

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 476

ISSN 1213-418X

Radovan Machotka

**AUTOMATIZACE
ASTRONOMICKÉHO
URČOVÁNÍ POLOHY**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav geodézie

Ing. Radovan Machotka, Ph.D.

AUTOMATIZACE ASTRONOMICKÉHO URČOVÁNÍ POLOHY

AUTOMATION OF ASTRONOMICAL POSITIONING

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
VĚDNÍ OBOR: GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



BRNO 2014

KLÍČOVÁ SLOVA

Geodetická astronomie, astronomické určování polohy, automatizace optických pozorování, tížnicové odchylky, kvazigeoid, tíhové modely Země.

KEYWORDS

Geodetic astronomy, astronomical positioning, automation of optical observations, vertical deflections, quasigeoid, Earth's gravity models.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:

Originál práce je uložen v archivu PVO FAST VUT v Brně

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 VÝZNAM ASTRONOMICKÉHO URČOVÁNÍ POLOHY PRO SOUČASNOU GEODÉZII..	5
2 MOTIVACE – PROČ ASTRONOMICKÁ MĚŘENÍ V 21. STOLETÍ.....	5
2.1 Zdroje dat o tíhovém poli Země.....	5
2.2 Význam astrogeodetických dat pro mapování tíhového pole Země	6
2.3 Astronomická nivelace.....	8
3 SOUČASNÝ STAV ASTRONOMICKÉHO URČOVÁNÍ POLOHY	10
3.1 Přístroje s digitální registrací obrazu	10
3.1.1 Teodolitové astronomické systémy.....	10
4 VÝVOJ VLASTNÍHO SYSTÉMU PRO ASTRONOMICKÉ URČOVÁNÍ POLOHY	11
4.1 Popis hardwarové konfigurace MAAS-1	12
4.2 Softwarová část MAAS-1	14
4.3 Užívané katalogy hvězd	14
5 SÍŤ AGNES.....	15
5.1 Oblast a data.....	15
5.2 Modely kvazigeoidu.....	16
5.3 Zhodnocení přesnosti tížnicových odchylek.....	17
5.4 Zhodnocení relativní přesnosti modelů.....	18
5.5 Závěry vyplývající ze zpracování lokálních modelů kvazigeoidu.....	19
6 PŘESNOST VÝSLEDKŮ MAAS-1	20
6.1 Vyhodnocení opakovatelnosti výsledků měření	21
6.1.1 Staniční testování na terase Fakulty stavební VUT v Brně.....	21
6.1.2 Opakovaná terénní měření.....	21
6.1.3 Zhodnocení opakovatelnosti výsledků.....	22
6.2 Porovnání výsledků MAAS-1 s výsledky určenými jinými přístroji.....	23
6.2.1 Přehled srovnávacích měření.....	23
6.2.2 Shrnutí srovnávacích měření	24
6.3 Porovnání s gravimetrickými tížnicovými odchylkami	26
6.3.1 Přehled lokalit.....	26
6.3.2 Shrnutí porovnání tížnicových odchylek	27
6.4 Shrnutí testování přesnosti výsledků MAAS-1.....	28
7 ZÁVĚR.....	28
8 POUŽITÉ ZDROJE	30
ABSTRACT.....	32

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Radovan Machotka

Datum a místo narození: 11. ledna 1974 v Humpolci

Rodinný stav: ženatý, 2 děti

Zaměstnavatel

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební



Studium

- 1992 zakončení studia na SPŠ strojní Pelhřimov úspěšným složením maturity;
1997 úspěšné složení státní zkoušky a obhajoba diplomové práce na Fakultě stavební VUT v Brně, obor Geodézie a kartografie. Diplomová práce byla oceněna cenou děkana;
1998 – 2001 interní doktorské studium na Fakultě stavební VUT v Brně, obor Geodézie a kartografie. Téma: Využití metod geodetické astronomie pro určení převýšení lokálního kvazigeoidu;
březen 2005 úspěšná obhajoba disertační práce.

Zaměstnání, pracovní zařazení

- 1997 – 1998 Geospol Dobruška, a.s, pracovní zařazení zeměměřický inženýr;
2000 externí asistent na Vojenské Akademii Brno;
2001 – 2005 VUT v Brně, Fakulta stavební, asistent na Ústavu geodézie;
2005 – dosud VUT v Brně, Fakulta stavební, odborný asistent na Ústavu geodézie;
2008 – 2012 tajemník pro vědu a výzkum Ústavu geodézie;
2010 – dosud zástupce vedoucího Ústavu geodézie;
2010 – 2013 zástupce řešitele projektu OPVK CZ.1.07/2.2.00/15.0144;
2012 zaměstnanec Centra AdMaS.

Pedagogické zaměření

Výuka klasických i moderních geodetických měřických metod a jejich teoretických základů
garant předmětů Geodetická astronomie a kosmická geodézie I a II
cvičící předmětů Geodézie I a III
(výběr) Vyšší geodézie a základy kosmické geodézie
Vyšší geodézie II
Výuka v terénu I

Odborné a výzkumné zaměření

Geodetická astronomie, automatizace měřících procesů, automatizace zpracování obrazu, fyzikální geodézie, kosmická geodézie, vyšší geodézie. Programování v jazycích Pascal, Delphi.

Jazykové znalosti

Angličtina aktivně na komunikační úrovni, ruština a španělština pasivně (studium odborných textů).

Publikační činnost

Přes 50 odborných a vědeckých publikací, 7 učebních textů.

1 VÝZNAM ASTRONOMICKÉHO URČOVÁNÍ POLOHY PRO SOUČASNOU GEODÉZII

S nástupem Globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) a hlavně nejznámějšího z nich Globálního pozičního systému (Global Positioning System – GPS) význam geodetické astronomie, jako metody určování polohy, významně poklesl. Metody využívající GNSS poskytují vyšší rychlost, přesnost i komfort určování polohy. Jejich využití není prakticky závislé na denní době ani počasí. GNSS vítězí i na poli nákladů. Ruční kódový přijímač lze pořídit za cenu nižší než je cena vysloužilého teodolitu, přičemž jeho používání nevyžaduje žádné zvláštní znalosti ani dovednosti. Moderním nástupcem služeb sledujících rotaci Země a pohyby jejích pólů je Mezinárodní služba pro rotaci Země a referenční systémy (International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS), která pro určování polohy zemských pólů a rychlosti rotace Země astronomická měření nevyužívá.

Důsledkem útlumu astronomických měření prakticky ustrnul vývoj metod a přístrojového vybavení. Obojí zůstalo na úrovni 80. let minulého století. Na začátku 21. století sice dochází k mírné renezanci astronomického určování polohy, ale přístrojové vybavení a navazující měřické metody jsou teprve ve vývoji.

Důvodem renezance astronomického určování polohy je paradoxně velký rozvoj metod GNSS. Pro provázání výsledků GNSS měření s měřeními pozemními je důležitá znalost parametrů tíhového pole Země v dané lokalitě. Jedná se totiž o propojení měření geometrických (GNSS) s měřeními vázanými na směr tíže (horizontální a vertikální úhly, nivelační či trigonometrická převýšení). V této oblasti poskytují astronomická (přesněji astronomicko-geodetická či zkráceně astrogeodetická) měření důležitá data pro zjišťování geometrie gravitačního pole. Konkrétně umožňují zjistit odklon vektoru gradientu tíže od normálového vektoru plochy použitého referenčního tělesa, tak zvanou tížnicovou odchylku.

Astronomické určování polohy není jedinou metodou poskytující údaje o tíhovém poli Země. Dalšími jsou gravimetrie, altimetrie či družicové tíhové mise. Je však jedinou metodou, která umožňuje v kombinaci s GNSS observacemi určování tížnicových odchylek přímým měřením.

2 MOTIVACE – PROČ ASTRONOMICKÁ MĚŘENÍ V 21. STOLETÍ

2.1 ZDROJE DAT O TÍHOVÉM POLI ZEMĚ

Data pro modely tíhového pole Země mohou být různého původu.

Gravimetrická měření jsou jednou z nejpoužívanějších metod. Relativním nebo absolutním měřením na vybraných bodech se určují hodnoty skutečného tíhového zrychlení $g(P)$. Pokud jsou známy elipsoidické souřadnice bodů B , L , H , lze vypočítat normální tíhové zrychlení $\gamma(Q)$ a pomocí vzorce

$$\Delta g(P) = g(P) - \gamma(Q) \quad (2.1)$$

vypočítat anomálie tíhového zrychlení $\Delta g(P)$. Jedná se o skalární veličiny.

Pokud jsou k dispozici tíhové anomálie z celého povrchu Země, lze je použít k výpočtu výšky geoidu či kvazigeoidu, stejně jako pro výpočet gravimetrických tížnicových odchylek. Potřebné vzorce lze nalézt ve většině učebnic vyšší geodézie, např. *Torge (2001)*, *Hofmann-Wellenhopf a Moritz (2005)*, *Pick (2000)*.

Protože integrace tíhových anomálií přes celý povrch Země je nepraktická a při použití nehomogenních dat může vést k systematicky vychýleným výsledkům, je vhodné použít pro zahrnutí vlivu vzdálených zón některý z globálních modelů tíhového pole Země. Při tomto postupu je vliv blízkých zón počítán z reziduálních tíhových anomálií, tedy takových, které byly určeny jako rozdíly mezi skutečnými hodnotami tíhového zrychlení a hodnotami vypočtenými

z příslušného globálního tíhového modelu (například EGM2008). Výpočet numerickou integrací v tomto případě probíhá jen v blízkých zónách (typicky v oblasti o poloměru 5') a vliv ostatních zón je převzat (vypočten) z globálního tíhového modelu.

Astrogeodetická měření (též astronomicko-geodetická měření) jsou kombinací astronomických a geodetických pozičních měření. Astronomicky se určují astronomické zeměpisné souřadnice vybraných bodů na Zemi a to pomocí směrových měření na vybraná nebeská tělesa (vesměs hvězdy). Konkrétně se jedná o astronomickou zeměpisnou šířku φ a astronomickou zeměpisnou délku λ . Kombinací těchto souřadnic s geodeticky získanými elipsoidickými souřadnicemi B a L lze, užitím vztahů

$$\xi = \varphi - B, \quad \eta = (\lambda - L) \cos B \quad (2.2)$$

vypočítat složky astrogeodetické tížnicové odchylky – meridiánovou ξ a příčnou η .

V současné době jsou geodetické souřadnice určovány téměř výhradně metodami GNSS v geocentrickém systému. Takto získané **tížnicové odchylky** lze považovat za **absolutní**, pokud jsou astronomické i geodetické souřadnice vztaženy ke stejným základním rovinám (rovina rovníku, rovina základního poledníku).

Přesná astrogeodetická měření lze provádět pouze na pevné Zemi.

Využití kombinace GNSS a nivelačních měření. Metoda spočívá v nezávislém určení výšek bodů v zájmové oblasti dvěma metodami. Metodou GNSS jsou určeny elipsoidické výšky, nivelací pak výšky v příslušném výškovém systému.

Výškovou anomálii ζ_A bodu A určíme ze vztahu:

$$\zeta_A = H_A - h_A, \quad (2.3)$$

kde H_A je jeho elipsoidická výška a h_A jeho normální výška. Výsledek je ovlivněn použitým výškovým systémem pro normální výšky.

Družicová altimetrie využívá speciálních družic vybavených radarovým případně laserovým dálkoměrem (altimetrem). Dálkoměr se využívá pro měření výšky družice nad hladinou oceánu. Pokud jsou přesně známy dráhové parametry družice, lze z výškových měření určit průběh hladiny oceánu. Po odstranění rušivých vlivů (oceánské slapy, vliv větru a tlaku vzduchu, mořské proudy, různá slanost mořské vody, ...) lze tuto hladinu ztotožnit s plochou geoidu.

Sledování gravitačního působení Země na družice. Tato metoda vychází ze sledování vlivu poruchového potenciálu na dráhy umělých družic Země. Metoda je citlivá hlavně na harmonické koeficienty nízkých řádů ($n \leq 60$). U těchto dosahuje vysoké přesnosti. Bylo vypuštěno několik specializovaných družic například LAGEOS, STARLETE, EGS, GFZ-1.

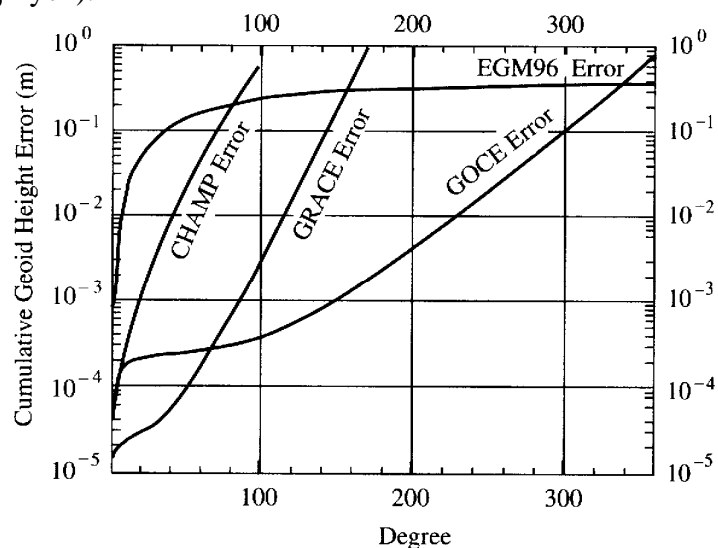
V poslední době bylo realizováno několik specializovaných projektů, které díky nízké oběžné dráze a speciálním metodám měření negravitačních vlivů a sledování dráhy dosáhly vysoké citlivosti i pro harmonické koeficienty vyšších řádů. Jedná se o projekty CHAMP, GRACE a GOCE. Výhodou je velké množství dat z celé Země získané jedním přístrojem. Odpadají tak problémy s homogenizací dat.

2.2 VÝZNAM ASTROGEODETICKÝCH DAT PRO MAPOVÁNÍ TÍHOVÉHO POLE ZEMĚ

V předchozí kapitole byly nastíněny zdroje dat pro mapování tíhového pole Země. Astrogeodetická měření jsou jen jedním ze zdrojů. V současnosti jsou pro modely tíhového pole Země využívány hlavně data gravimetrická, altimetrická a data ze sledování drah družic. V tomto směru lze říci, že tyto zdroje dat lze vhodně kombinovat, neboť družicová data umožňují přesné určení harmonických koeficientů nízkých řádů, zatímco u vyšších řádů nedostačují. Naopak data gravimetrická a altimetrická zachycují i podrobnější strukturu tíhového pole. Nevýhodou dat gravimetrických je pak jejich značná nehomogenita co do kvality, hustoty a použité metodiky měření.

