



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

GPS MĚŘENÍ NA POLYGONU TETČICE

GPS MEASUREMENTS AT THE TETČICE POLYGON

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JANA DARMOPILOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LUBOMIL POSPÍŠIL, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646T003 Geodézie a kartografie
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Jana Darmopilová
Název	GPS měření na polygonu Tetčice
Vedoucí diplomové práce	doc. RNDr. Lubomil Pospíšil, CSc.
Datum zadání diplomové práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	30. 5. 2014
V Brně dne 30. 11. 2013	

.....
doc. Ing. Josef Weigel, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Švábenský, O., Witiska, M., Ratiborský, J., Blažek, R., Pospíšil, L., Weigel, J.: Preliminary results of repeated measurement in local geodynamic network Morava. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2011, vol. 8, no. 3 (163), s. 291-301.

Pospíšil, L., Švábenský, O., Weigel, J., Witiska, M.: Geodetic and geophysical analyses of Diendorf-Čebín tectonic zone. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2009, vol. 6, no. 3, p. 309-321. ISSN: 1214- 9705.

Švábenský O, Weigel J, 2004: Optimized Technology for GPS Height Determination, CD ROM, Proceedings of the FIG Conference "Olympic Spirit in Surveying", Athens.

Vyskočil P, 1996: Recent crustal movements their properties and results of studies at the territory of Czech Republic. In: Seismicity, Neotectonics, and Recent dynamics with special regard to the Territory of Czech Republic. ISBN 80-85881-04-7, Roc.42, c.15. VUGTK Zdíby, 77–120.

Zásady pro vypracování

Zadání a cíl diplomové práce je zaměřen na realizaci měření GPS na polygonu Tetčice.

Výsledky budou využity pro sledování geodynamických poměrů v této oblasti.

Údaje budou současně využity k vývoji, testování a zdokonalování nové technologie umožňující zpřesnění anomálií tíhového pole a řešení hustotních poměrů v libovolné části zemského povrchu na základě dostupných satelitních výškových a gravimetrických dat.

Výstupy budou tvořit mapa geodynamických jevů v okolí okrajového zlomu Boskovické brázdy, roční rychlosti na měřených bodech, dokumentace ve formě profilů, zápisníků a grafů.

Předepsané přílohy

.....
doc. RNDr. Lubomil Pospíšil, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá etapovým měřením na polygonu Tetčice za účelem potvrzení geologické aktivity způsobené geologickým zlomem, který prochází středem obce. V rámci práce byla zaměřena v létě roku 2013 třetí etapa technologií GNSS metodou dlouhé statické observace pro sledování horizontálních posunů na obou okrajích Boskovické brázdy. Body jsou stabilizovány na pilířích s nucenou centrací. Součástí práce je shrnutí dosavadních výsledků z předchozích etap, porovnání rozdílů mezi jednotlivými etapami a grafické znázornění posunů. Teoretická část práce se zabývá geologickými poměry v území a popisem technologie GNSS.

ABSTRACT

This thesis deals with periodical measurements at the Tetčice polygon to confirm geological activity caused by geological shift that pass through the center of the village. This work was focused on the third phase of measurement by long static GNSS observation in summer 2013 to monitor horizontal shifts on both edges of Boskovice furrow. Points are stabilized on pillars with forced centring. Part of the thesis is summary of present results, the differences between the various stages and graphical representations of shifts. The theoretical part deals with the geological conditions in the area and description of GNSS technology.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tetčice, GNSS, Boskovická brázda, horizontální posuny, tektonika

KEYWORDS

Tetčice, GNSS, Boskovice furrow, horizontal shift, tectonics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jana Darmopilová *GPS měření na polygonu Tetčice*. Brno, 2014. 78 s., 6 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie.
Vedoucí práce doc. RNDr. Lubomil Pospíšil, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. 5. 2014

.....
podpis autorky
Bc. Jana Darmopilová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce, doc. RNDr. Lubomilu Pospíšilovi, CSc., za odbornou pomoc, podporu, cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce a pomoc při měření. Dále děkuji prof. Ing. Otakaru Švábenskému, CSc., za pomoc při měření a odbornou pomoc při zpracování práce.

Dále chci na tomto místě poděkovat svým kamarádům, bez kterých by se měření nemohlo uskutečnit, jmenovitě Tomáši Bradáčovi, Šárce Chrástové, Tomáši Mansbartovi, Martině Novákové, Radmile Staňkové a Jaroslavu Štulíkovi.

V neposlední řadě patří moje velké dík mým rodičům, kteří mi umožnili studovat a během studia mě podporovali, a mému příteli Antonínu Staňkovi jak za podporu při studiu, tak za pomoc při měření.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. CHARAKTERISTIKA LOKALITY.....	11
2.1. Obec Tetčice	11
2.2. Geologie.....	12
2.2.1. Český masiv.....	12
2.2.1.1. Moldanubikum.....	13
2.2.1.2. Moravosilezikum	13
2.2.2. Boskovická brázda	13
3. GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ SATELITNÍ SYSTÉM.....	15
3.1. NAVSTAR GPS	15
3.1.1. Kosmický segment.....	15
3.1.1.1. Vybavení družic.....	16
3.1.1.2. Družicové radiové signály.....	17
3.1.1.3. Modernizace systému.....	20
3.1.1.4. Kryptografické techniky.....	21
3.1.2. Řídící a kontrolní segment.....	22
3.1.3. Uživatelský segment	24
3.2. GLONASS.....	26
3.2.1. Kosmický segment.....	26
3.2.1.1. Družicové radiové signály.....	28
3.2.2. Řídící a kontrolní segment.....	29
3.3. Galileo	29
3.3.1. Koncepce systému Galileo	30
3.3.2. Struktura signálů a poskytované služby	30
3.4. Metody určování polohy.....	31
3.4.1. Fázové měření.....	32
3.4.2. Získání polohy při postprocessingu	33
3.4.3. Relativní způsob určení polohy	33
3.4.3.1. Diference	34
3.4.3.2. Lineární kombinace měření.....	34
3.4.4. Statická metoda.....	35
3.5. Čas v systémech GNSS	35

3.5.1.	Čas GPS.....	35
3.5.2.	Čas systému GLONASS.....	36
3.5.3.	Čas systému Galileo.....	36
3.6.	Faktory ovlivňující přesnost.....	37
3.6.1.	Chyby související s družicemi.....	37
3.6.2.	Chyby vznikající šířením signálu atmosférou.....	37
3.6.2.1.	Troposférická refrakce.....	37
3.6.2.2.	Ionosférická refrakce.....	38
3.6.3.	Chyby související s přijímačem.....	38
3.6.4.	Chyby související s lokalitou měření.....	39
3.7.	Vyjádření přesnosti měření.....	39
3.7.1.	Dilution of Precision (faktor snížení přesnosti).....	39
3.8.	Sítě permanentních referenčních stanic.....	40
3.8.1.	CZEPOS – Česká síť permanentních stanic pro určování polohy.....	41
3.8.2.	Data formátu RINEX.....	42
3.9.	Souřadnicové systémy.....	43
3.9.1.	ITRS.....	43
3.9.2.	ETRS89.....	44
3.9.3.	WGS84.....	44
3.9.4.	Transformace souřadnic z ETRS89 do S-JTSK.....	45
3.10.	Problematika určování výšek z měření GNSS.....	46
4.	MĚŘENÍ DAT A JEJICH ZPRACOVÁNÍ.....	47
4.1.	Předcházející etapy měření.....	47
4.2.	Pilíře pro měření technologií GNSS.....	48
4.3.	Použité přístroje pro observaci.....	49
4.4.	Průběh měření.....	51
4.4.1.	Výška antény.....	51
4.4.2.	Parametry měření.....	52
4.4.3.	Atmosférické podmínky.....	52
4.5.	Zpracování naměřených dat.....	53
4.5.1.	Postup zpracování v Leica Geo Office.....	53
4.6.	Výsledky a zhodnocení GNSS měření.....	56
4.6.1.	Třetí etapa, 26. – 27. 7. 2013.....	57
4.6.2.	Porovnání s předchozími etapami.....	58
4.6.2.1.	Reference na bodu TUBO.....	59

4.6.3. Reference na bodu VODJ (P6)	64
4.7. Grafické zpracování	68
5. ZÁVĚR.....	70
6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
SEZNAM OBRÁZKŮ	75
SEZNAM TABULEK.....	76
SEZNAM GRAFŮ.....	77
SEZNAM PŘÍLOH	78

1. ÚVOD

Boskovická brázda je jednou z nejméně výraznějších tektonicky ohraničených sníženin v České republice o rozloze asi 500 km². Rozkládá se od Moravského Krumlova na jihu přes Ivančice, Rosice a Boskovice až k Moravské Třebové na severu. Nejstarší poznatky o její geologii sahají k roku 1760, kdy se začalo v Rosicko-oslavanské pánvi těžit černé uhlí.

Středem obce Tetčice prochází zakrytý geologický zlom. Již několik diplomantů z VUT v Brně se tak snažilo objasnit, zda dochází v Tetčicích pouze k místním deformacím v důsledku sedání půdy v místě bývalého rybníka či vlivem těžké a intenzivní dopravy nebo např. vlivem proměnlivé hladiny podzemní vody nebo zda jsou pohyby základové půdy součástí tektonických pohybů Diendorfsko-čebínského zlomového pásu.

Cílem této diplomové práce je shrnout dosavadní výsledky z měření v této oblasti, které byly shromážděny metodou GNSS, zaměřit novou etapu, vyhotovit grafické znázornění dosavadních posunů, zobrazit měřickou síť na vhodných mapových podkladech a poskytnout data pro další navazující měření. Měření GNSS technologií probíhá na hloubkově stabilizovaných betonových měřických pilířích s nucenou centrací, jež byly zbudovány v roce 2010 na základě výsledků diplomové práce Ing. Michala Witisky, který provedl v této lokalitě první měření. Pilíře jsou vhodně rozmístěny tak, aby ležely na obou okrajích brázdy, tedy na východ i na západ od předpokládaného průchodu geologického zlomu, a v intravilánu obce.

Diplomová práce je rozdělena do tří částí, kdy v první části je stručně shrnutá charakteristika lokality nejen zeměpisně, ale hlavně také z pohledu geologie, což je nutné pro dokreslení interpretace případných změn v polohách bodů. Další část je věnována teorii globálních navigačních satelitních systémů, kde se věnuji jednotlivým použitým systémům a principům určování polohy včetně faktorů ovlivňující přesnost. V poslední části, která se věnuje praktickému měření, popisují průběh měření i zpracování formou post-processingu a provádím zhodnocení výsledků jak v rámci nově měřené etapy, tak zejména vzhledem k etapám předcházejícím.



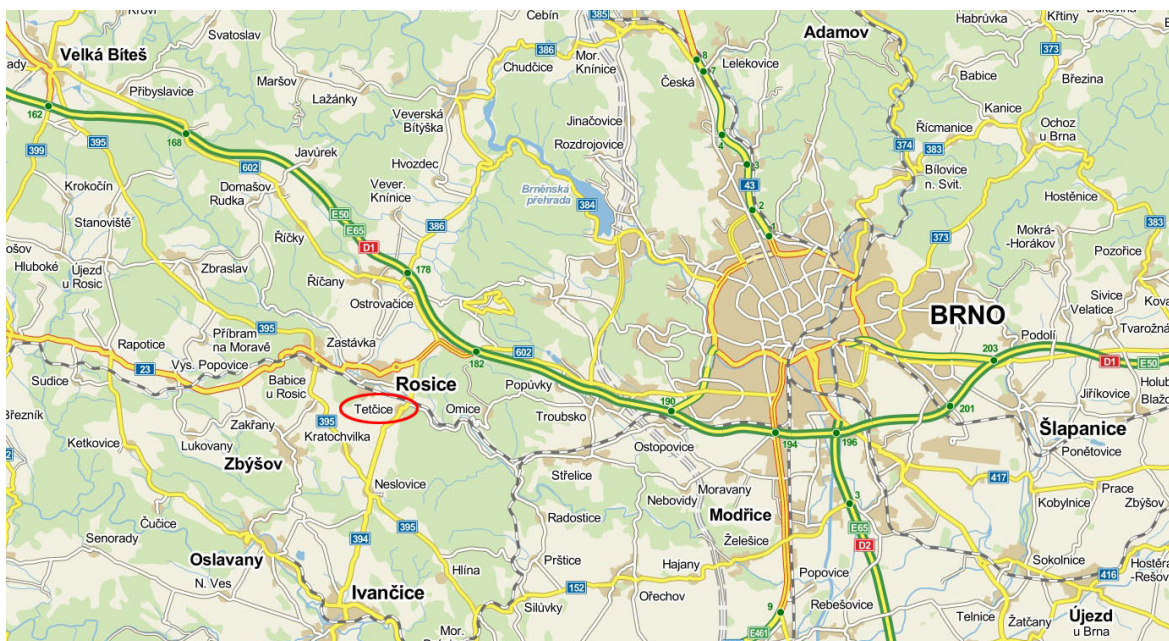
Obr. 1-1: Pohled na obec Tetčice od kaple Nejsvětější Trojice (bod TROJ)

2. CHARAKTERISTIKA LOKALITY

Zájemová oblast této diplomové práce, která se týká pohybu tektonických desek v Boskovické brázdě, leží v obci Tetčice, kde je vybudována měřická síť jak pro měření výšek přesnou nivelací, tak pro měření polohy pomocí technologie globálních družicových navigačních systémů (dále GNSS).

