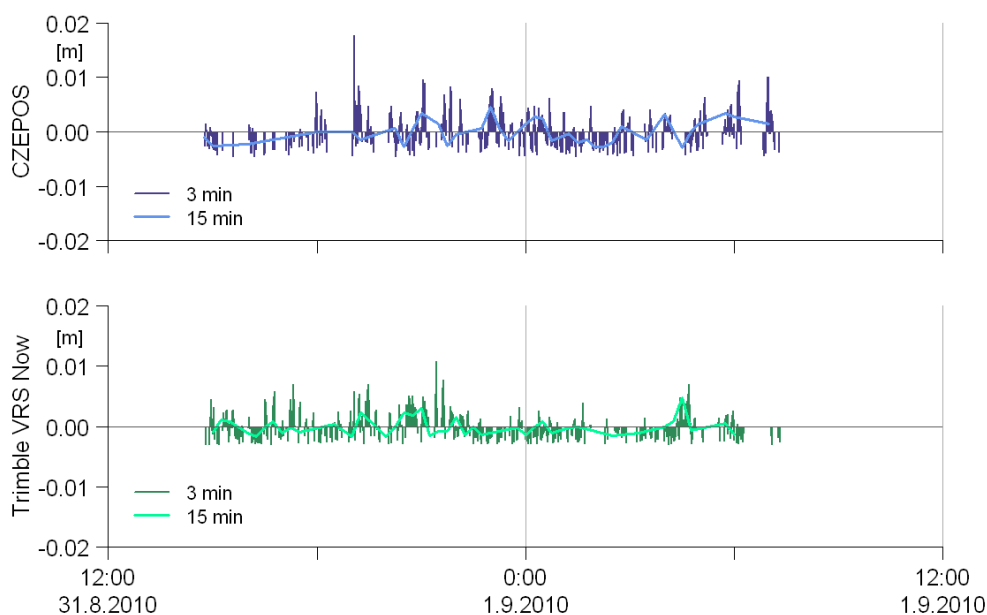
Tabulka 7 – Statistické vyhodnocení souboru naměřených dat

sít	faktor		střední hodnota H [m]	směrodatná odchylka [m]	koeficient korelace	statistické vyhodnocení
CZEPOS	síť perm. stanic	den	270,556	0,010	-0,233	nízká korelace
Trimble VRS Now		noc	270,552	0,008		
CZEPOS	denní doba	den	270,555	0,010	0,139	nízká korelace
		noc	270,558	0,008		
Trimble VRS Now	denní doba	den	270,552	0,008	-0,009	žádná korelace
		noc	270,552	0,007		

Tučně zvýrazněné hodnoty jsou statisticky signifikantní na hladině významnosti 5 %. Všechny testy vyhodnotily nízkou nebo téměř žádnou míru závislosti srovnávaných veličin. Z dat získaných tímto experimentem nebyla potvrzena vzájemná závislost naměřené výšky na vybraných faktorech.

5.1.7 Vyhodnocení observace statickou metodou

Kromě výpočtu vztažných souřadnic bodu P4 byla statická data využita pro vytvoření časové řady znázorňující změny v určení prostorové polohy pomocí řešení po kratších intervalech. Obvykle se při praktickém měření pomocí dvoufrekvenční GNSS aparatury volí délka statické observace přibližně 15 minut, protože je to ve většině případů dostatečně dlouhá doba k úspěšnému vyřešení ambiguit a výpočtu souřadnic. Samozřejmě s ohledem na vzdálenost od referenční stanice, stav zastínění obzoru na určovaném bodě a další faktory, může být délka observace jiná. V rámci tohoto zpracování byla statická observace vyhodnocena dvěma způsoby. Výpočet souřadnic byl uskutečněn postupně v jednotlivých intervalech (výpočtových oknech) v průběhu celé délky observace. Posouváním těchto výpočtových oken byly získány souřadnice pro každé okno, a tím vznikla časová řada. Za prvé byl realizován výpočet v 15minutových intervalech, které byly od sebe posunuty o 15 minut a za druhé v 3minutových intervalech s odstupem 1 minuta. Interval s délkou observace 3 minuty se ukázal jako nejkratší možný pro úspěšné vyřešení ambiguit při zpracování měření s nastavením parametrů, které byly uvedeny v kapitole 5.1.2. Grafické znázornění výškových odchylek jednotlivých řešení vzhledem ke vztažným souřadnicím je zobrazeno na obrázku 15.



Obr. 15 – Grafické znázornění výškových odchylek ze statické observace

V tabulce 8 jsou uvedeny souhrnné informace popisující vyhodnocovaný soubor výškových odchylek.

Tabulka 8 – Vyhodnocení výškových odchylek ze statické observace

sít'	délka observace	počet řešení	minimální odchylka [m]	maximální odchylka [m]	směrodatná odchylka [m]
CZEPOS	3 min	1041	-0,022	0,022	0,006
	15 min	69	-0,013	0,008	0,005
Trimble VRS	3 min	1041	-0,011	0,014	0,004
Now Czech	15 min	69	-0,006	0,007	0,002

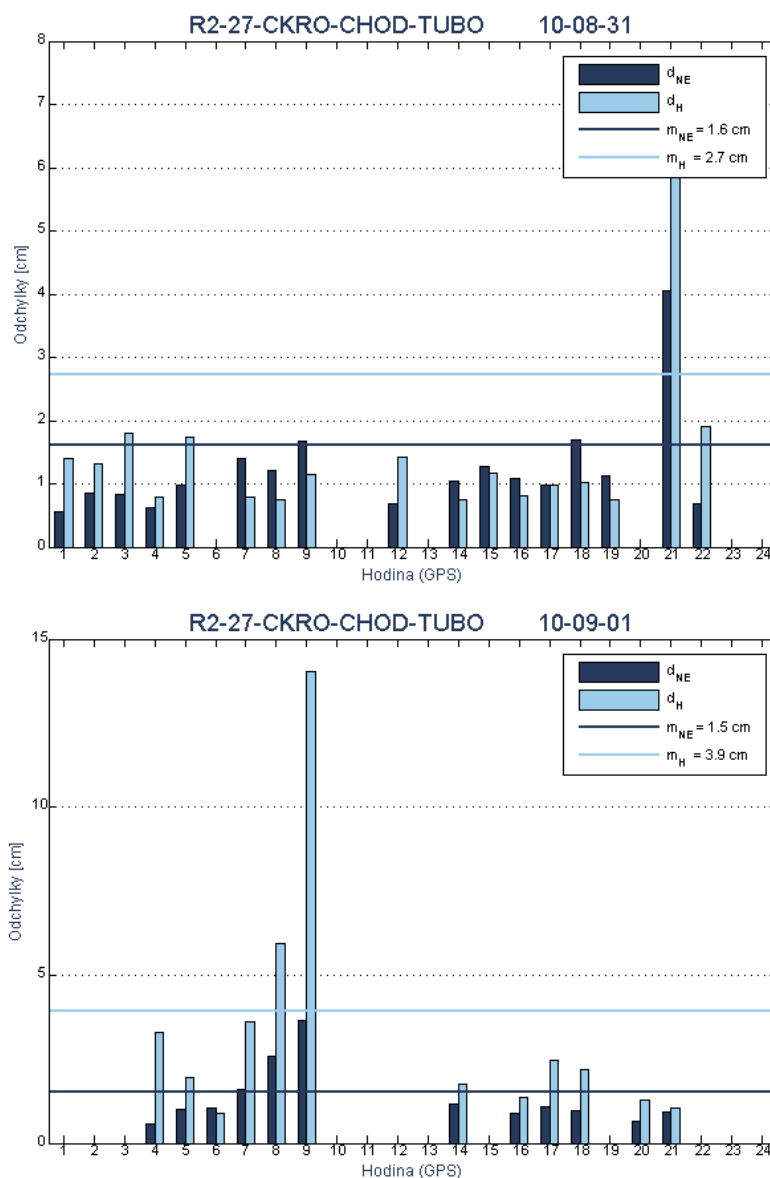
Uvedené hodnoty odchylek potvrdily předpoklad, že výsledky statické observace vykazují vyšší přesnost než výsledky získané metodou RTK. Soubor odchylek dokonce téměř neobsahoval takové hodnoty, které by výrazně převyšovaly trojnásobek směrodatné odchylky. Tato hodnota statisticky vymezuje interval, ve kterém by se mělo nacházet 99,7 % naměřených hodnot.

Rovněž byly porovnány také souřadnice bodu P4 určené statickou metodou s připojením na bod TUBO sítě CZEPOS se souřadnicemi určenými s připojením na bod CZBR sítě Trimble VRS Now Czech. Tyto souřadnice byly používány jako vztažné při vyhodnocení výsledků získaných metodou RTK. Jejich odchylka v polohové složce dosahuje hodnoty 0,008 m, ve výškové složce hodnoty 0,010 m. Vzhledem k velikostem hodnot směrodatných odchylek určených na základě dat jednotlivých sítí nelze tvrdit, že by se na základě tohoto měření dala tato odlehlost charakterizovat jako vzájemný nesoulad v souřadnicích připojovacích permanentních stanic. Jedná se o odchylku v rámci přesnosti použité metody měření.

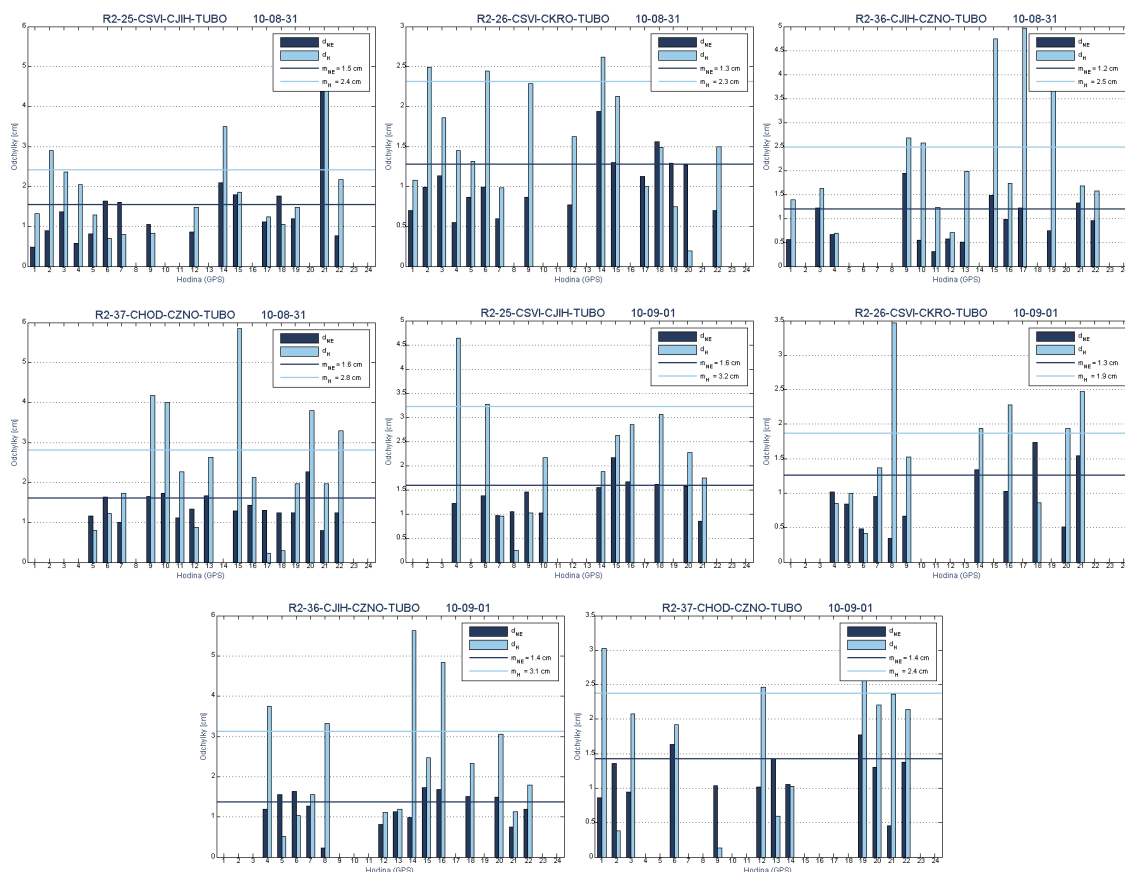
Na základě srovnání výsledků metody RTK, které jsou uvedeny v tabulce 6, s výsledky statické metody uvedenými v tabulce 8 lze potvrdit, že použitím statické metody lze dosáhnout vyšší přesnosti určovaných výšek oproti metodě RTK. Nicméně při použití dostatečně dlouhé doby observace je možné dosáhnout pomocí obou metod výsledné prostorové polohy charakterizované směrodatnou odchylkou lepší než 0,010 m. Použití statické metody má také svoje nevýhody, jednou z nich je větší časová náročnost na měření oproti metodě RTK. Také nesmíme zapomínat, že výsledky získané statickou metodou mohou být zatíženy případnými chybami v určení prostorové polohy použité referenční stanice.

5.1.8 Kontrola kvality služeb sítě CZEPOS

Přesnost odchylek získaných pomocí korekcí sítě CZEPOS je možné konfrontovat také s výsledky permanentní kontroly přesnosti síťového řešení, které v té době již byly poskytovány na webových stránkách sítě CZEPOS (viz kap. 3.4.1). Pro tyto účely jsou permanentní stanice rozděleny do trojúhelníkové sítě, přičemž přesnost síťového řešení je vyhodnocována zvlášť pro každou oblast trojúhelníkového tvaru. Na obrázku 16 jsou zobrazeny grafy znázorňující průběh přesnosti síťového řešení v době měření popisovaného experimentu [38]. Lokalita měření se nachází uvnitř oblasti vymezené stanicemi CKRO, CHOD a TUBO. Vzhledem k tomu, že se tato lokalita nachází výrazně blíže ke stanici TUBO než k ostatním permanentním stanicím, jsou na obrázku 17 uvedeny rovněž grafy ostatních vyhodnocovaných oblastí v okolí stanice TUBO.



Obr. 16 – Grafy přesnosti síťového řešení pro oblast CKRO-CHOD-TUBO [38]



Obr. 17 – Grafy přesnosti síťového řešení pro ostatní oblasti v okolí stanice TUBO

5.1.9 Určování doby inicializace

Jedním z dalších ukazatelů kvality služeb poskytovaných permanentními stanicemi je také doba inicializace. To je čas potřebný k dosažení fixního řešení od okamžiku, kdy GNSS aparatura odešle požadavek k odběru korekčních dat (viz kap. 3.3.9). Za účelem testování tohoto ukazatele bylo realizováno další testovací měření. V rámci tohoto měření byly na šesti testovacích bodech opakovaně realizovány RTK observace, při kterých byly využívány korekce ze sítí CZEPOS, TopNET i Trimble VRS Now Czech. Seznam vybraných služeb, které byly při měření využívány, je uveden v tabulce 9.

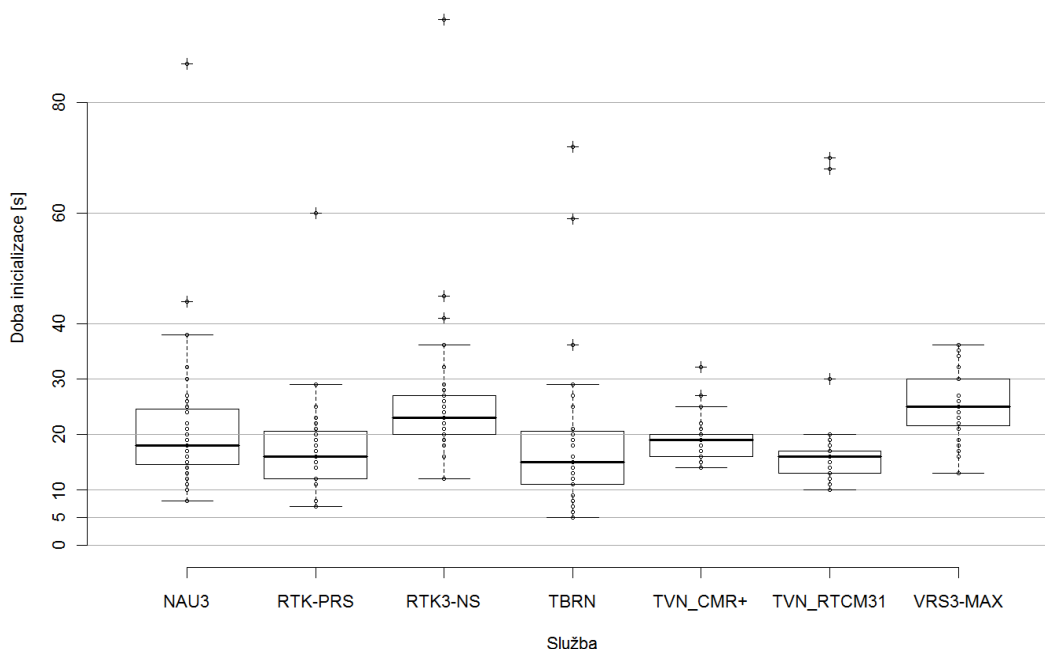
Tento experiment byl uskutečněn v roce 2009. V té době ještě síť TopNET neposkytovala korekce generované pomocí síťového řešení, proto tato služba není obsažena mezi testovanými službami.

Pořadí měření bylo navrženo tak, aby se střídali RTK služby různých poskytovatelů. Tím bylo zajištěno, že se aparatura odpojila od jednoho NtripCasteru, připojila se k druhému a proces fixace probíhal vždy od stavu, kdy měla aparatura k dispozici pouze svoji polohu s navigační přesností. Měření bylo realizováno postupně na šesti bodech, aby došlo také k obměně podmínek družicových observací.

Tabulka 9 – Seznam testovaných RTK služeb

síť	služba	formát dat
CZEPOS	RTK-PRS	(RTCM2.3)
	RTK-NS	(RTCM3.1)
	VRS3-MAX	(RTCM3.1)
Trimble VRS Now Czech	TVN_RTCM_31	(RTCM3.1)
	TVN_CMV_PLUS	(CMV+)
TopNET	NAU3	(RTCM3.0)
	TBRN	(RTCM2.3)

Na obrázku 18 jsou znázorněny doby inicializace, které byly dosaženy v případě použití jednotlivých služeb. Z grafu vyplývá, že střední hodnota doby inicializace je ve všech případech menší než 30 s.

**Obr. 18 – Vyhodnocení doby inicializace jednotlivých služeb [19]**

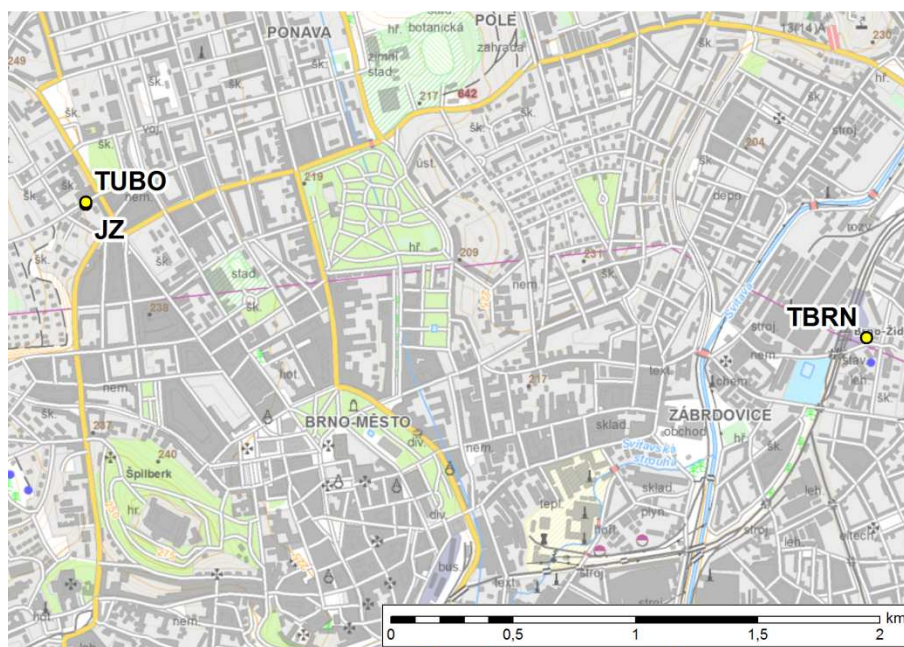
Testování proběhlo v městské zástavbě, kde může být na rozdíl od lokalit v extravilánu kvalitnější pokrytí signálem GSM pro připojení k internetu prostřednictvím GPRS anebo EDGE. Dalo by se očekávat, že při použití korekcí generovaných pomocí síťového řešení bude doba inicializace delší než při použití korekcí z konkrétní stanice. Tuto hypotézu z testovaných služeb nepotvrdily např. služby RTK-NS a RTK-PRS sítě CZEPOS anebo TVN_RTCM_31 sítě Trimble VRS Now Czech. Doba inicializace služby RTK-NS byla delší než u obdobné služby ze sítě TopNET. To mohlo být způsobeno např. nutností obousměrné komunikace, která musí proběhnout s NtripCasterem na rozdíl od případu, kdy v aparatuře předem zvolíme permanentní stanici, ze které požadujeme

odběr korekcí. Naproti tomu služby RTK-PRS a TVN_RTCM_31, které poskytují korekce na základě síťového řešení, měly i přesto kratší dobu inicializace než některé služby poskytující korekce z konkrétní permanentní GNSS stanice.