Dle *Seeber (2003)* nelze očekávat, že družicové projekty jako CHAMP, GRACE či GOCE nahradí pozemní měření. Předpokládaná přesnost a rozlišení modelů tíhového pole vytvořených na základě jednotlivých misí jsou uvedeny na obrázku 2.1.

Jak je vidět, uvedené mise výrazně zlepšují dřívější modely (v obrázku vyznačen EGM96) u harmonických koeficientů nízkých řádů, nejvíce se v tomto smyslu čeká od mise GOCE. Avšak pro stupně a řády větší než 360 je přínos minimální či nulový. Rozlišení odpovídající řádu 360 je 55 km (polovina vlny). Nepravidelnosti s kratší vlnovou délkou nelze pomocí žádné z uvedených tíhových družicových misí zjistit. V oblasti oceánů lze pro další zvýšení rozlišení použít družicovou altimetrii, v oblasti kontinentů je nutné použít pozemních měření (tíhových, astrogeodetických či jiných).



Obr. 2.1 Kumulovaná chyba ve výškách geoidu pro družicové mise CHAMP, GRACE a GOCE (*Gruber 2000*)

Výhodou astrogeodetických měření je skutečnost, že získaná data (tížnicové odchylky) jsou prakticky nezávislá na lokálních souřadnicových, tíhových či výškových systémech. Při astrogeodetických observacích není nutné navazovat na starší geodetická či tíhová měření. Pro určení prostorové polohy astrogeodetických bodů lze použít vedle běžných diferenčních GNSS měření i GNSS metodu Precise Point Positioning (PPP), která je globálně dostupná a nevyžaduje referenční stanice. Svou přesností danému účelu bohatě dostačuje. Ani při použití běžné diferenční GNSS metody není kvalita získaných dat významně ovlivněna kvalitou geodetických základů daného území.

Obecně lze astrogeodetické tížnicové odchylky použít buď samostatně, například pro vytvoření lokálního modelu geoidu či kvazigeoidu, nebo spolu s daty z jiných metod pro kombinované řešení. Velký význam mohou mít v oblasti nezávislé kontroly tíhových modelů získaných jinými metodami. Uvedu několik příkladů.

Vzhledem k tomu, že pro výpočty modelů geoidu jsou využívána hlavně gravimetrická a družicová data, mohou astrogeodetická data sloužit pro kontrolu těchto modelů, stejně jako mohou být použita pro kombinovaná řešení. Astrogeodetické tížnicové odchylky zlepšují kvalitu určení geoidu hlavně v horských oblastech, protože zde gravimetrické řešení trpí poklesem přesnosti. Rovněž umožňují lépe modelovat jeho jemnou strukturu (*Hirt a Bürki 2006, str. 91*). Uplatňuje se také další výhoda astrogeodetických dat a to, že na rozdíl od gravimetrických dat nemusí být k dispozici data z okolí zpracovávané oblasti.

Kombinované řešení tvorby tíhového modelu s využitím astrogeodetických tížnicových odchylek bylo již několikrát použito. Zahrnutí astrogeodetických tížnicových odchylek bylo použito v Rakousku (*Kühtreiber 2003*), Švýcarsku (*Müller a kol. 2004 a Brockmann a kol. 2004*),

Portugalsku (informace o měření viz *Somieski 2008, str. 97 – 98*) či severní části Egejského moře (*Somieski 2008*).

Výhodou začlenění astrogeodetických tížnicových odchylek do kombinovaného řešení je možnost úpravy hustoty vstupních dat podle lokálních požadavků na přesnost modelu či podle lokální topografie. Je možné zvýšit hustotu astronomických měření tam, kde je požadována nejvyšší přesnost nebo tam, kde lze očekávat problémy gravimetrického řešení v důsledku členitého terénu. U gravimetrických řešení je úprava hustoty vstupních dat v důsledku obvyklého způsobu výpočtu rychlou Fourierovou transformací obtížná.

Astrogeodetické tížnicové odchylky byly použity pro ověření globálního tíhového modelu EGM2008 před jeho zveřejněním (*Pavlis a kol. 2008*), tíhových modelů NLGeo2004 a EGG97 na území Nizozemí v roce 2005 (*Hirt a Schreutelkamp 2006*). Probíhá též projekt na ověření výsledků tíhové družicové mise GOCE (*Voigt a kol. 2007*).

Tížnicové odchylky umožňují přesnou redukci pozemních geodetických měření (horizontální a vertikální úhly) na referenční elipsoid (*Featherstone a Rueger 2000*). Rovněž umožňují přepočítání převýšení určených geometrickou nivelací na převýšení elipsoidická, a to užitím metody známé jako astronomická nivelace (viz dále).

V oblasti geofyzikálního výzkumu je zajímavá možnost práce s úplným vektorem tíhového zrychlení. Ten lze získat kombinací astrogeodetických a gravimetrických měření. Stejně jako velikost tíže je i směr tíže ovlivněn rozmístěním hmot pod povrhem Země. Lze ho tedy použít pro hledání anomálií hustoty v zemské kůře. Příklady lze nalézt v (*Bürki 1988* nebo *Hirt a Seiber 2005*).

Astrogeodetické tížnicové odchylky lze využít i pro studium jemné struktury tíhového pole. Tato oblast je doposud málo prozkoumána. Výzkum lze realizovat například měření tížnicových odchylek na bodech vzájemně vzdálených jen několik desítek metrů. Předpokladem úspěšného použití je vysoká vnitřní přesnost a úspěšné potlačení systematických chyb (*Hirt a Seiber 2005*).

2.3 ASTRONOMICKÁ NIVELACE

Pojem astronomická nivelace zavedl Helmert (*Helmert 1880*). Teorie astronomické nivelace (či „astronomicko-geodetické“ nivelace) je relativně jednoduchá a je dobře popsána v odborné literatuře (např. *Torge 2001, Hofmann-Wellenhof a Moritz 2005*).

Použití astronomické nivelace pro určení průběhu plochy kvazigeoidu vychází ze vzorce pro rozdíl výškových anomálií (převýšení kvazigeoidu) mezi body *A* a *B* (např. *Hofmann-Wellenhof a Moritz 2005, str. 338* nebo *Torge 2001, str. 297*):

$$\Delta\zeta_{A,B} = \zeta_B - \zeta_A = -\int_A^B \bar{\varepsilon} ds - E_{A,B}^N, \quad (2.4)$$

kde ζ je výšková anomálie v daném bodě, $\bar{\varepsilon}$ povrchová tížnicová odchylka dle Moloděnského definice a ds je elementární přírůstek délky.

Pravá část vztahu (2.4) je tzv. normální výšková redukce (normal height reduction) $E_{A,B}^N$, což je tíhová korekce identická s korekcí z anomálie tíže zaváděnou u niveláčnických měření v systému normálních výšek dle Moloděnského (*Torge 2001, str. 251*):

$$E_{A,B}^N = \int_A^B \frac{g - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} dh + \frac{\bar{\gamma}_A - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} h_A - \frac{\bar{\gamma}_B - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} h_B. \quad (2.5)$$

Veličiny h_A a h_B jsou normální výšky, dh je elementární přírůstek normální výšky a γ_0^{45} je normální tíhové zrychlení na 45. rovnoběžce.

Co se týká přesnosti určení korekce, dle *Torge (2001, str. 250)* je možné normální výškovou redukci vypočítat s přesností 0,1 mm pokud dh nepřekračující 100 m a tíže je známa s přesností 10 μms^{-2} nebo lepší. Hodnoty tíže je v tomto případě možné určit interpolací z tíhových měření

s rozestupem 5 až 20 km v rovinatém terénu a 1 až 2 km v horském terénu. Taková data jsou často k dispozici z dřívějších gravimetrických mapování a tak není nutné provádět měření nová.

Povrchová tížnicová odchylka $\bar{\varepsilon}$ je úhel mezi skutečnou a normální tížnicí v bodě P na povrchu Země. Pro její výpočet můžeme použít vztah:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\xi} \cos \alpha + \bar{\eta} \sin \alpha, \quad (2.6)$$

kde $\bar{\xi}$ a $\bar{\eta}$ jsou meridiánová a příčná složka povrchové tížnicové odchylky a α je azimut vertikálního řezu procházejícího body A a B.

Složky $\bar{\xi}$ a $\bar{\eta}$ tížnicové odchylky lze vypočítat ze známých astronomických zeměpisných souřadnic φ a λ a elipsoidických zeměpisných souřadnic \bar{B} a \bar{L} . Vzorci

$$\bar{\xi} = \varphi - \bar{B} \quad \text{a} \quad (2.7)$$

$$\bar{\eta} = (\lambda - \bar{L}) \cos B \quad (2.8)$$

jsou obdobou vzorců (2.2) s tím rozdílem, že elipsoidické zeměpisné souřadnice bodu P na povrchu Země jsou opravené o vliv zakřivení normální tížnice mezi elipsoidem a povrchem Země (Hofmann-Wellenhof a Moritz 2005, str. 335):

$$\bar{B} = B + 0.17'' H_{[km]} \sin 2B, \quad (2.9)$$

$$\bar{L} = L, \quad (2.10)$$

$H_{[km]}$ je elipsoidická výška bodu P vyjádřená v km.

Astronomické souřadnice φ a λ jsou vztaženy ke skutečné tížnici procházející bodem P a určují se převážně astronomickými měřeními, souřadnice B a L jsou vztaženy k normále procházející bodem P a určují se nejčastěji observacemi s užitím GNSS.

Vzorec (2.4) umožňuje vypočítat rozdíl výškových anomálií mezi body A a B za předpokladu znalosti hodnot $\bar{\varepsilon}$ a Δg v každém bodě na spojnici bodů A a B. V případě čistě astrogeodetického řešení je však hodnota $\bar{\varepsilon}$ známa jen v koncových bodech A a B – v místech astronomických měření. Chybějící data mezi body A a B lze nahradit nějakým typem interpolace.

Klasické řešení vychází z předpokladu, že se tížnicová odchylka $\bar{\varepsilon}$ mezi body A a B mění lineárně. To vede ke vzorci

$$\Delta \zeta_{AB} = \zeta_B - \zeta_A = -\frac{\bar{\varepsilon}_A + \bar{\varepsilon}_B}{2} s_{AB} - E_{A,B}^N. \quad (2.11)$$

Jestliže se tížnicová odchylka nemění mezi body A a B lineárně vede použití tohoto vzorce k nepřesnému výsledku. Důvodem nelineární změny může být například nerovnoměrné rozložení hmot podél spojnice obou bodů. Vzniklou chybu budu dále v textu nazývat „chybou z linearizace úlohy“, či zkráceně „chybou z linearizace“. Chyba z linearizace se zvyšuje s rostoucí vzdáleností mezi body A a B a s rostoucí geoprostorovou variabilitou tížnicových odchylek v daném území. Obecně lze stanovit pravidlo, že čím členitější území s většími předpokládanými změnami tížnicových odchylek, tím menší by měla být volena vzdálenost mezi body A a B, aby chyba z linearizace zůstala malá.

Jiná řešení problému využívají dodatečná data pro interpolaci astrogeodetických tížnicových odchylek podél spojnice A – B. Jedna z metod využívá gravimetrických tížnicových odchylek vypočtených na základě gravimetrických a topografických dat z bezprostředního i širšího okolí řezu. Tuto metodu zavedl Moloděnský a je známa jako „astronomicko-gravimetrická nivelace“.

Alternativní metoda využívá pro interpolaci astrogeodetických tížnicových odchylek tížnicových odchylek topografických. Ty jsou počítány na základě topografických dat. Metoda byla vyvinuta v druhé polovině 20. století a je známa jako astronomicko-topografická nivelace. Obě uvedené metody mohou zvýšit přesnost výsledků, zvláště pokud se tížnicové odchylky v zájmovém území významně mění.

3 SOUČASNÝ STAV ASTRONOMICKÉHO URČOVÁNÍ POLOHY

3.1 PŘÍSTROJE S DIGITÁLNÍ REGISTRACÍ OBRAZU

Digitální metody záznamu obrazu vstoupily do oblasti astronomického určování polohy v době přesunu zájmu směrem k terénním měřením. Proto je většina konstrukcí zaměřena tímto směrem i když se najdou i výjimky (např. CCD zenitová tuba v Ondřejově).

Přístroje pro terénní měření musí být snadno transportovatelné a nezávislé na elektrické síti. Navíc bývají doplněny o servomotory a řídicí počítač, který s pomocí speciálního softwaru zajišťuje automatický chod observace. Přístroje tvoří spolu s dalším vybavením sofistikované měřicí systémy. V současnosti můžeme hovořit o nástupů mobilních měřicích systémů do astronomického určování polohy.

Vývoj nových mobilních systémů sleduje dvě hlavní větve. Jedna vychází z přenosných zenitových kamer, zatímco druhá navazuje na vývoj moderních elektronických teodolitů a totálních stanic. Z důvodu úspory místa se zde budu věnovat jen druhé skupině. Měřicí systém tohoto typu je totiž jedním z předmětů mé práce.

3.1.1 Teodolitové astronomické systémy

Problematika využití elektronických teodolitů (či jejich častější obdoby nazývané totální stanice) pro astronomické určení polohy začala být řešena na přelomu 20. století. První práce vycházely z použití vizuálního sledování hvězd. Toto řešení nevyžaduje žádné úpravy přístroje. Z velkého množství pokusů uveďme alespoň *Balodimos a kol. (2003)*, *Gerstbach (1999)* či *Ogrizovic (2007)*. Autor se tomuto tématu věnoval od roku 1998 v rámci své disertační práce *Machotka (2004)*.

Pokrok v této oblasti přineslo i použití elektronických teodolitů s motorizovaným otáčením. Ty nabízí důležitější zrychlení měření, neboť jsou schopny natočit se samočinně do směru další měřené hvězdy. Příkladem je teodolitový systém ICARUS (*Hirt a Bürki 2006*).

Dalším vývojovým stupněm teodolitových systémů je doplnění elektronického teodolitu o přídatnou CCD kameru, která snímá zorné pole přístroje. Takovýto přístroj se může stát základem plně automatizovaného systému pro astronomické určování polohy. Autorovi jsou známy jen dva měřicí systémy tohoto typu. Kromě MAAS-1 vlastní konstrukce (viz kap. 4) ještě systém DAEDALUS z ETH Zürich (*Bürki a Guillaume 2011*, obr. 3.1). DAEDALUS je další vývojový stupeň systému ICARUS zmíněného výše.