2.1. OBEC TETČICE

Obec Tetčice s 1 094 obyvateli (k 1. 1. 2012) leží v Jihomoravském kraji, asi 15 km západně od města Brna, na okraji přírodního parku Bobrava, v nadmořské výšce 300 až 340 m n. m.



Obr. 2-2: Lokalizace obce Tetčice, mapy.cz

Jednou z dominant obce je kopec Bučín, který sahá do výšky 444 m n. m. Obcí také protéká řeka Bobrava, která zde vstupuje do údolí a přetíná tak Bobravskou vrchovinu na dvě poloviny.

Středem obce vede velmi frekventovaná silnice II. třídy spojující dálnici D1 s ivančickým regionem a vlaková linka S4, zařazená do Integrovaného systému Jihomoravského kraje, Brno – Náměšť nad Oslavou.

První historicky doložená zmínka pochází z roku 1349, barokní kaple sv. Floriana byla postavena roku 1764. Do roku 1852 se v obci nacházel velký rybník, který ovšem zanikl při výstavbě železnice. Ta přinesla obci nejen nové pracovní příležitosti, ale také velmi pohodlné spojení s Brnem. Železnice byla zbudována kvůli nedalekým černouhelným dolům Rosicko-oslavanského revíru, jež se tak nepřímou podporou postaraly o rozvoj obce.

2.2. GEOLOGIE

Zaměříme-li se na Českou republiku z hlediska geologické minulosti, zjistíme, že území státu patří ke dvěma velkým celkům s odlišným geologickým vývojem. Většina Moravy a Slezska a celé Čechy jsou součástí Českého masivu, kdežto východní část Moravy a Slezska patří k okrajové části Západních Karpat.

2.2.1. ČESKÝ MASIV

Český masiv je jednou z nejrozsáhlejších a nejzachovalejších oblastí evropského variského (hercynského) horstva, které bylo vyvrásněno před 380 – 300 miliony let při variském vrásnění. Podle teorie deskové tektoniky byla příčinou vzniku srážka dvou desek zemské kůry – Gondwany na jihu a Laurussie na severu. Pohoří bylo původně mohutné a několik tisíc metrů vysoké, ale v dalších etapách vývoje Země bylo nejen sníženo erozí, ale také porušováno zlomy, a tak můžeme najít jen jeho zbytky, jež jsou vzájemně izolované. Nachází se v prostoru mezi jižní Anglií, Českou republikou na východě a na jihu zasahují až na Pyrenejský poloostrov. [1] [33]



Obr. 2-3: Výskyt variských hornin ve střední Evropě, výřez ze Schematické geologické mapy České republiky, www.ig.cas.cz

Na stavbě Českého masivu se podílejí především horniny prekambriického a paleozoického stáří. Horninové celky spolu původně nesouvisely, ale procesy variského vrásnění je spojily v jeden celek, na kterém se ukládal pokryv mladších sedimentů.

Horninové celky dělíme do pěti hlavních oblastí: moldanubické (moldanubikum), středočeské (bohemikum), sasko-durynské (saxothuringikum), západosudetské (lugikum) a moravskoslezské (moravosilezikum). [32]

Tetčice leží na východním okraji příkopové propadliny Boskovická brázda, která vznikla tektonickým pohybem geologických celků – moldanubika, moravika a brněnského masivu. [31]

2.2.1.1. MOLDANUBIKUM

Moldanubikum tvoří jižní a jihozápadní část Českého masivu, zaplňuje prostor mezi Vltavou a Dunajem. Patří sem jak Český les, Šumava a Novohradské hory, tak větší část jihočeské vysočiny a Českomoravské vrchoviny.

Oblast budují silně metamorfované horniny prekambriického a paleozoického stáří, prostoupené tělesy hlubinných granitoidních hornin, mezi které patří pararuly (přeměněné sedimenty) a ortoruly (přeměněné vyvřeliny). [32]

2.2.1.2. MORAVOSILEZIKUM

Moravosilezikum je východní okraj oddělující Český masiv od karpatské soustavy. Patří do něj brunovistulikum, moravikum, silesikum, žulovský masiv a moravskoslezské paleozoikum. Dále si rozebereme celky, jež zasahují do námi zkoumané oblasti v okolí Tetčic.

Moravikum patří do moravskoslezské oblasti Českého masivu. Je to poměrně úzká geologická jednotka nacházející se na jihovýchodním okraji v délce přes 130 km. Dělí se na svrateckou a dyjskou klenbu, na západě se stýká s moldanubikem. Na složení kleneb se podílejí fylity včetně vápenců, ruly či horniny plutonické. Moravikum tvoří krystalinické celky nasunuté na brunovistulikum a jeho obal. [32]

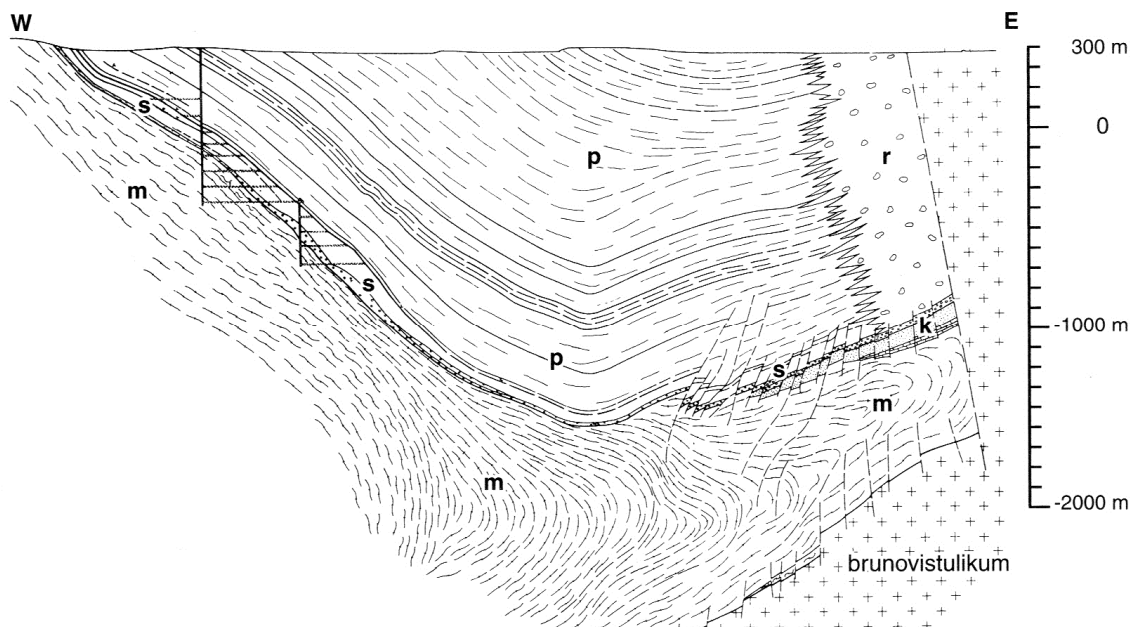
Brněnský masiv má trojúhelníkový tvar protažený v severojižním směru. Společně s dyjským masivem tvoří geologickou jednotku brunovistulikum. Převládají zde různé typy granodioritů, které jsou rozdělené severojižní zónou metabazitů na monotónnější severovýchodní a pestřejší jihozápadní část.

2.2.2. BOSKOVICKÁ BRÁZDA

Boskovická brázda je protáhlá, asi 95 km dlouhá, a má SSV - JJZ směr. Brázda vychází z podhůří Orlických hor přes Moravskou Třebovou do oblasti Moravského Krumlova. Vytváří zřetelný pruh nezalesněné krajiny. Střední sklon brázdy je 4° 20' a nejvyšším bodem kopec Nad Amerikou, jehož výška je 503 m n. m. a je součástí Svárovské vrchoviny. [31]

Na jihovýchodě je obklopená brněnským masivem a na severozápadě horninami moravika, kde zakrývá styk s brunovistulikem.

Převážnou část výplně, kterou můžeme sledovat od severního okolí Boskovic až k Moravskému Krumlovu, tvoří uloženiny spodního permu. V jižní části brázd najdeme i uloženiny nejvyššího karbonu, které mohou dosáhnout mocnosti až několika tisíc kilometrů.



Obr. 2-4: Příčný profil boskovickou brázdou v rosicko-oslavanské části [1]

m – krystalinikum moravika; k – devonské a kulmské horniny; s – svrchnokarbonské balinské slepence a nadložní uhlonosné vrstvy (stephan); p – spodnopermské uloženiny, převážně prachovce a pískovce; r – rokytenské slepence.

Na obr. 2-4 můžeme vidět, že výplň brázd je výrazně asymetrická, kdy východní hranici tvoří příkrý až vertikální či překocný zlom, který byl aktivní i během zaplňování příkopu a poskytoval ze zvedané východní kry hrubý klastický materiál. Těmto materiálům říkáme rokytenské slepence. Rokytnské slepence obsahují bloky a valouny hornin s převahou kulmských drob a prachovců a jsou nevrstevnaté. V západní části brázd jsou naopak vrstvy mírně ukloněny a porušeny jen méně významnými zlomy. Nacházejí se zde slepence klastického materiálu vyvinuté při bázi, jež označujeme jako balinské. [1]

Největší zastoupení ve výplni brázd mají červenohnědě zbarvené písčité, při krajích hrubozrnné, sedimenty říčního a jezerního původu.

3. GLOBÁLNÍ NAVIGAČNÍ SATELITNÍ SYSTÉM

Globální navigační satelitní systém (dále GNSS z anglického Global Navigation Satellite System) umožňuje na základě zpracování signálů vysílaných družicemi určovat prostorovou polohu antény přijímače těchto signálů. GNSS lze použít na jakémkoliv místě na Zemi, v kteroukoliv dobu, nezávisle na počasí a pohybu.

V současné době je plně funkční systém americké armády NAVSTAR GPS (dále jen GPS) a ruský GLONASS. V roce 2020 by měl být v plně operačním stavu evropský systém Galileo a čínský Compass (známý také jako Beidou-2).

V teoretické části práce se budu věnovat především systému GPS, jehož signál přijímaly všechny čtyři použité přijímače. Dva novější přijímače GNSS přijímaly data i ze systému GLONASS, a proto se zmíním zejména o jeho odlišnostech vzhledem k systému GPS.

3.1. NAVSTAR GPS

Globální systém určování polohy (dále jen GPS, z anglického Global Positioning System) je v současné době nejdéle a nejlépe fungujícím GNSS. Byl vyvinut jako náhrada navigačního systému TRANSIT Ministerstvem obrany USA pod celým názvem NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System).