5.2 Opakování dlouhodobé observace

Z důvodu aktuálnosti zjišťovaných parametrů GNSS observací bylo dlouhodobé GNSS měření metodou RTK realizováno znovu s odstupem dvou let. Ve dnech 29. a 30. listopadu 2012 byla uskutečněna 24h observace na pilíři s nucenou centrací na terase Ústavu geodézie Fakulty stavební VUT v Brně (viz obr. 19). Prostorová poloha tohoto bodu byla registrována metodou RTK s intervalem záznamu dat 1 s. Korekce měřených dat byly získávány ze sítě CZEPOS (služba VRS3-MAX) a ze sítě TopNET (služba NVR3).

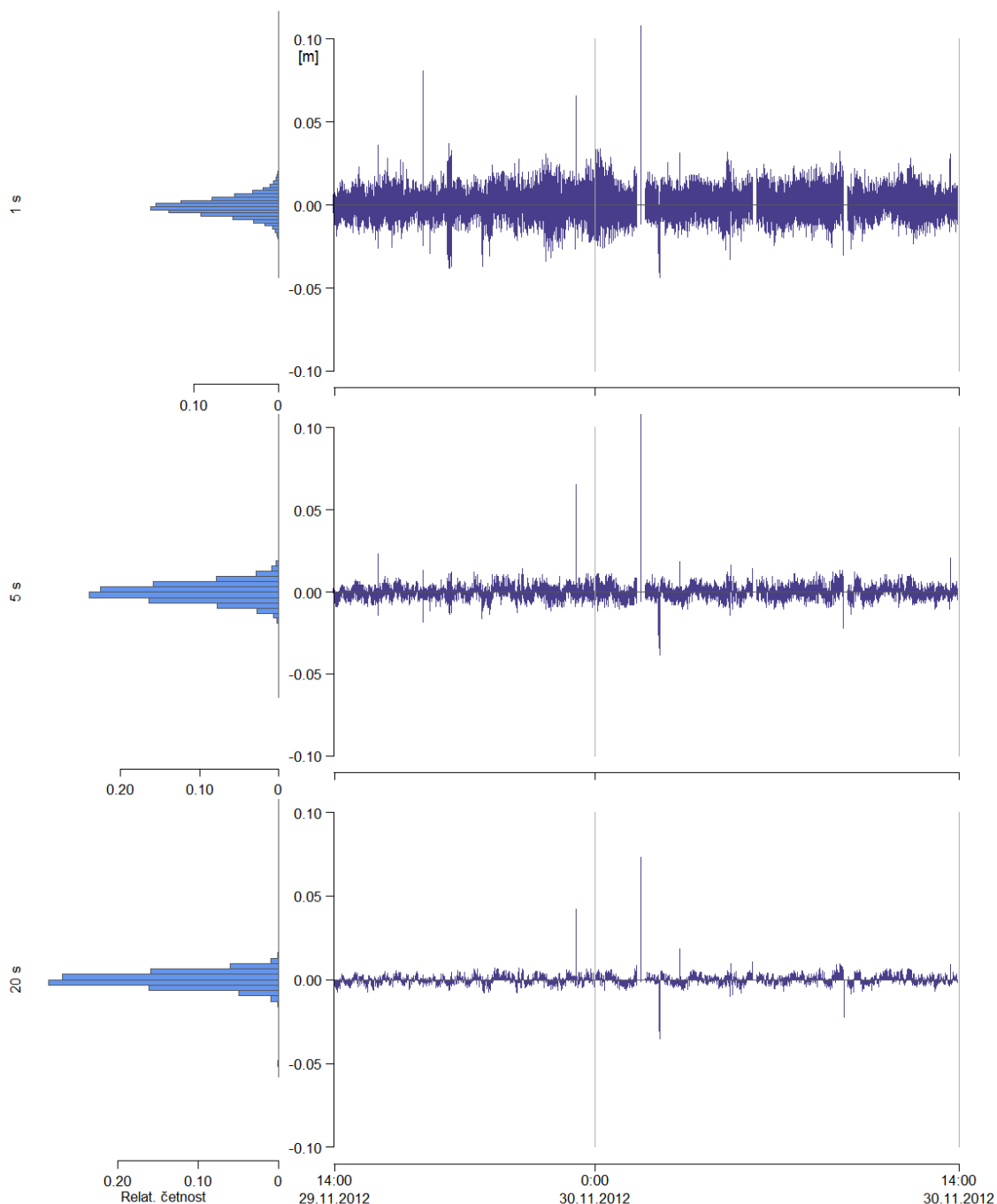
Vzdálenost nejbližších permanentních stanic obou sítí vzhledem k observovanému bodu nebyla příliš srovnatelná, z toho důvodu bylo voleno síťové řešení, které zohledňuje rovněž observace na okolních permanentních stanicích jednotlivých sítí. Obě použité služby poskytují korekce ze síťového řešení příslušné sítě permanentních GNSS stanic prostřednictvím protokolu RTCM3.1. Při měření byly použity dvě aparatury Leica System 1200, které byly pomocí anténního rozdělovače připojeny k jedné anténě Leica AX 1202GG, podobně jako tomu bylo během předchozího testovacího měření.



Obr. 19 – Znárodnění bodu JZ a nejbližších permanentních GNSS stanic (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

V rámci tohoto testování nebyla registrována statická observace, jako vztažná hodnota výšky bodu byla použita střední hodnota z naměřených veličin. Registrovaná data byla zpracována stejným postupem, jako v předchozí kapitole. Z registrovaných 1s dat

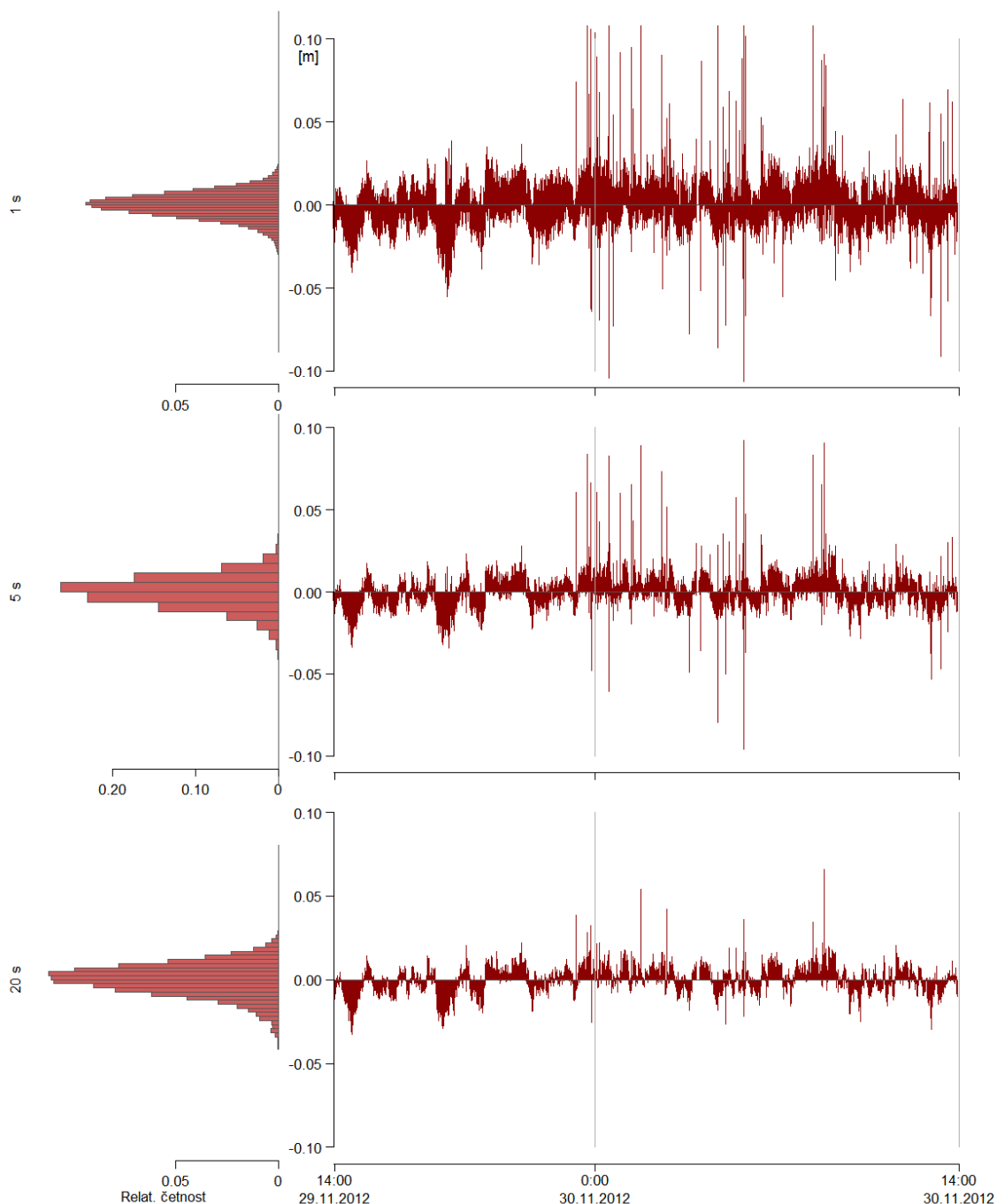
byly vypočteny 5s a 20s průměry z hodnot získaných pomocí korekcí ze sítě CZEPOS (viz obr. 20) a z hodnot získaných pomocí korekcí sítě TopNET (viz obr. 21). Vedle grafů s časovým průběhem výškových odchylek byly vyhotoveny opět histogramy relativní četnosti těchto odchylek.



Obr. 20 – Časový průběh výškových odchylek – CZEPOS

Opět byly určovány odchylky ve výškové složce od jejich střední hodnoty a zjišťovány parametry přesnosti elipsoidické výšky h . Podobně jako v předchozím experimentu nebylo k dispozici fixované řešení prostorové polohy po celou dobu observace. Před těmito výpadky opět předcházelo stav, kdy docházelo k postupnému

zhoršování aktuální přesnosti určení bodu, i když aparatura stále vyhodnocovala polohu jako fixovanou. Tyto hodnoty byly ze zpracování rovněž vyloučeny. Při praktickém měření by měřič obsluhující aparaturu tato měření neregistroval, v rámci automatizovaného záznamu však byly registrovány všechny získané výsledky prostorové polohy.



Obr. 21 – Časový průběh výškových odchylek – TopNET

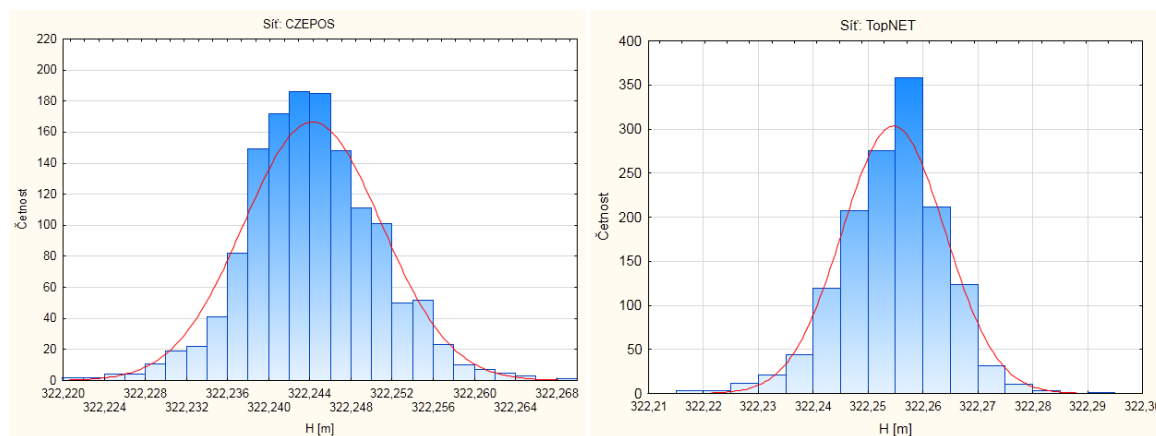
Číselně lze soubor naměřených hodnot elipsoidické výšky charakterizovat pomocí středních hodnot a směrodatných odchylek uvedených v tabulce 10. Z výsledků vyplývá neobvyklé zvýšení přesnosti při použití korekcí sítě CZEPOS při použití 5sekundových a 20sekundových průměrů.

Tabulka 10 – Empirické střední hodnoty a směrodatné odchylky naměřených hodnot

sít'	data	střední hodnota H [m]	směrodatná odchylka [m]
CZEPOS	1s	322,057	0,006
	5s	322,057	0,004
	20s	322,057	0,003
TopNET	1s	322,068	0,010
	5s	322,068	0,009
	20s	322,068	0,008

5.2.1 Statistické vyhodnocení

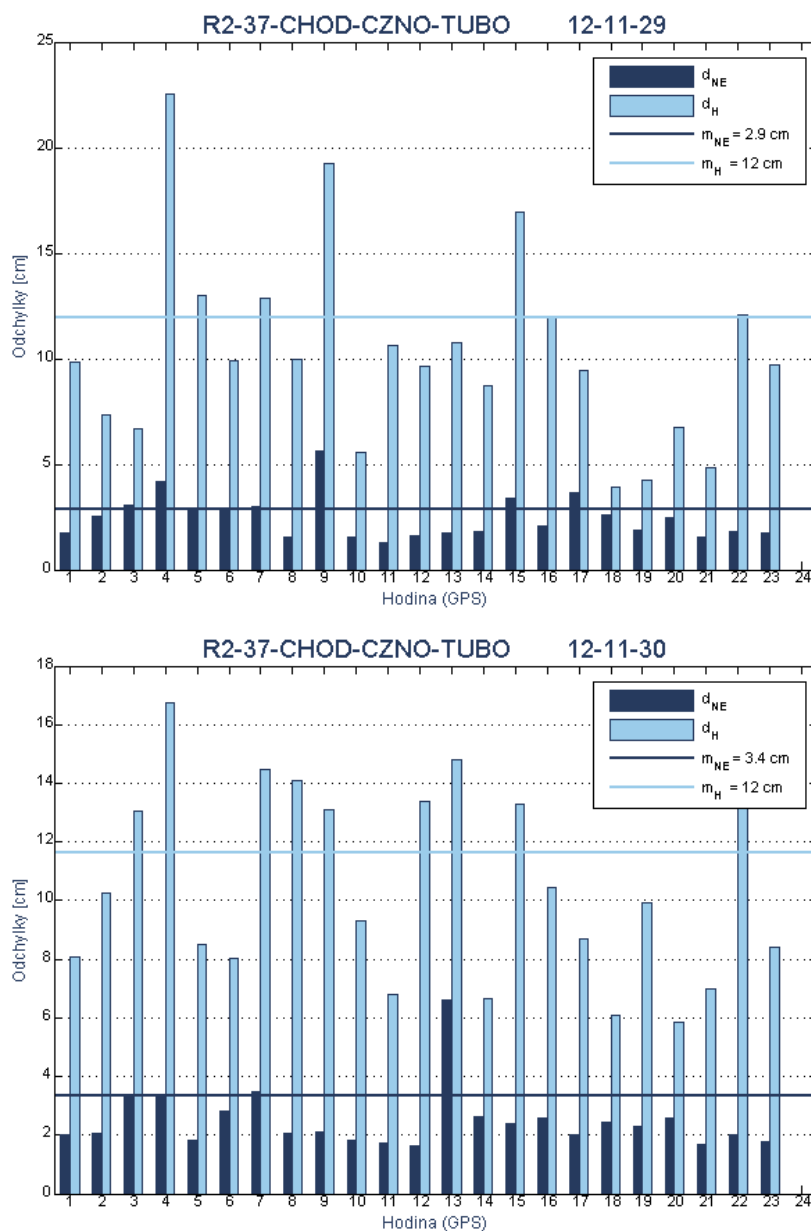
Soubor s měřeními veličinami obsahoval více než 86 tisíc hodnot pro každou z obou použitých sítí permanentních stanic. Ze souborů 1s, 5s a 20s dat byly v programu STATISTICA náhodným výběrem vybrány vzorky dat, na kterých byla ověřena normalita naměřených veličin. Na základě statistických testů normality lze opět konstatovat, že výběrové soubory naměřených hodnot splňují normální rozdělení. Z grafického vyhodnocení histogramů četností výškových odchylek ze všech registrovaných dat vyplývá, že odpovídají očekávanému normálnímu rozdělení (viz obr. 22) a lze tyto soubory dat také považovat za soubory s normálním rozdělením náhodných chyb.

**Obr. 22 – Histogramy četností odchylek určených pomocí sítě CZEPOS a TopNET**

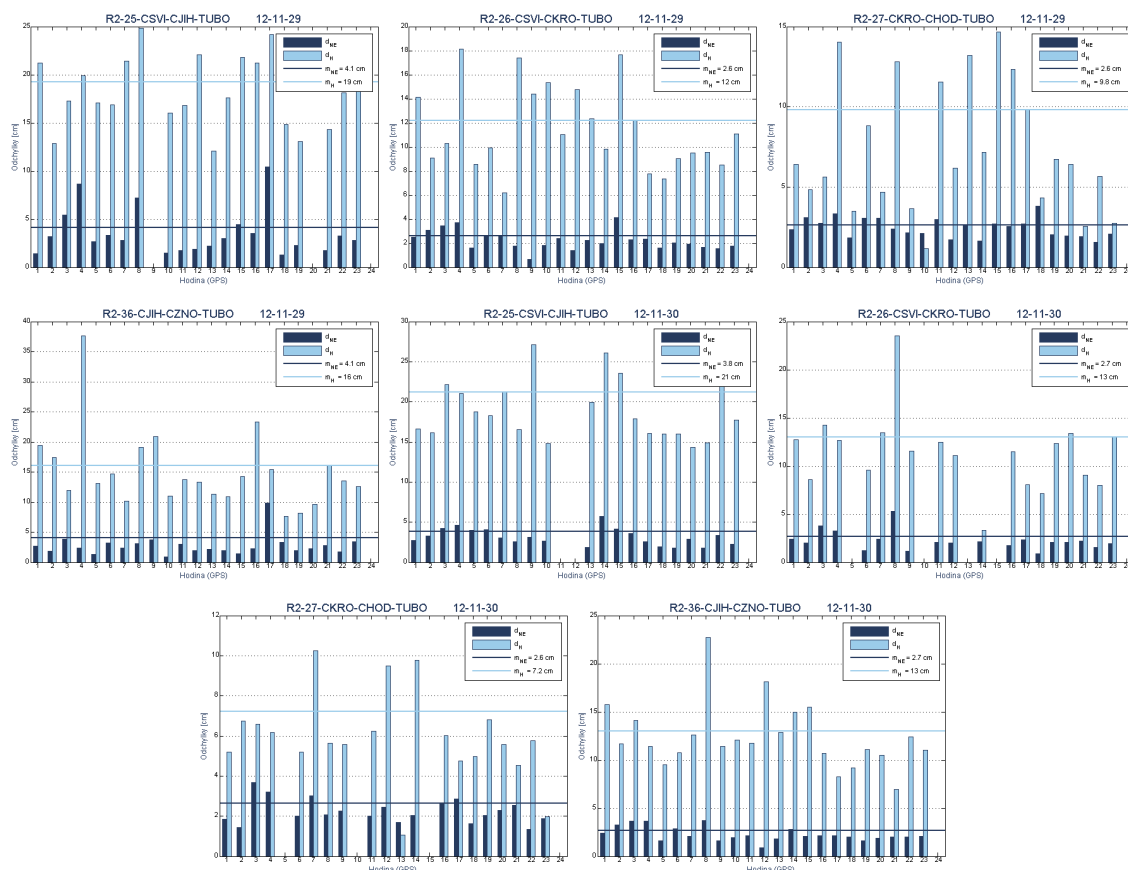
Potvrzením normality testovaných souborů dat bylo docíleno skutečnosti, že při výpočtu středních hodnot, směrodatných odchylek a dalších charakteristik přesnosti můžeme tyto hodnoty považovat za nestranný odhad těchto parametrů.