Obr. 3.1 Totální stanice Leica TCA 1800 se systém DAEDALUS (*Bürki a Guillaume 2011*)

4 VÝVOJ VLASTNÍHO SYSTÉMU PRO ASTRONOMICKÉ URČOVÁNÍ POLOHY

Při návrhu vlastního měřicího systému pro určování polohy jsem vycházel z těchto požadavků:

- vysoká mobilita a
- vysoká přesnost výsledků

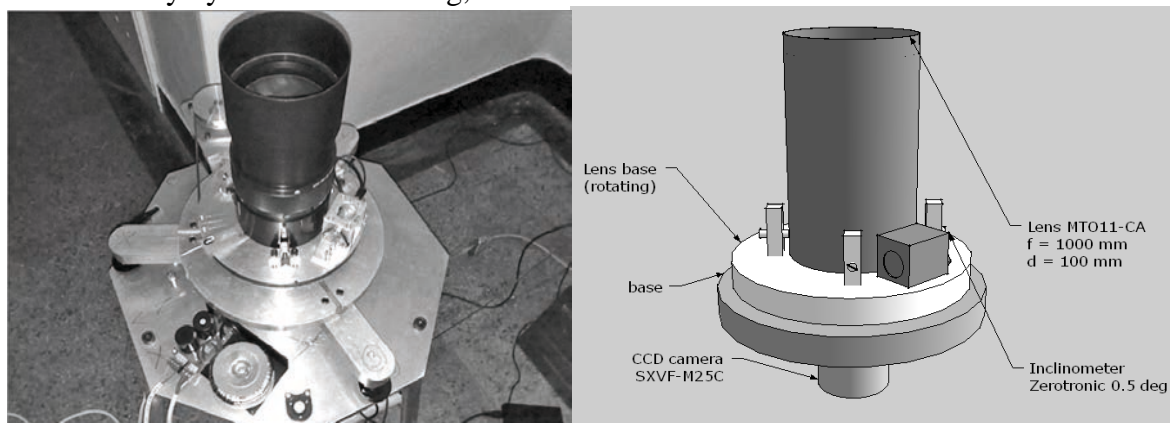
Mobilita měřicího systém je důležitá z hlediska jeho použitelnosti na libovolném místě v terénu, tedy všude tam, kde bude astronomické měření žádoucí. Tedy i mimo cestní síť a v horských oblastech. Tomu vyhovuje pouze systém přenosný, s hmotností nejtěžší části do 15 kg a s možností provozu na baterie.

Vysoká přesnost výsledků je pro navrhovaný systém zcela zásadní. Od počátku byl systém navrhován pro přesnost $m_{\xi} = m_{\eta} \leq 0,5''$, přičemž byla snaha dosáhnout přesnosti co nejvyšší.

Ač mi v době návrhu základní koncepce systému (v letech 1998 – 1999) digitální zenitové kamery ještě nebyly známy, lze jednoduše ověřit, že mnou stanoveným kritériím nevyhovují.

Jediné dvě mně známé funkční digitální zenitové kamery, TZK2-D a DIADEM (*Hirt a Bürki 2002* a *Hirt a kol. 2010*) přenosné nejsou. Je to zapříčiněno velkou aperturou a ohniskovou vzdáleností použité optické soustavy (objektivu) – 200 mm respektive 1020 mm. Otočné umístění takto rozměrné optické soustavy při zachování vysoké tuhosti konstrukce a odolnosti proti rozkmitání větrem neumožňuje dosáhnout přepravní hmotnosti nižší než 50 kg (autorův odhad na základě osobní prohlídky TZK2-D). Pro jejich použití je tedy nezbytný příhodný terén. Prakticky veškerá pozorování digitálními zenitovými kamerami se uskutečňují na místech přístupných vozidly.

Pokusy o zmenšení rozměrů optické soustavy narážejí na závažné technické problémy, které jsou dle autorova názoru za současného stavu techniky nepřekonatelné. Tomu nasvědčuje i neúspěch všech dosavadních konstrukcí přenosných zenitových kamer (např. *Gerstbach a Pichler 2003*, *Kudrys 2007, 2009*, obr. 4.1). Přenosná digitální zenitová kamera, tedy taková, jejíž hmotnost by byla menší než 15 kg, není v tuto chvíli na obzoru.



Obr. 4.1 Experimentální konstrukce digitální zenitové kamery s aperturou 100 mm (vlevo) a její schéma (vpravo) (*Kudrys 2009, Kudrys 2007*)

Vývoj autorova přenosného měřicího systému pro astronomické určování polohy probíhal ve dvou fázích. První fáze z let 1998 až 2004 je souhrnně popsána v *Machotka (2004)*. Počáteční impuls k vývoji tohoto systému vzešel od mého tehdejšího školitele v rámci doktorského studia prof. Ing. Jana Fixela, CSc.

Výsledkem řešení této fáze byl přenosný systém pro astronomické určování polohy, založený na bázi elektronické totální stanice Topcon GTS 6A. S jeho provozními parametry jsem však jako autor nebyl plně spokojen.

Od roku 2007 následovala druhá fáze vývoje měřicího systému. Z fáze první byla převzata některá klíčová řešení:

- metoda pozorování – tzv. Metoda párů stejné výšky (*Machotka 2005*) a navazující autorův software pro výběr vhodných párů pro dané místo a čas pozorování,
- celková koncepce – využití přesného elektronického teodolitu jako základu systému a
- metoda zpracování výsledků vyrovnáním MNČ.

Na druhou stranu zcela od základů byl změněn hardware měřicího systému a vytvořen ucelený řídicí software umožňující samočinný chod měřicího systému. Byl naprogramován interface pro dálkové řízení totální stanice, vizuální detekce hvězd byla nahrazena digitální registrací obrazu s časovým záznamem, pro navázání měření na světový čas byl použit přijímač GPS.

Vývoj systému včetně základního testování a ladění trval tři roky (2007 – 2009), další tři roky (2010 – 2012) pokračovalo testování s cílem určit skutečné provozní parametry systému, hlavně přesnost.

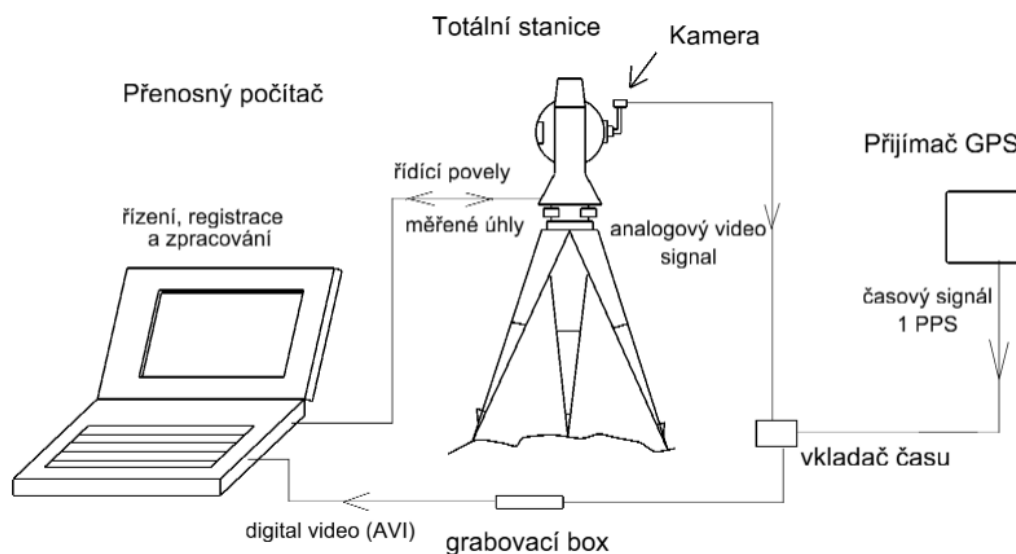
Nová verze měřicího systému je od počátku řešena jako snadno replikovatelná, složená z běžně dostupných komponentů, přičemž jednotlivé komponenty mohou být zaměněny za jiné s obdobnými parametry. To má pomoci budoucímu rozšíření měřicího systému do praxe. Při použití jiných základních komponentů (totální stanice, kamera, videovkladač) stačí upravit příslušné komunikační procedury (softwarový interface) hlavního řídicího programu. Není tedy nutné pořizovat identickou hardwarovou konfiguraci jako má testovaný (první) systém.

Měřicí systém byl pojmenován *Mobilní automatizovaný astronomický systém (MAAS)*, přičemž v současnosti existující jediný exemplář je označován jako MAAS-1.

4.1 POPIS HARDWAROVÉ KONFIGURACE MAAS-1

Měřicí systém MAAS se obecně skládá z těchto komponent (obr. 4.2):

- motorizovaný elektronický teodolit nebo totální stanice,
- CCD kamera,
- přijímač GPS,
- videovkladač,
- grabovací box,
- přenosný počítač a
- baterie.



Obr. 4.2 Schéma MAAS

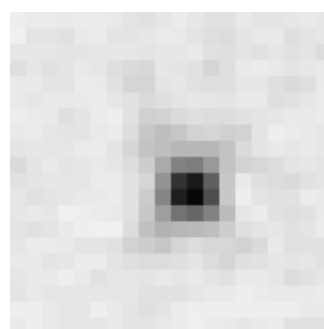
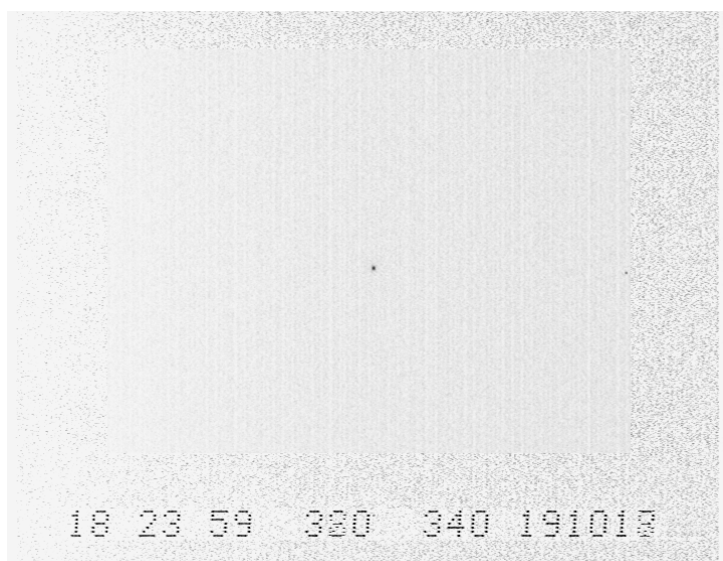
V současnosti existující jediná realizace MAAS označovaná jako MAAS-1 se skládá z totální stanice Topcon GPT 9001A (obr. 4.3), vysoce citlivé černobílé CCD kamery o rozlišení 720 x 576 pixelů, kódového GPS přijímače Garmin 18 LVC, videovkladače KIWI-OSD 2 a dalších komponentů. Videovkladač, neboli vkladač času do videosignálu (video time inserter), vkládá časové titulky do každého pulsímků pořízeného kamerou. Zařízení je vybaveno křemenným oscilátorem přičemž využívá přicházející časové značky 1 PPS z přijímače GPS pro svou synchronizaci na světový čas UTC. Počátek a konec expozice každého pulsímků lze určit z údajů na vloženém časovém titulku (obr. 4.5).



Obr. 4.3 Totální stanice Topcon GPT 9001A



Obr. 4.4 Upevnění kamery na MAAS-1



Obr. 4.5 Snímek hvězdy pořízený systémem MAAS-1 v inverzních barvách. Vlevo celý snímek, vpravo výřez okolí hvězdy (zvětšeno).

4.2 SOFTWAREOVÁ ČÁST MAAS-1

Softwarové vybavení systému lze rozdělit na tři skupiny programů:

- a) program pro plánování měření (SW „Příprava“),
- b) program na řízení měření, zpracování snímků a ukládání měřených dat (SW „MSV“) a
- c) balík programů na výpočet výsledných zeměpisných souřadnic (SW „Hrubé“, SW „Export“, SW „ZDP-5“ a SW „Vyrovnaní“).

Podrobný popis softwarových řešení MAAS není na tomto místě možný, proto odkazují na nezkrácenou verzi habilitační práce (Machotka 2013). Zde pouze nastíním rozsah problematiky řešené v softwaru MSV.

Software s názvem „MSV“ na řízení měření je velice komplexní program, který:

- zajišťuje obousměrnou komunikaci s obsluhou,
- zajišťuje obousměrnou komunikaci s totální stanicí (vysílá příkazy, přijímá data),
- přijímá, zobrazuje a vyhodnocuje snímky z videokamery,
- kontroluje správnou horizontaci totální stanice,
- v režimu měření samočinně řídí proces měření na základě předem vloženého pozorovacího programu
- kontroluje, vyhodnocuje a ukládá naměřená data jako zápisník v textovém formátu, může ukládat i vybranou část či všechny snímky,
- vyhotovuje protokol o měření.

Všechny uvedené procesy běží v reálném čase a jsou navázané na závaznou časovou osu měření. Program dále obsahuje procedury pro:

- synchronizaci vlastní časové základny se světovým časem,
- orientaci totální stanice k astronomickému severu pomocí záměry na Polárku a
- kalibraci CCD kamery.

Program naopak nezajišťuje přesné určování epoch snímků (tj. epoch měření). K tomu jsou využívány časové titulky na snímcích. Software tedy může běžet pod operačním systémem Windows, který nezaručuje synchronnost procesů. Drobná zpoždění v provedení jednotlivých úkonů (v řádu desetin sekundy) nejsou na závadu běhu programu ani přesnosti výsledků.

Kromě softwaru MSV bylo třeba vyřešit i další aspekty problematiky:

- provést optimalizaci původního autorova softwaru pro přípravu plánu pozorování (tzv. pozorovací program) s cílem zkrácení doby měření a
- upravit softwary pro zpracování naměřených dat – ty byly z velké části převzaty z původního autorova systému.

4.3 UŽÍVANÉ KATALOGY HVĚZD

Primárním hvězdným katalogem používaným pro přípravu a zpracování pozorování MAAS-1 je katalog FK5. Tento katalog je sice již mírně zastaralý, ale pro daný účel vyhovuje jak přesností poloh tak množstvím hvězd. Systém je od února 2010 upraven i pro použití modernějších katalogů, jmenovitě byly testovány FK6 a ARIHIP, avšak ani jeden se při běžných měřeních nepoužívá. Důvodem je menší počet hvězd s vhodnou magnitudou v daných katalozích. Více k tomuto tématu viz kap 3.2.4 habilitační práce.