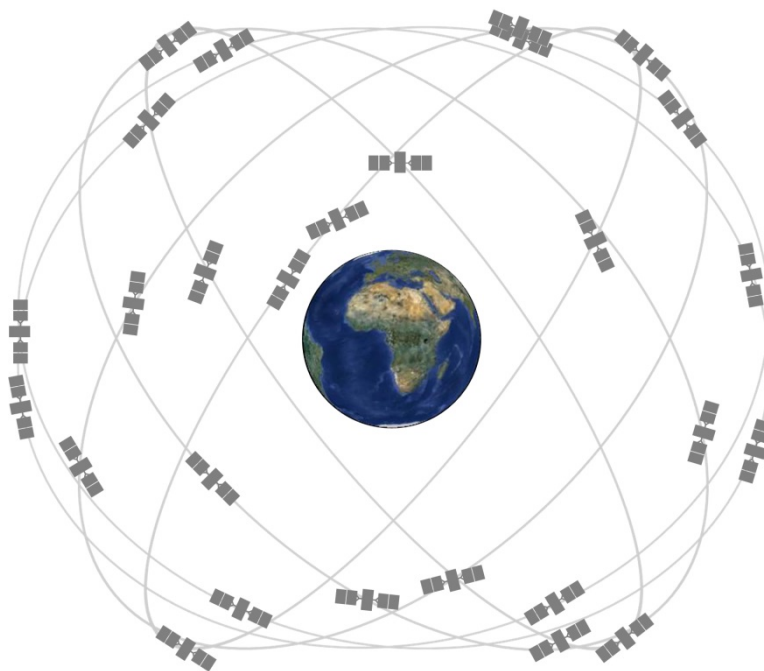
Vývoj systému započal na začátku 70. let, první dvě testovací družice byly vypuštěny během let 1973 – 1979. Hlavní fáze budování probíhala v letech 1979 – 1985, kdy bylo vysláno 11 družic I. bloku na dvě oběžné dráhy, zřízeny první pozemní stanice a testovány uživatelské přístroje. Od roku 1986 byly vypouštěny družice II. bloku a systém byl prohlášen za plně operační v roce 1995, kdy bylo na oběžných drahách celkem 24 družic.

V současné době se systém GPS skládá ze tří hlavních segmentů – kosmického, kontrolního a uživatelského. Americká armáda vyvíjí, udržuje a provozuje kosmický a řídicí segment.

3.1.1. KOSMICKÝ SEGMENT

U systému GPS je kosmický segment tvořen v plném operačním stavu 24 družicemi, které jsou umístěny na šesti orbitálních drahách se sklonem 55° k rovině rovníku. Dráhy jsou vzájemně posunuty o 60° podél rovníku (posunutí rektascenze výstupních uzlů) a na každé z nich mají být rovnoměrně rozmístěny čtyři družice. Aktuálně (v roce 2014) je však aktivních dohromady 31 družic a dochází tak k nepravidelnému rozložení na jednotlivých drahách. Doplnkové družice však zlepšují přesnost, protože poskytují nadbytečná měření, a pokud několik družic selže, systém zůstává stále plně funkční. Na jednu dráhu pak připadá pět až šest družic.

Výška oběžné dráhy je 20 183 km nad povrchem Země. Doba oběhu kolem Země je pak 11 hodin a 58 minut, což je polovina hvězdného dne. Pozorovatel na Zemi tak může vidět družici každý den na stejném místě, její východ bude akorát o 4 minuty dříve, než v den předcházející. Dráhy jsou voleny tak, aby z každého místa na Zemi bylo vidět nejméně šest družic nad obzorem v jeden okamžik.



Obr. 3-5: Konfigurace GPS družic v roce 2013 [8]

3.1.1.1. VYBAVENÍ DRUŽIC

Jedna družice váží asi 1,8 tuny. Na střední oběžné dráze (MEO, z anglického Medium Earth Orbit) se pohybuje rychlostí 3,8 km/s.

Každá družice je vybavena třemi až čtyřmi velmi přesnými atomovými hodinami s rubidiovým nebo cesiovým oscilátorem, které udržují přesný čas a kmitočet. Jejich stabilita je lepší než 10^{-13} . Dále jsou vybaveny 12 anténami pro vysílání rádiových kódů v pásmu L, anténami pro komunikaci s pozemními kontrolními stanicemi v pásmu S, anténami pro vzájemnou komunikaci družic v pásmu UHF, optickými, rentgenovými a pulzně-elektromagnetickými senzory pro detekci startů balistických raket a jaderných výbuchů a v neposlední řadě solárními panely a bateriemi, které slouží jako zdroj energie.

Úkolem každé z družic je přenést informace o čase a dráhových elementech do přijímačů pomocí pseudonáhodných kódů a navigační zprávy.

Družice jsou vysílány do vesmíru v rámci bloků. Pro každý blok je pak charakteristická určitá nová technologie. Jedenáct satelitů bloku I bylo vypuštěno v letech 1978 – 1985, dále následovalo 9 satelitů bloku II (1989 – 1990) a 19 satelitů bloku IIA v letech 1990 – 1996. Družice bloku II byly schopny samostatného provozu bez zásahu pozemních stanic 14 dní, kdežto družice bloku IIA až 180 dní. Jednou z důležitých

vlastností byla možnost kryptografických technik, jež umožňovaly snížit přesnost v určení polohy, rychlosti i času. Některé satelity z bloku IIA jsou stále funkční.

V letech 1997 – 2009 bylo vyrobeno a vypuštěno 20 družic pod označením IIR a IIR-M, které umožňují lepší vzájemnou komunikaci, mohou měřit vzájemné vzdálenosti a generovat vlastní navigační zprávu. Blok IIR-M se liší vysíláním civilního signálu i na frekvenci L2 a zavedením nového kódu M na frekvencích L1 i L2.



Obr. 3-6: Družice systému GPS, blok IIR-M [8]

Nejnovější družice jsou družice bloku IIF (od roku 2010), které mají novou třetí civilní frekvenci L5 pro lepší modulaci atmosféry. Celkově má být vypuštěno 13 družic, k listopadu 2013 jsou na oběžné dráze čtyři (poslední vypuštěna 15. května 2013).

Družice bývají několikrát do roka odstaveny kvůli údržbě atomových hodin a korekci dráhy družice. Jejich údržba trvá 12 – 24 hodin. Družice jsou konstruovány pro životnost 10 let, novější pro 15 let, ale ještě dnes jsou aktivní družice z bloku IIA, který byl vypouštěn v letech 1990 – 1996, což znamená, že jsou v oběhu již více než 17 let.

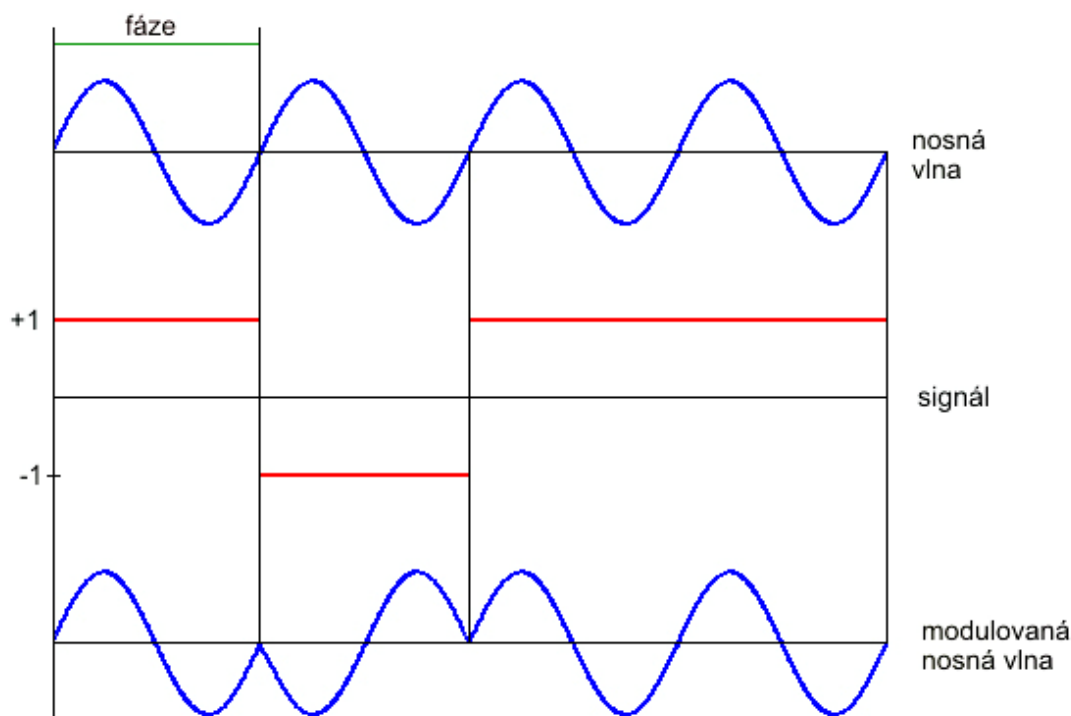
3.1.1.2. DRUŽICOVÉ RADIOVÉ SIGNÁLY

Z důvodu velké energetické náročnosti pro spojení družic a pozemních aparatur byla pro zpracování přijímaného signálu navržena metoda statistického vyhodnocení, která dovoluje přijímat signál s velkým podílem šumu (až 20 dB) a současně umožnila zmenšit rozměry přijímacích antén.

Základní frekvence $f_0 = 10,23$ MHz pro přenos signálů je vytvářena velmi přesnými atomovými hodinami, které se starají o dlouhodobou frekvenční stabilitu vysílaného signálu. V současné době jsou vysílány dvě nosné vlny odvozené od základní frekvence tak, že je tato frekvence vynásobena čísly 154 a 120. Tím vzniká nosná vlna L1 = 1 575,42 MHz a nosná vlna L2 = 1 227,60 MHz. Aktuálně se testuje nosná vlna s označením L5 = 1 176,45 MHz, kterou vysílají družice bloku IIF vypouštěné od roku 2010. Předpokládá se dostupnost na 24 družicích systému v roce 2021. [8]

Vysílání na dvou a více frekvencích je důležitý požadavek na spolehlivé řešení některých zdrojů systematických chyb, např. vliv ionosféry. Nosná vlna je modulována fázovou modulací, tzv. binárním fázovým klíčováním – kdykoliv dojde ke změně vysílaného binárního kódu, posune se fáze vlny o jednu polovinu vlnové délky. Binární jedničky odpovídá hodnota +1, binární nula je reprezentována hodnotou -1 (viz obr. 3-7).

Pro modulaci nosné vlny se využívá několik pseudonáhodných kódů (dále PRN kódů, z anglického pseudorandom noise), které jsou unikátní pro každou z družic a umožňují tak jejich jednoznačnou identifikaci. Kódy jsou posloupností hodnot 0 a 1 a mají pseudonáhodný charakter, i když jsou ve skutečnosti vytvářeny podle stanoveného matematického modelu. Nosná vlna L1 je modulována dvěma kódy - C/A a P(Y) kódem, nosná vlna L2 je modulována pouze P(Y) kódem.



Obr. 3-7: Modulace nosné vlny [11]

C/A kód (Clear/Access = volný přístup nebo Coarse Acquisition = sběr hrubých dat)

Je modulován pouze na nosné vlně L1 a není šifrován, což umožňuje přístup i neautorizovaným uživatelům. Je vysílán frekvencí 1 023 MHz, což odpovídá vlnové délce 293,1 m, a je 1 023 bitů dlouhý, tzn., že je opakován každou tisícinu sekundy. Vzájemná korelační funkce dvou různých kódů má nízkou hodnotu, což je výhodné pro vzájemné oddělení signálů různých družic (patří mezi tzv. zlaté kódy). Tato technika se nazývá CDMA (Code Division Multiple Access) a umožňuje rozpoznávat více satelitů na stejné frekvenci.

Jednomu prvku C/A kódu odpovídá přibližně 300 m. Přesnost pseudovzdáleností určených z kódových měření se udává jako 1 % z vlnové délky kódu, a tak můžeme pro C/A kód očekávat přesnost 3 m. Dříve byla jeho přesnost snížena zavedením SA (Selective Availability, viz kapitola 3.1.1.4), ale od 1. května 2000 je zcela dostupný civilním uživatelům.

P-kód (Protected = chráněný nebo Precision = přesný)

Pseudonáhodný kód je vytvářen kombinací bitových sekvencí dvou registrů s frekvencí 10,23 MHz, což odpovídá vlnové délce 29,3 m. Je modulován na obou nosných vlnách L1 a L2 a určen pouze pro autorizované uživatele. Dvě frekvence umožňují odstranění ionosférických a troposférických refrakcí, takže můžeme dosahovat přesností v řádech milimetrů.

Délka kódu je 266,4 dne, což je přibližně 37 týdnů. Pro praktické měření bylo vybráno 32 variant bitů, jejichž délka je 7 dní. Každé družici je pak přidělena jedna z částí a vždy o sobotní půlnoci, kdy začíná nový GPS týden, dochází ke změně vysílaného kódu. Tím je dosaženo rozdílných PRN družic.