5.2.2 Kontrola kvality služeb sítě CZEPOS

Přesnost odchylek získaných pomocí korekcí sítě CZEPOS je opět možné konfrontovat také s výsledky permanentní kontroly přesnosti síťového řešení, které jsou poskytovány na webových stránkách sítě CZEPOS [38]. Na obrázku 23 jsou grafy znázorňující průběh přesnosti síťového řešení v době měření opakovaného experimentu. Lokalita měření se nacházela uvnitř oblasti vymezené stanicemi CHOD, CZNO a TUBO. Tentokrát se měřící aparatura nacházela v několikametrové blízkosti od stanice TUBO. Z toho důvodu jsou zde také uvedeny grafy ostatních vyhodnocovaných oblastí v okolí stanice TUBO na obrázku 24.



Obr. 23 – Grafy přesnosti síťového řešení pro oblast CHOD-CZNO-TUBO [38]



Obr. 24 – Grafy přesnosti síťového řešení pro ostatní oblasti v okolí stanice TUBO [38]

Z grafů je patrné, že RTK korekce vygenerované na základě síťového řešení mohou vykazovat ve výškové složce horší přesnost, než jaká byla vyhodnocena při testování kvality služeb v roce 2006 [31]. Zároveň stojí za povšimnutí zhoršení přesnosti vyplývající z grafů permanentního testování oproti stavu v roce 2010 (viz. obr. 16). To mohlo být způsobeno řadou faktorů, mimo jiné např. zvyšující se solární aktivitou, která ovlivňuje chování ionosféry. Určitý význam může mít také zprovoznění nových služeb sítě CZEPOS v září 2011, kdy bylo spuštěno síťové řešení s korekcemi pro systém GPS i GLONASS (služby VRS3-MAX-GG, resp. VRS3-iMAX-GG).

6 SOUČASNÉ URČOVÁNÍ VÝŠEK TECHNOLOGIÍ GNSS A NIVELACÍ

Při měření technologií GNSS jsme při měření v terénu limitováni zejména požadavky na vhodný, zejména nezastíněný obzor. Měřené body tedy musí být při určování touto metodou voleny s ohledem na podmínky observace. Naproti tomu má technologie GNSS několik nesporných výhod, zejména její nezávislost na stávajícím bodovém poli. Může být použita kdekoli na Zemi a poskytuje přitom výsledky s homogenní přesností.

Zpravidla se při určování výšek požaduje udávat výsledky v závazném výškovém systému daným platnou legislativou, u nás je jím Výškový systém baltský – po vyrovnání (Bpv) [7]. Připojení do tohoto systému je zajištěno prostřednictvím České státní nivelační sítě (ČSNS). Metoda nivelace je tedy primární technologií při určování výšek. I přes vysokou hustotu nivelačních bodů existují lokality, kde by výškové připojení nivelací bylo obtížné, představovalo by např. zdolání zamokřeného území, členitého terénu apod.

V rámci této práce byla testována metodika současného měření technologií GNSS a nivelací. Spojením těchto dvou metod můžeme využít výhod obou z nich. Společně jsou využitelné v lokalitách, kde například již jsou zřízeny body, jejichž výšku je třeba určovat, ale nejsou vhodné pro družicová měření kvůli překážkám v obzoru, a zároveň by bylo náročné výškové připojení prostřednictvím nivelačního měření. Tuto situaci lze řešit například tím způsobem, že v blízkosti určovaného bodu nalezneme místo vhodné k družicovému měření, zde určíme výšku pomocí GNSS observace a s použitím výšky tohoto pomocného bodu určíme výšku určovaného bodu nivelací (viz obr. 27). Praktické nasazení této metody do procesu určování nadmořských výšek je závislé na počátečním uvážení, jestli nám pro získání výšky určovaného bodu postačuje přesnost, kterou poskytuje technologie GNSS.

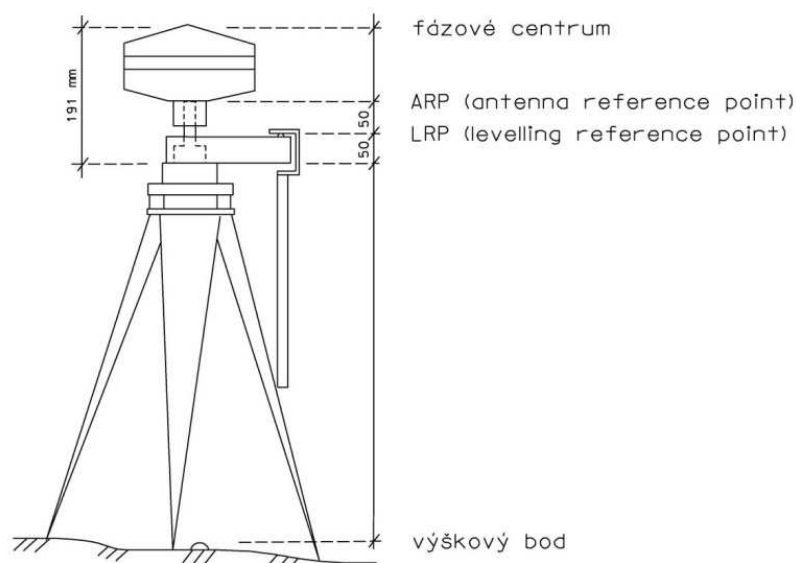
6.1 Návrh držáku závěsné latě

Při praktickém měření se obvykle provádí nejprve družicové měření na stabilizovaných bodech a následně se tyto body zanivelují, popř. se měření provedou v opačném pořadí. Tím, že jsou obě měření provedena zvlášť, je do měření zaveden ještě vliv rozdílného určení výšky měřicího přístroje. V případě GNSS aparatury je to měření výšky GNSS antény např. pomocí svinovacího metru, v případě nivelačního měření je to přiřazení nuly nivelační latě použité na tomto bodě.

Za účelem současného měření elipsoidických a nadmořských výšek bylo navrženo speciální sestavení GNSS aparatury, při kterém byla nivelační lať uchycena k trojnožce

GNSS antény. Tím bylo možné provádět měření nivelace v průběhu GNSS observace. Společným upevněním nivelační latě s anténou GNSS můžeme po zavedení příslušných výškových offsetů vztáhnout obě výšky ke stejné výškové úrovni, tedy ke stejnému bodu.

Hlavní myšlenkou tohoto měřického postupu je měření nivelace za současného postavení antény a přijímání signálů z družic. Společné upevnění nivelační latě k anténě GNSS bylo realizováno pomocí speciálně vytvořeného držáku nivelační latě, který se přichytí k nastavci (trnu), který je upevněn v trojnožce, a na kterém je usazena anténa během družicové observace (viz obr. 28). Zabroušená spodní podstava držáku se usadí na jednu z výškových úrovní nastavce, jejíž vertikální offset od referenční úrovně antény (ARP – antenna reference plane) je udáván výrobcem. Vzhledem ke konstrukci aparatury a její funkci byla pro nivelační měření použita závěsná nivelační lať. Tato lať je zavěšena na držáku na kulovém vrchlíku, který určuje vztažnou výškovou úroveň pro nivelační měření (LRP – levelling reference plane). S použitím výškových offsetů jednotlivých vztažných rovin je potom výšková úroveň měření nivelace vztažena přímo k referenčnímu bodu GNSS antény. Výškové offsety vztažných rovin (viz obr. 25) byly zjištěny laboratorně metodou přesné nivelace.



Obr. 25 – Znázornění výškových offsetů GNSS aparatury

Popisovaný měřicí systém je přizpůsoben pro přichycení závěsné nivelační latě s kódovým čtením, která je k dispozici na Ústavu geodézie FAST VUT v Brně. Držák byl přizpůsoben této půlmetrové úzké lati s nízkou hmotností. Při praktickém měření se ukázalo, že použitá lať ne zcela vyhovuje všem požadavkům. Její rozsah se při měření projevil jako velmi omezený. Rovněž byla problematická nízká hmotnost nivelační latě, neboť i při slabším větru se na kulovém vrchlíku kýve a vyžaduje přidržení ve svislici figurantem. Z toho důvodu byl vyroben upínací držák, který lze připevnit k nohám stativu. Závěsnou lať potom je možné stabilizovat ve svislé poloze pomocí tohoto upínacího

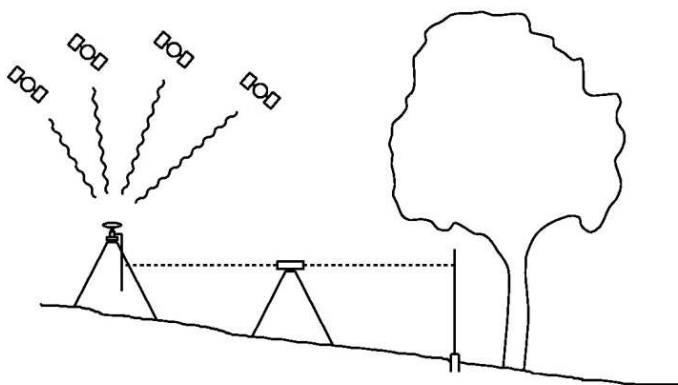
držáku. Na obrázku 26 je znázorněna GNSS aparatura uchycenou nivelační latí v průběhu měření.



Obr. 26 – GNSS aparatura se závěsnou latí při měření

Výhoda popisovaného způsobu měření spočívá především v současném určení obou výšek, kdy nedochází ke ztrátě času na určovaném bodě v průběhu družicového měření v případě měření statickou metodou. Důležitou vlastností této metody je skutečnost, že nutně nevyžaduje stabilizaci určovaného bodu, protože jsou obě výšky vztaženy přímo k referenční úrovni antény. Rovněž tato metoda umožňuje jednoduše vykonat kontrolní měření pomocí opakované observace na jiném místě v okolí určovaného bodu. Prostřednictvím nového postavení aparatury dojde k obměně konfigurace satelitů při družicové observaci a také ke změně převýšení určovaného nivelací. Získáme tím výsledky, které jsou nezávislé na předchozím měření, což je nejlepší způsob odhalení případných odlehlých měřených veličin anebo omylů. Nezávislé opakované měření rovněž zvyšuje spolehlivost výsledných hodnot. Opakované měření lze realizovat vícekrát na různých místech, čímž získáme potřebný počet nadbytečných měření.

Při měření metodou GNSS/nivelace tedy určujeme jak elipsoidickou výšku bodu pomocí GNSS observace, tak nadmořskou výšku nivelací. Převýšení kvazigeoidu potom můžeme určovat jako rozdíl těchto dvou výšek. Pokud určíme obě výšky současně, vyloučí se tím zejména posun stabilizační značky, který by mohl nastat, pokud by mezi oběma měřeními uplynula delší doba, např. kdyby byla jednotlivá měření provedena v jinou roční dobu.

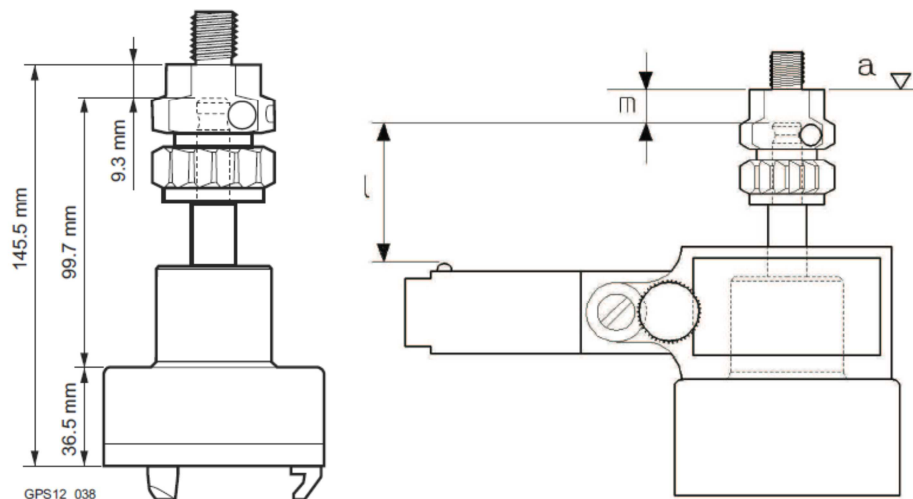


Obr. 27 – Současné měření GNSS a nivelace

Popisovaný způsob měření lze využít několika způsoby. Za prvé lze na základě současného měření elipsoidické a nadmořské výšky určovat převýšení kvazigeoidu nad elipsoidem. Druhou možností je využití tohoto způsobu měření pro určení nadmořské výšky bodu pomocí měření elipsoidické výšky za předpokladu, že v tomto bodě známe převýšení kvazigeoidu. Ve druhém případě je nutno počítat s tím, že přesnost modelů kvazigeoidu se pohybuje na centimetrové úrovni (např. model CR2005 je charakterizován střední kvadratickou chybou 0,03 m). Dalším způsobem využití může být např. kontrola nadmořské výšky bodu, kdy podobně jako v předchozím případě určíme výšku bodu, jehož nadmořskou výšku ověřujeme. V tomto případě je nutno brát v úvahu, jestli je přesnost určování výšky tímto způsobem dostatečná pro daný účel.

6.2 Laboratorní určení výškových offsetů a testování držáku latě

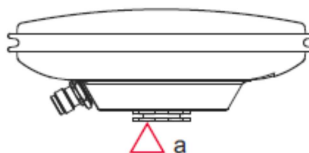
Speciální držák závěsné nivelační latě byl vyroben na Ústavu geodézie Fakulty stavební VUT v Brně. Je navržen tak, aby mohl být používán s aparaturami značky Leica. Tvar jeho vnitřní vysoustružené části přesně dosedá na trn GRT144, na kterém je umístěna GNSS anténa při měření. Spodní hrana držáku je zbroušena do roviny a při nasazení dosedne na nejnižší z vodorovných ploch trnu, jejíž výškový offset od mechanické referenční roviny antény je dán výrobcem (viz obr. 28). Od této úrovně je možno měřit výšku aparatury např. při postavení na pilíři.



Obr. 28 – Speciální držák závěsné latě k GNSS anténě (upraveno dle [21])

Na vysunuté části držáku je umístěna kovová značka ve tvaru kulového vrchlíku. Na tuto značku lze umístit závěsnou nivelační lať. Pro testovací měření byla k dispozici závěsná nivelační lať o délce 0,65 m, která má ve spodní části osazenu krabicovou libelu. Délka latě je záměrně krátká, takže je možné ji uchytit k GNSS aparatuře tak, aby se nedotýkala země. Stupnice na lati je tvořena čárovým kódem pro automatizované čtení digitálním nivelačním přístrojem. Čtení roste standardně ve směru odspodu nahoru, takže nulové čtení je ve spodní části latě, přičemž vztázná výšková úroveň je v místě závěsu. Čtení, které odpovídá místu závěsu, označujeme jako délku latě a naměřené nivelační převýšení je o tuto hodnotu opraveno při zpracování. Jedná se o parametr lati, který je potřeba zavést do zpracování, pokud pracujeme s touto latí.

Vzájemné výškové offsety kovové výškové značky a jednotlivých výškových úrovní trnu byly určeny laboratorně pomocí přesné nivelace [2]. Tím byla kovová značka vertikálně vztážena k výrobcem definovaným výškovým úrovním aparatury. Výškovou úroveň nejvyššího bodu kulového vrchlíku kovové značky označujeme jako „levelling reference plane” (LRP), protože výsledné převýšení určené z nivelačních měření je měřeno k této úrovni. Výška určená z GNSS observace je vztážena k úrovni ARP (viz obr. 29). Výškový offset obou úrovní je tedy znám a je konstantní, s oběma typy měření lze s výhodou pracovat současně.



Obr. 29 – Anténa Leica AX1202 GG se znázorněním úrovně ARP [21]

6.3 Volba parametrů GNSS observace

V rámci testovacích měření se speciálním držákem nivelační lati bylo také provedeno experimentální měření, při kterém bylo využíváno různých typů RTK korekcí za účelem optimalizace parametrů družicové observace realizované během měření nivelace. Cílem bylo navrhnout postup RTK měření, který by poskytl důvěryhodné výsledky v co nejkratším čase. Existuje několik metod měření technologií GNSS, jejichž doba observace dosahuje od několika sekund po desítky hodin. Měření nivelace trvá v závislosti na počtu sestav řádově několik desítek minut. Aby byl tento způsob měření co nejefektivnější, je nutno zvolit takovou metodu GNSS měření, jejíž délka observace bude kratší nebo stejná jako doba trvání připojovacího měření. Na základě tohoto požadavku na délku observace byla upřednostněna metoda RTK před statickou metodou. Při použití statické metody by mohla být v některých případech doba observace výrazně delší než doba potřebná pro nivelační měření. Při použití metody RTK je délka měření naopak výrazně kratší (řádově několik desítek sekund), což nám umožňuje během doby měření nivelace provést několikanásobné opakování RTK měření, popř. použití různých služeb poskytovaných v reálném čase. Opakovaným měřením se sice nijak výrazně nezvyšuje přesnost měření, ovšem zvyšuje se spolehlivost výsledných souřadnic. Díky nezávislosti metody na stabilizaci observovaného bodu může být toto měření zopakováno na dalším místě s jiným postavením stativu, čímž se obmění podmínky pro družicovou observaci.

6.4 Metodika současného měření technologií GNSS a nivelací

Pomocí současného měření GNSS a nivelace můžeme určovat elipsoidickou i nadmořskou výšku daného bodu (resp. v daném místě). Metodika je uzpůsobena pro určování obou těchto výšek např. za účelem určení převýšení kvazigeoidu nad elipsoidem. Sestavíme aparaturu včetně držáku pro závěsnou lať v blízkosti nivelačního bodu sítě ČSNS. Polohu stanoviště volíme tak, abychom měli co nejlepší obzor pro GNSS observaci. Nejvhodnější je zvolit stanoviště ve vzdálenosti do 50 m až 100 m od nivelačního bodu, aby se nivelační měření skládalo z jediné nebo z několika málo sestav.

GNSS observace zahrnuje sérii RTK observací. Je výhodné využít kromě korekcí síťového řešení (např. služba VRS3-MAX síť CZEPOS) také korekce z nejbližší referenční stanice (např. služba RTK3-NS síť CZEPOS). Použití dvou různých typů korekčních dat nám dává určitou kontrolu nad výsledky. Na korekce generované síťovým řešením by měla mít největší vliv nejbližší permanentní stanice. Pokud by se výsledky jednotlivých služeb lišily, znamenalo by to, že v době měření neměla pro generaci síťového řešení nejbližší stanice největší váhu. V takové situaci musíme buď zjišťovat, která varianta je správná anebo měření opakovat za jiných podmínek.

Současně s GNSS observací probíhá nivelační měření, na základě kterého se určuje nadmořská výška úrovně LRP aparatury. Pokud nepotřebujeme stanovisko měření stabilizovat, lze připočtením příslušných offsetů určit nadmořskou výšku úrovně ARP, ke které je určována elipsoidická výška RTK měřením. Výsledkem je tedy jak nadmořská, tak elipsoidická výška úrovně ARP použité aparatury.

6.5 Varianty využití

Popisovanou metodu měření lze využít např. těmito způsoby:

- určování převýšení kvazigeoidu na základě současného měření elipsoidické i nadmořské výšky určovaného bodu,
- určování popř. ověřování nadmořské výšky bodu na základě měření elipsoidické výšky a známého převýšení kvazigeoidu v daném bodě,
- modelování lokálního průběhu kvazigeoidu pomocí současného měření elipsoidické i nadmořské výšky několika bodů, které jsou vhodně rozmístěné v zájmové lokalitě.

V první řadě byla tato metoda měření vyvinuta pro účely určování lokálního kvazigeoidu metodou GNSS/nivelace. V tomto případě potřebujeme určit elipsoidickou výšku a zároveň nadmořskou výšku určovaného bodu. Pokud není na určovaném bodě vhodný obzor pro družicovou observaci, použijeme postavení na jiném místě, které je k tomu vhodné. Toto pomocné stanovisko nemusí být stabilizováno, pokud jsme schopni výšku určenou technologií GNSS vztáhnout přímo k nivelační značce anebo naopak znivelovat přímo vztažnou výškovou úroveň aparatury GNSS. Popisovaná metoda měření nám přesně tohle umožňuje.