5 SÍŤ AGNES

Měřicí systém MAAS-1 byl použit v několika vědeckých projektech, jejichž cílem bylo prokázat přínos tížnicových odchylek pro detailní zkoumání tíhového pole Země. Nejhlubší analýzu dat umožňovaly projekty sítí Veverí a AGNES. V obou sítích byla použita kombinace různých technik pro zkoumání tíhového pole s cílem umožnit jejich vzájemné porovnání. Z důvodu úspory místa se zde zaměřím jen na síť AGNES, která je plošně i množstvím zpracovávaných dat rozsáhlejší. Vybrané části dále popisované problematiky byly publikovány v několika článcích, mimo jiné *Machotka (2012)* a *Volařík a kol. (2013)*.

5.1 OBLAST A DATA

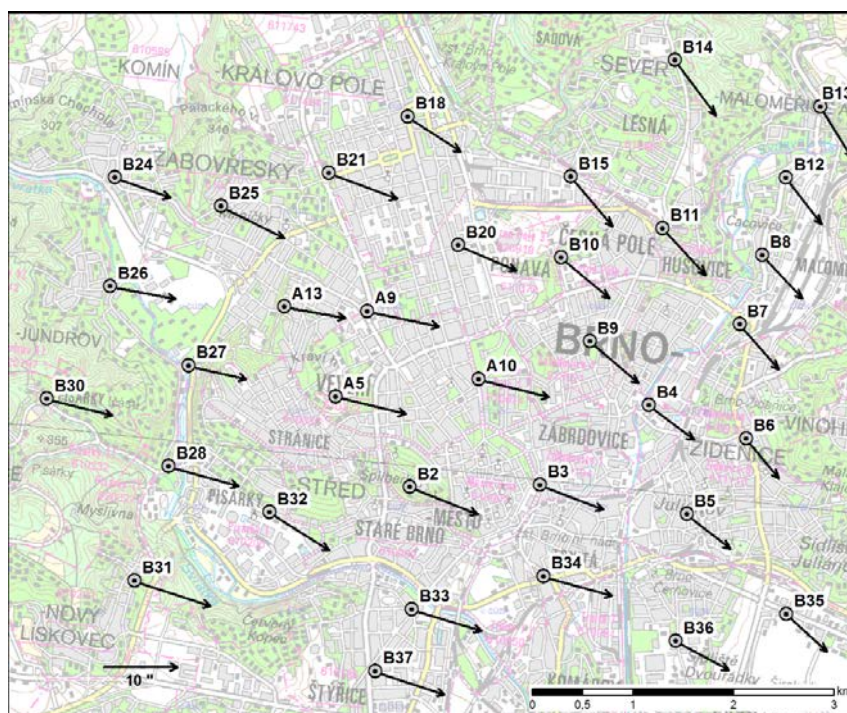
Síť označována jako AGNES (zkratka z Astronomicko – GNSS – nivelační experimentální síť) má celkové rozměry 5 x 7 km a pokrývá centrální část Brna. Účelem sítě bylo poskytnout prostor a data, na kterých by bylo možné porovnat tři metody tvorby modelu kvazigeoidu – astrogeodetickou, gravimetrickou a metodu GNSS/nivelace. V síti se podařilo shromáždit všechna data potřebná pro tento úkol.

Síť obsahuje 34 astrogeodetických bodů, na kterých se uskutečnily astronomické a GNSS observace, 22 bodů sítě je též připojeno geometrickou nivelací na body ČSNS či Plošné nivelační sítě Brno (PNS). Body sítě mají nadmořské výšky v rozmezí 200m až 318 m. Průměrná hustota astrogeodetických bodů v síti AGNES je cca 1 bod/km², průměrná vzdálenost mezi sousedními body přibližně 1300 m.



Obr. 5.1 Měření MAAS-1 v síti AGNES – bod B2 v areálu hradu Špilberk

Složky tížnicových odchylek určené na základě astronomických a GPS měření jsou znázorněny na obrázku 5.2 pomocí šipek. Je zde vidět výrazný východní trend. Průměrná velikost příčné složky tížnicové odchylky $\bar{\eta}$ je 8,0", maximální hodnoty dosahuje na bodě B31 (10,68"), průměrná hodnota meridiánové složky $\bar{\xi}$ je -2,2". Velké hodnoty příčných složek tížnicových odchylek jsou důsledkem regionálního trendu v tíhovém poli Země.



Obr. 5.2 Tízníkové odchylky v síti AGNES (podklad Základní mapa ČR 1:50 000)

Dalšími daty byla tíhová data z gravimetrického mapování v měřítku 1:25 000. Pro jejich zpracování byl připraven digitální model terénu (DMT) s rozlišením 1" x 1,5" (cca 30 x 30 m). Tento model byl vytvořen automatizovanou vektorizací map ZABAGED a pokrývá stejné území jako gravimetrická data, tedy vlastní síť AGNES a její okolí až do vzdálenosti 5" (cca 9 km) od krajních bodů sítě. Celkově se jednalo o plochu 23 x 25 km, čemuž odpovídalo přes 600 000 uzlových bodů. Postupem popsáním v kap. 8.1. habilitační práce bylo na základě dříve uvedených tíhových dat vypočteno povrchové tíhové zrychlení ve všech uzlových bodech DMT.

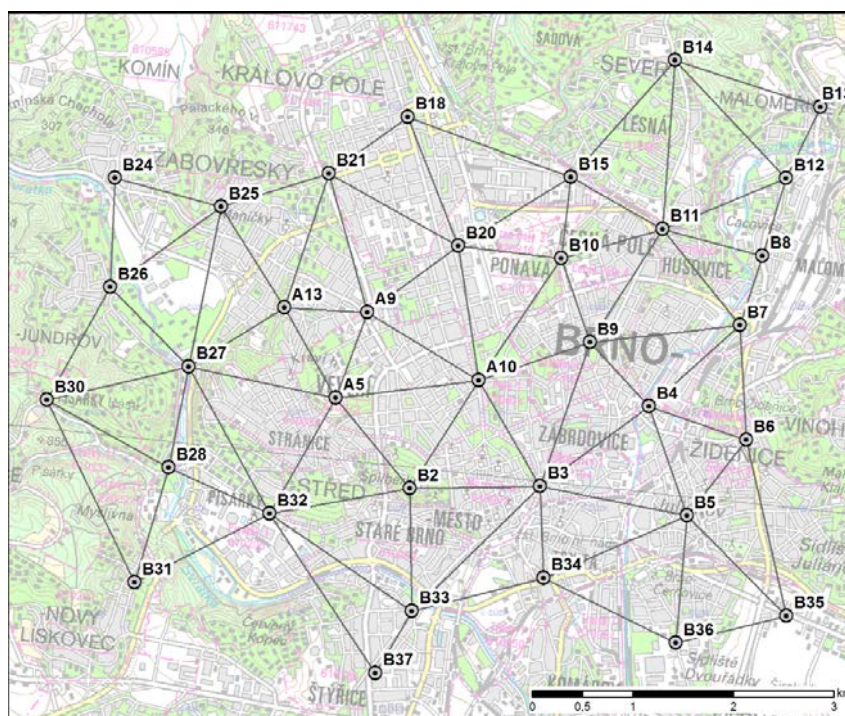
Tato data dále sloužila k výpočtu gravimetrických tízníkových odchylek a gravimetrického kvazigeoidu. Tyto výpočty provedl Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i., Zdiby, pracoviště Geodetická observatoř Pecný. Podrobnosti o výpočtu jsou obsahem technické zprávy *Kostelecký a kol. (2011)*.

Vypočtené gravimetrické tízníkové odchylky byly následně použity pro kontrolu astrogeodetických tízníkových odchylek. Výsledky srovnání jsou v tabulce 5.1 (sloupce 2 a 3). Směrodatné odchylky rozdílů složek tízníkových odchylek byly vyčísleny na 0,32" a 0,33" pro jednotlivé složky tízníkové odchylky. To jsou srovnatelné výsledky s výsledky získanými v síti Veveří a svědčí o vysoké kvalitě obou sad tízníkových odchylek.

5.2 MODEL KVAZIGEOIDU

V síti AGNES byly porovnávány tři různé metody vytváření modelu kvazigeoidu.

Primárním testovaným modelem byl model astrogeodetický. Ten byl vytvořen pod mým vedením v rámci diplomové práce Bc. Jurčíka (*Jurčík 2012*) metodou astronomické nivelace s následným podmínkovým vyrovnáním. Schéma rozčlenění plochy AGNES do trojúhelníků je znázorněno na obr. 5.3. Průměrná délka spojnice s_{AB} byla 1275 m, maximální délka 2016 m. Průměrná hodnota uzávěru v trojúhelníku byla 1,5 mm, maximální hodnota 6 mm.



Obr. 5.3 AGNES – rozčlenění sítě do trojúhelníků pro vyrovnání astrogeodetického modelu (podklad základní mapa ČR 1:50 000)

Po vyrovnání byl astrogeodetický model výškově umístěn tak, aby se maximálně přimykala výsledkům získaným metodou GNSS/nivelace (viz níže). Jednalo se však pouze o výškové posunutí, ne o náklon či deformaci modelu. Směrodatné odchylky výškových anomálií, tak jak byly určeny z vyrovnání, se pohybují v rozmezí od 0,00 mm (bod A10 zvolený jako výchozí/bezchybný) do 2,98 mm (bod B13 na severovýchodním okraji sítě). Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 2,0 mm.

Druhým modelem byl model gravimetrický. Byl zpracován kombinací regionálních tíhových a gravimetrických dat s globálním tíhovým modelem EGM2008. Postup byl obdobný jako při výpočtu gravimetrických tížnicových odchylek, jen místo numerické integrace Vening-Meineszových integrálů byla řešena numerická integrace Stokesova vzorce. Výpočet provedla Geodetická observatoř Pecný. Pro porovnání s ostatními modely byl, stejně jako model astrogeodetický, výškově posunut dle výsledků GNSS/nivelace.

Třetí model byl získán metodou GNSS/nivelace. Nejednalo se o model kvazigeoidu v pravém slova smyslu, šlo v podstatě jen o soubor 22 bodů s určenými elipsoidickými i nadmořskými výškami. Nadmořské výšky většiny bodů byly určeny přesnou nivelací z bodů ČSNS, u zbytku byla použita technická nivelace a body plošné nivelační sítě Brno.

5.3 ZHODNOCENÍ PŘESNOSTI TÍŽNICOVÝCH ODCHYLEK

Z porovnání měřených a vyrovnaných tížnicových odchylek s gravimetrickými odchylkami (tab. 5.1) vyplývá, že se směrodatná odchylka rozdílů vyrovnáním nesnížila. Tedy vyrovnání v tomto případě, na rozdíl od sítě Veverí, nepřispělo ke zpřesnění astrogeodetických tížnicových odchylek. Důvod lze spatřovat v nedostatečně přesném matematickém modelu výpočtu. Jestliže vzorec (2.11) vyhovoval pro zpracování sítě Veverí, kde byla vzdálenost sousedních bodů na úrovni 0,5 km, pro síť AGNES s téměř trojnásobnými vzdálenostmi již nevyhovuje. Tzv. chyba z linearizace úlohy zmiňovaná v kap 2.3, zde nabyla podstatných hodnot, což se promítlo do výsledků vyrovnání. Řešením by bylo zpřesnění interpolace tížnicových odchylek podél spojnic bodů, tj. nahrazení vzorce (2.11) sofistikovanějším vztahem.

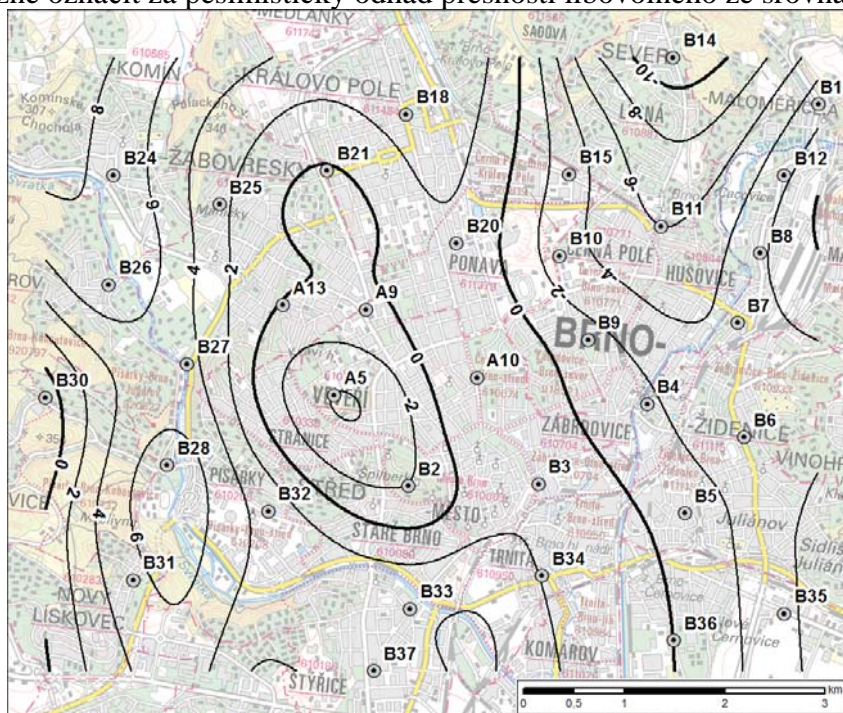
Tab. 5.1 Porovnání gravimetrických a astrogeodetických tížnicových odchylek v síti AGNES

	rozdíly gravimetrické - měřené		rozdíly gravimetrické - vyrovnané	
	ξ ["]	η ["]	ξ ["]	η ["]
střední hodnota	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06
směrodatná odchylka	0,32	0,33	0,27	0,35

5.4 ZHODNOCENÍ RELATIVNÍ PŘESNOSTI MODELŮ

Porovnání jednotlivých modelů bylo provedeno statistickým zpracováním diferencí výškových anomálií na společných bodech.

Analýza diferencí mezi astrogeodetickým a gravimetrickým modelem nenaznačuje žádný vzájemný trend (viz obr. 5.4), tzn. přítomnost systematického vlivu. Soulad modelů je na úrovni 4,0 mm, což je hodnota směrodatné odchylky vzájemných diferencí. Tato hodnota je zajímavá nejen z teoretického, ale i z praktického hlediska. V první řadě svědčí o vysoké kvalitě obou srovnávaných modelů, jejichž přesnost je tímto nezávisle ověřena. Uvedenou směrodatnou odchylku je možné označit za pesimistický odhad přesnosti libovolného ze srovnávaných modelů.