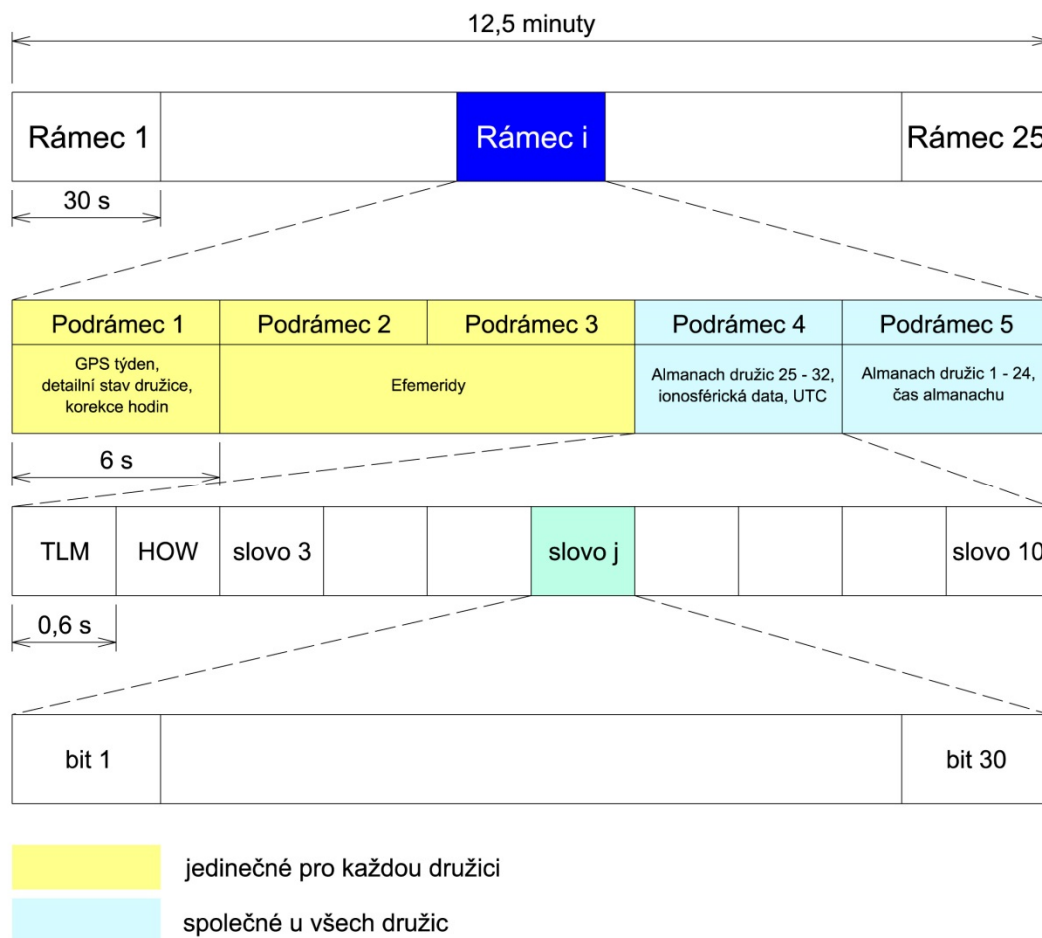
V případě, kdy funguje režim A-S (Anti-Spoofing, viz kapitola 3.1.1.4), je P kód šifrován pomocí Y kódu, a proto se někdy označuje také jako P(Y) kód.

Navigační zpráva

Obsahuje informace o dráze jednotlivých družic, data pro výpočet polohy, rychlosti, času a korekční data. Vysílá se na frekvenci 50 Hz a je tvořena 25 rámci (frame) po 1 500 bitech, kdy odvysílání jednoho rámce trvá 30 sekund. Odeslání celé navigační zprávy tak trvá 12,5 minuty. Každý rámec je rozdělen do pěti podrámců (subframe) po 300 bitech. V každém rámci se vysílají první tři podrámce opakovaně, mění se pouze čtvrtý a pátý podrámec (celkem je tedy 25 variant čtvrtého a pátého rámce). Jeden podrámec se vysílá 6 sekund, obsahuje 10 slov (word) a jedno slovo tedy trvá 0,6 sekundy.

Každý podrámec může mít 25 stránek. Podrámce 1 až 3 mají pouze jednu stránku, a tak dochází k jejich opakování každých 30 s, podrámce 4 a 5 mají celkem 25 stránek, opakují se tedy pouze jednou za 12,5 minuty.

Prvním slovem v každém podrámeči je telemetrické slovo TLM nesoucí synchronizační vzor a diagnostické zprávy řídicího segmentu. Druhým slovem je HOW (handover word), které nese identifikační údaje a také časovou hodnotu TOW (time of week), což je pořadí následujícího rámce od počátku GPS týdne.



Obr. 3-8: Struktura navigační zprávy

První podrámeč obsahuje číslo GPS týdne, předpověď přesnosti v určení pseudovzdálenosti, indikátor zdraví družice a koeficienty pro korekce palubních hodin. Dráhové efemeridy pro daný okamžik a jejich časové změny obsahuje druhý a třetí podrámeč. Ve čtvrtém podrámeči se vysílají především vojenské informace, ale také almanach pro družice s číslem vyšší, než 25 (tzn. pro družice fungující nad rámec plného operačního stavu 24 družic). Pátý rámeč pak obsahuje almanach pro aktuálně nejstarších 24 družic. Almanach je aktualizován jednou za šest dnů a obsahuje méně přesná data o poloze všech družic. Všechny družice vysílají stejný almanach.

3.1.1.3. MODERNIZACE SYSTÉMU

Po uvedení systému do plného operačního stavu v roce 1995 se začala plánovat modernizace systému, která byla schválena v roce 2000. Tato modernizace byla nazvána

GPS III a plánuje jak nové pozemní stanice, tak i družice a další civilní i vojenské signály pro zlepšení dostupnosti a přesnosti. Některé z nových technologií jsou dostupné u družic bloku IIR-M a IIF, kde probíhá testování. Fáze modernizace proběhne s blokem III.

Jedním z nových signálů je druhý civilní **L2C**, který má přinést eliminaci ionosférického zpoždění vysíláním na dvou frekvencích. Civilní uživatelé by tak mohli dosahovat podobných přesností jako autorizovaní uživatelé. Jsou pro něj vytvořeny dvě nové PRN sekvence – CM kód a CL kód. První družice z bloku IIR-M vysílající L2C byla vypuštěna v roce 2005.

Třetím z civilních signálů je **L5** (SoL, Safety of Life) na frekvenci 1 176,45 MHz. L5 má garantovat kvalitu polohovací služby natolik, aby bylo ihned možné rozpoznat chybu v systému. Jeho užití je plánováno zejména v oblasti bezpečnosti letecké dopravy (zejména při přiblížování a přistávání letadel) a pro vysílání využívá rezervované pásmo pro letectví s nízkou mírou rušení.

Čtvrtý civilní signál, **L1C**, je vyvíjen pro lepší interoperabilitu mezi systémem GPS a dalšími mezinárodními navigačními systémy. Bude vysílán na stejnou frekvenci jako L1, který bude zachován pro zpětnou kompatibilitu. První družice vysílající signál L1C mají být vypuštěny v roce 2015 (blok III), plný operační stav se očekává kolem roku 2026.

Jednou z dalších novinek je **CNAV Navigační zpráva** – vylepšená verze původní navigační zprávy. Bude obsahovat sice stejná data, ale ta budou vysílána v novém formátu. Současné rámce budou nahrazeny systémem 300 bitů dlouhých pseudopaketů, jejichž vysílání bude trvat 12 sekund. Nová konstrukce tak bude umožňovat velkou variabilitu paketů a tím pádem i pružnější využití obsahu vysílaných dat.

Číslo označující GPS týden bude rozšířeno na 13 bitů a jeho maximální hodnota bude 8 192. K jeho vyčerpání tak dojde jednou za 157 let. Každý paket ponese informaci o zdravotním stavu družice, takže bude možné do 6 sekund vyřadit nespolehlivou družici z výpočtu, čímž se zvýší přesnost a spolehlivost aplikací typu Safety of Life. Jeden z paketů ponese informaci o rozdílu mezi časem GPS a ostatními GNSS systémy – podporovány budou minimálně GLONASS a Galileo, což zvýší interoperabilitu dat. V neposlední řadě bude navigační zpráva podporovat až 63 družic.

M kód má nahradit stávající P(Y) kód na frekvencích L1 a L2. Signál má být vysílán širokoúhloú anténou, která má pokrýt celý povrch Země rovnoměrným signálem. Dále bude využita směrová anténa umístěná mimo tělo družice, kterou bude možno natáčet a v určitém regionu tak zvýšit sílu signálu až o 20 dB. Společně s M kódem bude pro autorizované uživatele k dispozici nová **MNAV navigační zpráva**, která bude mít zřejmě stejný formát jako CNAV a bude tak využívat pakety místo rámců. [8]

3.1.1.4. KRYPTOGRAFICKÉ TECHNIKY

Režim **Selective Availability (SA)** fungoval od 25. března 1990 a zanášel do radiového signálu umělou chybu. Dokázal měnit základní frekvenci hodin a efemeridy

vysílané v navigační zprávě. Způsobil tak sníženou přesnost měření pseudovzdáleností pomocí C/A kódu. Toto opatření mělo zabránit zneužití systému GPS pro navigaci např. balistických raket. Chybu bylo možné potlačit diferenčním měřením anebo dlouhou statickou observací. Autorizovaní uživatelé mohli využívat pro přesné určení polohy P kódu. SA byl vypnut prezidentským výnosem 1. května 2000, čímž bylo umožněno rozšíření GPS mezi civilní a komerční uživatele. Přesnost C/A kódu se tak zlepšila na jednotky metrů. Služba je na družicích stále dostupná, zrušena úplně bude až na družicích bloku III. [8]

Anti-Spoofing (A-S) funguje od roku 1994 a umožňuje zašifrování P-kódu, čímž vzniká asymetricky šifrovaný P(Y) kód. A-S se provádí za účelem ověření pravosti signálu z družic – chrání P kód před případným podvržením či zneužitím nepřítelem, a je proto neustále zapnut, aby byla zaručena jeho stoprocentnost. Vzniká modulováním Y kódu, jehož dešifrování mohou provádět pouze autorizovaní uživatelé pomocí W kódu. Detaily Y i W kódu podléhají vojenskému utajení.

3.1.2. ŘÍDÍCÍ A KONTROLNÍ SEGMENT

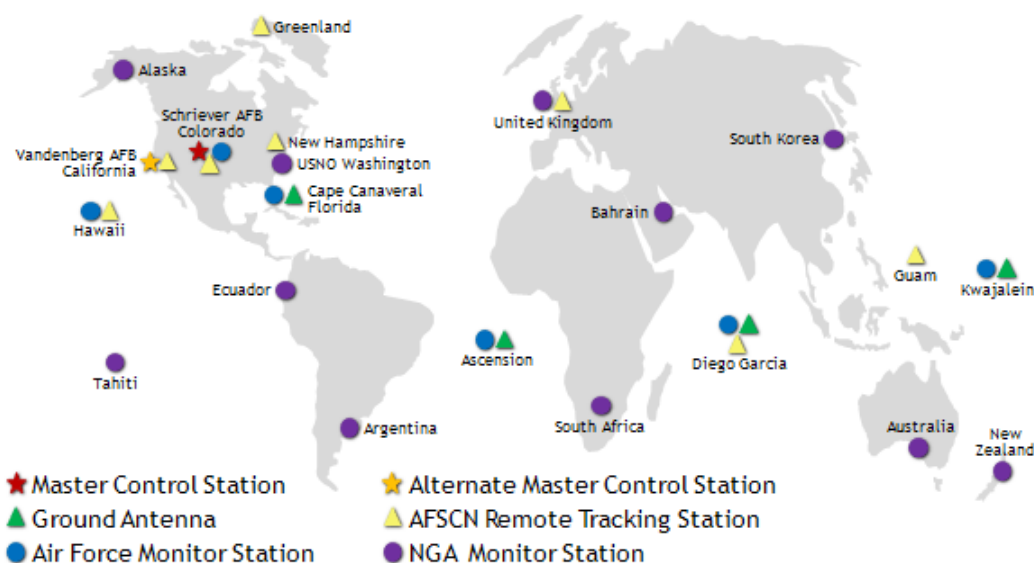
Řídící nebo také kontrolní segment je složen ze sítě monitorovacích stanic, hlavní řídicí stanice, záložní hlavní řídicí stanice a pozemních antén. Mezi jeho hlavní úlohy patří monitoring a kontrola oběžných drah družic včetně změn oběžných drah a pozic družic, kontrola stavu družic, atomových hodin a jejich podsystémů jako solární panely nebo baterie, aktualizace parametrů v navigační zprávě (efemeridy, almanach a časové korekce) nebo správa Selective Availability a Anti-Spoofing. Podílí se také na přípravě vypouštění nových družic. [13]

Hlavní řídicí stanice se nachází v Colorado Springs na Schrieverově letecké základně (USA) a je pod správou 2d Space Operations Squadron, což je jednotka amerických vzdušných sil. Tvoří centrální řídicí uzel. Zpracovává data obdržena od monitorovacích stanic a vytváří z nich navigační zprávu s daty o vysílaných efemeridách a korekčních parametrech pro čas. Navigační zpráva je pak odesílána pozemními anténami zpátky na družice.