Popsaným způsobem je možné určit převýšení kvazigeoidu na více bodech v dané lokalitě, čímž vznikne lokální model kvazigeoidu, pomocí kterého můžeme pomocí interpolace určovat hodnoty převýšení ζ také na ostatních určovaných bodech v této lokalitě. Popis tohoto způsobu měření je uveden v práci [2].

Další varianta využití se nabízí při ověřování výšek nivelačních značek. V tomto případě je nutné znát průběh kvazigeoidu v dané lokalitě s požadovanou přesností. Pomocí měření elipsoidické výšky lze potom určit nadmořskou výšku určovaného bodu, kterým může být nivelační bod, jehož výšku potřebujeme ověřit. Vzhledem k přesnosti měřené elipsoidické výšky a přesnosti dostupných modelů kvazigeoidu je tato metoda vhodná spíše k vyhledávání řádově centimetrových chyb ve výšce ověřovaného bodu. V lokalitách s nízkou hustotou nivelačních bodů, popř. se zhoršenou přístupností pro nivelační měření se jedná o efektivnější metodu měření, která dokáže odhalit hrubé chyby v ověřovaných výškách.

6.6 Optimalizace metodiky současného měření výšek

Jeden z prvních experimentů, na základě kterých byly voleny parametry GNSS observace při dalších měřeních, se uskutečnil v lokalitě Nové Sady v Brně.

Pro tento způsob určování výšek bylo testováno několik různých služeb RTK poskytovaných sítí CZEPOS. Měření bylo provedeno v pěti různých režimech. Byly přijímány dva druhy korekcí, korekce z nejbližší permanentní stanice (TUBO) a korekce využívající síťového řešení (korekce generované z pseudoreferenční stanice, služba PRS). S oběma typy korekcí bylo observováno po dobu 20 s a 180 s, s intervalem záznamu dat 1 s. Podle statistického vyhodnocení RTK měření v závislosti na délce observace [3] se ukazuje, že prodloužením doby RTK observace lze snížit hodnoty středních souřadnicových chyb, které jsou uváděny pro observace délky 20 s, až na polovinu. Tato přesnost se po přibližně třiminutové observaci dále významně nezlepšuje. Proto byla volena kromě observační doby RTK měření 20 s také doba 180 s jakožto maximální smysluplná délka observace. Pro srovnání byla realizována také observace statickou metodou s délkou observace 1 hodina. Při tomto testovacím měření byla tedy doba měření GNSS výrazně delší než doba potřebná k měření nivelace. Toto měření sloužilo především k ověření a výběru metody GNSS měření vhodné pro tyto účely a k porovnání výsledků získaných pomocí jednotlivých vybraných služeb, nebylo cílem odhadnout přesnost této metody.

Při tomto měření byla výše popsanou metodou určována výška čepové nivelační značky vybraného bodu nivelační sítě města Brna, tedy výška bodu, na kterém nelze přímo realizovat GNSS měření. V blízkosti této značky bylo vybráno několik míst vhodných pro GNSS observaci (na obrázku 30 jsou tato místa znázorněna žlutými značkami).



Obr. 30 – Přehled observovaných pomocných bodů (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

Při výběru těchto míst je důležité, aby poskytovala co nejméně zakrytý obzor, a zároveň, aby byla co nejbližší k určované nivelační značce z důvodu minimálního počtu sestav při měření nivelace. Série GNSS observací byla zahájena hodinovým statickým měřením a následně byly provedeny jednotlivé observace ve vybraných režimech RTK, postupně v pořadí RTK-TUBO 20 s, RTK-TUBO 180 s, RTK-PRS 20 s a RTK-PRS 180 s. Během GNSS observací bylo provedeno nivelační měření mezi GNSS aparaturou a určovaným bodem (čepovou značkou). Tento postup byl zopakován pro čtyři různá postavení GNSS aparatury v okolí vybraného nivelačního bodu Ki1-0.1, čímž bylo možno testovat rozdílnost výsledků výšek získaných RTK metodami a statickou metodou.

Tímto způsobem byla určena výška nivelační značky Ki1-0.1 pomocí měření na jednotlivých pomocných bodech. Výsledné výšky byly poté porovnány s výškou uvedenou v geodetických údajích tohoto výškového bodu. Průměrná odchylka určované výšky od její hodnoty uvedené v geodetických údajích o bodu dosáhla hodnoty $-0,020$ m se střední chybou $0,006$ m. Velikost této odchylky byla ovlivněna použitou hodnotou převýšení kvazigeoidu v dané lokalitě. Pro výpočet byla použita hodnota z modelu kvazigeoidu určeného metodou GNSS/nivelace v rámci předchozích experimentů.

Na základě výsledků tohoto experimentu se ukázalo, že prodloužením délky RTK observace na 180 s nedojde k výraznějšímu zvýšení přesnosti měřených hodnot. Odchylky výšek od dané hodnoty určené jednotlivými metodami dosahovaly podobných hodnot.

Přesnost popsané metody měření lze odhadnout na základě přesnosti určování elipsoidických výšek pomocí družicových metod měření. Jeden z dalších experimentů, které sloužily k testování přesnosti metody GNSS/nivelace, je popsán např. v publikaci [1]. Dílčí výsledky tohoto experimentu jsou součástí testování, které je popsáno v kapitole 8. V rámci tohoto testování byl průběh kvazigeoidu určený metodou GNSS/nivelace porovnán s kvazigeoidem určeným na základě astronomických měření. Další experimentální měření zabývající se testováním přesnosti metody GNSS/nivelace, která byla realizována v rámci této práce, jsou popsána v kapitolách 5 a 7.

6.7 Doporučený postup měření

Technologie GNSS obecně neposkytuje takovou přesnost určování výšek jako metoda geometrické nivelace. Výsledky dlouhodobých observací metodou RTK sice dosahují relativně vysokou přesnost v určované poloze, nicméně jednotlivé observace vykazují až řádově 10-ti centimetrové odchylky od střední hodnoty. Vyšší spolehlivost výsledku může zaručit pouze několikanásobné opakování observace, popř. určení prostorové polohy bodu prostřednictvím několika různých typů korekčních dat nejlépe od různých poskytovatelů RTK služeb.

Na základě výsledků experimentálních měření popsaných v této práci lze doporučit následující požadavky na měření:

- délka jedné RTK observace: 20 s
- počet opakování observace: 5 (v rámci každé použité služby)
- počet využívaných služeb: 2

Kromě těchto podmínek výrazně zvyšuje spolehlivost výsledků rovněž opakování celého měření za jiné konfigurace družic. Teprve tímto opakováním dojde k verifikaci určené výšky, jejíž přesnost je možné při použití RTK služeb poskytovaných na území České republiky charakterizovat střední výběrovou chybou 0,030 m. Jiná konfigurace družic je obvykle definována časovým odstupem alespoň 3 hodiny od předchozí observace, a zároveň alespoň 3 hodiny od okamžiku, kdy nastane znovu stejná konfigurace v důsledku pravidelného opakování konfigurace družic použitých navigačních systémů.

7 TESTOVÁNÍ METODY GNSS/NIVELACE

Metoda GNSS/nivelace pro určování převýšení kvazigeoidu byla použita na testovacích bodech na území města Brna. Testovací měření, která jsou součástí této práce, probíhala již od roku 2006. Za tímto účelem byly stabilizovány měřické body na části území města Brna, jejichž nadmořské výšky byly určeny nivelací a rovněž na nich byly realizovány GNSS měření statickou metodou. Celkem bylo tímto způsobem určeno převýšení kvazigeoidu na 71 bodech (v roce 2006 bylo zaměřeno 28 bodů, v roce 2007 dalších 23 bodů a v roce 2008 přibýlo 20 bodů).

7.1 SÍŤ AGNES

V roce 2009 byl naplánován projekt, při kterém byla porovnávána metoda GNSS/nivelace s metodou určování kvazigeoidu pomocí astronomických měření (viz kap. 8). K tomu účelu byla vybudována síť bodů, na kterých bylo potřeba realizovat všechny porovnávané typy měření, tedy GNSS observace, nivelační měření a astronomická měření. Tato síť byla označena názvem AGNES a celkově se skládá z 34 bodů, z nichž 14 bylo převzato z testovací sítě popsané výše. Přehled bodů této sítě je znázorněn např. na obrázku 31 (body sítě AGNES jsou zde znázorněny žlutými značkami) a na dalších obrázcích v této kapitole.

Body sítě AGNES jsou rovnoměrně rozmístěny na území města Brna, na rozloze přibližně 50 km², přičemž průměrná vzdálenost mezi jednotlivými body je přibližně 500 m.

7.1.1 Družicová měření

Pro měření metodou GNSS/nivelace bylo vyžito 22 bodů ze sítě AGNES. Družicová observace na 14 převzatých bodech byla znovu přepočítána, aby výsledné výšky odpovídaly aktuálnímu referenčnímu rámci ETRF2000. Na některých z nově vzniklých bodů bylo pro měření metodou GNSS/nivelace využito speciálního držáku nivelační latě a měřického postupu popsaného v kapitole 6, na těchto bodech bylo realizováno GNSS měření statickou metodou. K měření byla použita aparatura Leica GPS System 300, která umožňuje registrovat pouze signály navigačního systému GPS. Při měření byly použity následující parametry observace:

- délka observace: 30 až 60 minut
- interval záznamu dat: 10 s
- elevační maska: 10 °

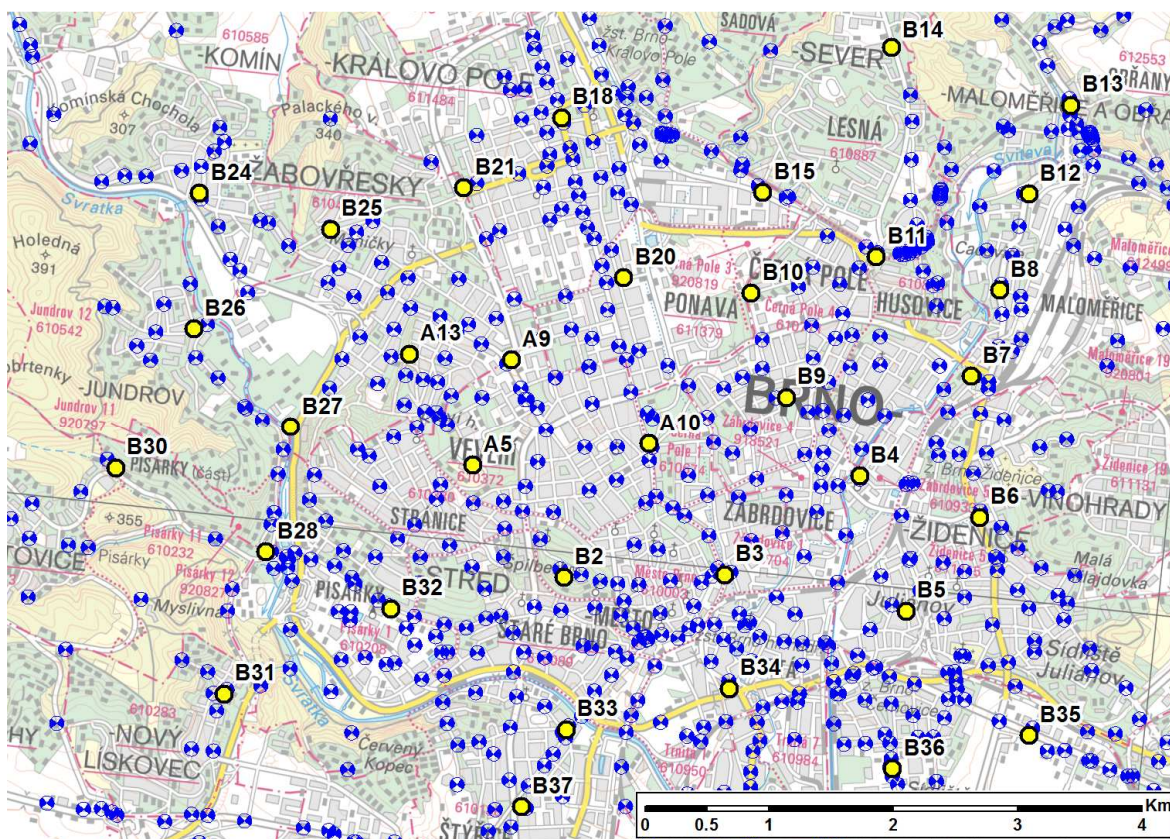
Výpočet prostorových souřadnic ze statických observací byl proveden v programu Leica Geo Office 5.0. Při zpracování byly nastaveny následující parametry výpočtu:

- typ řešení: GPS
- frekvence: L1 a L2 (popř. L1)
- elevační maska: 10 °
- model troposféry: Saastamoinen
- model ionosféry: Standardní

Jako referenční stanice pro výpočet prostorových souřadnic byla použita stanice TUBO ze sítě permanentních stanic CZEPOS.

7.1.2 Nivelační měření

Nadmořské výšky bodů sítě AGNES byly určovány nivelací s připojením na síť ČSNS. Pro účely určování převýšení kvazigeoidu metodou GNSS/nivelace byla zvolena pro určování nadmořských výšek metoda technické nivelace. Přehled bodů nivelační sítě na území města Brna se znázorněním bodů sítě AGNES je zobrazen na obrázku 31.



Obr. 31 – Přehled výškových bodů ČSNS a podrobných výškových bodů v zájmové lokalitě (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

V některých případech, když byly výšky určovány v rámci rozsáhlejších prací, např. při ověřování výšek nivelačních značek, byla použita metoda přesné nivelace. Pro

výškové připojení určených bodů byl použit vždy nejbližší bod sítě ČSNS, popř. nejbližší bod podrobného výškového bodového pole. Pokud se jednalo o bod nivelačního pořadu I. až III. řádu, bylo měření provedeno zpravidla metodou přesné nivelace a zároveň byla touto metodou ověřena výška tohoto bodu. V případě, že nejbližší nivelační bod byl bodem podrobné nivelační sítě, bylo připojovací měření provedeno zpravidla technickou nivelací a výška tohoto bodu byla ověřena pomocí dvou nejbližších nivelačních bodů. Nivelální měření prováděná metodou přesné nivelace byla realizována v rámci několika bakalářských či diplomových prací zaměřených na ověřování výšek nivelačních značek na území města Brna.

V rámci jednotlivých experimentálních měření, která se zabývala určováním průběhu kvazigeoidu, byly určovány nadmořské výšky všech testovacích bodů metodou nivelace. Jednalo se o body experimentálních sítí, které jsou popsány v úvodu kapitoly 7. U těch bodů, na kterých byly vykázaný odlehlosti v určeném průběhu kvazigeoidu, byly ověřeny výšky připojovacích nivelačních bodů. Body, jejichž výšky byly dostatečně spolehlivé, byly zahrnuty do sítě AGNES, jak je uvedeno v kapitole 7.1. V tabulce 11 je uveden seznam bodů sítě AGNES a souhrn výškových bodů, které byly použity jako výchozí výškové body pro jednotlivá připojovací měření.

Tabulka 11 – Seznam připojovacích bodů

bod	připojovací bod	bod	připojovací bod
B2	JM-071-450	B18	Kij-12.2
B3	Kij-2.1	B20	Kij-9
B4	JM-071-638	B21	JM-071-345 (Kij-12.2)
B5	JM-071-647	B24	Ki1-18
B6	Kj5-10	B25	JM-071-348 (Kij-12.2)
B7	JM-071-1539	B26	JM-071-1075 (Ki1-11.2)
B8	Kj5-17.1	B27	Ki1-10.1
B11	JM-071-533 (Kij-12.2)	B33	KP-107
B12	Kj5-20	B34	Pa10-26
B13	Kj5-23	B36	Pa10-5
B15	JM-071-531 (Kij-12.2)	B37	KP-101

7.2 Určování kvazigeoidu

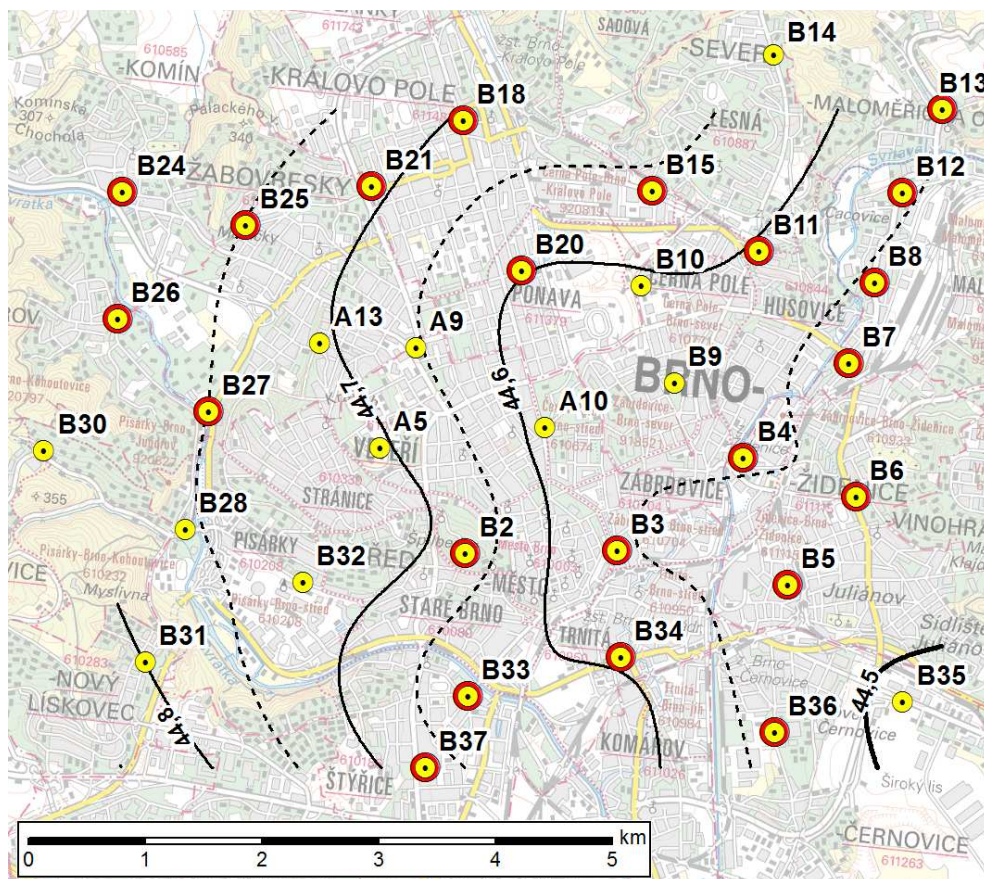
Převýšení kvazigeoidu na jednotlivých bodech bylo určováno pomocí vztahu (24). Výsledné hodnoty převýšení kvazigeoidu $\zeta_{G/N}$ určené metodou GNSS/nivelace jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 – Výsledné hodnoty převýšení kvazigeoidu určeného metodou GNSS/nivelací

Bod	h [m]	H_Q [m]	$\zeta_{G/N}$ [m]	typ připojení
B2	333,534	288,861	44,673	PNS
B3	247,316	202,759	44,557	ČSNS
B4	248,100	203,547	44,553	PNS
B5	247,557	203,030	44,527	PNS
B6	254,028	209,480	44,548	ČSNS
B7	250,148	205,613	44,535	PNS
B8	252,709	208,166	44,543	ČSNS
B11	296,174	251,579	44,595	ČSNS
B12	259,447	214,890	44,557	ČSNS
B13	273,179	228,621	44,558	ČSNS
B15	271,029	226,391	44,638	ČSNS
B18	278,916	234,222	44,694	ČSNS
B20	259,033	214,431	44,602	ČSNS
B21	307,026	262,315	44,711	ČSNS
B24	255,678	210,890	44,788	ČSNS
B25	278,517	233,768	44,749	ČSNS
B26	254,415	209,625	44,790	ČSNS
B27	254,605	209,855	44,750	ČSNS
B33	248,041	203,420	44,621	ČSNS
B34	244,525	199,929	44,596	PNS
B36	244,422	199,889	44,533	PNS
B37	256,771	212,098	44,673	ČSNS

Údaj ČSNS ve sloupci „typ připojení“ znamená, že nivelační měření bylo připojeno na nivelační bod I. až III. řádu, popř. na nivelační bod plošné nivelační sítě, který byl ověřen pomocí měření připojeného na bod I. až III. řádu. Typ připojení PNS znamená, že měření nivelace bylo připojeno na nivelační bod plošné nivelační sítě, který nebyl ověřen. Ověřovací měření jsou prováděna průběžně v rámci závěrečných prací studentů oboru Geodézie a kartografie na Fakultě stavební VUT v Brně.