Obr. 5.4 Vzájemné diference mezi astrogeodetickým a gravimetrickým modelem [mm] (podklad základní mapa ČR 1:50 000)

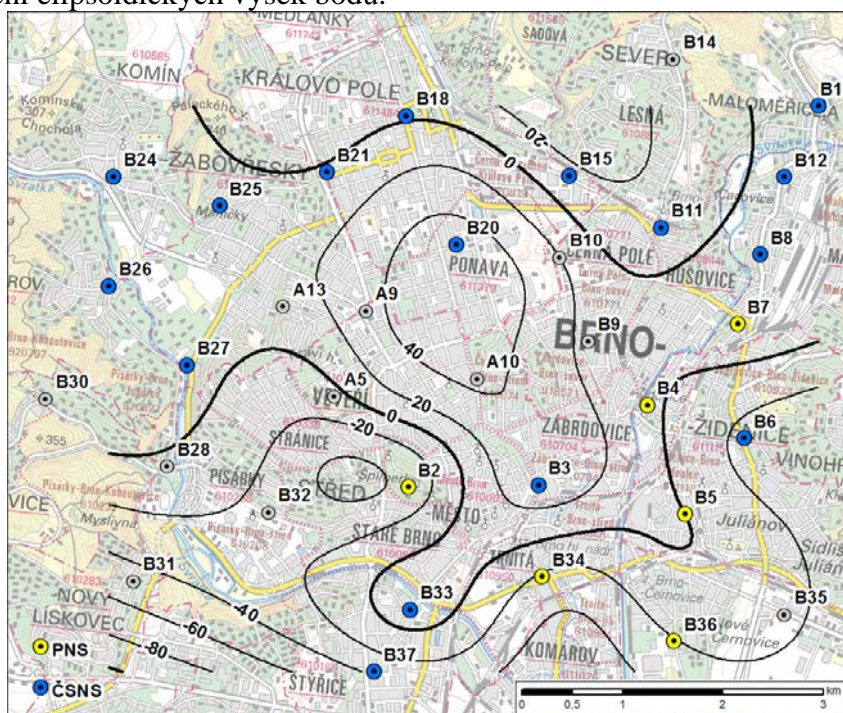
Z technického hlediska je zajímavé, že uvedená směrodatná odchylka je téměř o řád nižší než běžná přesnost určování elipsoidických výšek měřením GNSS. Použití modelu kvazigeoidu o této přesnosti umožňuje transformaci elipsoidických výšek na nadmořské bez významné ztráty přesnosti.

Směrodatná odchylka 4,0 mm koresponduje celkem dobře s průměrnou směrodatnou odchylkou z vyrovnání astrogeodetického modelu 2,0 mm (viz výše). Druhá z hodnot vyjadřuje vnitřní střední chybu, nepostihující systematické vlivy, zatímco hodnota první zohledňuje jak systematické vlivy, tak i náhodné a systematické chyby v modelu gravimetrickém. Pokud přijmeme směrodatné odchylky určené vyrovnáním za odhady skutečné přesnosti astrogeodetického modelu, můžeme vyčíslit relativní přesnost astrogeodetického kvazigeoidu. Vzájemná relativní přesnost dvou nejvzdálenějších bodů sítě B13 ($\sigma_{B13} = 2,98$ mm) a B31 ($\sigma_{B31} =$

2,95 mm) je dle zákona hromadění středních chyb 4,19 mm, jejich vzdálenost 8305 m. Z toho vychází relativní přesnost astrogeodetického modelu $4,19 \text{ mm}/8,305 \text{ km} \approx 0,5 \text{ mm}/1 \text{ km}$. Tento výsledek je stejný jako v případě sítě Veverí. Jedná se však o optimistický odhad. Pesimistický odhad vycházející ze shody s gravimetrickým modelem ($\sigma_{B13} = 4,0 \text{ mm}$, $\sigma_{B31} = 4,0 \text{ mm}$), dává při podobné úvaze relativní přesnost $5,66 \text{ mm}/8,305 \text{ km} \approx 0,7 \text{ mm}/1 \text{ km}$.

Shoda metody GNSS/nivelace s libovolným ze dvou dalších modelů (tj. astrogeodetickým a gravimetrickým) je kolem 20 mm. Tato hodnota vypovídá především o přesnosti metody GNSS/nivelace. Stejně jako v předchozím případě není možné z plošného rozložení diferencí (obr. 5.5) vypožorovat žádný vzájemný trend.

Ze statistického zpracování se dále jeví, že úroveň shody modelu GNSS/nivelace s některým z ostatních nezávisí na způsobu určení nadmořských výšek bodů (připojení na body ČSNS či PNS). I když pro výpočet směrodatné odchylky použijeme pouze body připojené přímo na body ČSNS, tzn. vynecháme body s méně kvalitním určením výšky, zůstane směrodatná odchylka diferencí stejná (20 mm). Primárním zdrojem chyb u této metody tedy jsou GNSS observace použité pro určení elipsoidických výšek bodů.



Obr. 5.5 Vzájemné diference mezi astrogeodetickým modelem a výsledky GNSS/nivelace [mm] (podklad základní mapa ČR 1:50 000)

5.5 ZÁVĚRY VYPLÝVAJÍCÍ ZE ZPRACOVÁNÍ LOKÁLNÍCH MODELŮ KVAZIGEIDU

- 1) Plošné rozmístění astrogeodetických bodů v kombinaci s vyrovnáním metodou nejmenších čtverců a vhodným matematickým modelem nabízí několik výhod:
 - a) Je možné určit přesnost vstupních tížnicových odchylek a porovnat ji s předpokládanou hodnotou.
 - b) Vyrovnání lze využít ke zvýšení přesnosti tížnicových odchylek a určení jejich charakteristik přesnosti.
 - c) Vyrovnání v trojúhelníkové síti účinně redukuje vliv náhodných chyb ve vstupních datech na výsledky. Jedná se jak o chyby ve složkách tížnicových odchylek, tak, do jisté míry, i o chybu z linearizace úlohy (tj. nepřesného matematického modelu). Chyby ve vstupních datech se projeví v hodnotách uzávěrů v síti (v uzávěrech trojúhelníků), ale díky vyrovnání

se nepřenesou plnou vahou do výsledků. Přínos vyrovnání je v lepším využití vstupních dat, kdy se pro zjišťování rozdílů anomálií dvou vzdálených bodů sítě využívají obě složky tížnicových odchylek všech bodů sítě, a to bez ohledu na umístění počítaných bodů v rámci sítě a azimutu jejich spojnice.

Jak bylo zmíněno výše, použitý matematický model nebyl pro síť AGNES z důvodu nízké hustoty bodů vhodný. Následkem toho nedošlo vyrovnáním ke zvýšení přesnosti tížnicových odchylek, jak předpokládá bod b) uvedený výše. Přesto jsou vyrovnané výškové anomálie v relativně dobré shodě s gravimetrickým modelem, v souladu s tvrzením v bodě c).

- 2) Možnost srovnání výsledků s podrobným gravimetrickým modelem je velice silný nástroj umožňujícím posoudit kvalitu astrogeodetického modelu. Kromě možnosti vyčíslit pesimistické odhady přesnosti vstupních tížnicových odchylek či přesnost výsledného astrogeodetického modelu, umožňuje také nezávislou kontrolu modelu. To má velký význam pro případné praktické použití přesných lokálních modelů kvazigeoidu. Technickou praxi ani tak nezajímají charakteristiky přesnosti jednotlivých bodů, jako spíše průkazná a nezávislá kontrola výsledku jako celku. Pokud dvě zcela rozdílné metody dají shodné či velice podobné výsledky, lze to po právu brát jako ověření správnosti výsledků.
- 3) Metoda GNSS/nivelace nedosahuje přesnosti astrogeodetické či gravimetrické metody. Jako jediná však dává přímo hodnoty výškové anomálie na měřených bodech. Metoda je vhodná či spíše přímo nezbytná pro výškové umístění modelů získaných předchozími metodami. Přes svou nižší přesnost se hodí i pro hrubou kontrolu takových modelů.
- 4) Pokud by jsme měli porovnat pracnost jednotlivých porovnávaných metod, nezbyvá než konstatovat, že pracné jsou všechny. Gravimetrická metoda z důvodu rozsáhlých, časově a finančně náročných gravimetrických měření (včetně navazující technické nivelace, dnes snad nahraditelné GNSS observacemi), GNSS/nivelace z důvodu dlouhých GNSS observací a nutnosti přesného výškového připojení na hodnověrné výškové značky. Astrogeodetická metoda je při použití MAAS-1 z uvedených nejrychlejší, ale tato výhoda je kompenzována velmi problematickým plánováním astronomických měření. Problematika počasí značně snižuje operativnost astrogeodetické metody. Z praktického hlediska vítězí ve střední Evropě gravimetrická metoda, a to z důvodu možnosti využití podrobných tížnicových dat z dříve uskutečněných gravimetrických mapování. Astrogeodetická metoda však může konkurovat v pobřežních nebo horských oblastech, kde tížvicová data dostupná nejsou nebo nemají dostatečnou hustotu či kvalitu.

6 PŘESNOST VÝSLEDKŮ MAAS-1

Jedním ze základních parametrů měřicího systému pro astronomické určování polohy je jeho přesnost. Tím je myšlena přesnost astronomicky určených zeměpisných souřadnic. Tato hodnota je důležitá pro jejich další zpracování, ať už samostatně, v rámci čistě astrogeodetického řešení, nebo v kombinaci s jinými typy dat (gravimetrická, GNSS/nivelace).

Z důvodu obtížnosti určení skutečné přesnosti astronomických měření se často udává jen přesnost vnitřní – přesnost zjištěná statistickým zpracováním naměřených dat – nebo se pojem „přesnost“ nahrazuje pojmem „opakovatelnost výsledků“. Tento pojem vyjadřuje vnější přesnost měření, ale při použití stejné technologie, přístroje a někdy i měřiče. Při použití jiné technologie, vybavení či měřiče se mohou výsledky významně lišit. Zjištění případného systematického odchýlení výsledků od správných výsledků je zahrnuto pod pojem určení vnější přesnosti měření. Obsahem této kapitoly bude jak určení opakovatelnosti výsledků měření MAAS-1, tak jeho porovnání s jinými přesnými metodami astronomického určení polohy.

6.1 VYHODNOCENÍ OPAKOVATELNOSTI VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

6.1.1 Staniční testování na terase Fakulty stavební VUT v Brně

Jako referenční bod pro dlouhodobé staniční testování systému MAAS-1 byl zvolen pilíř č. 1 na terase Fakulty stavební VUT v Brně. Na pilíři bylo v letech 2009 až 2011 uskutečněno 23 testovacích observací v průběhu 23 nocí. Testovací observace pokrývají všechna roční období. Jejich rozsah byl různý, minimální počet párů byl 3 šířkové a 4 délkové, maximální 23 šířkových a 31 délkových. Během uvedené doby docházelo k postupnému zdokonalování metodiky pozorování a měnila se i softwarová část systému. Tyto a další příčiny způsobily, že soubor výsledků není zcela homogenní. Přesto pokládám jeho statistické vyhodnocení za důležité, protože se jedná o soubor dat s největší časovou základnou. Lze na něm demonstrovat postupné zlepšování výsledků.

Při souhrnném zpracování **všech** observací byly určeny směrodatné odchylky 0,25" pro zeměpisnou šířku a 0,43" pro délku. Pokud se omezíme jen na **posledních sedm** observací dostaneme hodnoty 0,19" a 0,15". U těchto sedmi observací již bylo použito skládání snímků s početní kompenzací pohybu hvězdy tak, jak je popsáno v kap. 6.4 habilitační práce.

6.1.2 Opakovaná terénní měření

Při opakovaných terénních observacích jsou porovnávány výsledky dvou či více měření na jednom bodě. Jedná se o měření uskutečněna v různých observačních nocích. Ve všech následujících případech se jedná o tzv. „standardní observace“ v nominálním rozsahu 4 šířkové a 4 délkové páry. Reálná měření mohou mít v některých případech o jeden pár víc (např. využití volného času při čekání na chybějící 4. šířkový či délkový pár) či méně (nejčastěji z důvodu nepřízně počasí).

V rozpětí let 2009 až 2011 byly pořízeny tři soubory dat, ze kterých lze odhadnout přesnost (opakovatelnost výsledků) měření MAAS-1. Tyto soubory dat jsou analyzovány níže.

1) Opakovaná měření v sítích Veveří a AGNES

V rámci měření sítí Veveří (kapitola 8 habilitační práce), rozšíření sítě Veveří (*Kárník 2011*) a AGNES bylo v letech 2009 a 2010 opakovaně pomocí MAAS-1 zaměřeno 10 bodů. Každý z bodů byl měřen 2x s tím, že měření se uskutečnila v různých nocích, ve čtyřech případech dokonce v různých letech.

2) Testování na Geodetické observatoři Pecný

Systém MAAS-1 byl na podzim roku 2010 testován ve spolupráci s Výzkumným ústavem geodetickým, topografickým a kartografickým, v.v.i. (VÚGTK). Cílem testů bylo nezávislé posouzení přesnosti výsledků MAAS-1. Způsob testování byl navržen VÚGTK, konkrétně Ing. Jakubem Kosteckým, Ph.D. Pro vyhodnocení opakovatelnosti byla využita měření na 6 bodech v areálu a blízkém okolí Geodetické observatoře Pecný (GOPE). Měření se uskutečnila během 4 observačních nocí v měsících srpen a září roku 2010. Bylo uskutečněno 15 standardních observací na 6 bodech v okolí GOPE (tj. 9 nadbytečných měření).

3) Profil Velká Bíteš – Brno – Uherské Hradiště

Třetím souborem použitelným pro vyhodnocení opakovatelnosti výsledků MAAS-1 byl soubor kontrolních měření na 8 bodech profilu Velká Bíteš – Brno – Uherské Hradiště (profil VB-B-UH). Tento profil o délce přibližně 100 km sleduje nivelační pořady prvního řádu KO, KP a LP. V letech 1999 až 2001 byly jeho vybrané body zaměřeny metodou GNSS/nivelace, přičemž výsledky byly publikovány v *Kostecký a kol. (2002)*. V roce 2011, v rámci řešení projektu specifického výzkumu FAST-S-11-18 „Vývoj a aplikace automatizovaných měřících systémů v geodézii“ byla na jeho 30 vybraných bodech provedena astronomická měření polohy pomocí MAAS-1. Výsledky byly prezentovány na General Assembly of European Geosciences Union v roce 2012 (*Kostecký a kol. 2012*).