Z důvodu decentralizace systému je kompletně vybavené záložní řídicí středisko vybudováno na Vandenbergově letecké základně v Kalifornii.

Před modernizací systému bylo po obvodu Země rovnoměrně rozmístěných v blízkosti rovníku celkem pět **monitorovacích stanic** na Havajských ostrovech, atolu Kwajalein na Marshallových ostrovech v západním Tichomoří, ostrově Ascension ve středním Atlantiku, na ostrově Diego Garcia v Indickém oceánu a v Colorado Springs. V návaznosti na zvyšující se nároky na přesnost a spolehlivost systému bylo do systému od roku 2001 začleněno dalších 12 stanic, např. na mysu Canaveral (Florida, USA), v Adelaide (Austrálie), v Pretorii (Jihoafrická republika), ve Washingtonu DC (USA) nebo v Papeete na Tahiti. Šest stanic je pod správou vzdušných sil USA, deset jich spravuje National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Po modernizaci systému je každá družice

viditelná minimálně ze tří monitorovacích stanic, což v důsledku zlepšuje přesnost výpočtů dráhových elementů a efemerid. [13]



Obr. 3-9: Rozmístění stanic kontrolního segmentu systému GPS [8]

Mezi vybavení monitorovacích stanic patří přesné cesiové normály a přijímače P kódu. Stanice tak vytvářejí síť pro určování palubních efemerid a modelují chod atomových hodin. Přijímají neustále signály z družic, které uchovávají a předávají do hlavní řídicí stanice.

Pozemní antény odesílají data vytvořená hlavní řídicí stanicí pomocí rádiového pásma S zpátky ke družicím. Může to být jednak navigační zpráva, ale také příkazy pro změnu oběžné dráhy družice. Díky rozložení antén na zemském povrchu, může být navázáno spojení s každou družicí třikrát za den, tedy každých osm hodin. Data se ovšem aktualizují většinou jednou denně. Pozemní antény najdeme ve stejných místech jako monitorovací stanice – na ostrovech Ascension, Diego Garcia, Kwajalein a na mysu Canaveral na Floridě. Řídicí segment je také napojen na Satelitní kontrolní síť vzdušných sil USA (Air Force Satellite Control Network, AFSCN). [8]

Pokud dochází ke změně oběžné dráhy družice, musí být satelit postaven mimo provoz (stav „unhealthy“), aby se nezapočítával do řešení na uživatelských přijímačích. Poté, co je provedena korekce, je dráha satelitu zaměřena ze Země a jsou vypočítány nové efemeridy. Po aktualizování informací o dráze satelitu je pak znovu uveden do provozu (stav „healthy“).

Z důvodu modernizace družic a zavádění nových technologií do systému GPS, musí být modernizován i kontrolní segment, ten pak bývá nazýván jako **Next Generation Operational Control System** (dále OCX). [8]

OCX představuje řídicí a kontrolní segment příští generace GPS – umožní vypuštění družice na oběžnou dráhu a její řízení během provozu stejně jako stahování

doslouživších družic z oběžné dráhy. OCX bude poskytovat vyšší přesnost, integritu a dostupnost GPS systému v součinnosti s dalšími celosvětovými GNSS systémy. Jednou z důležitých vlastností má být zvýšená odolnost proti kybernetickým útokům a tím pádem zlepšení spolehlivosti dodávaných informací. Dojde také k úplné obměně hardwaru a k přechodu na digitální technologii.

OCX má zajišťovat plnou podporu pro kontrolu nových civilních signálů (L2C, L5, L1C) a bude zaváděn v jednotlivých blocích. OCX blok I má vstoupit do systému v roce 2016 a nahradí současný kontrolní systém u družic bloku III. Poskytne tak podporu pro signál L1C. OCX bloku II bude podporovat, monitorovat a kontrolovat signály L1C a L5. OCX bloku III je v plánu pro zajištění funkcí nové generace družic bloku III. [8]

3.1.3. UŽIVATELSKÝ SEGMENT

Do posledního segmentu řadíme speciální uživatelské přijímače všech typů a přesností, které dokáží přijímat signál z GPS družic, určovat pseudovzdálenosti a řešit navigační rovnice s cílem získání souřadnic přijímače (X, Y, Z) a přesného času.

Přijímače jsou pasivní, tzn., že signály a data z družic pouze přijímají a nevysílají žádná data zpátky. Hlavním důvodem pro vznik pasivního systému byl především fakt, aby nemohly být přijímače zaměřeny nepřítelem (nesmíme zapomenout, že systém vznikl jako vojenský). Pasivní systém je také schopný obsloužit neomezený počet uživatelů.

Každý uživatelský přijímač se skládá z několika částí:

- **Anténa**, jež přijímá signály od všech viditelných družic a po zesílení signálu **předzesilovačem** předává data přijímači. Měřená data se vždy vztahují k fázovému centru antény, které je různé pro každou frekvenci a které není totožné s fyzickým centrem antény. Anténa může být oddělena nebo spojena s přijímačem.
- **Radiofrekvenční jednotka** zpracovává přijaté signály z jedné nebo více frekvencí a porovnává je s referenčním signálem, který vytváří **křemenný oscilátor**.
- **Mikroprocesor** je řídicím prvkem celého systému a řeší navigační úlohu měřením pseudovzdáleností.
- **Komunikační jednotka** zajišťuje styk přijímače s uživatelem, je propojena s klávesnicí a může tak přijímat dodatečná data od uživatele.
- **Paměťová jednotka** pro ukládání naměřených hodnot.
- **Zdroj napětí**.

Přijímače můžeme dělit do několika kategorií, podle různých kritérií:

- **Podle počtu přijímaných pásem** – pokud přijímač může přijímat signál pouze na jedné nosné vlně (L1), pak se jedná o přijímač **jednofrekvenční**. Pokud přijímá signál na obou nosných vlnách, pak je označujeme jako **dvoufrekvenční** přijímače. V dnešní době již existují i **vícefrekvenční** přijímače, které umožní přijímat i nové signály (např. L5).
- **Podle principu výpočtů** – přijímače pro zpracování kódu, tzv. **kódové přijímače**, nebo **přijímače pro fázová měření**.
- **Podle počtu kanálů** – přijímače mohou být jednokanálové nebo vícekanálové. **Jednokanálové** byly používány v raných fázích systému, kdy přijímač byl schopen zachytit a zpracovat signál pouze z jedné družice v jeden okamžik. Po zpracování informace z první družice následně přepnul na druhou viditelnou družici a tento postup se opakoval, dokud nebyly přijaty signály ze všech viditelných družic. **Vícekanálové** přijímače mají pro každou družici vyčleněn samostatný kanál a mohou tak zpracovávat signály najednou. Dříve bylo těchto kanálů čtyři nebo pět, v současné době pracují přijímače s 12 až 20 kanály najednou.
- **Podle počtu přijímaných systémů** – většina starších přijímačů je **jednosystémových**, které umožňují přijímat signál pouze z družic systému GPS. Dnes se můžeme již běžně setkat s **vícesystémovými** přijímači, jež přijímají signály i z ruského systému GLONASS a k dostání jsou i přijímače podporující příjem z evropského systému Galileo. Přijímače podporující pouze GLONASS nejsou na našem ani na západním trhu dostupné.
- **Podle použití** – **geodetické** přijímače, jež využívají fázová měření a jejichž přesnost se tak pohybuje v řádu centimetrů až milimetrů podle použitých přístrojů a metody. **Navigační** přístroje pro vojenské i civilní použití. V běžném životě se s navigačními přístroji můžeme setkat např. v automobilové dopravě nebo při turistice. Dalším využitím jsou přijímače pro **časovou synchronizaci**, jelikož systém GPS poskytuje atomový čas bez nutnosti vlastnit atomové hodiny. Těchto přístrojů využívají např. světové a investiční banky z důvodu přesné synchronizace platebních transakcí.

Samotné uživatele můžeme rozdělit do dvou skupin, a to na autorizované uživatele a neautorizované uživatele. **Autorizovaní uživatelé** (vojenský sektor USA a vybrané spojenecké armády) mají přístup k přesné polohové službě (Precise Positioning Service – PPS). Přijímač je pak vybavený hardwarovými a softwarovými klíči a dokáže tak pracovat s P kódem, který je pro běžné uživatele zakódovaný pomocí Y kódu (metoda Anti-Spoofing, viz kapitola 3.1.1.4). **Neautorizovaní uživatelé** mohou využívat standardní

polohovou službu (Standard Positioning Service – SPS), kdy přijímač pracuje pouze s C/A kódem.

3.2. GLONASS

Ruský globální navigační satelitní systém GLONASS (rusky ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система, tr.: GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistěma) je konkurenční obdobou amerického NAVSTAR GPS. Byl vyvinutý v Sovětském svazu a nyní je pod správou ruské armády a jejího Úřadu ruských vojenských vesmírných sil.

Vzhledem ke skutečnosti, že všechny GNSS systémy mají ve své podstatě podobný princip fungování a při měřických pracích v Tetčicích byly použity přijímače určené primárně pro systém GPS, zaměřím se v této kapitole zejména na rozdíly mezi systémy GLONASS a GPS.

První dvě testovací a jedna provozní družice byly vypuštěny z Kosmodromu Bajkonur na oběžnou dráhu 12. října 1982. Do roku 1991 bylo vypuštěno celkem 8 testovacích a 44 provozních družic. Omezený provoz systému byl možný právě od roku 1991, kdy bylo ve dvou oběžných rovinách dvanáct družic. V letech 1996 až 2001 postihl kosmickou část systému úpadek z důvodu kolapsu ruské ekonomiky a s tím souvisejícího snížení finančních prostředků pro vesmírný průmysl. Znovuobnovení do plného operačního stavu pak začalo v roce 2001 po intervenci ruského prezidenta Vladimíra Putina, který zařadil obnovení systému mezi vládní priority. V květnu 2007 pak podepsal dekret, který zaručuje neomezený a nezaplatněný přístup k civilním signálům pro běžné civilní uživatele. [14]

3.2.1. KOSMICKÝ SEGMENT

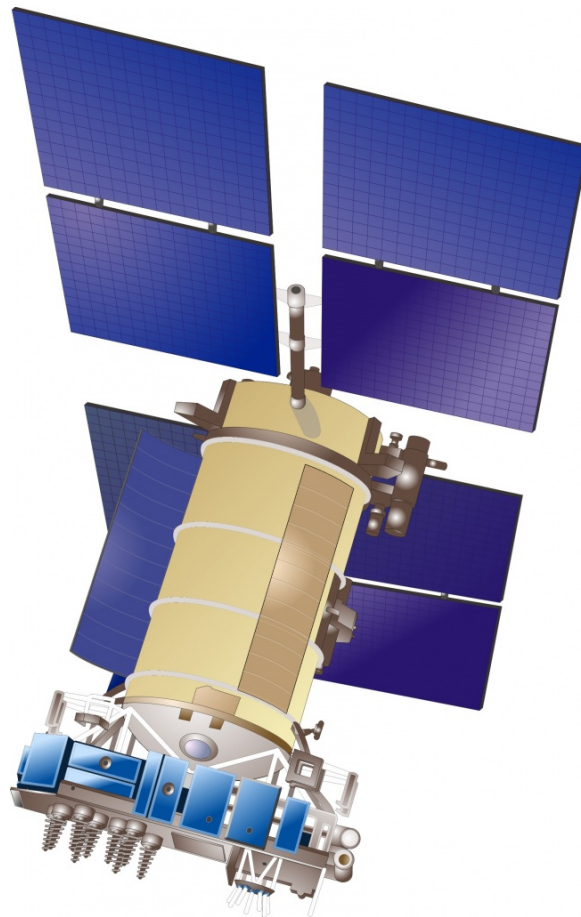
GLONASS počítá stejně jako GPS s kompletní konstelací 24 družic rozdělených však pouze do třech oběžných drah. V každé dráze tak bude osm družic, z nichž sedm bude v provozu a jedna bude záložní. Každá družice je identifikovatelná dle svého pozičního čísla. Výška přibližně kruhové oběžné dráhy je 19 100 km nad zemským povrchem a její sklon $64,8^\circ$ k rovině rovníku. Dráhy jsou vzájemně posunuty o 120° a družice v jedné rovině o 45° . Družice oběhne Zemi za 11 hodin a 15 minut rychlostí 3,9 km/s. V každém okamžiku má být odkudkoliv ze Země viditelných nejméně pět družic.