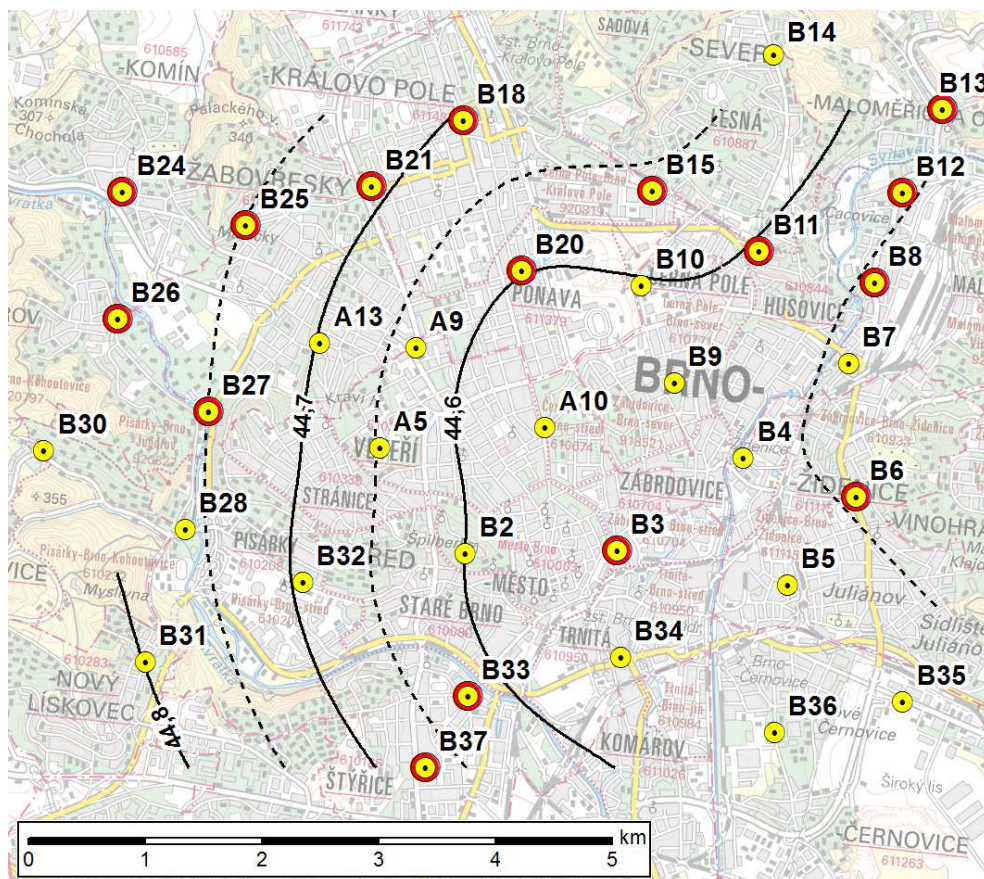
Na základě získaných hodnot $\zeta_{G/N}$ byl vygenerován průběh kvazigeoidu v dané lokalitě a znázorněn pomocí izolinií (viz obr. 32). Body, na kterých bylo realizováno měření metodou GNSS/nivelace jsou zvýrazněny červeně.



Obr. 32 – Kvazigeoid GNSS/nivelace, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech
(zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

Z průběhu vrstevnicového vyjádření plochy kvazigeoidu je patrné, že výsledné hodnoty jsou zatíženy jak systematickými chybami, které působí při družicových observacích, tak chybami v určení výšek nivelačních bodů.

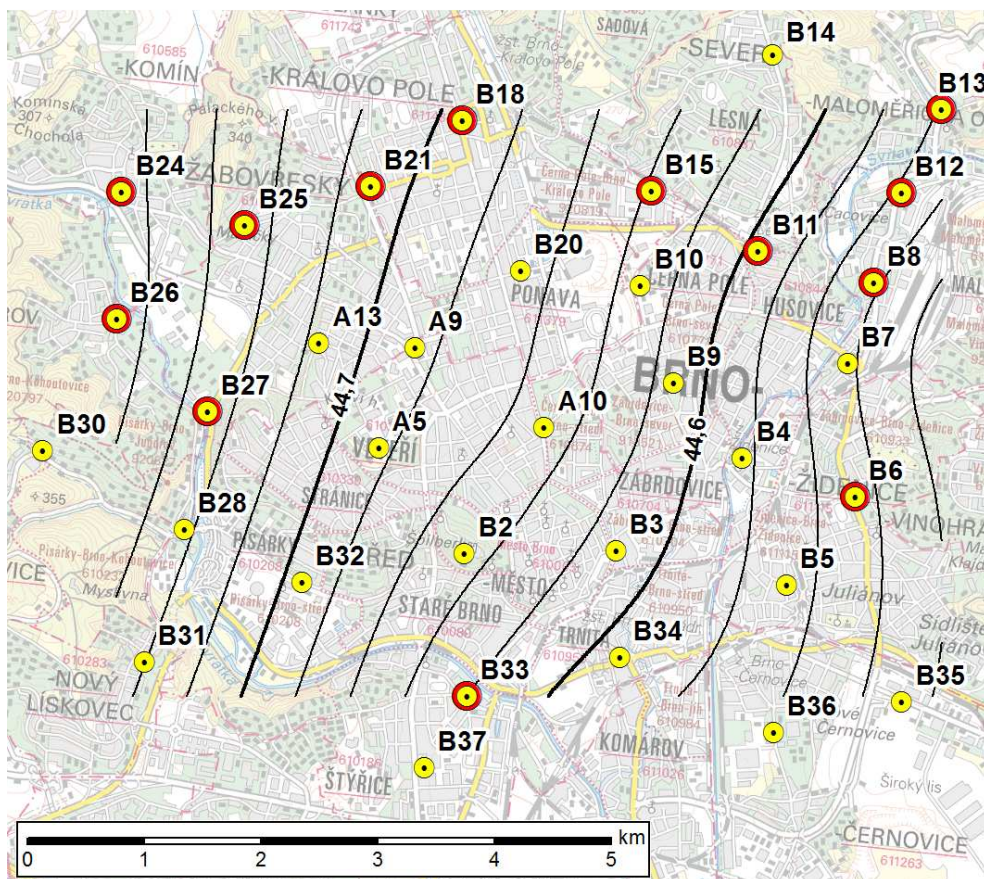
Pro porovnání byl také vygenerován průběh kvazigeoidu pouze z měření na bodech, jejichž výška byla ověřena pomocí připojovacího měření na body ČSNS. Průběh kvazigeoidu určeného tímto způsobem je znázorněn na obrázku 33, body použité pro vygenerování modelu kvazigeoidu jsou zvýrazněny červeně.



Obr. 33 – Kvazigeoid GNSS/nivelace z bodů připojených na ČSNS, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

Z tohoto znázornění je patrné, jak výrazný vliv na průběh kvazigeoidu mají jednotlivé body. Ze změny průběhu izolinií vyplývá, že použitá metoda nedosahuje takové přesnosti při určování hodnot $\zeta_{G/N}$, aby mohla být použita při modelování lokálního průběhu kvazigeoidu s touto podrobností (vzájemná vzdálenost měřených bodů byla 500 m až 1000 m).

Vzhledem k tomu, že výsledný průběh izolinií neodpovídal obvyklému „hladkému“ průběhu kvazigeoidu, byly na základě vyhodnocení odchylek tohoto modelu při porovnání s vybranými modely kvazigeoidu vyřazeny ze zpracování body B3, B20 a B37, které vykazovaly největší odchylky. Podrobně je porovnání s jinými modely kvazigeoidu popsáno v kapitole 7.3. Průběh izolinií po eliminaci těchto bodů ze zpracování je znázorněn na obrázku 34, body použité pro vygenerování modelu kvazigeoidu jsou zvýrazněny červeně.



Obr. 34 – Kvazigeoid GNSS/nivelace z vybraných bodů, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

Je patrné, že průběh modelu kvazigeoidu v centrální části byl dán především hodnotami převýšení kvazigeoidu na bodech B3, B20 a B37. Výsledky na těchto bodech nelze s jistotou označit za chybné, neboť nedosahují hodnot, které by neodpovídaly přesnosti určení výšek metodou GNSS/nivelace (viz tabulka 14). Při takto podrobném rozmístění měřených bodů však tyto hodnoty výrazně ovlivnily výsledný průběh modelu.

7.3 Porovnání s jinými modely kvazigeoidu

Hodnoty převýšení kvazigeoidu získané pomocí tohoto experimentu byly v rámci jejich verifikace porovnány s hodnotami získanými prostřednictvím jiných modelů kvazigeoidu. K tomuto účelu byly vybrány následující modely:

- CR2005 – hodnoty označené ζ_{CR2005}
- EGM2008 – hodnoty označené ζ_{EGM08}
- InGeoCalc geometrický model (Kadlec 2011) – hodnoty označené ζ_{geom}
- InGeoCalc kombinovaný model (Kadlec 2011) – hodnoty označené ζ_{kombi}

Hodnoty z modelu CR2005 byly získány pomocí zpřesněné globální transformace mezi novou realizací ETRS89 v ČR a S-JTSK, v rámci které je model CR2005 používán.

Hodnoty z ostatních modelů byly získány pomocí aplikace InGeoCalc, o které bylo pojednáno v kapitole 3.5. V tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty převýšení kvazigeoidu vygenerované pomocí vybraných modelů pro jednotlivé body testovací sítě AGNES.

Tabulka 13 – *Hodnoty převýšení ζ z vybraných modelů kvazigeoidu*

bod	ζ_{CR2005} [m]	ζ_{EGM08} [m]	ζ_{geom} [m]	ζ_{kombi} [m]
B2	44,664	44,630	44,650	44,623
B3	44,613	44,575	44,524	44,562
B4	44,587	44,584	44,580	44,578
B5	44,556	44,532	44,532	44,528
B6	44,551	44,546	44,557	44,545
B7	44,575	44,560	44,557	44,561
B8	44,584	44,560	44,557	44,561
B11	44,616	44,612	44,606	44,607
B12	44,600	44,595	44,596	44,584
B13	44,611	44,595	44,596	44,584
B15	44,651	44,612	44,606	44,607
B18	44,710	44,668	44,659	44,654
B20	44,676	44,642	44,642	44,638
B21	44,730	44,729	44,685	44,717
B22	44,723	44,723	44,761	44,706
B24	44,805	44,773	44,814	44,764
B25	44,764	44,723	44,761	44,706
B26	44,800	44,773	44,814	44,764
B27	44,763	44,771	44,814	44,767
B33	44,650	44,625	44,650	44,640
B34	44,600	44,569	44,524	44,528
B36	44,540	44,520	44,532	44,518
B37	44,657	44,618	44,626	44,615

Hodnoty převýšení kvazigeoidu vygenerované pomocí jednotlivých modelů byly porovnány s hodnotami $\zeta_{\text{G/N}}$ převýšení určenými v předchozí kapitole. Odchytky výsledných hodnot $\zeta_{\text{G/N}}$ od hodnot získaných pomocí vybraných modelů jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 – Porovnání získaného modelu kvazigeoidu s vybranými modely

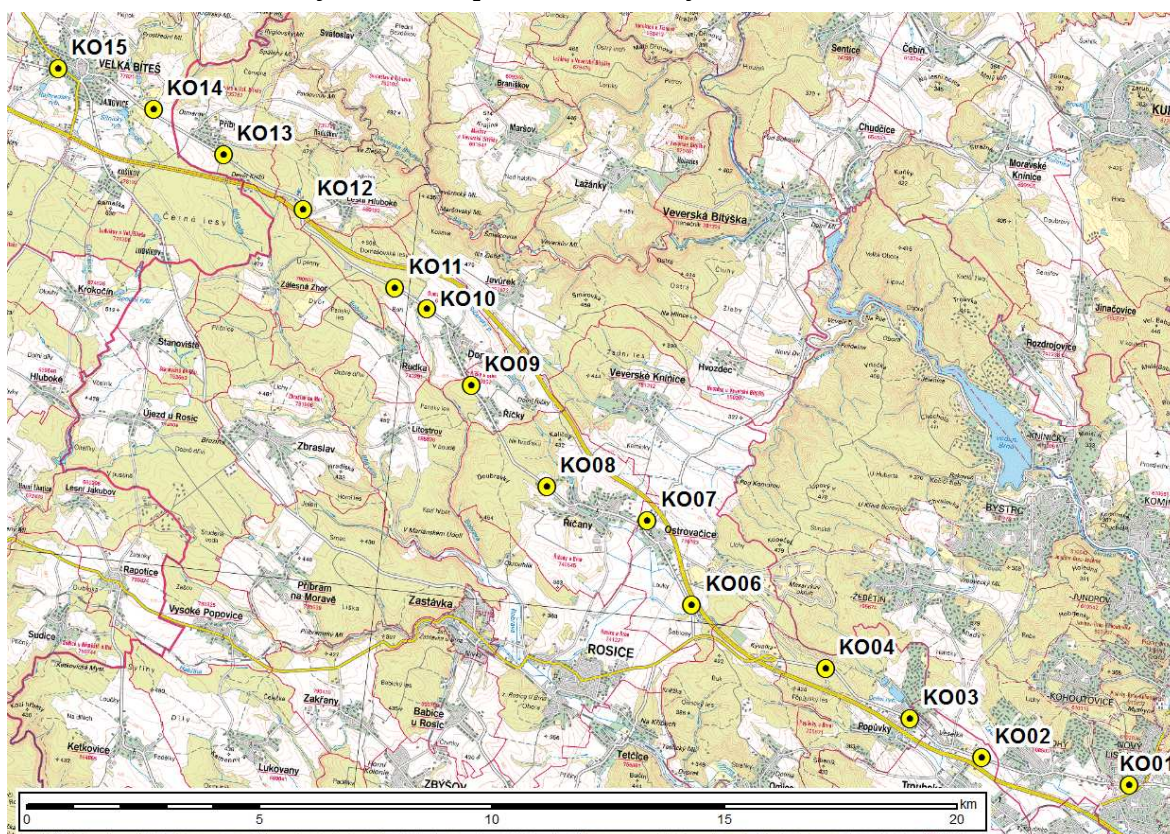
bod	$\zeta_{G/N} - \zeta_{CR2005}$ [m]	$\zeta_{G/N} - \zeta_{EGM08}$ [m]	$\zeta_{G/N} - \zeta_{geom}$ [m]	$\zeta_{G/N} - \zeta_{kombi}$ [m]
B2	0,010	0,043	0,023	0,050
B3	-0,056	-0,018	0,033	-0,005
B4	-0,033	-0,031	-0,027	-0,025
B5	-0,029	-0,005	-0,005	-0,001
B6	-0,003	0,002	-0,009	0,003
B7	-0,040	-0,025	-0,022	-0,026
B8	-0,041	-0,017	-0,014	-0,018
B11	-0,021	-0,017	-0,011	-0,012
B12	-0,043	-0,038	-0,039	-0,027
B13	-0,052	-0,037	-0,038	-0,026
B15	-0,013	0,026	0,032	0,031
B18	-0,016	0,026	0,035	0,040
B20	-0,074	-0,040	-0,040	-0,036
B21	-0,019	-0,018	0,026	-0,006
B22	0,009	0,009	-0,029	0,026
B24	-0,017	0,015	-0,026	0,024
B25	-0,015	0,026	-0,012	0,043
B26	-0,010	0,017	-0,024	0,026
B27	-0,014	-0,021	-0,064	-0,017
B33	-0,029	-0,004	-0,029	-0,019
B34	-0,004	0,026	0,071	0,067
B36	-0,007	0,013	0,001	0,015
B37	0,015	0,055	0,047	0,058
průměr	-0,022	-0,001	-0,005	0,007
sm. odch.	0,022	0,027	0,033	0,031

Z velikosti průměrných hodnot odchylek je patrné, jak je model kvazigeoidu určený metodou GNSS/nivelace odchylený od ostatních modelů. Největší průměrné odchylení vykazuje porovnání s modelem CR2005, a sice o hodnotu – 0,022 m. Směrodatné odchylky určené z hodnot odchylek dosahují velikosti přibližně 0,02 m až 0,03 m. Z toho lze usoudit, že systematické posuny mezi jednotlivými modely touto metodou nebyly prokázány. Velikosti odchylek uvedených v předchozí tabulce potvrzují řádově centimetrovou přesnost určení modelu kvazigeoidu.

7.4 Testování kvazigeoidu pomocí kontrolního profilu

V předcházejících kapitolách bylo pojednáno o plošném testování lokálního průběhu kvazigeoidu. Dalším způsobem porovnání dvou modelů je pomocí kontrolního profilu. V letech 1999 až 2001 byl metodou GNSS/nivelace zaměřen profil, který vedl z Velké Bíteše do Uherského Hradiště. Trasa profilu byla příhodně volena ve směru spádu, který vykazuje průběh kvazigeoidu na území jižní Moravy. Profil byl veden po trase nivelačních pořadů I. řádu. Primárně byly realizovány družicové observace přímo na nivelačních bodech, které poskytovaly vhodný obzor pro observaci. Pro měření byly voleny body, které byly vzájemně vzdáleny přibližně 2 až 3 km. Pokud bylo nutné zřídit excentrické stanoviště z důvodu vhodného obzoru pro družicovou observaci, byla výška tohoto stanoviště určena metodou přesné nivelace. Celková délka profilu dosahovala přibližně 120 km. Výsledné hodnoty převýšení kvazigeoidu byly porovnány s modely CR2000, VÚGTK96, EGM96 a EGG97, které byly v té době aktuální. [17]

Na toto měření bylo navázáno v roce 2009, kdy byla znovu změřena část profilu metodou GNSS/nivelace s využitím metody RTK. Jednalo se o úsek mezi Velkou Bíteší a Brnem, na obrázku 35 je zobrazen přehled zaměřených bodů.



Obr. 35 – Přehled bodů profilu zaměřených v roce 2009 (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

Tento úsek kontrolního profilu byl veden podél nivelačního pořadu KO. Z 15-ti bodů, které byly na tomto úseku zaměřeny při původním měření, jich bylo 14 zaměřeno

znovu v roce 2009. Připojovací nivelační bod KO-24.1 příslušející k bodu KO05 nebyl nalezen, z toho důvodu bod KO05 nebyl zaměřen.

V průběhu GNSS observací na měřených bodech byly přijímány čtyři typy korekcí sítě CZEPOS. Jednalo se o korekce z permanentních GNSS stanic TUBO a CMOK a korekce se síťovým řešením – RTK-PRS a VRS3-MAX. Na každém bodě byla realizována observace, která zahrnovala pětinašobné určení prostorové polohy bodu pomocí každé z vybraných RTK služeb. Doba jednotlivých měření byla 20 s. Některé nivelační body, které byly stabilizovány nivelačním kamenem nebo hloubkovou stabilizací, umožňovaly realizovat družicovou observaci přímo nad stabilizační značkou. Určovaná elipsoidická výška byla tedy vztažena přímo k příslušnému nivelačnímu bodu (jednalo se o body KO02, KO03, KO08, KO10, KO11, KO12, KO14 a KO15). V ostatních případech bylo nutno pro družicovou observaci volit excentrické stanoviště, neboť zákryt obzoru nad výškovým bodem neumožňoval realizovat družicovou observaci. Při těchto měřeních bylo prováděno současné měření technologií GNSS a nivelací, které je popsáno v kapitole 6.4. Bylo zřízeno dočasné stanoviště ve vzdálenosti několika desítek metrů od výškového bodu. Na tomto stanovišti probíhala družicová observace vybraných RTK služeb. V průběhu RTK observace byla určena nadmořská výška úrovně LRP měřící GNSS aparatury pomocí nivelačního měření připojeného na příslušný výškový bod. Ukázka zápisníku nivelačního měření při použití speciálního držáku a závěsné lati je obsahem přílohy č. 2.

Z hodnot elipsoidických výšek určených prostřednictvím jednotlivých služeb byly poté určeny jejich střední hodnoty. V tabulce 15 jsou uvedeny zprůměrované hodnoty elipsoidických výšek získaných pomocí jednotlivých RTK služeb a nadmořské výšky měřených bodů určené metodou přesné nivelace.