Obr. 6.1 Měření MAAS-1 na bodech C13 (vlevo) a C34 (vpravo). Profil Velká Bíteš – Brno – Uherské Hradiště. Vzhledem k umístění bodů podél silnic nebyly těsné průjezdy kamionů ve vysoké rychlosti (obrázek vlevo) žádnou výjimkou.

6.1.3 Zhodnocení opakovatelnosti výsledků

Pro spolehlivé vyčíslení „opakovatelnosti výsledků“ MAAS-1 je třeba vzít v úvahu všechna výše uvedená opakovaná měření. Souhrn jejich výsledků je uveden v tabulce 6.1. Směrodatné odchylky tížnicových odchylek byly vypočteny za předpokladu, že geodetické souřadnice použité pro jejich výpočet jsou „bezchybné“, tzn. jejich přesnost je výrazně vyšší než přesnost souřadnic astronomických. Pro výpočet směrodatné odchylky příčné složky tížnicové odchylky η byla směrodatná odchylka v zeměpisné délce vynásobena faktorem $\cos \varphi$, kde φ je zeměpisná šířka lokality.

Tab. 6.1 Souhrn výsledků testů opakovatelnosti výsledků

měřická kampaň	směr. odchylky souřadnic ["]		směr. odchylky složek tíž. odchylek (rozdílu) ["]	
	φ	λ	ξ	η
FAST (všechna měření)	0,25	0,43	0,25	0,28
FAST (posledních 7 měření)	0,19	0,15	0,19	0,13
AGNES	0,29	0,22	0,29	0,16
testovací měření na GOPE	0,26	0,32	0,26	0,24
profil VB-B-UH	0,21	0,17	0,21	0,13

Z tabulky 6.1 plynou tyto závěry:

- 1) Ve většině případů vychází směrodatná odchylka příčné složky tížnicové odchylky nižší než odpovídající hodnota meridiánové složky. Tyto výsledky však mohou být zavádějící, jelikož konfigurace měření zeměpisné délky je méně variabilní než konfigurace měření zem. šířky (např. menší variabilita v rychlosti změny zenitového úhlu s časem, užší azimutové sektory, atd.) a tedy se konstantní (systematické) vlivy v měřených zenitových úhlech či časech méně projevují v rozptylu výsledků. Za míru reálné přesnosti je třeba vzít horší z dvojice směrodatných odchylek pro meridiánovou a příčnou složku tížnicových odchylek.
- 2) Souhrnně lze konstatovat, že v období 2009 – 2011 se přesnost výsledků MAAS-1 postupně zvyšovala. Je to vidět jak na výsledcích staničního testování (směrodatné odchylky posledních 7 observací oproti směr. odchylkám všech observací), tak na terénních testováních (směrodatné odchylky třech postupně uskutečněných testů).

- 3) Reálná opakovatelnost výsledků MAAS-1 odpovídá směrodatné odchylce 0,20" – 0,30" pro obě složky tížnicových odchylek. Tato hodnota odpovídá terénním měřením při použití „standardních observací“.
- 4) Výsledky staničního testování jsou poněkud odlišné. Velká hodnota směr. odchylky příčné složky tížnicové odchylky (0,28") je dle mého názoru způsobena změnami v metodice měření a zpracování výsledků aplikovanými za dobu dlouhodobého testování. Optimistické směrodatné odchylky posledních 7 observací naopak odrážejí specifika staničního testování. Výsledky jsou lepší než u terénních testování mimo jiné z důvodu většího počtu párů v jedné observaci.

6.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MAAS-1 S VÝSLEDKY URČENÝMI JINÝMI PŘÍSTROJI

Pro určení vnější přesnosti měření je nutné uskutečnit měření na bodech o známých astronomických souřadnicích. Tyto souřadnice by měly mít pokud možno vyšší přesnost než je očekávaná přesnost testované metody měření.

6.2.1 Přehled srovnávacích měření

V rámci testování MAAS-1 bylo uskutečněno větší množství takových měření. Lze je rozdělit podle způsobu určení astronomických souřadnic referenčních bodů do čtyř skupin.

1) Srovnání s referenčními souřadnicemi CCD zenitové tuby v Ondřejově

Pro určení případného systematického odchýlení výsledků MAAS-1 byla použita CCD (dříve fotografická) zenitová tuba v Ondřejově. Pro zkrácené označení přístroje budu používat tradiční zkratku PZT. Jedná se o v současnosti nejpřesnější optický astrometrický přístroj na území ČR a jeden z nejpřesnějších na celém světě (popis a přesnost přístroje viz kap. 3.2.3 habilitační práce). Pro posouzení výsledků MAAS-1 byly využity referenční souřadnice přístroje určené v síti asi 40 přístrojů optické astrometrie. Tyto mi poskytl Ing. Cyril Ron z Astronomického ústavu AV ČR. Pro účely tohoto srovnání jsou považovány za „bezchybné“

2) Měření na bodě Mezinárodní časové služby na GOPE

Pro další porovnání výsledků MAAS-1 byl využit bod Mezinárodní časové služby (BIH) číslo 573. Tento bod se nachází v areálu Geodetické observatoře Pecný (v dalším textu bude zkráceně označován jako „referenční bod GOPE“). Jeho výchozí souřadnice byly určeny ze souborného zpracování astrometrických pozorování na bodě z let 1970 až 1983. Vzhledem k tomu, že souřadnice vznikly jako průměr z více než 200 pozorovacích řad cirkumzenitálu VÚGTK 100/1000, bylo možné tyto považovat pro daný účel za „bezchybné“.

Observace MAAS-1 na tomto bodě proběhly v rámci výše zmíněného testování MAAS-1 ve spolupráci s VÚGTK (viz kap. 6.1.2). Protože vlastní bod není vhodný pro měření MAAS-1 byla tato realizována v jeho těsné blízkosti a výsledky přepočteny na centrum (délky excentricit do 6 m).

3) Srovnání s body určenými cirkumzenitálem VÚGTK 50/500

Pro toto srovnávací měření byly využity body zaměřené tzv. „malým cirkumzenitálem“ VÚGTK 50/500. Jednalo se celkem o 7 bodů, čtyři v areálu či okolí GOPE a další tři v síti AGNES.

Referenční souřadnice bodů v blízkosti GOPE byly převzaty ze starších měření, body sítě AGNES byly zaměřeny Ing. Skoupým z VÚGTK v rozmezí září až listopad 2010. Deklarovaná přesnost výsledků cirkumzenitálu 50/500 je 0,3" – 0,5" z jedné pozorovací řady (rozsah cca 2 hodiny \approx cca 25 měřených hvězd). Referenční body byly zaměřeny vesměs ve 2 či 3 pozorovacích řadách. Z důvodu potlačení vlivu osobně přístrojových chyb na výsledky byly do

zpracování zahrnuty i souřadnicové opravy zjištěné navazovacím měřením na bodě Mezinárodní časové služby číslo 573 (ref. bod GOPE).

Přes změření většího počtu pozorovacích řad nelze v tomto případě referenční souřadnice považovat za bezchybné. Dle technické zprávy VÚGTK č. 1161/2010 (*Kostelecký jr. 2010*), lze směrodatné odchylky takto určených souřadnic odhadnout na 0,25".

4) Srovnání s výsledky TZK2-D

V rámci řešení projektu FAST-S-11-18 „Vývoj a aplikace automatizovaných měřících systémů v geodézii“ se uskutečnilo srovnávací měření na bodech zaměřených v současnosti nejpřesnějším mobilním přístrojem – digitální zenitovou kamerou TZK2-D (viz kap. 3.2.1). Měření se uskutečnilo po domluvě s provozovatelem tohoto přístroje Institut für Erdmessung, Universität Hannover (IfE) v srpnu 2011.

Dle původního plánu mělo být přeměřeno 6 vybraných bodů „profilu Benthe“ nedaleko Hannoveru (viz *Hirt a Reese 2004*) zaměřeného uvedeným přístrojem v roce 2004. Na každém z těchto 6 bodů byly plánovány až 3 standardní observace MAAS-1 (dle přízně počasí). Počasí však astronomickým měřením nepřálo, a tak se z původního plánu podařilo realizovat jen zlomek – po jednom měření na 3 bodech profilu. Navíc pak i jedno měření na referenčním bodě IfE v areálu university. Tento bod slouží pro kontrolní měření přístrojem TZK2-D a jeho souřadnice byly určeny z dlouhodobých opakovaných měření. Pro účely srovnání s MAAS-1 lze jeho souřadnice považovat za „bezchybné“.

Přesnost astronomických měření TZK2-D na bodech profilu je poněkud nižší. Dle *Hirt a Rees (2004)* byla určena analýzou vícenásobných měření na bodech profilu Benthe směrodatná odchylka jednoho měření. Ta je 0,08" pro meridiánovou (ζ) a 0,09" pro příčnou (η) složku tížnicové odchylky. Vnější přesnost byla na základě opakovaných měření na bodech v Hannoveru a Hamburku odhadnuta poněkud nižší, na úrovni 0,10" – 0,15". Pokud vyjdeme z pesimistické varianty 0,15", získáme přepočtem přesnost astronomických souřadnic (geodetické bereme jako bezchybné) – směrodatné odchylky 0,15" a 0,24" pro zeměpisnou šířku a délku.

Vybrané body profilu byly určeny dvěma (body 7 a 27) nebo čtyřmi (bod 14) nezávislými měřeními. V prvním případě vychází směrodatné odchylky zeměpisné šířky a délky na 0,11" respektive 0,17", v druhém na 0,08" respektive 0,12". Tyto hodnoty nejsou zcela zanedbatelné, obzvlášť v případě zeměpisných délek se blíží přesnosti standardního měření MAAS-1.

6.2.2 Shrnutí srovnávacích měření

Jednotlivá srovnávací měření popsaná v předchozích kapitolách se lišila počty observací, kvalitou referenčních bodů i způsobem jejich určení. Výsledky jejich statistického zpracování jsou souhrnně uvedeny v tabulce 6.2. „Průměrným posunem“ je myšlen aritmetický průměr rozdílů mezi výsledky MAAS-1 a referenčními souřadnicemi, „směrodatnou odchylkou posunu“ pak přesnost výše uvedené hodnoty. Tato hodnota byla vypočtena jako směrodatná odchylka aritmetického průměru souboru posunů. „Směrodatná odchylka jednoho měření“ je vypočtena z rozptylu jednotlivých měření a vyjadřuje vliv náhodných chyb. Všechny směrodatné odchylky jsou vypočteny bez uvážení chyb v referenčních souřadnicích.

Tab. 6.2 Souhrn srovnávacích měření MAAS-1 (barevně zvýrazněny statisticky prokázané posuny)

srovnávací měření	průměrné posuny ["]		směr. odchylky posunů ["]		směr. odchylky jednoho měření (rozdílů) ["]	
	φ	λ	φ	λ	φ	λ
PZT Ondřejov	0,36	-0,78	0,07	0,05	0,17	0,12
ref. bod GOPE	-0,06	-0,21	0,11	0,13	0,19	0,22
cirkumzenitál 50/500	0,10	0,32	0,11	0,14	0,39	0,49
TZK2-D	-0,11	-0,25	0,06	0,16	0,13	0,32

Z výsledků lze učinit několik dílčích závěrů:

- 1) Zjištěné systematické posuny výsledků mezi MAAS-1 a referenčními souřadnicemi se pohybují v rozmezí $-0,11''$ až $0,36''$ pro šířku a v rozmezí $-0,78''$ až $0,32''$ pro délku. Tyto hodnoty nejsou rozhodně zanedbatelné, pozitivem však je, že výsledky MAAS-1 leží uvnitř uvedených intervalů.
- 2) Porovnáním posunů s jejich směrodatnými odchylkami lze zjistit, že jen ve třech případech je zjištěný posun prokazatelný, tj. více než dvojnásobný v porovnání s jeho směrodatnou odchylkou. Jedná se o posun vzhledem k výsledkům PZT (obě souřadnice) a posun v zeměpisné délce vůči cirkumzenitálu 50/500 (v tabulce 6.2 označeno barevně).
- 3) Posun $+0,32''$ vůči cirkumzenitálu 50/500 je překvapivý, protože jeho výsledky byly korigovány navazovacím měřením na ref. bodě GOPE (viz výše), vůči kterému byl zjištěn neprokázaný **posun opačného znaménka** $-0,21''$. To svědčí o značném nesouladu mezi měřeními cirkumzenitálu 50/500 a MAAS-1. Tento se projevuje i ve velkých hodnotách směrodatných odchylek jednoho měření ($0,39''$ a $0,49''$). Tyto hodnoty jsou přibližně dvojnásobné v porovnání s výsledky ostatních srovnávacích měření. Zde se zřejmě projevují chyby v referenčních souřadnicích určených cirkumzenitálem, přičemž směrodatná odchylka referenčních zeměpisných délek je pravděpodobně větší než deklarovaných $0,25''$. Dle názoru autora jsou výsledky tohoto srovnávacího měření nepříznivě ovlivněny malou přesností referenčních souřadnic, a proto jeho výsledky nebudou v dalším brány do úvahy.
- 4) Zjištěné posuny výsledků (v šířce i délce) mezi PZT a MAAS-1 vysoce překračují příslušné směrodatné odchylky, a proto se zdají být věrohodně prokázány. Příčina je autorovi neznámá. Vzhledem k tomu, že u zbylých dvou srovnávacích měření (na ref. bodě GOPE a na bodech určených TZK2-D) nebyl podobný posun výsledků zaznamenán, soudí autor, že tento je spjat s použitými referenčními souřadnicemi PZT. Jelikož přesnost měření PZT je nezpochybnitelná, přichází v úvahu jen odlišný referenční rámec jeho souřadnic.
- 5) Srovnávací měření na referenčním bodě GOPE a na bodech určených TZK2-D dávají podobné výsledky co se týká zjištěných posunů i co se týká směrodatných odchylek jednotlivých měření. Větší hodnota směrodatné odchylky TZK2-D u zeměpisné délky není překvapivá. Odpovídá konečné přesnosti zeměpisných délek referenčních souřadnic určených TZK2-D – viz poznámka u daného testu.

Souhrn:

- Srovnávací měření na bodě Mezinárodní časové služby na GOPE a srovnávací měření na bodech určených digitální zenitovou kamerou TZK2-D ukazují, že **výsledky MAAS-1 nevykazují prokazatelný systematický posun**. Je však neprokázané podezření na systematický posun v zeměpisné délce o velikosti cca $-0,25''$ (hodnoty určené MAAS-1 jsou menší než referenční).
- Co se týká **vnější přesnosti**, tak pokud vypočteme střední kvadratickou odchylku jednoho měření, tak ta dosahuje **$0,18''$ pro zeměpisnou šířku a $0,36''$ pro zeměpisnou délku**. Převáděno na přesnost složek tížnicových odchylek se jedná o **$0,18''$ pro meridiánovou a $0,23''$ pro příčnou složku**. Uvedené hodnoty se však opírají jen o 7 observací MAAS-1 na 5 různých bodech. Přesnost referenčních souřadnic nebyla zohledněna (byly považovány za bezchybné). Při výpočtu uvedených středních chyb byl vzájemný posun výsledků považován za nulový a zjištěné rozdíly za pravé (skutečné) chyby.