Charakteristickým znakem konstelace družic je její identické opakování každých osm dní, čímž se liší od GPS, kde dochází k identickému opakování každý hvězdný den. U systému GLONASS dochází po jednom hvězdném dni pouze k neidentickému opakování družic, což znamená, že družice zaujme stejné místo jako předchozí družice.

Družice nesou označení Uragan a v současné době jsou v provozu ty s označením Uragan-M, což je druhá generace družic (M znamená „modernizované“ anebo „modifikované“). Váží asi 1,4 tuny a jsou vynášeny z kosmodromu Bajkonur v sestavách

po třech družicích. Byly vyvíjeny od roku 1990, ale první se dostala na oběžnou dráhu až v roce 2003. Výhodou oproti první generaci byla zejména jejich zvýšená životnost, která je plánována na sedm let oproti dvěma až třem rokům u první generace, což se ale stále nemůže rovnat životnosti družic systému GPS. Nejvýznamnější funkcí byla podpora druhého civilního signálu, což umožnilo zavádět ionosférickou korekci.

Mezi vybavení družic Uragan-M patří velmi přesné atomové hodiny s cesiovým oscilátorem, dvanáct antén pro vysílání radiových kódů v pásmu L, antény pro komunikaci s pozemními kontrolními stanicemi, solární panely a baterie jako zdroj energie a odrazové pole pro využití Satellite Laser Ranging (SLR). V současné době (stav k 24. listopadu 2013) je vypuštěných 28 družic, z nichž je 24 v provozu, tři jsou v záloze a jedna je v testovací fázi. [15]



Obr. 3-10: Družice ruského systému GLONASS, Uragan-M

Nová generace družic nese název Uragan-K, plánovaná životnost má být 10 let a jejich váha se má zredukovat na 750 kg, což umožní jejich vypuštění po dvojicích. Největší novinkou oproti druhé generaci bude podpora CDMA, což umožní rozpoznávat více satelitů na stejné frekvenci jako u systému GPS (nyní má každý satelit vlastní frekvenci, viz kapitola 3.2.1.1).

3.2.1.1. DRUŽICOVÉ RADIOVÉ SIGNÁLY

Přenos dat z více družic směrem k uživateli je u systému GLONASS řešena pro GNSS spíše netypicky, pomocí frekvenční modulace (FDMA), což znamená, že každá družice vysílá stejné kódy na své vlastní nosné frekvenci. Jednotlivé frekvence jsou definovány podle vzorců:

$$L1(n) = 1\,602,0 \text{ MHz} + n \cdot 0,56250 \text{ MHz}$$

$$L2(n) = 1\,246,0 \text{ MHz} + n \cdot 0,43750 \text{ MHz} \quad (L2 = L1 \cdot 7/9)$$

$$L3(n) = 1\,201,5 \text{ MHz} + n \cdot 0,42195 \text{ MHz} \quad (L3 = L1 \cdot 3/4)$$

kde $n = -7$ až 6 (od roku 2005). Původní rozsah byl $n = 1$ až 24 , ale z důvodu rušení důležité radioastronomické frekvence byla vyšší frekvenční pásma opuštěna.

Protože je satelitů více, než frekvenčních kanálů, využívají stejné kanály protilehlé satelity, u kterých nehrozí vzájemné rušení, jelikož nemohou být nikdy z jednoho bodu viditelné současně.

Navigační signál **standardní přesnosti** (Standard Precision Service, SP) byl dříve vysílán pouze na nosné frekvenci L1, ale s modernizací systému (družice Uragan-M) se začal vysílat i na frekvenci L2, což umožnilo zavádění ionosférických korekcí. Je obdobou C/A kódu u systému GPS, avšak vysílá se s přibližně poloviční frekvencí (0,511 MHz), což znamená menší přesnost u kódových měření.

Navigační signál **vysoké přesnosti** (High Precision Service, HP) byl od začátku vysílán na obou nosných frekvencích a oproti SP s desetkrát vyšší frekvencí (5,11 MHz). Tato služba však nebyla nikdy kódována jako P-kód u GPS a nepředpokládá se, že by se tento stav v budoucnosti změnil. Definice HP však nikdy nebyla uvolněna pro komerční použití a je k dispozici pouze akademické obci a ruským ozbrojeným silám.

Navigační zpráva je dlouhá 7 500 bitů a její odvysílání trvá 2,5 minuty. Je rozdělena do pěti třiceti sekundových rámců, které se dělí na patnáct podrámců. V navigační zprávě nalezneme informace o efemeridách, posunu hodin družice vzhledem k systémovému času GLONASS a k UTC, korekce družicového času na čas GLONASS, kalendářní číslo dne v rámci čtyřleté periody, číslo družice v systému, příznak stavu družice a almanach. Informace o efemeridách a posunu hodin družice jsou obsaženy v každém rámcu, opakují se tedy každých 30 sekund.

Almanach obsahuje informace o všech družicích v systému včetně jejich Keplerovských dráhových parametrů, hrubých korekcí hodin všech družic a příznak stavu pro každou družici. Příznak stavu se může měnit buď automaticky, kdy ke změně stavu dojde do jedné minuty od detekce problému, anebo na základě příkazu z pozemní řídicí stanice. [16]

Frekvence L1 a L2 jsou dostupné od počátku systému, frekvence L3 je plánována pro použití v satelitech třetí generace (Uragan-K) a novějších. Další plánovanou frekvencí

je L5, což má být signál typu Safety of Life. Má podporovat modulaci CDMA a zajistit tak interoperabilitu s dalšími GNSS systémy (GPS, Galileo) stejně tak, jako frekvence L1CR.

3.2.2. ŘÍDÍCÍ A KONTROLNÍ SEGMENT

Pozemní segment je rozložen především v oblasti bývalého Sovětského svazu, což znamená značnou nevýhodu systému, kdy družice nemohou být pod kontinuální kontrolou monitorovacích stanic a může tak docházet ke zhoršení přesnosti při výpočtu efemerid. Do budoucna se však počítá s rozšířením jak monitorovacích stanic do dalších částí světa, tak nahrávacích stanic pro přenos informací zpátky k družicím. Nové stanice mají vzniknout např. na Antarktidě.

Stejně jako u systému GPS monitoruje kontrolní segment stav satelitů, zasílá povely družicím, počítá efemeridy a korekce pro družicové hodiny a dvakrát denně posílá k družicím obnovenou navigační zprávu.



Obr. 3-11: Rozmístění kontrolního a řídicího segmentu systému GLONASS [14]

Segment se skládá z řídicího střediska (System Control Center, SCC) v Krasnoznamensku nedaleko Moskvy, sítě pěti povelových stanic (Telemetry, Tracking and Command/Communication, TT&C), centrálních atomových hodin v Šelkovu nedaleko Moskvy (Central Clock, CC), dále ze tří nahrávacích stanic (Uplink Station, ULS a Control Center, CC), dvou stanic pro satelitní laserovou lokaci (SLR) a sítě deseti monitorovacích stanic (Monitor Station, MS). [17]

3.3. GALILEO

Evropský program pro satelitní navigaci byl oficiálně zahájen 19. 7. 1999 z podnětu Evropské komise, která ho vyvíjí společně s Evropskou kosmickou agenturou (ESA). Je pojmenovaný po italském astronomovi Galileo Galileovi. Hlavním důvodem budování

nového systému GNSS je jeho nezávislost jak na americkém GPS, tak na ruském systému GLONASS, které mají pod správou armády těchto zemí, a tak může dojít k jeho neočekávanému vypnutí v průběhu válečných konfliktů. Galileo je proto primárně určen pro civilní využití.

První experimentální družice pojmenované GIOVE-A byla vypuštěna z kazašského kosmodromu Bajkonur v roce 2005 a druhá družice, GIOVE-B, v roce 2008.

3.3.1. KONCEPCE SYSTÉMU GALILEO

Galileo bude složen celkem ze tří složek, a to z globální, regionální a lokální. **Globální složka** bude obsahovat vesmírný segment složený z družic a pozemní segment tvořený dvěma řídicími centry.

Plný operační systém (FOC, Full Operational Capability) bude tvořit celkem 30 družic – 27 operačních a 3 záložní, které budou obíhat po kruhových oběžných drahách vzájemně vůči sobě posunutých o 120° na střední oběžné dráze Země ve výšce 23 222 km. Každá dráha bude svírat s rovinou rovníku úhel 56° , což umožní navigovat až do míst ležících na 75° zeměpisné šířky, a bude v ní umístěno devět družic + jedna záložní. Aktivní satelity budou v oběžné rovině rozmístěny rovnoměrně po 40° . Doba oběhu bude zhruba 14 hodin a satelity vždy po deseti dnech zopakují stejné rozmístění. Během těchto deseti dnů oběhne každá družice Zemi celkem sedmáctkrát. FOC stav se předpokládá na přelomu let 2019 a 2020. [19]

První dvojici satelitů vyslala ESA v říjnu 2011 a další dva v srpnu 2012, což znamenalo dovršení fáze IOV (In Orbit Validation), která umožňuje ověřit technické charakteristiky v reálných podmínkách kosmického prostoru. Důležitým datem pak pro systém Galileo byl 12. březen 2013, kdy došlo k zaměření prvního cíle na zemském povrchu s přesností 10 až 15 metrů. [18]

Regionální složka se bude skládat z několika Externích regionálních integrovaných systémů (External Region Integrity Systems, ERIS), které budou zajišťovat hlášení o integritě systému nezávisle na hlášení systému Galileo a budou vytvořeny, spravovány a provozovány soukromými společnostmi nebo státy, či skupinami států mimo EU. [19]

Poslední, **lokální**, složka má sloužit pro zkvalitnění příjmu signálu v problematických lokalitách a má být spravována soukromými společnostmi.

3.3.2. STRUKTURA SIGNÁLŮ A POSKYTOVANÉ SLUŽBY

Každá Galileo družice bude vysílat celkem deset různých navigačních signálů v rozmezí 1 200 – 1 600 MHz, díky čemuž bude moct systém nabídnout pět různých druhů služeb:

- **Základní služba** (Open Service, OS) bude využívat signály na nosné vlně $E1 = 1\,575,42$ MHz, E5a a E5b. Podle typu přijímače se pak bude odvíjet

přesnost v určení polohy (jednofrekvenční/dvoufrekvenční nebo dokonce třífrekvenční služba). Služba bude poskytována zdarma.

- **Komerční služba** (Commercial Service, CS) přidává k OS další dva signály o hlavní frekvenci 1278,75 MHz, které budou chráněny komerčním kódováním – přijímač bude muset znát přístupový klíč pro využití služby.
- **Služba „kritická“ z hlediska bezpečnosti** (Safety of Life service, SoL) využívá signály služby OS a navíc data o integritě – uživatel bude během deseti sekund varován, že dochází k nedodržení garantovaný limitů systému.
- **Vyhledávací a záchranná služba** (Search and Rescue service, SAR) je služba nouzové lokalizace v rámci celosvětové družicové záchranné služby COSPAS-SARSAT, která umožňuje obousměrnou komunikaci.
- **Veřejně regulovaná služba** (Public Regulated Service, PRS) bude realizována dvěma šifrovanými signály s kontrolovaným přístupem. Budou ji moci využívat pouze subjekty určené státem, např. bezpečnostní složky státu.

Galileo rozlišuje signály obsahující navigační data a signály, které nenesou žádná data. Tyto signály jsou vzájemně fázově posunuty o 90° , což umožňuje jejich oddělený příjem. Modulace signálu byla volena tak, aby nedocházelo k interferenci s ostatními navigačními systémy ve stejném pásmu (signál L1). Modulace má název BOC(1,1). [19]

3.4. METODY URČOVÁNÍ POLOHY

Metody určování polohy můžeme rozdělit podle několika faktorů, které jsou vzájemně kombinovatelné:

- Podle použitých veličin
 - Kódové
 - Fázové
- Podle doby potřebné k získání polohy
 - V reálném čase
 - S následným zpracováním
- Podle režimu pohybu přijímače během měření
 - Statické
 - Kinematické
- Podle způsobu určení polohy
 - Absolutní

- Relativní
- Diferenční

Při měření na polygonu v Tetčicích byla použita relativní statická metoda. Data byla získána při následném zpracování, tzv. postprocessingu, kdy získáváme polohu aparatury až v kanceláři. Souřadnice byly určeny z fázových měření.