Tabulka 15 – *Elipsoidické výšky určené pomocí jednotlivých typů korekcí*

bod	h TUBO [m]	h CMOK [m]	h RTK-PRS [m]	h VRS3-MAX [m]	H_Q [m]
KO15	515,077	515,054	515,008	515,051	469,508
KO14	550,427	550,367	550,399	550,383	504,894
KO13	547,154	547,151	547,119	547,161	501,607
KO12	558,897	558,872	558,864	558,842	513,500
KO11	545,874	545,799	545,829	545,823	500,489
KO10	529,182	529,144	529,152	529,154	483,823
KO09	508,907	508,854	508,872	508,878	463,596
KO08	455,209	455,202	455,233	455,241	410,019
KO07	380,299	380,267	380,298	380,292	335,151

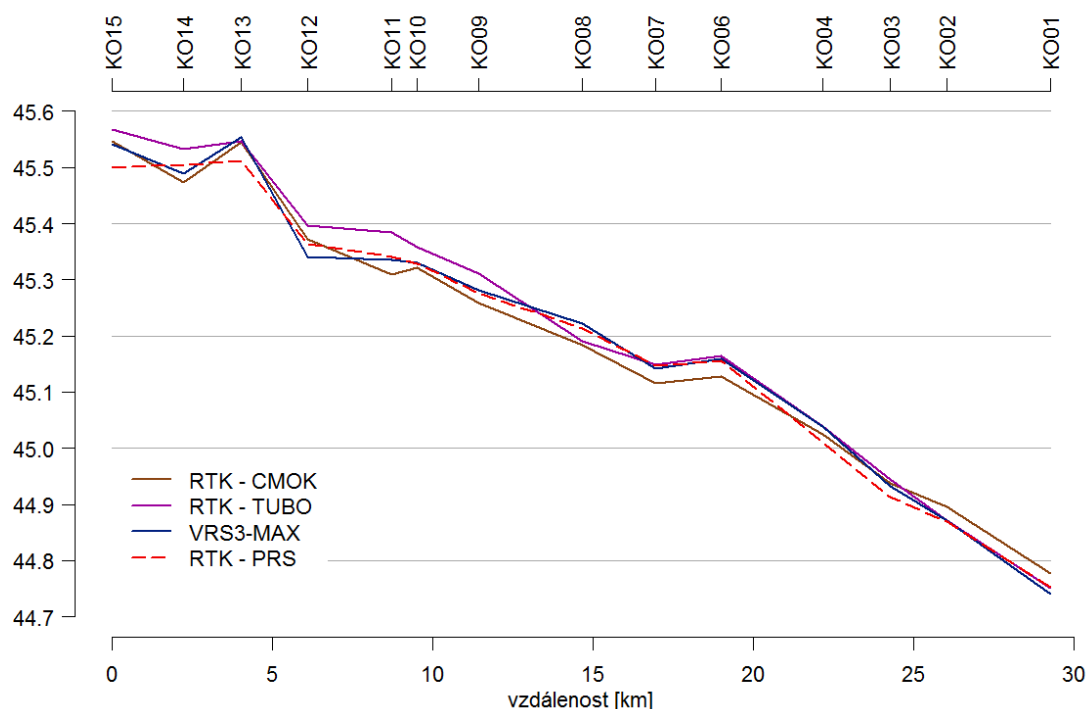
bod	h TUBO [m]	h CMOK [m]	h RTK-PRS [m]	h VRS3-MAX [m]	H_Q [m]
KO06	399,538	399,500	399,528	399,533	354,373
KO04	441,535	441,522	441,508	441,535	396,497
KO03	341,505	341,499	341,474	341,494	296,561
KO02	341,181	341,205	341,180	341,182	296,310
KO01	318,305	318,332	318,307	318,295	273,554

Z naměřených výšek byly určeny velikosti převýšení kvazigeoidu nad elipsoidem, opět z hodnot získaných pomocí jednotlivých použitých RTK služeb. V tabulce 16 jsou uvedeny tyto hodnoty převýšení kvazigeoidu nad elipsoidem WGS84. Pro porovnání jsou v tabulce uvedeny také hodnoty převýšení kvazigeoidu určené z měření z let 1999 až 2001 označené ζ_{2001} .

Tabulka 16 – Hodnoty převýšení kvazigeoidu určené pomocí jednotlivých RTK služeb

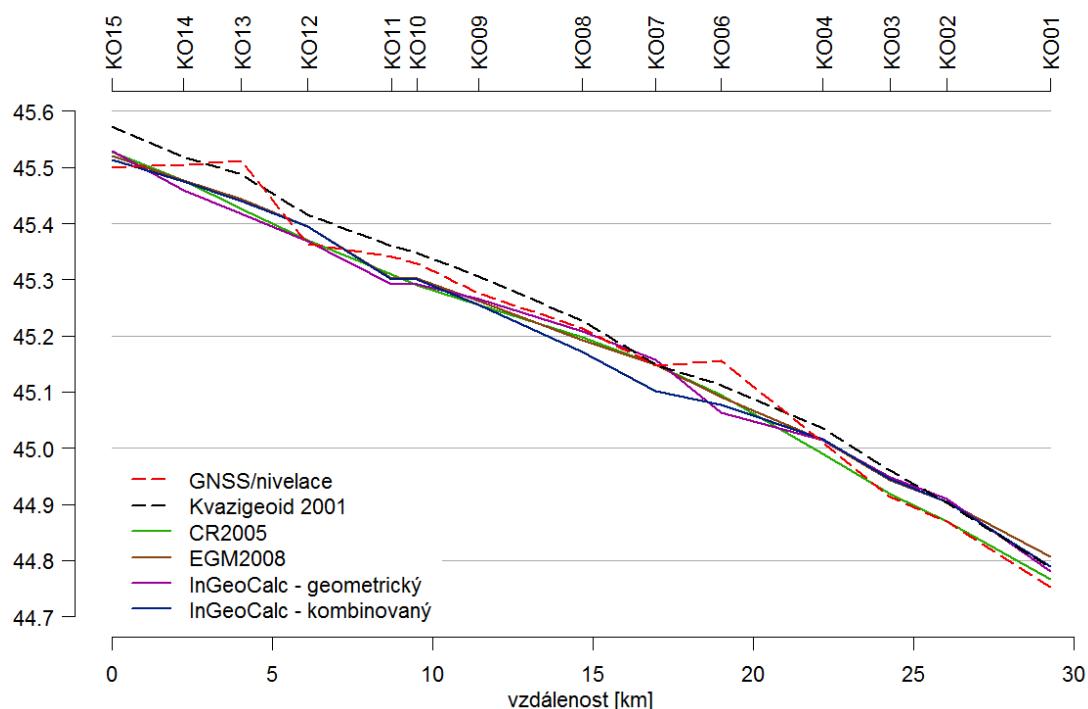
bod	připojovací bod ČSNS	ζ_{2001} [m]	ζ_{TUBO} [m]	ζ_{CMOK} [m]	$\zeta_{\text{RTK-PRS}}$ [m]	$\zeta_{\text{VRS3-MAX}}$ [m]
KO15	KO-67.3	45,572	45,568	45,546	45,499	45,542
KO14	KO-61.1	45,519	45,533	45,473	45,505	45,489
KO13	KO-58	45,487	45,547	45,544	45,512	45,554
KO12	KO-51.2	45,416	45,396	45,372	45,364	45,341
KO11	KO-48	45,360	45,385	45,310	45,341	45,335
KO10	KO-46	45,347	45,359	45,321	45,329	45,331
KO09	KO-42.2	45,305	45,311	45,258	45,276	45,282
KO08	KO-36.2	45,228	45,190	45,183	45,214	45,222
KO07	KO-31.2	45,148	45,148	45,116	45,147	45,141
KO06	KO-28	45,113	45,165	45,127	45,155	45,160
KO04	KO-19	45,035	45,038	45,025	45,011	45,038
KO03	KO-15.1	44,961	44,944	44,938	44,913	44,933
KO02	KO-12.1.1	44,902	44,871	44,895	44,870	44,872
KO01	KO-6.2	44,787	44,751	44,778	44,753	44,741

Na následujícím obrázku je znázorněn průběh převýšení kvazigeoidu získaný na základě elipsoidických výšek určených pomocí jednotlivých RTK služeb využívaných v rámci tohoto testování.



Obr. 36 – Průběh kvazigeoidu určený pomocí různých RTK služeb

Na základě opakovaných měření byly vyhodnoceny směrodatné odchylky jednotlivých hodnot. Nejmenší rozptyl vykazovaly hodnoty určené pomocí korekcí z bodu TUBO, které lze charakterizovat směrodatnou odchylkou 0,037 m. Přesnost těchto výsledků se ovšem měnila v závislosti na vzdálenosti od bodu TUBO. Přibližně rovnoměrnou přesnost vykazovaly výšky získané pomocí ostatních služeb, přičemž nejlepší přesnost výsledků byla dosažena pomocí služby RTK-PRS. Výběrová směrodatná odchylka výšek získaných pomocí této služby dosáhla hodnoty 0,044 m. Z toho důvodu byl průběh kvazigeoidu určený pomocí výšek získaných metodou RTK-PRS vybrán pro následující porovnání s dalšími modely kvazigeoidu: s modelem CR2005, s modelem EGM2008, s geometrickým modelem projektu InGeoCalc a s kombinovaným modelem projektu InGeoCalc. Grafický průběh porovnávaných modelů kvazigeoidu je znázorněn na obrázku 37.



Obr. 37 – Porovnání průběhu kvazigeoidu GNSS/nivelace s vybranými modely

Ze vzájemného znázornění vyplývá, že průběh kvazigeoidu určený metodou GNSS/nivelace odpovídá ostatním modelům, s výjimkou výsledků na bodech KO06 a KO13, na kterých je patrná jistá odlehlost. Tyto odchylky jsou způsobeny náchylností metody GNSS/nivelace k systematickým chybám, které jsou zapříčiněny zpravidla chybami v určení výšek výchozích výškových bodů nebo přesností určení elipsoidických výšek metodou GNSS.

V rámci zpracování byly vyhodnocovány odchylky jednotlivých měření od střední hodnoty výšky příslušného měřeného bodu. Z těchto odchylek byly určeny směrodatné odchylky hodnot získaných pomocí jednotlivých služeb: směrodatná odchylka výšek získaných pomocí korekcí ze stanice TUBO dosáhla hodnoty 0,037 m, pomocí korekcí ze stanice CMOK hodnoty 0,052 m, pomocí služby RTK-PRS hodnoty 0,044 m a pomocí služby VRS3-MAX hodnoty 0,067 m.

Závěrem je možné konstatovat, že při měření metodou GNSS/nivelace je nutné provádět opakovanou družicovou observaci, která zajistí eliminaci odlehlých výsledků a zároveň je nutné nivelační měření připojit na body, jejichž výška byla ověřena.

7.5 Příklady využití metody GNSS/nivelace ve světě

Při bližším zhodnocení využitelnosti metody GNSS/nivelace ve světě můžeme konstatovat, že družicové metody měření jsou často používány při určování výšek. V rámci čerpání informací a konfrontování výsledků dosažených pomocí jednotlivých testovacích

měření byla nalezena řada prací, které se zabývají družicovými metodami měření v souvislosti s určováním výšek. Metoda GNSS/nivelace bývá často používána pro vytváření modelu geoidu popř. kvazigeoidu. Například pro definici výškového systému v Austrálii je použita jak plocha geoidu, tak kvazigeoidu. Vzájemná odlehlost těchto dvou ploch je odhadována na 0,150 m se střední chybou 0,018 m, jak uvádějí Featherstone a Kirby [10].

Nahavandchi a Soltenpour [27] popisují vytvoření vhodné výpočetní plochy pro převod výšek určených technologií GNSS na normální výšky v Norsku. K tomuto účelu bylo využito měření metodou GNSS/nivelace na více než 1700 bodech. Výsledná plocha byla určena kombinací těchto dat s gravimetrickým kvazigeoidem. Pro výpočet byla použita metoda kolokace. Přesnost transformace výšek pomocí takto vzniklé převodní plochy je přibližně 0,050 m.

Kromě výše zmíněných případů bývá metoda GNSS/nivelace využívána i v dalších státech. Zejména při určování lokálních anebo globálních modelů kvazigeoidu, za účelem převodu elipsoidických výšek určených technologií GNSS do národních výškových systémů.

8 POROVNÁNÍ MODELU S ASTRONOMICKÝM KVAZIGEOIDEM

V rámci porovnávání zjišťovaných hodnot výškové anomálie ζ v předchozích experimentech bylo navíc přistoupeno k určování této odlehlosti kvazigeoidu metodou astronomicko-geodetické nivelace. Měření astronomickou metodou bylo realizováno na všech 34 bodech sítě AGNES popsané v předchozí kapitole. Souřadnice bodů, na kterých nebylo měřeno metodou GNSS/nivelace, byly určeny metodou RTK, neboť tyto souřadnice byly potřeba pro výpočet tížnicových odchylek určených z astronomických měření.

Na Fakultě stavební VUT v Brně byl pro určování astronomických souřadnic vyvinut Mobilní astronomický automatizovaný systém (MAAS). Jedná se o měřicí systém, který je výsledkem vlastního vývoje pod vedením Ing. Radovana Machotky, Ph. D. Tento systém byl navržen právě pro terénní astronomická měření s cílem určit tížnicové odchylky pomocí měření astronomických souřadnic. Podrobnější popis měřicího systému lze nalézt např. v publikacích [25] a [26].

V průběhu astronomické observace byla zaměřena poloha vždy minimálně čtyř hvězdných párů v severo-jížní konfiguraci a alespoň čtyř hvězdných párů v západo-východní konfiguraci. Vlastnímu měření na každém bodě předcházela příprava tzv. pozorovacího programu, kdy bylo potřeba zvolit vhodné dvojice hvězd pro měření. Software pro tvorbu pozorovacího programu vyseletoval na základě data a času měření a přibližné polohy stanoviště vhodné hvězdné páry, z nichž byly pro měření vybrány takové, které se skládaly z co nejvíce jasných hvězd. Dále byly vybírány hvězdné páry tak, aby následovaly vhodně po sobě a nevznikaly přílišné časové prodlevy v průběhu měření. V průběhu observace byly měřeny topocentrické souřadnice těchto hvězd, tedy jejich souřadnice v horizontální souřadnicové soustavě – azimut a zenitový úhel. Zároveň byl registrován přesný čas v okamžiku měření těchto souřadnic. Přesný čas byl získáván pomocí GNSS přijímače, který po dobu měření přijímal signál navigačního systému GPS. Astronomická observace na jednom bodě trvala jednu až dvě hodiny v závislosti na stavu oblačnosti. Během jedné měřické noci bylo obvykle zaměřeno čtyři až pět stanovišek.

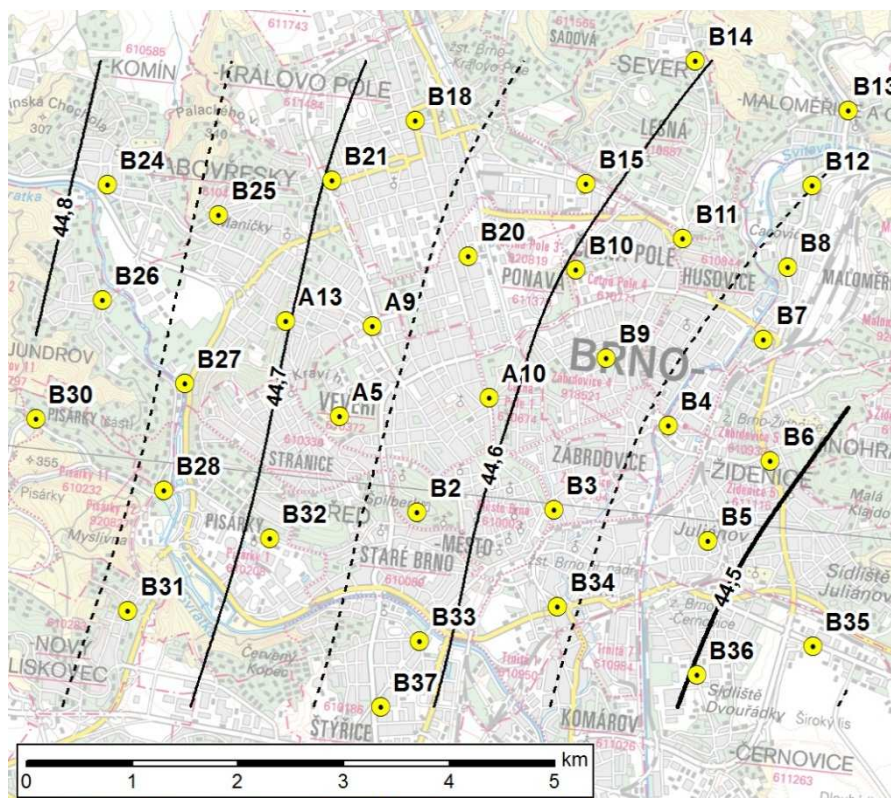
Geodetické souřadnice observovaných bodů byly určovány na základě znalosti souřadnic měřených hvězd v rovníkové souřadnicové soustavě z hvězdné ročenky a měřených topocentrických souřadnic těchto hvězd. Souřadnice určené z astronomických měření jsou vztaženy k tížnici v daném bodě. Z rozdílů astronomických souřadnic a souřadnic určených družicovými metodami byly určeny tížnicové odchylky na jednotlivých bodech dle vztahů (30) a (31).

Postup výpočtu hodnot relativního převýšení kvazigeoidu pomocí tížnicových odchylek je uveden v kapitole 3.2. Hodnoty relativního převýšení kvazigeoidu mezi dvojicemi jednotlivých bodů byly vyrovnány metodou nejmenších čtverců, čímž vznikl výsledný model astronomického kvazigeoidu. Hodnoty relativního převýšení kvazigeoidu na jednotlivých bodech jsou uvedeny v tabulce 17 ve sloupci označeném ζ_A . Relativní astronomický model kvazigeoidu byl následně vztažen do odpovídající výškové úrovně pomocí hodnoty převýšení kvazigeoidu určeného metodou GNSS/nivelace na centrálním bodě A10 sítě AGNES. Tímto způsobem získané hodnoty byly potom použity pro porovnání s hodnotami $\zeta_{G/N}$ určenými metodou GNSS/nivelace.

Tabulka 17 – Porovnání kvazigeoidu určeného GNSS/nivelací a astronomického kv.

bod	$\zeta_{G/N}$ [m]	ζ_A [m]	$\zeta_{G/N} - \zeta_A$ [m]	typ připojení
B2	44,673	0,016	0,047	PNS
B3	44,557	-0,040	-0,014	ČSNS
B4	44,553	-0,068	0,010	PNS
B5	44,527	-0,097	0,013	PNS
B6	44,548	-0,101	0,037	ČSNS
B7	44,535	-0,079	0,002	PNS
B8	44,543	-0,071	0,003	ČSNS
B11	44,595	-0,039	0,023	ČSNS
B12	44,557	-0,060	0,006	ČSNS
B13	44,558	-0,052	-0,001	ČSNS
B15	44,638	-0,001	0,028	ČSNS
B18	44,694	0,063	0,020	ČSNS
B20	44,602	0,025	-0,034	ČSNS
B21	44,711	0,086	0,014	ČSNS
B24	44,788	0,176	0,001	ČSNS
B25	44,749	0,130	0,008	ČSNS
B26	44,790	0,168	0,011	ČSNS
B27	44,750	0,129	0,010	ČSNS
B33	44,621	0,003	0,006	ČSNS
B34	44,596	-0,052	0,037	PNS
B36	44,533	-0,113	0,035	PNS
B37	44,673	0,012	0,050	ČSNS

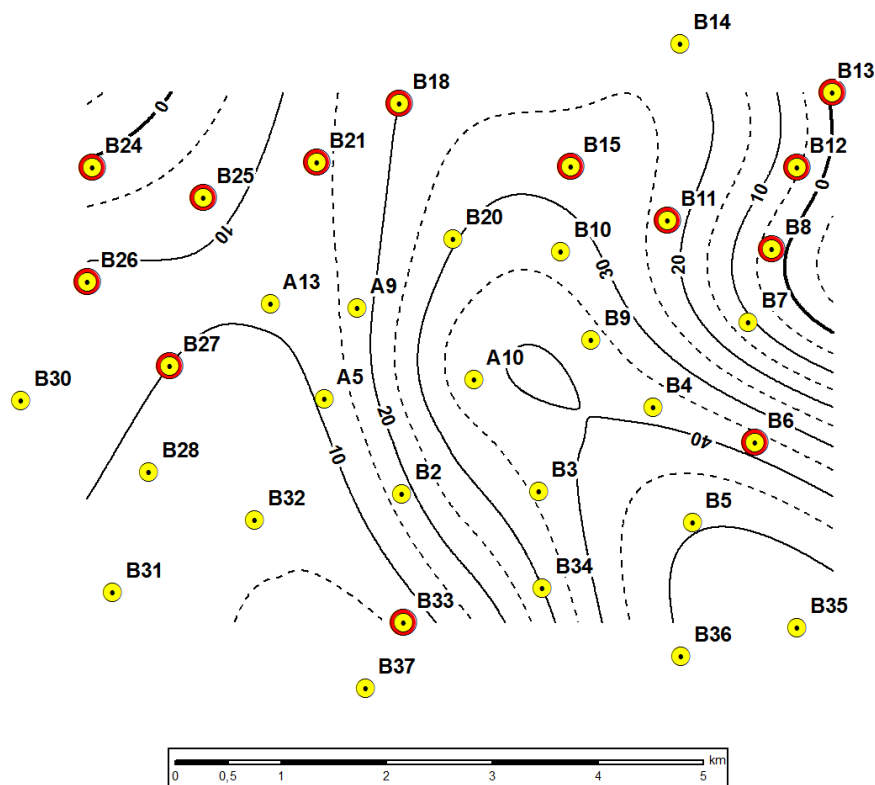
Průběh astronomického kvazigeoidu je znázorněn pomocí izolinií na obrázku 38.