6.3 POROVNÁNÍ S GRAVIMETRICKÝMI TÍŽNICOVÝMI ODCHYLKAMI

Další metodou použitelnou k určení vnější přesnosti výsledků MAAS-1 je porovnání tížnicových odchylek s gravimetricky určenými tížnicovými odchylkami na totožných bodech. Tato metoda nebyla v předdružicové geodézii použitelná, mimo jiné z důvodu rozdílných referenčních systému užívaných pro astronomické a gravimetrické tížnicové odchylky. Dnes díky GNSS observacím není problém určit geodetické souřadnice bodů v geocentrickém souřadnicovém systému, a tak určovat astronomické tížnicové odchylky jako tzv. „absolutní“.

Určení vnější (skutečné) přesnosti gravimetricky určených tížnicových odchylek je stejně problematické jako určení přesnosti tížnicových odchylek astronomických. Při použití kvalitních dat lze očekávat přesnost gravimetrických tížnicových odchylek na úrovni desetin úhlové vteřiny, tedy řádově stejnou jaké dosahují astronomické tížnicové odchylky.

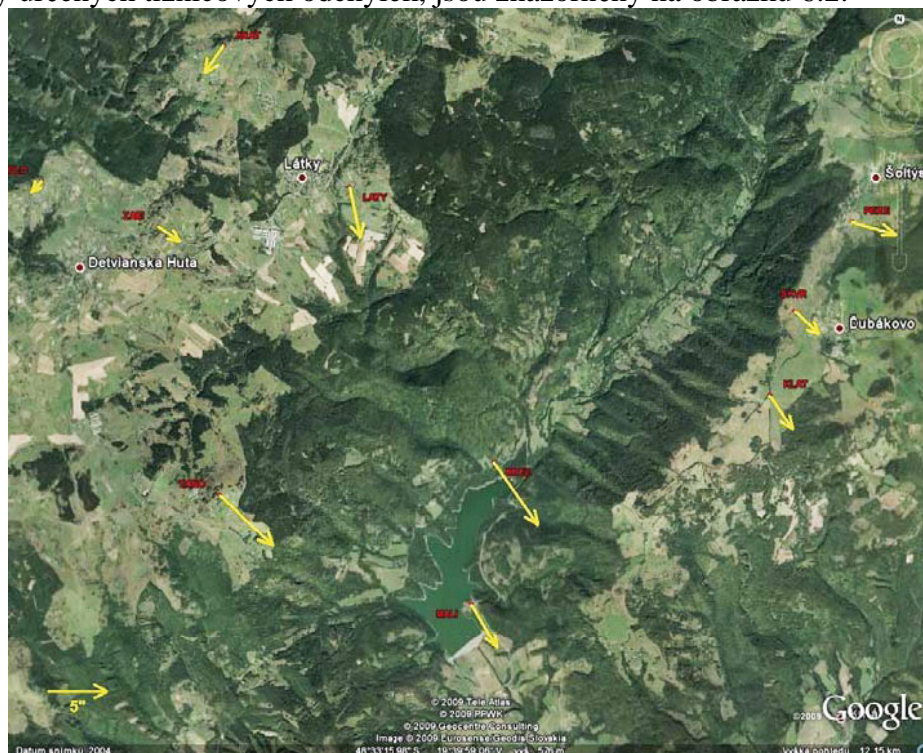
Z hlediska následujících testů je důležitá skutečnost, že astronomické a gravimetrické tížnicové odchylky vznikají na základě zcela rozdílných dat a výpočetních postupů. Statistickým vyhodnocením jejich rozdílů lze tedy určit vzájemný soulad obou typů tížnicových odchylek, a tedy jejich vnější přesnost. Nevýhodou pak je, že není možné odděleně vyčíslit chyby v jedné a druhé datech, tedy přesnost jednotlivých typů tížnicových odchylek.

Možnost srovnání tížnicových odchylek určených pomocí MAAS-1 s gravimetrickými se naskytla u výsledků tří měřických kampaní.

6.3.1 Přehled lokalit

1) Síť Sihla

Síť Sihla se nachází na Slovensku v oblasti plánované přečerpávací elektrárny na řece Ipel' a je etapově měřena (GNSS a tíhová měření) členy Katedry geodetických základov (KGZ) STU Bratislava. Síť se skládá z 9 bodů, které byly roku 2009 zaměřeny systémem MAAS-1. Určené tížnicové odchylky bylo možné porovnat s tížnicovými odchylkami odvozenými z modelu kvazigeoidu Slovenska GMSQ05 (Gravimetric Model of Slovak Quasigeoid 2005), které mi poskytl jeden z jeho autorů Ing. Juraj Papčo PhD. z KGZ STU Bratislava. Body sítě, včetně astronomicky určených tížnicových odchylek, jsou znázorněny na obrázku 6.2.



Obr. 6.2 Grafické znázornění astronomicky určených tížnicových odchylek v síti Sihla

2) Síť AGNES

Porovnání astronomických tížnicových odchylek s gravimetrickými bylo použito i v síti AGNES. Použitá data jsou popsána v kapitole 5, postup výpočtu gravimetrických tížnicových odchylek v kap. 8.1 habilitační práce.

3) Profil VB-B-UH

Posledním projektem, kde bylo možné porovnat výsledky MAAS-1 s gravimetrickými tížnicovými odchylkami, byl profil Velká Bíteš – Brno – Uherské Hradiště (viz kap. 6.1.2).

Výpočet gravimetrických tížnicových odchylek provedlo stejně jako v předchozích případech VÚGTK. Použitá gravimetrická a topografická data měla stejný původ a charakter jako data použitá pro výpočet gravimetrických tížnicových odchylek pro síť AGNES. Pouze rozsah zpracovávané oblasti byl větší – celková délka 116 km a šířka 26 – 33 km tak, aby data pokrývala oblast v okruhu 9300 m (5') kolem libovolného bodů profilu. Způsob výpočtu byl totožný se způsobem použitým u sítí Veveří a AGNES.

6.3.2 Shrnutí porovnání tížnicových odchylek

Výsledky získané MAAS-1 při měření na bodech s gravimetricky určenými tížnicovými odchylkami jsou shrnuty v tab. 6.3.

Tab. 6.3 Souhrn srovnání astronomických a gravimetrických tížnicových odchylek

měřická kampaň	průměrné posuny ["]		směr. odchylky posunů ["]		směr. odchylky jednotlivých rozdílů ["]	
	ξ	η	ξ	η	ξ	η
Sihla	0,09	0,22	0,12	0,13	0,37	0,42
AGNES	0,06	0,06	0,06	0,06	0,32	0,33
profil VB-B-UH	-0,07	0,08	0,05	0,04	0,27	0,22

Směrodatné odchylky rozdílů tížnicových odchylek v jednotlivých měřických kampaních se pohybují v rozmezí 0,27" až 0,37" pro meridiánové složky a 0,22" až 0,42" pro příčné složky tížnicových odchylek. Tyto výsledky lze interpretovat jako pesimistické odhady skutečné (vnější) přesnosti obou typů tížnicových odchylek. Jinými slovy, jak astronomické, tak gravimetrické tížnicové odchylky mají přesnost stejnou nebo lepší než uvedené hodnoty. Poněkud větší hodnoty směrodatných odchylek u sítě SIHLA mohou být způsobeny starším datem astronomických měření uskutečněných v době, kdy vývoj software MAAS-1 ještě nebyl zcela dokončen a výsledky byly obecně horší (viz závěry z opakovaných měření uvedené v kap. 6.1.3). Jistý vliv může mít i nižší rozlišení „celo-slovenského“ modelu GMSQ05 ve srovnání s detailními modely kvazigeoidu vytvořenými speciálně pro síť AGNES a profil VB-B-UH. Detailní informace o výpočtu tížnicových odchylek z modelu GMSQ05 nemá autor k dispozici. V každém případě jsou uvedené výsledky velice dobré a splňují autorem dříve stanovený cíl měřit astronomické tížnicové odchylky s přesností lepší než 0,5" (viz úvod kap. 4).

Posuny výsledků MAAS-1 vůči gravimetricky určeným tížnicovým odchylkám jsou v rozmezí -0,07" až 0,09" pro meridiánovou složku a 0,06" až 0,22" pro příčnou složku tížnicové odchylky. Velikost žádného z těchto posunů však nepřekračuje dvojnásobek příslušné směrodatné odchylky a proto je nelze považovat za prokázané. Faktem však je, že všechny hodnoty posunů v příčné složce tížnicové odchylky jsou kladné.

Souhrn:

Pokud vypočteme střední kvadratickou odchylku rozdílu složek tížnicových odchylek ze spojeného soboru složeného z měření na bodech sítě AGNES a na bodech profilu VB-B-UH (celkem 64 bodů) dostaneme **0,30" pro meridiánovou a 0,29" pro příčnou složku tížnicové odchylky**. Tyto hodnoty jsou pesimistickým odhadem vnější přesnosti MAAS-1 po úpravách softwaru v první polovině roku 2010. Pesimistickým proto, že neuvažují chyby v gravimetrických

tížnicových odchylkách. Při výpočtu uvedených středních kvadratických odchylek byl vzájemný posun výsledků považován za nulový a zjištěné rozdíly za pravé (skutečné) chyby.

6.4 SHRUTÍ TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI VÝSLEDKŮ MAAS-1

Byly uskutečněny tři typy testů – opakovaná měření na testovacích bodech, měření na referenčních bodech s kvalitně určenými souřadnicemi a měření na bodech se známými gravimetrickými odchylkami. První typ testů slouží k určení opakovatelnosti výsledků MAAS-1, další dva typy lze využít k určení systematických posunů výsledků vůči referenčním technikám a k určení vnější (skutečné) přesnosti výsledků.

Hlavní závěry testování přesnosti jsou:

- 1) **Opakovatelnost výsledků MAAS-1 je na úrovni 0,2" až 0,3" pro obě složky tížnicové odchylky.** Směrodatná odchylka příčné složky vychází typicky menší než meridiánové složky.
- 2) Posun výsledků MAAS-1 byl prokázán jen vůči referenčním souřadnicím PZT Ondřejov. V ostatních případech prokázán nebyl. Podezření na systematický posun výsledků v zeměpisné délce o velikosti cca $-0,25''$ se při testech zaměřených na porovnávání s gravimetricky určenými tížnicovými odchylkami nepotvrdilo. Zjištěné posuny u příčné složky tížnicové odchylky měly opačné znaménko a velikost v rozmezí $0,06''$ až $0,22''$. **Dle stávajících testů nelze usuzovat na systematický posun výsledků MAAS-1 vůči použitým referenčním technikám (s výjimkou PZT Ondřejov).**
- 3) Vnější přesnost výsledků MAAS-1 zjištěná srovnávacími měřeními je cca $0,2''$ pro meridiánovou a $0,25''$ pro příčnou složku tížnicové odchylky. **Porovnáním výsledků MAAS-1 s gravimetrickými tížnicovými odchylkami vyplynulo, že vzájemná shoda výsledků je na úrovni $0,3''$ v obou jejich složkách.**

Na základě všech provedených testů lze tvrdit, že vnější přesnost složek tížnicových odchylek určených MAAS-1 je někde v intervalu $0,2'' - 0,3''$ (rozmezí mezi optimistickým a pesimistickým odhadem).

7 ZÁVĚR

Astronomické určování polohy prožívá v posledním desetiletí jistou renezanci a to hlavně v souvislosti se zkoumáním tíhového pole Země. Astronomicky určené tížnicové odchylky nacházejí uplatnění jak při testování globálních tíhových modelů Země, tak při vytváření lokálních tíhových modelů o vysokém rozlišení a vysoké přesnosti.

Terénní určování astronomických tížnicových odchylek je specifická oblast geodetické astronomie, která vyžaduje speciální přístrojové vybavení. Autor po zkušenostech s vlastním poloautomatickým teodolitovým systémem navrhl, sestrojil a otestoval systém automatický, pojmenovaný MAAS-1, přičemž tento systém je od počátku navrhován pro terénní určování tížnicových odchylek. Systém byl vyvinut v letech 2007 až 2009, načež následovalo jeho důkladné testování a aplikace na třech pilotních projektech – sítích Veveří, AGNES a profilu Velká Bíteš – Brno – Uherské Hradiště.

V této práci autor shrnuje všechny hlavní poznatky z vývoje a testování výše uvedeného automatizovaného měřicího systému v období 2007 až 2012. Dále též zkušenosti s využitím výsledků astrogeodetických tížnicových odchylek.

Závěry práce lze rozdělit do dvou skupin. V první jsou zjištění týkající se využití astrogeodetických tížnicových odchylek, v druhé zjištění týkající se samotného měřicího systému MAAS-1.

Využití astrogeodetických tížnicových odchylek

V kapitole 5 bylo ukázáno využití tížnicových odchylek pro tvorbu lokálního modelu kvazigeoidu. Výsledkem tohoto a dalších pilotních projektů popsaných v plném textu habilitační práce byly lokální relativní kvazigeoidy vykazující vysokou shodu s gravimetrickými kvazigeoidy vytvořenými z nezávislých dat. To ukazuje, že astrogeodetické tížnicové odchylky lze použít pro vytváření velice kvalitních modelů kvazigeoidu s vysokou přesností a podrobností. Těchto výsledků je možné dosáhnout i při použití relativně primitivní metody zpracování tížnicových odchylek, tedy metody astronomické nivelace. Použití metod matematicky vyspělejších, hlavně kolokace, autor se svými spolupracovníky v současnosti testuje.

Základem dobrých výsledků zmíněných výše je vysoká hustota tížnicových odchylek v zájmové oblasti a jejich dostatečná přesnost. Dalším faktorem, který měl na výsledky příznivý vliv, bylo plošné rozmístění astrogeodetických bodů, jež umožnilo zpřesnit výsledky vyrovnáním MNČ. Vyrovnání je možné využít pouze při plošném rozmístění bodů. Často používané liniové rozmístění bodů v astrogeodetických profilech použití vyrovnání neumožňuje.