V dalších částech diplomové práce tudíž rozeberu pouze ty metody určování polohy, které byly reálně využity a použity při měření.

3.4.1. FÁZOVÉ MĚŘENÍ

Určujeme-li polohu na základě fázových měření, vycházíme z předpokladu, že skutečnou vzdálenost vysílač – přijímač můžeme spočítat vynásobením vlnové délky radiové vlny počtem vlnových délek, které se nacházejí mezi vysílačem a přijímačem v okamžiku měření.

$$R = N\lambda + \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi,$$

kde N je počet celých vlnových délek, λ vlnová délka nosné vlny a $\Delta\varphi$ fázový doměrek.

Jednodušší částí této úlohy je určení desetinné části vlny, kterou umí přijímač určit relativně velmi přesně, složitějším problémem je určení celočíselného počtu vln. Tento počet označujeme jako počáteční celočíselná **ambiguïta** (česky neurčitost). Ta zůstává stejná po celou dobu měření, dokud nedojde k přerušení signálu. Přijímač udržuje její hodnotu a pouze připočítává změny (kladné nebo záporné).

Abychom zkrátili observační dobu, odhadují se ambiguita současně s dalšími parametry z diferencovaných fázových měření. Ambiguita pak řešíme ve třech krocích:

1. Vyrovnáním MNČ určíme hodnoty ambiguit jako reálná čísla (tzv. float řešení)
2. Vyhledáme celočíselné hodnoty ambiguit pomocí vyhledávacích technik a statistických testů
3. Provedeme nové vyrovnání s již celočíselnými hodnotami

Druhý a třetí krok se opakuje do té doby, než se najde řešení s nejmenší směrodatnou odchylkou – testují se charakteristiky přesnosti nejlepšího a druhého nejlepšího výsledku. Pokud získáme řešení se statisticky významným zmenšením variace oproti druhému nejlepšímu výsledku, označujeme toto řešení jako fixované (fixed). Pokud neprokážeme nejlepší řešení, použijí se hodnoty z float řešení.

Pokud dojde k přerušení signálu, dojde k tzv. **fázovému skoku** (cycle slip), kdy přijímač již není schopen počítat vlnové délky, o které se změnila vzdálenost mezi

přijímačem a vysílačem. Přijímač pak musí začít nový cyklus s novou počáteční ambiguitou.

Uvažujeme-li přesnost zpracování signálu v přijímači na 1 – 2 % délky vlny, znamená to, že pomocí fázového měření můžeme určit polohu bodu s přesností na milimetry. [16]

3.4.2. ZÍSKÁNÍ POLOHY PŘI POSTPROCESSINGU

Pokud zpracováváme měření postprocessingem, tzn. následným zpracováním, nezískáváme polohu přijímače v reálném čase, ale až při zpracování v kanceláři, kdy pracujeme s registrovanými měřenými daty. Můžeme pak kombinovat data měřená na různých stanovištích či data z více referenčních stanic.

Pracujeme většinou s daty RINEX pro konkrétní referenční stanici nebo pro virtuální referenční stanici v době našeho měření, která kombinujeme s daty naměřenými v terénu.

3.4.3. RELATIVNÍ ZPŮSOB URČENÍ POLOHY

Relativní (diferenciální) způsob určení souřadnic lze využít jak při kódových, tak při fázových měřeních, kdy měří minimálně dva přijímače současně. Výsledkem je vzájemná poloha těchto dvou přijímačů, tzv. vektor. Jedním z přijímačů je referenční stanice, u které známe přesné geocentrické souřadnice, druhým je rover, jehož souřadnice určíme. Délku základny (baseline) mezi těmito dvěma body pak můžeme určit s přesností na milimetry.

Metoda měření se volí dle účelu měření a v závislosti na požadované přesnosti:

- Statická metoda ($m_p = 3 - 5 \text{ mm}$)
- Rychlá statická metoda ($m_p = 5 - 10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$)
- Stop & Go ($m_p = 10 - 20 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$)
- Kinematická metoda ($m_p = 20 - 30 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$)
- Real Time Kinematic (RTK, $m_p = 30 - 50 \text{ mm}$)

Fázová měření jsou tedy u relativního určování polohy bodu prováděna minimálně dvěma přijímači současně v předem definovaných měřicích intervalech, tzv. epochách (např. každou 1 s, každých 5 s, každých 15 s), vzhledem k několika družicím. Poloha měřených bodů se neurčuje přímým zpracováním dat, ale je vhodné vytvářet lineární kombinace fázových měření. Diferencemi pak můžeme eliminovat určité systematické vlivy.

3.4.3.1. DIFERENCE

Signály z družic procházejí při simultánním pozorování stejnými vrstvami atmosféry, a tudíž můžeme pomocí diferencí snížit vliv troposféry i ionosféry, a tak eliminovat vliv některých společných parametrů v základní rovnici pro fázová měření

$$\varphi_P^D(t) = -f^D \frac{\rho}{c} - f^D \Delta t^D + f_P \Delta t_P + (f^D - f_P)t - N_P^D + \varepsilon_P^D,$$

kde φ je fáze, f je kmitočet (na družici D, v přístroji P), Δt je korekce hodin v čase t.

Diference lze získat následujícími postupy:

- a) rozdíly v pozorování jedné družice více přijímači v jedné epoše
- b) rozdíly v pozorování více družic jedním přijímačem v jedné epoše
- c) rozdíly v pozorování stejné družice na stejném stanovišti v různých epochách [10]

Jednoduché difference (single difference) lze získat mezi fázovými měřeními provedenými dvěma přijímači (koncové body základny) ke stejné družici v jedné epoše. Tyto jednoduché difference pak eliminují vliv chyb hodin družice.

Z jednoduchých diferencí jsou pak počítány **dvojitě difference** (double difference), což jsou rozdíly dvou jednoduchých diferencí. K tomu potřebujeme znát měření provedená současně mezi dvěma družicemi a dvěma přijímači v jedné epoše. V tomto případě se vyloučí z rovnice členy závislé na korekci hodin přijímačů, což je hlavní důvod pro použití dvojitých diferencí fázových měření.

Trojité difference (triple difference) vychází z fázových měření mezi dvěma přijímači a dvěma družicemi ve dvou epochách. Výhodou trojitých diferencí je, že jsou nezávislé na počáteční celočíselné ambiguitě, která zůstává po celou dobu konstantní (nedošlo-li k fázovému skoku). Dále jsou vyloučeny chyby hodin družic a přijímačů. Nevýhodou je ovšem mnohem menší přesnost výsledků, než u jednoduchých či dvojitých diferencí. [10]

3.4.3.2. LINEÁRNÍ KOMBINACE MĚŘENÍ

Další možností, jak zpřesnit měření, je vytvoření lineárních kombinací původních kódových i fázových měření na obou nosných vlnách L1 a L2, což nám umožní vyloučit některé systematické chyby.

Lineární kombinace L3 nebo P3 (L pro fázová, P pro kódová měření) téměř eliminuje vliv ionosférické refrakce a nazývá se **ionosphere-free**. Rozdíl mezi ionosphere-free fázového měření a kódového měření můžeme využít pro detekci vícecestného šíření signálu. Tato kombinace se značí W3, její nevýhodou je však nízká přesnost kódových měření.

Rozdíl fázových nebo kódových měření na nosných vlnách L1 a L2 vytváří lineární kombinaci **geometry-free**, která není ovlivněna chybou hodin přijímače a polohou družice a přijímače neboli jejich geometrií. Tuto kombinaci pak můžeme využít pro určení ionosférických modelů. [10]

3.4.4. STATICKÁ METODA

Při statické metodě měření se poloha bodu určuje vzhledem k referenčnímu bodu, jehož geocentrické souřadnice známe. Musíme pak uskutečnit měření minimálně se dvěma přístroji na dvou bodech v jeden časový okamžik, které tvoří základnu. Může se měřit po dobu několika hodin, ale také několik dní. Jedná se o časově nejnáročnější, ale zároveň nejpřesnější metodu. Využívá se diferencí (jednoduchých, dvojitých i trojitých), jelikož nám umožní určit délku základny až s milimetrovou přesností.

Statická metoda se využívá při budování základních geodetických sítí na velkém území, při národních a kontinentálních měřeních, při sledování tektonických pohybů bodů, pokud jsou opakovaná měření provedena v dostatečně vzdálených časových horizontech, nebo při sledování posunů a přetvoření. Je časově méně náročná a při delších vzdálenostech přesnější, než klasické terestrické sítě.

3.5. ČAS V SYSTÉMECH GNSS

Dnes existují celkem dva základní způsoby odvozování času, jednak z pohybu Země (astronomický čas) a jednak z kmitočtu atomů (atomový čas). Atomový čas však není synchronní s astronomickým časem, jelikož dochází k postupnému zpomalování rotace Země (asi o jednu sekundu za rok). Z důvodu synchronizace byl proto zaveden tzv. **univerzální koordinovaný čas** (Universal Coordinated Time, UTC), který je sledován atomovými hodinami, ale dochází k jeho opravám tak, aby byl v souladu s astronomickým časem. Opravy se provádějí přidáváním přestupné sekundy, pokud přesáhne nesoulad mezi těmito dvěma časy stanovený limit, vždy 30. června nebo 31. prosince.

Všechny výpočty související se systémy GNSS se uskutečňují ve speciálně definovaných časových stupnicích.

3.5.1. ČAS GPS

Systémový čas GPS je označován jako GPST, což je kontinuálně plynoucí čas, který se v periodických intervalech fyzikálně synchronizuje s časem UTC.

$$|GPST - UTC| = n \pm 1 \mu sec,$$

kde n je počet sekundových skoků od 1. ledna 1980. [10]

Základní jednotkou je sekunda času GPS, která je shodná se sekundou Mezinárodního atomového času TAI. Čas GPST nepoužívá přestupné sekundy (vzhledem k astronomickému času) a proto není rozdíl s UTC časem konstantní. K 1. červenci 2012 tvořil rozdíl mezi GPST a UTC 16 sekund [20].

Hodnota GPST se skládá ze dvou částí, a to pořadového čísla GPS týdne w_{GPS} a počtu sekund od počátku GPS týdne t_{GPS} . GPS týdny se počítají od neděle 6. ledna 1980 v 0 h UTC – číslo týdne bylo 0. Další počátky týdnů jsou vždy v 0 h UTC mezi sobotou a nedělí. Vzhledem k omezené délce binárního zápisu ve vysílaných efemeridách skončil 1023. týden 21. srpna 1999 v 24 h UTC a od tohoto data se počítají GPS týdny opět od nuly. K dalšímu přetečení týdnů dojde v noci na 25. května 2019. Tento problém má vyřešit nová verze CNAV navigační zprávy, kde dojde k vyčerpání počítadla jednou za 157 let (viz kapitola 3.1.1.3).

Systémový čas GPST zabezpečuje řídicí segment a vychází z realizace času UTC v Námořní observatoři USA ve Washingtonu. (U. S. Naval Observatory). Každá družice si udržuje pomocí vlastních atomových hodin svůj vlastní čas (kapitola 3.1.1.1). Tyto časy jsou pak sledovány pozemními monitorovacími stanicemi tak, aby rozdíl oproti GPST nepřekročil 1 milisekundu. Navigační zpráva pak obsahuje údaje pro korekci mezi družicovým časem a časem GPST. Tato korekce se vyjadřuje ve formě polynomu 2. stupně:

$$\Delta t_{SV} = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r,$$

kde a_{f0} , a_{f1} a a_{f2} jsou koeficienty z navigační zprávy, t je GPS čas měření, t_{oc} je referenční okamžik pro korekci hodin a Δt_r je opravou relativistického efektu.