Obr. 38 – Kvazigeoid z astronomických měření, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)

Z porovnání modelu kvazigeoidu určeného metodou GNSS/nivelace s astronomickým kvazigeoidem byly získány odchylky, které lze charakterizovat směrodatnou odchylkou 0,020 m. V případě, že bychom brali v úvahu pouze body, jejichž nadmořská výška byla ověřena nivelačním měřením na přípojevací body I. až III. řádu, klesne tato směrodatná odchylka na hodnotu 0,017 m. Z těchto výsledků je patrné, že zbytkové chyby nivelačních měření a především chyby družicových metod při určování výšek výrazně ovlivňují přesnost výsledného modelu kvazigeoidu.

Na obrázku 39 jsou graficky znázorněny odchylky modelu kvazigeoidu určeného metodou GNSS/nivelace zobrazeného na obrázku 34 od modelu získaného pomocí astronomických měření, které jsou uvedeny v tabulce 17. Do tohoto znázornění byly zahrnuty body, které byly připojeny na nivelační síť I. až III. řádu s výjimkou vyloučených bodů B3, B20 a B37.



Obr. 39 – Odchyly astronomického kvazigeoidu a modelu určeného GNSS/nivelací, hodnoty izolinií jsou uvedeny v milimetrech

Pro verifikaci astronomického kvazigeoidu byl použit gravimetrický kvazigeoid z tíhových dat. K výpočtu kvazigeoidu byly použity tíhové anomálie ve volném vzduchu (Fayeovy). Ty byly přepočítány z měřených tíhových zrychlení a nivelovaných výšek na pravidelný rastr bodů pomocí metody remove-compute-restore. Fayeovy anomálie se tedy redukovaly na Bouguerovy, ty se vyinterpolovaly v pravidelném rastru a následně se redukce zavedla zpět pro získání výsledných Fayeových anomálií.

Výsledný astronomický kvazigeoid vykazuje velmi dobrou shodu s gravimetrickým modelem kvazigeoidu. Vzájemné odchyly dosahují hodnot do 0,010 m, přičemž směrodatná odchylka charakterizující soubor odchylek těchto dvou modelů byla vyčíslena na 0,003 m. Astronomický kvazigeoid lze tudíž chápat jako referenční model pro ověřování přesnosti při určování kvazigeoidu metodou GNSS/nivelace, neboť je určen s přesností lepší o jeden řád. [33]

Dále byl model kvazigeoidu určený z astronomických měření porovnán s vybranými modely kvazigeoidu, které jsou dostupné pro území České republiky. Jedná se o tytéž modely, které byly použity v kapitole 7.3. V tabulce 18 jsou uvedeny vzájemné odchyly převýšení kvazigeoidu ζ z jednotlivých modelů a astronomického kvazigeoidu.

Tabulka 18 – Porovnání astronomického kvazigeoidu s vybranými modely kvazigeoidu

bod	$\zeta_{\text{CR2005}} - \zeta_A$ [m]	$\zeta_{\text{EGM08}} - \zeta_A$ [m]	$\zeta_{\text{geom}} - \zeta_A$ [m]	$\zeta_{\text{kombi}} - \zeta_A$ [m]
B2	-0,001	-0,012	0,005	-0,012
B3	0,004	-0,012	-0,066	-0,017
B4	0,006	0,026	0,019	0,027
B5	0,005	0,003	0,000	0,006
B6	0,003	0,020	0,028	0,027
B7	0,005	0,012	0,006	0,021
B8	0,006	0,004	-0,002	0,013
B11	0,006	0,025	0,016	0,027
B12	0,012	0,029	0,027	0,025
B13	0,014	0,020	0,018	0,017
B15	0,003	-0,014	-0,023	-0,011
B18	-0,001	-0,021	-0,033	-0,028
B20	0,003	-0,009	-0,012	-0,006
B21	-0,005	0,016	-0,031	0,012
B24	-0,019	-0,029	0,009	-0,031
B25	-0,014	-0,033	0,002	-0,043
B26	-0,016	-0,021	0,017	-0,023
B27	-0,014	0,016	0,056	0,020
B33	-0,002	-0,004	0,017	0,018
B34	0,003	-0,005	-0,053	-0,039
B36	0,004	0,007	0,015	0,012
B37	-0,003	-0,020	-0,015	-0,016
sm. odch.	0,009	0,018	0,028	0,022

Z uvedených odchylek je patrné, že si jednotlivé modely vzájemně odpovídají na úrovni několika málo centimetrů. Hodnoty jednotlivých odchylek nevykazují žádný systematický posun nebo jinou závislost mezi porovnávanými modely.

Metoda GNSS/nivelace se z hlediska přesnosti výsledných výšek neukazuje jako nejpřesnější metoda pro tvorbu lokálního kvazigeoidu, jak je patrné podle výsledků v kapitole 7. Přesnost výsledných hodnot převýšení kvazigeoidu $\zeta_{G/N}$ je totiž ovlivněna plnou vahou systematickými chybami působícími při určení elipsoidické výšky technologií GNSS a stejně tak chybami v určení výšek výchozích bodů použitých pro nivelační měření. Tyto vlivy způsobují odchylky až v řádu centimetrů, které při detailnějším mapování průběhu kvazigeoidu způsobují lokální nehomogenní chyby při modelování kvazigeoidu. Metoda GNSS/nivelace je spíše vhodnější jako kontrolní metoda pro jiné

metody určování kvazigeoidu, popř. jako referenční metoda pro výškové umístění relativních modelů kvazigeoidu vzniklých jinými metodami. Výhodou metody GNSS/nivelace je skutečnost, že jejím výsledkem je přímo absolutní hodnota převýšení kvazigeoidu nad referenčním elipsoidem, na rozdíl např. od astronomické metody určování kvazigeoidu, kterou se určuje relativní průběh kvazigeoidu, a na rozdíl od gravimetrické metody určování kvazigeoidu z tíhových dat, kdy získáme převýšení kvazigeoidu nad globálním elipsoidem, popř. sféroidem, který je závislý na použitém referenčním systému tíhových dat.

9 PŘÍNOS PRÁCE

V rámci této práce byla provedena řada testovacích měření zabývajících se zjišťováním reálné přesnosti prostorové polohy bodů určených technologií GNSS. Jednalo se o testovací měření metodou RTK a statickou metodou, o dlouhodobé i krátkodobé observace s využitím referenčních dat z různých sítí permanentních GNSS stanic. Při těchto testovacích měřeních byly vyhodnocovány nejen charakteristiky přesnosti výškové složky registrovaných dat, ale také vlivy vybraných faktorů, které působí v průběhu observace. Bylo např. zjišťováno, jestli má na přesnost měření vliv denní doba, použitá síť permanentních stanic a podobné faktory. Výsledky a závěry těchto experimentů tvoří řadu dílčích přínosů této práce.

Za účelem realizace navržených testovacích měření byla vybudována síť výškových bodů na území města Brna. Od roku 2006 bylo zřízeno 71 bodů, na kterých byly určovány elipsoidické výšky technologií GNSS a nadmořské výšky nivelací. V roce 2009 byl navržen projekt, v rámci kterého byl určován průběh kvazigeoidu několika různými metodami, kromě metody GNSS/nivelace také pomocí astronomických měření. Z toho důvodu byly ze stávající sítě výškových bodů vybrány takové body, na kterých bylo možno realizovat všechna navržená testovací měření. Celkem bylo použito 14 původních bodů, které byly doplněny o dalších 20 bodů. Při zřizování nových bodů již byly využívány zkušenosti z dřívějších testovacích měření. Vzhledem k charakteru měřených veličin byla nově vzniklá síť označena názvem AGNES (Astronomicko-GNSS-Nivelační Experimentální Síť). Body této sítě jsou rovnoměrně rozmístěny na části území města Brna o rozloze přibližně 50 km². Na těchto bodech byly uskutečněny družicové observace, nivelační měření a astronomické observace. Vybudování kvalitní sítě bodů bylo nezbytné pro realizaci navržených testovacích měření. Vznikl lokální model kvazigeoidu, pomocí něhož byla testována přesnost výšek určených pomocí technologie GNSS.

V rámci verifikace výchozích dat bylo provedeno ověření výšek zvolených bodů sítě ČSNS v některých částech města Brna. To bylo realizováno prostřednictvím několika bakalářských prací vypracovaných v součinnosti s testovacími měřeními realizovanými v rámci této práce.

Jedním z dalších přínosů této práce je navržená metodika současného měření technologií GNSS a metodou nivelace pomocí speciálního závěsného držáku nivelační latě, který lze uchytit ke GNSS aparatuře. Pomocí tohoto držáku je možné současně určovat elipsoidickou a nadmořskou výšku bodu. Nespornou výhodou popisovaného současného měření je skutečnost, že obě tyto výšky můžeme vztáhnout ke stejné referenční úrovni. Tímto postupem se redukuje chyby vznikající vlivem změn stabilizace bodu v době mezi jednotlivými měřeními, pokud tato měření probíhají odděleně.

Tato metodika je využitelná zejména při určování průběhu kvazigeoidu metodou GNSS/nivelace. Dále je možno ji využít při určování nadmořských výšek pomocí měření elipsoidických výšek technologií GNSS v lokalitách, kde známe průběh kvazigeoidu, popř. kde jej lze určit. Na základě stejného principu může být tato metoda využita rovněž při ověřování výšek bodů bodových polí v lokalitách, kde jsou zhoršené podmínky pro měření metodou nivelace způsobené např. nízkou hustotou nivelačních značek. Tímto způsobem lze v těchto lokalitách výškové body i zřizovat.

Za účelem zefektivnění zpracování dat byly provedeny programové úpravy ve formě skriptu, pomocí kterého bylo realizováno dávkové zpracování GNSS observací v programu Leica Geo Office v jazyce VBS. Tímto způsobem byly získány vstupní hodnoty pro vyhodnocení dat v kapitole 5.1. Podobným způsobem bylo řešeno filtrování dat naměřených metodou RTK pomocí skriptu v jazyce Python 2.6 anebo automatizované zpracování dat v programu Microsoft Excel pomocí maker v jazyce VBA.

Na základě výsledků získaných z jednotlivých testovacích měření byl v rámci této práce navržen postup měření metodikou současného měření metodou RTK a metodou nivelace. Pomocí tohoto postupu lze získat převýšení kvazigeoidu s přesností, kterou je možno charakterizovat směrodatnou odchylkou 0,030 m. Přesnější určení průběhu kvazigeoidu by poskytla statická metoda GNSS, popř. využití astronomických měření.

Metodika současného měření technologií GNSS a metodou nivelace, popř. metoda astronomicko-geodetické nivelace, je využitelná také pro určování lokálních modelů kvazigeoidu při realizaci rozsáhlejších staveb. Vyšší přesnost určování kvazigeoidu je přínosná např. při budování přehrad, kdy může docházet ke změnám tíhového pole.

10 ZÁVĚR

Tato disertační práce se zabývá problematikou určování výšek technologií GNSS. Za účelem zjišťování přesnosti výšek určených touto technologií byla v rámci této práce realizována řada testovacích měření. Některé experimenty zahrnovaly více než 24 hodin trvající družicovou observaci metodou RTK, při které byly registrovány 1s observace. Tato délka observace zajišťovala prostrídání všech konfigurací navigačního systému GPS. Data byla vyhodnocována v různých variantách (s různou délkou průměrovaných dat), které představovaly reálné měřické postupy, při praktickém měření touto technologií. V posledních dvou kapitolách práce je pojednáno také o přesnosti modelu kvazigeoidu, který na základě družicových měření vzniká.

Výsledky vyhodnocení parametrů přesnosti výškové složky při měření technologií GNSS RTK ukázaly, že touto metodou lze dosáhnout výsledných výšek, které je možno charakterizovat směrodatnou odchylkou přibližně 0,010 m. Jedná se ovšem pouze o přesnost vlastního družicového měření, která může být zhoršena dalšími vlivy působícími během observace (zákryt obzoru, vícecestné šíření signálu), popř. vlivy při převodu do jiného výškového systému (přesnost použitého modelu kvazigeoidu). Všechny tyto vlivy způsobují, že výsledná výška určená pomocí RTK měření může dosahovat přesnosti nejvýše kolem 0,020 m. Od toho se potom odvíjí přesnost modelu kvazigeoidu, který je určen s použitím těchto výšek metodou GNSS/nivelace. Výsledný model kvazigeoidu vytvořený v rámci této práce metodou GNSS/nivelace byl porovnán s modelem získaným pomocí astronomických měření, který byl určen s řádově milimetrovou přesností. Přesnost modelu určeného metodou GNSS/nivelace lze na základě tohoto porovnání charakterizovat směrodatnou odchylkou 0,017 m.

Z hlediska přesnosti určených výšek technologií GNSS existuje několik metod, které poskytují různou přesnost výsledných veličin. Výsledky získané metodou RTK obsahují větší množství odlehlých veličin. Abychom získali výsledky, které by vykazovaly přesnost danou výše uvedenou směrodatnou odchylkou 0,010 m, musíme realizovat vícenásobné opakování jednotlivých RTK observací. Na druhou stranu je metoda RTK výhodná z hlediska časové náročnosti měření, neboť dokáže získávat požadované výsledky v reálném čase. Zlepšení přesnosti určování prostorové polohy bodů je teoreticky možné očekávat po spuštění plného provozu navigačního systému Galileo, neboť družice tohoto systému budou vybaveny přesnějšími hodinami než družice systémů GPS a GLONASS.

Pokud uživatel požaduje vyšší přesnost a zároveň vyšší spolehlivost výsledné prostorové polohy určených bodů, je vhodnější použít měření statickou metodou. Z výsledků dosažených nejen v rámci této práce vyplývá, že při použití statické metody lze dosáhnout vyšší přesnosti určených souřadnic, a navíc tyto výsledky obsahují méně

odlehklých hodnot. Tím se zvyšuje spolehlivost měření, takže je možné realizovat menší počet opakování GNSS observací. Nevýhodou stále zůstává nutnost delší doby jednotlivých observací oproti metodě RTK.

Veškerá testovací měření uskutečněná v rámci této práce byla realizována na území města Brna a na profilu vedeném z Velké Bíteše do Brna. Tuto oblast na území jižní Moravy lze charakterizovat výraznějším sklonem průběhu kvazigeoidu, než je tomu v jiných oblastech České republiky. Z velké části výsledky testovacích měření odrážejí podmínky pro družicová měření dané městskou zástavbou. Našli bychom však i jiné typy území, které jsou určitým způsobem charakteristické svojí členitostí terénu a většími změnami v průběhu kvazigeoidu. Jsou to např. horské oblasti, které poskytují specifické podmínky pro geodetická měření a průběh kvazigeoidu zde lze očekávat výrazně proměnlivější než v jiných oblastech. Problematikou geodetických měření v horských oblastech se zabývá řada prací Ústavu geodézie na Fakultě stavební VUT v Brně, ve kterých jsou popsána terestrická a družicová měření v síti Králický Sněžník. Jedná se o další lokalitu, kde lze pokračovat v testování přesnosti metody GNSS/nivelace prostřednictvím astronomických měření a v testování postupu současného měření technologií GNSS a nivelací popsaného v této práci.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BENCALÍKOVÁ, K., KURUC, M. *Porovnání relativních modelů kvazigeoidu*. In Sborník anotací, Juniorstav 2010. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2010. ISBN 978-80-214-4042-5.
- [2] BIELY, P. *Budování nových výškových bodů s využitím sítě CZEPOS*. Brno, 2009. Diplomová práce. FAST, VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Weigel, CSc.
- [3] BUREŠ, J. *Optimalizace procesu měření GPS-RTK při využití CZEPOS*. In Sborník přednášek, 44. Geodetické informační dny. Brno: ECON Publishing, 2008. s. 124 – 136. ISBN: 978-80-86433-50-9.
- [4] BURŠA, M. *Geopotenciál. Díl I. Teoretické základy a modely*. Praha, Ministerstvo obrany ČR 2004. ISBN: 80-7278-224-X.
- [5] BURŠA, M., VATRT, V., VOJTÍŠKOVÁ, M. *Geopotenciál. Díl II. Modely a jejich využití v praxi*. Dobruška, Ministerstvo obrany ČR, Geografická služba AČR 2012. ISBN: 978-8-260-2092-9.
- [6] ČERNÝ, M.: *Nejmodernější technologie Trimble v oblasti GNSS*. In Sborník referátů: Družicové metody v geodézii a katastru. ECON publishing, s.r.o., Brno 2012, str. 39 – 42. ISBN: 978-80-86433-55-4.
- [7] ČR. 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.
- [8] DACH, R., HUGENTOBLE, U., FRIDEZ, P., MEINDL, M. *Bernese GPS Software: User manual of the Bernese GPS Software Version 5.0*. [online]. Astronomical Institute, University of Bern, 2007 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>.
- [9] DROŠČÁK, B., SMOLÍK, K. *Analýza inicializačných časov používateľov SKPOS*. Odborný seminár konaný pri príležitosti 60. výročia pedagogického a vedecko-výskumného pôsobenia Katedry geodetických základov [online]. 2012 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: http://www.svf.stuba.sk/docs/web_katedry/gza/dokumenty/60KGZA/prezentacie/60KGZA_Droscak_Smolik.pdf
- [10] FEATHERSTONE, W., KIRBY, J. *Estimates of the separation between the geoid and the quasigeoid over Australia*. Geomatics Research Australasia [online], no. 68, June 1998. [cit. 2012-12-09] Dostupné z: http://www.cage.curtin.edu.au/~will/gra68_05.pdf

- [11] GAO, Y., ABDEL-SALAM, M., CHEN, K., WOJCIECHOWSKI, A. *Point Real-Time Kinematic Positioning*. In *A Window on the Future of Geodesy*. Springer Berlin Heidelberg, 2005. ISSN: 0939-9585.
- [12] HOFMANN-WELLENHOF, B., MORITZ, H. *Physical geodesy*. Wien: Springer, 2005, 403 s. ISBN 32-112-3584-1.
- [13] CHEN, J., WU, B., HU, X., ZHOU, S., CAO, Y., WU, X. a XING, N. *Compass/Beidou: system status and initial service*. In: *IGS Workshop on GNSS Biases* [online]. Bern, 2012 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_2.3.4.pdf
- [14] JANSSEN, V. A comparison of the VRS and MAC principles for network RTK. *IGNSS Symposium 2009* [online]. 2009 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: http://ecite.utas.edu.au/60284/1/2009_Janssen_IGNSS2009_proceedings_version.pdf
- [15] JURČÍK, J. *Užití astronomické nivelace pro vytváření modelů kvazigeoidu*. Brno, 2012. Diplomová práce. FAST, VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
- [16] KAPLAN, E. D., HEGARTY, C. J. *Understanding GPS. Principles and applications*. Second edition. ARTECH HOUSE, INC., Norwood 2006. ISBN: 978-1-58053-894-7.
- [17] KOSTELECKÝ, J., J. KOSTELECKÝ JR., I. PEŠEK, J. ŠIMEK, O. ŠVÁBENSKÝ, J. WEIGEL a A. ZEMAN. *Quasigeoids for the Territory of the Czech Republic*. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2004, vol. 48, issue 3, s. 503-518. DOI: 10.1023/B:SGEG.0000037469.70838.39. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/B:SGEG.0000037469.70838.39>
- [18] KURUC, M., BENCALÍKOVÁ, K., HAŠOVÁ, A., POKORNÝ, J., PUCHRIK, L. *Současné určování výšek družicovými metodami a nivelací*. In *Juniorstav 2009, Sborník anotací*. Brno, VUT v Brně, Fakulta stavební. 2009. ISBN 978-80-214-3810-1.
- [19] KURUC, M., PUCHRIK, L., VOLAŘÍK, T. *Srovnání RTK služeb poskytovaných sítěmi GNSS permanentních stanic na území ČR*. In *Sborník referátů: Družicové metody v geodézii a katastru*. Brno, ECON publishing, s.r.o. 2010. p. 86 - 94. ISBN 978-80-86433-46-2.
- [20] LANDAU, Herbert, Ulrich VOLLATH a Xiaoming CHEN. *Virtual Reference Stations versus Broadcast Solutions in Network RTK: Advantages and Limitations*. In: *Trimble - Survey Research and White Papers* [online]. 2003 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-183158/VRS%20vs%20FKP%20-%20GNSS2003.pdf>