„Astrogeodetická metoda“, použitá autorem v této práci, je obzvláště vhodná pro území s nedostatkem či nízkou kvalitou existujících tížnicových dat, pro oblasti horské či hraniční. Ve všech těchto případech bude astrogeodetická metoda nejen spolehlivější, ale pravděpodobně i ekonomičtější než metoda gravimetrická, vyžadující gravimetrické mapování nejen dané lokality, ale i jejího širšího okolí (běžně vyžadovaný přesah gravimetrických dat je alespoň $5' \approx 9$ km na všechny strany).

Kromě přímé tvorby modelů kvazigeoidu lze astrogeodetické tížnicové odchylky s úspěchem používat pro vytváření modelů kombinovaných či pro kontrolu modelů jiných (gravimetrických, družicových, GNSS/nivelace,...).

V neposlední řadě je nutno připomenout, že tížnicové odchylky nemají vliv jen na výšková měření, ale i na měření úhlová a délková. V případě vytváření přesných lokálních sítí v nepříznivých podmínkách s velkými změnami tížnicových odchylek a velkými převýšeními (typicky v horách) není často možné zanedbávat vliv tížnicových odchylek na měřené směry, úhly, délky či azimuty. V těchto případech mohou být astrogeodetická měření tížnicových odchylek na vybraných bodech sítí jednoduchým a spolehlivým řešením problému.

Závěry týkající se MAAS-1

- 1) MAAS-1 je použitelný pro terénní určování tížnicových odchylek. Vyhovuje jak produktivitou měření (až 6 stanovisek za observační noc), tak přesností (běžně dosahovaná přesnost $0,2'' - 0,3''$ pro složky tížnicových odchylek).
- 2) Systém je provozně spolehlivý a téměř bezporuchový – z více než 110 dosud uskutečněných terénních observací ani jedna nebyla postižena technickou závadou, která by observaci znemožnila či znehodnotila její výsledky. Ke ztrátě či poškození dat nedošlo nikdy ani chybou obsluhy – software pro řízení měření je navržen tak, aby se data ukládala průběžně, a to bez nutnosti zásahu obsluhy.
- 3) Obsluha systému při observaci je víceméně rutinní záležitostí. Zácvik obsluhy (např. studenta vyššího ročníku geodézie) trvá 2 – 3 hodiny. Po tomto zácviku je schopen samostatně provádět observace. K tomuto stavu z velké části přispívá software pro řízení měření, který je navržen s ohledem na jednoduchost obsluhy a specifika nočního terénního měření.
- 4) Pokud bychom porovnali MAAS-1 s cirkumzenitálem VÚGTK 50/500, což je přístroj s obdobným určením, tak hlavní zjištění jsou tato:
 - Přesnost jedné cca 45 minutové observace MAAS-1 ($0,2'' - 0,3''$, viz kap. 6.4) je srovnatelná s přesností jedné pozorovací řady cirkumzenitálu trvající 1,5 – 2 h, tj. $0,2''$

- 0,3" (Skoupý 1986, 1989). V případě MAAS-1 se však jedná o průměr ze čtyř nezávislých určení každé složky tížnicové odchylky, tedy výsledek je ověřený.
 - MAAS-1, na rozdíl od cirkumzenitálu, nevyžaduje k dosažení uvedené přesnosti navazovací měření na bodě o známých astronomických souřadnicích ani zkušeného observátora.
 - MAAS-1 lze během několika minut sbalit, přepravit pěšky či autem na další bod a tam opět zprovoznit. Cirkumzenitál je tak náročný na přípravu na stanovisku, že se v průběhu observační noci zpravidla nepřemísťuje.
 - Pro obsluhu MAAS-1 stačí krátké zaškolení obsluhy. Obsluha cirkumzenitálu vyžaduje nejen důkladné zaškolení, ale hlavně cvik a praxi. Oboje totiž ovlivňuje významně kvalitu výsledků. Navíc výsledky získané různými observátory nelze bez navazovacího měření společně zpracovávat.
- 5) Ze srovnání MAAS-1 se špičkovými digitálními zenitovými kamerovými systémy TZK2-D a DIADEM vyplývá, že přesností výsledků ani produktivitou měření nemůže současný MAAS-1 uvedeným systémům přímo konkurovat. Má oproti nim však několik výhod, které tento nedostatek částečně kompenzují:
- Výrazně vyšší mobilita daná nízkou přepravní hmotností. MAAS-1 lze v terénu dopravit prakticky kamkoliv.
 - Nejedná se o drahé a výrobně extrémně náročné jednoúčelové zařízení, ale o dočasnou adaptaci běžného geodetického přístroje. V případě potřeby není problém sestavit v krátké době další exempláře MAAS (MAAS-2, MAAS-3,... MAAS-X).

Další vývoj teodolitových systémů pro astronomické určování polohy by se měl ubírat hlavně směrem ke zvyšování přesnosti a produktivity měření. Obzvláště v oblasti přesnosti je autor poměrně optimistický. Neexistuje zřejmý důvod, proč by přesnost dosahovaná nyní systémem MAAS-1 měla být limitní. Zvýšení přesnosti lze dosáhnout např. užitím teodolitu/totální stanice s větší přesností měření úhlů, použitím tužšího upevnění kamery či přesnějšího katalogu hvězd. Ve všech těchto směrech má stávající MAAS-1 rezervy.

8 POUŽITÉ ZDROJE

Balodimos, D. D., Korakitis, R., Lambrou E. and Pantazis G., 2003. Fast and accurate determination of astronomical coordinates Φ , Λ and azimuth, using a total station and GPS receiver, Survey Review, Vol 37, No290, pp. 269 –275

Brockmann, E., Becker, M., Bürki, B., Gurtner, W., Haefele, P., Hirt, C., Marti, U., Müller, A., Richard, P., Schlatter, A., Schneider, D., and Wiget, A. 2004. Realization of a Swiss Combined Geodetic Network (CHCGN). EUREF'04 Symposium of the IAG Commission 1 - Reference Frames, Subcommission 1-3a Europe (EUREF), Bratislava, Slovakia.

Bürki B., 1988. Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea-Zone und deren geophysikalische Interpretation. PhD Thesis ETH Nr. 8621, ETH Zurich, Switzerland.

Bürki, B., Guillaume, S., 2011. Astro-geodetic measurements of deflections of the vertical by means of the low-cost clip-on CCD system DAEDALUS for total stations. Presentace z Generálního shromáždění IUGG v Melbourne.

Featherstone, W. E., Rüeger, J. M., 2000. The Importance of Using Deviations of the Vertical for the Reduction of Survey Data to a Geocentric Datum. The Australien Surveyor Vol. 45 No. 2: 46-61.

Gerstbach, G. 1999: CCD und Astro-Geodäsie. Unterwegs zur automatischen Lotrichtungsmessung. Geowiss. Mitt. 50: 45-58.

Gerstbach, G.; Pichler, H., 2003. A small CCD zenith camera (ZC-G1) - developed for rapid geoid monitoring in difficult projects, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade (ISSN 0373-

3742), No. 75, p. 221 – 228. In: Proceedings of the XIII National Conference of Yugoslav Astronomers, Belgrade, October 2002, s. 17-20.

(dostupné z <http://www.aob.bg.ac.yu/paob/75/pdf/221-228.pdf>)

Gruber, T., Reigber, C., Schwintzer, P., 2000. The 1999 pre-CHAMP high resolution gravity model. In: Schwarz (ed.) 2000, pp 89-95.

Helmert F.R., 1880. Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie, Part 1. Teubner, Leipzig, Germany.

Hirt, C., Bürki, B., 2002. The Digital Zenith Camera - A New High-Precision and Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Deflections of the Vertical. Proceed. of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki (ed. I. Tziavos): 161-166.

Hirt C., Bürki, B., 2006. Status of geodetic astronomy at the beginning of the 21st century, In: Festschrift Univ.- Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Günter Seeber anlässlich seines 65. Geburtstages und der Verabschiedung in den Ruhestand, (Hirt C., Ed.), Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover Nr. 258, 81–99pp.

(dostupné z <http://ebookbrowse.com/status-of-geodetic-astronomy-at-the-beginning-of-the-21st-century-pdf-d56638652>)

Hirt, C., Burki, B., Somieski, A., Seeber, G., 2010. Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras, Journal of Surveying Engineering 136(1): 1-12.

(dostupné z [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000009](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000009))

Hirt, C., Reese, B. 2004. High-Precision Astrogeodetic Determination of a Local Geoid Profile Using the Digital Zenith Camera System TZK2-D, Electronic Proc. IAG GGSM2004 Symposium Porto, Portugal. (dostupné z http://www.ife.uni-hannover.de/download-allgemein/hirt_astronomical_levelling.pdf).

Hirt, C., Seeber, G., 2005. High-Resolution Local Gravity Field Determination at the Sub-Millimeter Level using a Digital Zenith Camera System. Proceedings IAG Meeting "Dynamic Planet", Cairns (dostupné z http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-49350-1_47)

Hirt, C. and Schreutelkamp, F., 2006. High-Precision Observation of Vertical Deflections at Utrecht, Amersfoort and Zwolle using the Digital Zenith Camera System TZK2-D. Report, Institut für Erdmessung, Universität Hannover. To be published in: Geodesia.

Hofmann-Wellenhof B., Moritz H., 2005. Physical Geodesy, SpriengerWienNewYork, Wien.

Jurčík, J., 2012. Užití astronomické nivelace pro vytváření modelů kvazigeoidu. Diplomová práce. VUT v Brně, FAST, Brno.

Kárník, J., 2011. Analýza různých metod určování tížnicových odchylek a vytváření modelů kvazigeoidu, Diplomová práce VUT v Brně, FAST, Brno.

Kostecký, J., Kostecký, J. jr., Pešek, I., Šimek, J., Švábenský, O., Weigel, J. and Zeman, A.: 2002, Quasigeoids for the territory of the Czech Republic and their testing. Proceedings of the EGS G10 symposium Geodetic and Geodynamic Programmes of the Central European Initiative, Nice, Reports on Geodesy No 1 (61), 47-52, WUT, Warsaw.

Kostecký, J., Machotka, R., Šimek, J., 2012. Combination of heterogenous geodetic data in detailed gravity field modelling. EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria. p. 1 - 1.

Kostecký, J., Novák, P., Šimek, J., 2011. *Výpočet gravimetrických tížnicových odchylek a výšek kvazigeoidu na bodech sítě AGNES*, Technická zpráva. VÚGTK, v.v.i., Zdíby.

Kostecký, J., jr., 2010. *Ověřování přesnosti měření Mobilního automatizovaného astronomického systému MAAS-1*, Technická zpráva VÚGTK, v.v.i. č. 1161/2010, Ondřejov.

Kudrys, J., 2007, Automatic determination of vertical deflection components from GPS and zenithal star observations, Acta Geodyn. Geomater., 4, No. 4 (148), 169–172.

- Kudrys, J., 2009. Automatic Determination of the Deflections of the Vertical – First Scientific Results. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 6(3), 233-238.
- Kühtreiber N., 2003. High Precision Geoid Determination of Austria Using Heterogeneous Data, *Proceeding of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission*, 144 – 149. (dostupné z <http://olimpia.topo.auth.gr/GG2002/SESSION2/Kuehtreiber.pdf>)
- Machotka, R., 2004. Využití metod geodetické astronomie pro určení převýšení lokálního kvazigeoidu. *Disertační práce*. VUT v Brně, Brno.
- Machotka, R., 2005. Určování astronomických souřadnic - Metoda párů stejné výšky. *Geodetický a kartografický obzor*. 51/93(12). p. 258 - 264. ISSN 0016-7096.
- Machotka, R., 2012. MAAS: Moderní prostředek pro určování astronomicko - geodetických tížnicových odchylek. In *Využitie modernej geodetickej techniky v geodetických referenčných systémoch*. Bratislava, Slovenská spoločnosť geodetov a kartografov. p. 143 - 150. ISBN 978-80-89626-00-7.
- Machotka, R., 2013. Automatizace astronomického určování polohy. *Habilitační práce*. VUT v Brně, Brno.
- Müller, A., Bürki, B., Kahle, H.-G., Hirt, C., Marti, U., 2004. First Results from New High- precision Measurements of Deflections of the Vertical in Switzerland. *GGSM 2004 IAG International Symposium Porto, Portugal* (ed. C. Jekeli et al.), Springer, Heidelberg: 143-148.
- Ogrizovic, V., 2007. Konstrukcija savremenog mernog sistema za astrogeodetska odredjivanja, PhD thesis, *Gradjevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd*.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor J.K., 2008, An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, Presented at the 2008 General Assembly of the European Geoscience Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008. (dostupné z <http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>).
- Pick, M., 2000. *Advanced Physical Geodesy and Gravimetry*. Ministry of Defence of the Czech Republic, Prague.
- Seeber, G., 2003. *Satellite Geodesy*. Berlin/New York 2003.
- Somieski, A.E., 2008. *Astrogeodetic Geoid and Isostatic Considerations in the North Aegean Sea, Greece*. Diss. ETH No. 17790, ETH Zurich, Switzerland.
- Torge W., 2001. *Geodesy*, de Gruyter, Berlin.
- Voigt, C., Denker, H., Hirt, C., 2007. Regional Astrogeodetic Validation of GPS/Levelling Data and Quasigeoid Models. Paper presented at IUGG General Assembly, Perugia 2007. *Proc. IAG Symposia* 133 (ed. M. Sideris), 413-420.
- Volařík, T., Machotka, R., Kuruc, M., Puchrik, L., Jurčík, J., 2013. Determination of quasigeoid in local network using modern astrogeodetic technologies. *Acta Geodyn. Geomater.*, vol. 10, No. 3(171).

ABSTRACT

Astronomical positioning has been experiencing a kind of renaissance in the last decade. The main reason is the Earth's gravity field research. Vertical deflections determined by astronomical observations can be used for testing of Earth's global gravity models as well as for creation of local gravity models with high resolution and precision.

Field observations for astronomical vertical deflection determination is a specific part of geodetic astronomy, which needs special instrumentation. In this work, all main findings regarding the development and testing of Mobile Automatic Astronomical System No 1. (MAAS-1) developed by author are summarized. This system was designed for vertical deflection field observations from the very beginning.

The work also describes author's experience with measuring system deployment in several pilot scientific projects. So called "astrogeodetic method" used in this projects was found convenient for areas with lack or low quality gravity data and for border or mountain areas. In such cases, the astrogeodetic method is not only more reliable, but also cheaper than the gravimetric method requiring the gravimetric mapping of an area and its surroundings with 5' \approx 9 km overlap in all directions.

At the end of the work, repeatability and accuracy of MAAS-1 results are evaluated. It is shown, that meridian and prime vertical components of vertical deflection are determined with accuracy 0.2 – 0.3 arc seconds each.