- [21] Leica Geosystems AG. *Leica GPS1200, Technical Reference Manual*. Heerbrugg, Switzerland, 2008. 1443p.
- [22] LENZ, Elmar. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) – Application and Benefit in Modern Surveying Systems. In: FIG working week [online]. 2004 [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts03/ts03_2_lenz.pdf
- [23] LIŠKA, P. *Využití sítě CZEPOS při určování výšek*. Brno, 2010. Diplomová práce. FAST, VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Weigel, CSc.
- [24] LUKEŠ, Z. *Zpracování dat GPS v reálném čase*. Praha, 2005. Disertační práce. ČVUT.
- [25] MACHOTKA, R. *Určování astronomických souřadnic – Metoda párů stejné výšky*. Geodetický a kartografický obzor, 12/2005. ČUZK, Praha 2005, str. 258 – 264.
- [26] MACHOTKA, R., KURUC, M. *Modely kvazigeoidu pro malá území*. In Družicové metody v geodézii a katastru, Sborník referátů. Brno, ECON publishing, s.r.o. 2012. p. 63 - 68. ISBN 978-80-86433-55-4.
- [27] NAHAVANDCHI, H., SOLTANPOUR, A.: *Improved determination of heights using a conversion surface by combining gravimetric quasi-geoid/geoid and GPS-levelling height differences*. *Studia Geophysica et Geodaetica* [online]. 2006, roč. 50, č. 2, s. 165-180 [cit. 2012-12-09]. ISSN 0039-3169. DOI: 10.1007/s11200-006-0010-3. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11200-006-0010-3>
- [28] NOVÁK, P. *Evaluation of selected gravity field parameters from local high resolution gravity and elevation data*. In Contributions to Geophysics and Geodesy. Vol. 36/1, 2006. ISSN: 1335-2806.
- [29] ŠUNKEVIČ, M. *Ruský globální družicový navigační systém GLONASS*. In: Česká kosmická kancelář [online]. 2007 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://www.czechspace.cz/cs/galileo/aktuality-GPS-Glonass/GLONASS>
- [30] TALICH, M., KADLEC, M. Technologie přesné transformace normálních a elipsoidálních výšek. VÚGTK. InGeoCalc [online]. 2011 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: http://www.vugtk.cz/ingeocalc/media/documents/transformace-vysek_doc.pdf
- [31] VILÍMKOVÁ, M. *Testování sítě CZEPOS*. Praha, 2007. Dostupné z: <http://czepos.cuzk.cz/diplomka.pdf>. Diplomová práce. ČVUT, FSV, Katedra vyšší geodézie. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kostecký, DrSc.
- [32] VOLAŘÍK, T., KURUC, M. Opakovatelnost určení prostorové polohy metodou RTK. In Seminář s mezinárodní účastí, GNSS v geodetické praxi, Sborník referátů. Brno, ECON publishing, s.r.o. 2011. p. 64 - 71. ISBN 978-80-86433-52-3.

- [33] VOLAŘÍK, T., MACHOTKA, R., KURUC, M., PUCHRIK, L., JURČÍK, J. *Determination of quasigeoid in local network using modern astrogeodetic technologies*. Acta Geodyn. Geomater., v. 10, No. 3(171), 2013. In print.
- [34] VYKUTIL, J. *Vyšší geodézie: vysokoškolská učebnice pro stavební fakulty*. 1. vyd. Praha: Kartografie, 1982, 544 s.
- [35] YUN-CHUN, Y., HATCH, R. R., SHARPE, R. T. *Minimizing the integer ambiguity search space for RTK*. In Wuhan University Journal of Natural Sciences. Volume 8, Issue 2 , pp 485-491. Wuhan University 2003. ISSN: 1007-1202.
- [36] ZEMAN, Antonín. *Fyzikální geodézie 10: teorie výšek a výškové systémy: doplňkové skriptum*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 83 s. ISBN 80-010-2733-3.

Webové zdroje

- [37] BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG). *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip): Version 1.0* [online]. [cit. 2013-02-21]. Dostupné z: http://igs.bkg.bund.de/root_ftp/NTRIP/documentation/NtripDocumentation.pdf
- [38] CZEPOS: *Sít' permanentních stanic GNSS České republiky* [online]. 2005 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://czepos.cuzk.cz/>
- [39] Galileo: a constellation of 30 navigation satellites. EUROPEAN SPACE AGENCY. ESA [online]. 2012, 2013-01-15 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_a_constellation_of_30_navigation_satellites
- [40] China Reveals Updated Compass/ Beidou-2 GNSS Signal Plan. In: InsideGNSS [online]. 2009 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://www.insidegnss.com/node/1624>
- [41] Information analytical centre of GLONASS and GPS controlling. Federal space agency [online]. 2012 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://www.glonass-center.ru/en/>
- [42] NGA: EGM2008 - WGS 84 Version. NGA. *Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)* [online]. [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html
- [43] O síti TopNET. GEODIS BRNO, spol. s r.o. TopNET [online]. 2010 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://topnet.geodis.cz/topnet/topnet.aspx>
- [44] Permanentní stanice. Český úřad zeměměřický a katastrální [online]. 2009 [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: <http://www.cuzk.cz/Dokument.aspx?>

PRARESKOD=998&MENUID=0&AKCE=DOC:10-GNSS-PERMANENTNI-STANICE

- [45] Space Segment. National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. GPS.gov: Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics [online]. 2012, 2013-01-16 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [46] Specifikace sítě. GEOTRONICS PRAHA, s. r. o. Trimble VRS Now Czech [online]. 2008 [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.geotronics.cz/specifikace-site>
- [47] STATSOFT. *Getting Started with Statistics Concepts*. StatSoft [online]. [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://www.statsoft.com/textbook/elementary-statistics-concepts/button/1/>
- [48] ÚSTAV GEODÉZIE, Fakulta stavební, VUT v Brně. *TUBO: Permanentní GPS stanice* [online]. [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: <http://tubo.fce.vutbr.cz/new/>
- [49] VÚGTK. InGeoCalc: Znalostní systém pro podporu rozhodování založeného na geodatech [online]. [cit. 2013-02-09]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/ingeocalc/apps>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ARP	antenna reference plane
CMR	Compact Measurement Record
ČSNS	Česká státní nivelační síť
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DGNSS	Diferenciální GNSS
DGPS	Diferenciální GPS
EGM2008	Earth Gravitational Model 2008
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPN	EUREF Permanent Network
ETRS	European Terrestrial Reference System
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
FKP	Flächenkorrekturparameter
GLONASS	Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOPE	Geodetic Observatory Pecný
GPS	Global Positioning System
IGS	International GNSS Service
LRP	levelling reference plane
NAVSTAR GPS	Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	the Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
S-JTSK	Souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
TEC	Total Electron Content
TECU	TEC Unit
TUBO	Technical University of Brno
VRS	Virtual Reference Station
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS 84	World Geodetic System 1984
ZÚ	Zeměměřický úřad

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Znázornění ortometrické a elipsoidické výšky (upraveno dle [12]).....	14
Obr. 2 – Princip astronomické nivelace (upraveno dle [26]).....	17
Obr. 3 – Frekvenční spektra signálů GNSS [40]	24
Obr. 4 – Systém Ntrip [37].....	25
Obr. 5 – Přehled permanentních GNSS stanic sítě CZEPOS [38]	28
Obr. 6 – Přehled permanentních GNSS stanic sítě TopNET [43]	29
Obr. 7 – Přehled permanentních GNSS stanic sítě Trimble VRS Now Czech [46]	30
Obr. 8 – Model kvazigeoidu na části území města Brna z roku 2008, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz).....	36
Obr. 9 – Znázornění testovacího bodu a nejbližších permanentních GNSS stanic (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)	38
Obr. 10 – a) zapojení GNSS aparatur, b) anténní rozdělovač signálu	39
Obr. 11 – Znázornění polohových odchylek a) sítě CZEPOS, b) sítě Trimble VRS Now	42
Obr. 12 – Časový průběh výškových odchylek – CZEPOS	43
Obr. 13 – Časový průběh výškových odchylek – Trimble VRS Now	44
Obr. 14 – Histogramy četností výškových odchylek určených pomocí sítě CZEPOS a Trimble VRS Now.....	46
Obr. 15 – Grafické znázornění výškových odchylek ze statické observace	47
Obr. 16 – Grafy přesnosti síťového řešení pro oblast CKRO-CHOD-TUBO [38]	49
Obr. 17 – Grafy přesnosti síťového řešení pro ostatní oblasti v okolí stanice TUBO	50
Obr. 18 – Vyhodnocení doby inicializace jednotlivých služeb [19]	51
Obr. 19 – Znázornění bodu JZ a nejbližších permanentních GNSS stanic (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)	52
Obr. 20 – Časový průběh výškových odchylek – CZEPOS	53
Obr. 21 – Časový průběh výškových odchylek – TopNET	54
Obr. 22 – Histogramy četností odchylek určených pomocí sítě CZEPOS a TopNET	55
Obr. 23 – Grafy přesnosti síťového řešení pro oblast CHOD-CZNO-TUBO [38]	56
Obr. 24 – Grafy přesnosti síťového řešení pro ostatní oblasti v okolí stanice TUBO [38] ..	57
Obr. 25 – Znázornění výškových offsetů GNSS aparatury.....	59
Obr. 26 – GNSS aparatura se závěsnou latí při měření	60
Obr. 27 – Současné měření GNSS a nivelace	61
Obr. 28 – Speciální držák závěsné latě k GNSS anténě (upraveno dle [21])	62
Obr. 29 – Anténa Leica AX1202 GG se znázorněním úrovně ARP [21]	62
Obr. 30 – Přehled observovaných pomocných bodů (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)...	65

Obr. 31 – Přehled výškových bodů ČSNS a podrobných výškových bodů v zájmové lokalitě (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz).....	69
Obr. 32 – Kvazigeoid GNSS/nivelace, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)	72
Obr. 33 – Kvazigeoid GNSS/nivelace z bodů připojených na ČSNS, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)	73
Obr. 34 – Kvazigeoid GNSS/nivelace z vybraných bodů, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)	74
Obr. 35 – Přehled bodů profilu zaměřených v roce 2009 (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz)	77
Obr. 36 – Průběh kvazigeoidu určený pomocí různých RTK služeb.....	80
Obr. 37 – Porovnání průběhu kvazigeoidu GNSS/nivelace s vybranými modely	81
Obr. 38 – Kvazigeoid z astronomických měření, hodnoty izolinií jsou uvedeny v metrech (zdroj podkladu: geoportal.gov.cz).....	85
Obr. 39 – Odchyšky astronomického kvazigeoidu a modelu určeného GNSS/nivelací, hodnoty izolinií jsou uvedeny v milimetrech.....	86

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Přehled služeb sítě CZEPOS	29
Tabulka 2 – Přehled služeb sítě TopNET.....	30
Tabulka 3 – Přehled služeb sítě Trimble VRS Now Czech	31
Tabulka 4 – Souřadnice bodu TUBO v systému ETRS89	32
Tabulka 5 – Empirické charakteristiky polohové složky	41
Tabulka 6 – Empirické střední hodnoty a směrodatné odchylky výškových odchylek.....	45
Tabulka 7 – Statistické vyhodnocení souboru naměřených dat	46
Tabulka 8 – Vyhodnocení výškových odchylek ze statické observace	48
Tabulka 9 – Seznam testovaných RTK služeb	51
Tabulka 10 – Empirické střední hodnoty a směrodatné odchylky naměřených hodnot	55
Tabulka 11 – Seznam připojovacích bodů	70
Tabulka 12 – Výsledné hodnoty převýšení kvazigeoidu určeného metodou GNSS/nivelací	71
Tabulka 13 – Hodnoty převýšení ζ z vybraných modelů kvazigeoidu.....	75
Tabulka 14 – Porovnání získaného modelu kvazigeoidu s vybranými modely	76
Tabulka 15 – Elipsoidické výšky určené pomocí jednotlivých typů korekcí	78
Tabulka 16 – Hodnoty převýšení kvazigeoidu určené pomocí jednotlivých RTK služeb.....	79
Tabulka 17 – Porovnání kvazigeoidu určeného GNSS/nivelací a astronomického kv.	84
Tabulka 18 – Porovnání astronomického kvazigeoidu s vybranými modely kvazigeoidu...	87

SEZNAM PŘÍLOH

1. Ukázka záznamu měřených dat:
dlouhodobá observace metodou RTK ze dne 31. 8. na 1. 9. 2010
2. Ukázka zápisníku nivelačního měření:
nivelační měření pomocí speciálního držáku závěsné latě při měření profilu
Velká Bíteš – Brno, červenec 2009

Příloha č. 1: Ukázka záznamu měřených dat:

dlouhodobá observace metodou RTK ze dne 31. 8. na 1. 9. 2010

Záznam observace GNSS aparatury, která přijímala korekce ze sítě CZEPOS:

Point Id,Point Class,Point Subclass,Date/Time,Coordinate Source XY,Coordinate Source
Z, Latitude,,,,,Longitude,,,,,Ellip. Hgt.,Sd. Latitude,Sd. Longitude,Sd. Height,Posn.
Qty,Hgt. Qty,Posn. + Hgt. Qty
C100002,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:41,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21694,N,16,36,43.33003,E,270.5591,0.0068,0.0044,0.0131,0.0081,0.0131,0.0154
C100003,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:42,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21708,N,16,36,43.33001,E,270.5672,0.0088,0.0057,0.0171,0.0105,0.0171,0.0201
C100004,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:43,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21704,N,16,36,43.33000,E,270.5707,0.0086,0.0056,0.0167,0.0103,0.0167,0.0196
C100005,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:44,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21714,N,16,36,43.32998,E,270.5627,0.0072,0.0047,0.0139,0.0086,0.0139,0.0164
C100006,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:45,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21709,N,16,36,43.32987,E,270.5611,0.0078,0.0051,0.0151,0.0093,0.0151,0.0177
C100007,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:46,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21700,N,16,36,43.32990,E,270.5724,0.0085,0.0055,0.0164,0.0101,0.0164,0.0193
C100008,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:47,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21692,N,16,36,43.32993,E,270.5727,0.0081,0.0053,0.0157,0.0097,0.0157,0.0184
C100009,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:48,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21701,N,16,36,43.33003,E,270.5711,0.0069,0.0044,0.0133,0.0082,0.0133,0.0156
C100010,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:49,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21696,N,16,36,43.32978,E,270.5613,0.0076,0.0050,0.0148,0.0091,0.0148,0.0174
C100011,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:50,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21714,N,16,36,43.33005,E,270.5685,0.0068,0.0044,0.0132,0.0081,0.0132,0.0155
C100012,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:51,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21711,N,16,36,43.32994,E,270.5586,0.0078,0.0051,0.0152,0.0093,0.0152,0.0178
C100013,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:52,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21720,N,16,36,43.33011,E,270.5475,0.0069,0.0045,0.0133,0.0082,0.0133,0.0156
C100014,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:53,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21698,N,16,36,43.32993,E,270.5580,0.0082,0.0053,0.0159,0.0098,0.0159,0.0187
C100015,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:54,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21705,N,16,36,43.33002,E,270.5684,0.0076,0.0049,0.0147,0.0090,0.0147,0.0172
C100016,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:55,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21719,N,16,36,43.33010,E,270.5598,0.0071,0.0046,0.0138,0.0085,0.0138,0.0162
C100017,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:56,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21699,N,16,36,43.32983,E,270.5633,0.0076,0.0049,0.0147,0.0090,0.0147,0.0172
C100018,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:57,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21712,N,16,36,43.32991,E,270.5583,0.0076,0.0049,0.0147,0.0090,0.0147,0.0172
C100019,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:58,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21697,N,16,36,43.32986,E,270.5625,0.0077,0.0050,0.0149,0.0092,0.0149,0.0175
C100020,Measured,Phase,08/31/2010 11:27:59,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21689,N,16,36,43.32999,E,270.5704,0.0074,0.0048,0.0143,0.0088,0.0143,0.0167
C100021,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:00,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21705,N,16,36,43.33000,E,270.5633,0.0072,0.0046,0.0139,0.0085,0.0139,0.0163
C100022,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:01,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21714,N,16,36,43.32999,E,270.5563,0.0071,0.0046,0.0138,0.0085,0.0138,0.0162
C100023,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:02,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21701,N,16,36,43.32989,E,270.5596,0.0069,0.0044,0.0133,0.0082,0.0133,0.0156
C100024,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:03,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21699,N,16,36,43.32993,E,270.5602,0.0060,0.0039,0.0116,0.0071,0.0116,0.0136
C100025,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:04,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21701,N,16,36,43.32996,E,270.5599,0.0068,0.0044,0.0132,0.0081,0.0132,0.0155
C100026,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:05,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21678,N,16,36,43.32970,E,270.5558,0.0074,0.0048,0.0144,0.0089,0.0144,0.0169
C100027,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:06,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21706,N,16,36,43.32998,E,270.5596,0.0068,0.0044,0.0133,0.0082,0.0133,0.0156
C100028,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:07,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21714,N,16,36,43.32993,E,270.5484,0.0069,0.0045,0.0134,0.0082,0.0134,0.0157
C100029,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:08,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21725,N,16,36,43.33006,E,270.5540,0.0070,0.0045,0.0136,0.0083,0.0136,0.0159
C100030,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:09,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21693,N,16,36,43.32992,E,270.5534,0.0063,0.0041,0.0123,0.0075,0.0123,0.0144
C100031,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:10,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21691,N,16,36,43.32972,E,270.5621,0.0066,0.0043,0.0129,0.0079,0.0129,0.0151
C100032,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:11,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21700,N,16,36,43.32990,E,270.5508,0.0070,0.0045,0.0135,0.0083,0.0135,0.0159
C100033,Measured,Phase,08/31/2010 11:28:12,Fixed by GPS,Fixed by
GPS,49,12,04.21700,N,16,36,43.33003,E,270.5626,0.0066,0.0042,0.0127,0.0078,0.0127,0.0149

Příloha č. 2: Ukázka zápisníku nivelačního měření:

nivelační měření pomocí speciálního držáku závěsné latě při měření profilu
Velká Bíteš – Brno, červenec 2009

Zápisník nivelace

Číslo bodu		Čtení na lati			Nadmořská výška horizontu přístroje	Nadmořská výška bodu		Poznámka
přesta- vového	bočného	vzad +	vpřed -	bočně -		přestavového	určeného bočně	
KO15		0,3564						závěsná lať
		-0,6430						datum: 8.7.2009
			0,35728					přístroj: Leica NA3003
		1,0102						lať: WILD GWCL182
KO-67.3			1,2987					hloubková stabilizace
		0,7236	1,6560					
			0,9324					
KO67.3		1,2821				470,1930		hloubková stabilizace
			0,9922					
		0,3210						
KO15			0,3216			471,1254		závěsná lať
			-0,6430					
		1,6031	0,6708		$h_1 =$	0,9324 m		
		0,9323			$h_2 =$	0,9323 m	$o = -0,0001$ m	
					$h =$	0,9324 m		
KO14		0,2103						závěsná lať
		-0,6430						
			1,7443					
		0,2299						
KO-61.1			1,6118					niv. kámen
		-0,2029	3,3561					
			3,5590					
KO61.1		1,5899				502,8530		niv. kámen
			0,2078					
		1,8769						
KO14			0,3430			506,4120		závěsná lať
			-0,6430					
		3,4669	-0,0922		$h_1 =$	3,5590 m		
		3,5590			$h_2 =$	3,5590 m	$o = 0,0000$ m	
					$h =$	3,5590 m		
KO13f		0,3502						závěsná lať
		-0,6430						
KO-58			0,4252					niv. kámen
		-0,2928	0,4252					
			0,7180					
KO-58		0,4107				500,8290		niv. kámen
KO13f			0,3357			501,5470		závěsná lať
			-0,6430					
		0,4107	-0,3073		$h_1 =$	0,7180 m		
		0,7180			$h_2 =$	0,7180 m	$o = 0,0000$ m	
					$h =$	0,7180 m		