3.5.2. ČAS SYSTÉMU GLONASS

Systémový čas GLONASS je označován jako GLONASST a na rozdíl od GPST pracuje s přestupnými sekundami vzhledem k astronomickému času. Jeho rozdíl od UTC nesmí nikdy přesáhnout 3 hodiny a 1 milisekundu.

$$GLONASST = UTC(SU) + 3^h - \tau, \text{ kde } \tau < 1 \text{ ms}$$

Tři hodiny jsou ve vzorci uvedeny z důvodu časového pásma, ve kterém leží Šelkovo (nedaleko Moskvy), kde se nacházejí centrální atomové hodiny a ke kterým se čas GLONASST vztahuje. [21]

3.5.3. ČAS SYSTÉMU GALILEO

Galileo používá systémový čas zvaný GST (Galileo System Time), který je kontrolován Kontrolním centrem ve Fucinu (Itálie) a synchronizován s časem TAI (Mezinárodní atomový čas definovaný pomocí atomové sekundy, nezávislý na rotaci Země, nezavádějí se přestupné sekundy) tak, aby jejich rozdíl nepřekročil 50 ns. Počáteční epocha času GST začala v 0 h UTC, v neděli 22. srpna 1999. [21]

Rozdíl mezi časy GPST a GST je zhruba 50 ns. Nanosekunda je miliardtina sekundy – signál tedy za tuto dobu urazí přibližně 30 cm, což znamená rozdíl v poloze asi 15 m. Abychom mohli oba systémy používat současně, vysílají satelity Galileo informaci o časovém posunu od GPST, což má zároveň pomoci k lepšímu využití systému Galileo v jeho rané fázi, kdy jsou na oběžné dráze pouze čtyři družice. Tento časový posun

se nazývá GPS to Galileo time offset, zkráceně GGTO, a je určen s přesností 5 ns a méně. [22]

3.6. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST

Navigační systémy jsou obecně zatíženy mnoha různými chybami, které snižují přesnost v určení polohy bodu. Chyby mohou být způsobeny například nevhodnou konstelací družic během měření nebo zpožděním signálu při jeho průchodu atmosférou.

Mezi faktory ovlivňující přesnost můžeme zařadit i umělé ovlivňování kvality signálu pomocí kryptografických technik u systému GPS. Tomuto problému jsem se věnovala v kapitole 3.1.1.4.

3.6.1. CHYBY SOUVISEJÍCÍ S DRUŽICEMI

Navigační systémy jsou založeny na principu měření času, který uběhne od vyslání signálu po jeho přijetí. Jedna nanosekunda v nepřesnosti určení času vede k chybě 30 cm v měřené délce satelit – přijímač.

Satelitní hodiny jsou tedy monitorovány pozemními stanicemi, které srovnávají palubní hodiny s hlavním řídicím hodinovým systémem. Zjištěné chyby jsou pak vysílány v navigační zprávě. Přijímač pak odečte chybu satelitních hodin od zjištěného přenosového času a získá tak skutečný čas přenosu.

Další chybou související s družicemi je nepřesné **určení parametrů drah družic**, které ale více ovlivňují výsledky autonomních GNSS měření než výsledky relativních měření.

Pokud zpracováváme dlouhé vektory (stovky km), musíme uvažovat správnou **polohu fázového centra antény**, která se nemusí shodovat s těžištěm antény.

3.6.2. CHYBY VZNIKAJÍCÍ ŠÍŘENÍM SIGNÁLU ATMOSFÉROU

Vzdálenost mezi satelitem a přijímačem se počítá z tranzitního času a z rychlosti světla. Rychlost světla je však závislá na prostředí, kterým signál prochází, a tedy na atmosférických podmínkách. Stejně jako u elektronických dálkoměrů, i u GNSS musíme počítat s vlivem refrakce, protože se elektromagnetické vlnění různě ohýbá a láme. Největší vliv má troposféra a ionosféra a proto mluvíme o troposférické a ionosférické refrakci.

3.6.2.1. TROPOSFÉRICKÁ REFRAKCE

Troposféra je nejnižší a nejhustší vrstva atmosféry sahající do výšky až 18 km na rovníku a 10 km v mírných zeměpisných šířkách. Má stejný vliv na všechny frekvence nosných vln a je stejná pro kódové i fázové měření, jelikož je tzv. nedisperzním médiem pro vlnění až do frekvence 15 GHz.

Vliv troposféry se řeší pomocí modelů (např. model Saastamoinen nebo Hopfieldové), podle nichž se stanovuje, jak musíme upravit pseudovzdálenost, aby nebyla ovlivněna průchodem troposférou. Pokud je družice nízko nad horizontem a průchod signálu troposférou je delší, korekce je větší. Ve vertikálním směru může dosahovat hodnoty 2,3 metru, u družic na horizontu však může být až desetkrát větší.

Troposférická refrakce je dána vztahem

$$\Delta_{trop} = 10^{-6} \int N^{trop} ds,$$

kde N^{trop} je tzv. refraktivita, která je závislá na tlaku, teplotě a vlhkosti atmosféry. $N^{trop} = 10^6 (n - 1)$, kde n je index lomu. [23]

Předpokládá se, že se vliv troposféry vyloučí při vytváření diferencí zejména u kratších vektorů (< 10 km). Její vliv však závisí na mikroklimatu v okolí antény přijímače, a tak se někdy nemusí podařit vyloučit její vliv ani při krátkých vektorech.

3.6.2.2. IONOSFÉRICKÁ REFRAKCE

Ionosféra složená z neutrálního plynu, iontů a elektronů, je ionizovaná část atmosféry významně ovlivňující šíření elektromagnetických signálů. Spodní okraj ionosféry je přes den ve výšce asi 60 km, v noci ve výšce 150 km.

Vliv ionosféry je různý pro různé vlnové délky vlnění, hodnoty korekcí se počítají z obsahu elektronů v ionosféře. Hodnoty můžeme získat modelováním (např. model Klobuchar) anebo přímým měřením (tzv. ionosférická sondáž). Ve dne má ionosféra větší vliv, než v noci, a může způsobit chybu v poloze až 15 metrů podle úrovně sluneční aktivity.

Pro eliminaci vlivu ionosféry se používá právě její rozdílný vliv na jednotlivé nosné frekvence, a proto všechny družice vysílají minimálně na dvou frekvencích. Při vytvoření diferencí se její vliv z větší části vyloučí, abychom jej odstranili úplně, musíme vytvořit vhodnou lineární kombinaci (ionosphere-free, kapitola 3.4.3.2). [10]

3.6.3. CHYBY SOUVISEJÍCÍ S PŘIJÍMAČEM

Jednou z chyb související s přijímačem je chyba hodin. V přijímači nemohou být umístěny atomové hodiny podobně jako na družici jak z důvodu jejich velikosti, tak především z finančních důvodů. Chyba hodin přijímače se tak odstraňuje početně, kdy ve výpočtu figurují čtyři neznámé – tři pro polohu (X, Y, Z) a čtvrtou neznámou je čas hodin přijímače. Abychom mohli vyřešit čtyři neznámé, potřebujeme čtyři rovnice pro výpočet, které nám zajistí měření na čtyři družice současně. [12]

Dalším zdrojem chyb je nepřesná znalost polohy fázových center. Prostorová poloha fázového centra totiž není pro obě frekvence stejná a mění se v závislosti na elevačním úhlu a azimutu družice. Tuto chybu můžeme odstranit kalibrací antény.

3.6.4. CHYBY SOUVISEJÍCÍ S LOKALITOU MĚŘENÍ

Poslední skupinou chyb, které mohou ovlivnit naše GNSS měření, jsou chyby související s místem, kde provádíme observaci. Nejvýznamnější je pak vícecestné šíření signálu, tzv. **multipath**.

Multipath nastane, když GNSS přijímač zpracovává nejen přímo přijatý signál, ale také signál odražený od okolí, např. od objektů s vysoce odrazným povrchem jako jsou kovové a skleněné budovy nebo vodní plochy či vozidla, čímž dochází k chybám při zpracování měření. Riziko multipath je největší u družic, které letí nízko nad obzorem. Proto se doporučuje vyřadit z měření družice, které jsou níže než 15 stupňů nad obzorem.

Existuje několik možností, jak můžeme vícecestnému šíření signálu zabránit:

- Speciální konstrukce antény (anténa typu Choke-Ring, Ground Plates)
- Vhodný výběr stanoviště bez rušivých objektů
- Delší doba observace, kdy dojde ke zprůměrování efektu [23]

3.7. VYJÁDŘENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ

Přesnost měření metodami GNSS můžeme vyjádřit dvěma způsoby – relativně nebo absolutně. Relativní přesnost se vyjadřuje hodnotou $a + b$ ppm, kdy druhý člen je závislý na délce vektoru. Můžeme tak např. vyjádřit přesnost rychlé statické metody jako $10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$. Absolutní přesnost se vyjadřuje pomocí faktoru DOP.

3.7.1. DILUTION OF PRECISION (FAKTOR SNÍŽENÍ PŘESNOSTI)

Přesnost GNSS měření je ovlivněna konfigurací družic v okamžiku měření. Kvalitu konfigurace vyjadřuje tzv. faktor snížení přesnosti neboli DOP, z anglického Dilution of Precision.

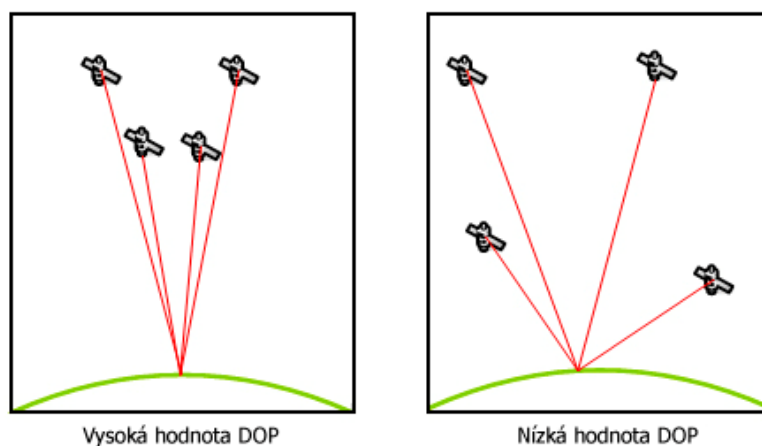
DOP je bezrozměrné číslo, jehož menší hodnota znamená vyšší kvalitu rozložení, a tedy i vyšší přesnost určení pozice. Družice mají mezi sebou větší vzdálenosti a průmět signálu na zemský povrch je pak určen s vyšší přesností. Hodnota DOP se tedy s časem mění a je závislá na počtu pozorovaných družic.

Rozlišujeme několik typů DOP:

- **GDOP** (Geometric Dilution of Precision) – faktor globálního snížení přesnosti, kdy má konfigurace družic vliv na určení všech čtyř určovaných veličin (prostorová poloha a korekce hodin přijímače).
- **PDOP** (Position Dilution of Precision) – faktor snížení přesnosti v určení polohy.
- **HDOP** (Horizontal Dilution of Precision) – faktor snížení přesnosti určení v horizontální poloze.

- **VDOP** (Vertical Dilution of Precision) – faktor snížení přesnosti ve výšce.
- **TDOP** (Time Dilution of Precision) – faktor snížení přesnosti v určení korekce hodin přijímače.

Geometricky si můžeme hodnotu DOP představit na mnohostěnu, jehož hrany jsou tvořeny spojnicemi přijímače s jednotlivými družicemi. Čím je objem mnohostěnu větší, tím menší je hodnota DOP.



Obr. 3-12: Vliv konfigurace družic na hodnotu DOP

3.8. SÍŤ PERMANENTNÍCH REFERENČNÍCH STANIC

Abychom mohli provádět přesná relativní fázová měření, potřebujeme mít k dispozici dva GNSS přijímače, kdy jeden z nich je na známých souřadnicích. Permanentní stanice přijímají nepřetržitě signály z družic GNSS, jsou obvykle vybaveny anténou i přijímačem od stejného výrobce a pomocí ethernet rozhraní připojeny k řídicímu centru.

Jelikož u všech relativních metod určení roste chyba určených souřadnic s délkou vektoru, znamenal by to nutnost vybudovat velmi hustou síť stanic – pro Českou republiku by pak odpovídající počet byl zhruba 200 stanic, které by od sebe byly vzdáleny 20 km.

Řešením toho problému je **síťové řešení**, kdy je do výpočtu zapojeno současně více stanic. V tomto případě pak klesá závislost na vzdálenosti od fyzické referenční stanice a poloze uživatele. Principem síťového řešení je řešení vektorů mezi stanicemi v rámci celé sítě, kdy se vyřeší celočíselné ambiguity a vyčíslí se chybové vlivy. Měřené vzdálenosti se pak o tyto chybové vlivy opraví a vypočtou se rezidua, což jsou rozdíly mezi opravenými a měřenými vzdálenostmi. Rezidua jsou pak interpolována mezi referenčními stanicemi.

Síť referenčních stanic poskytuje služby jak pro řešení v reálném čase, tak pro postprocessing. Data pro postprocessing jsou dodávána ve formátu RINEX a mohou být poskytována jak z reálné, tak z virtuální stanice o zadaných souřadnicích.

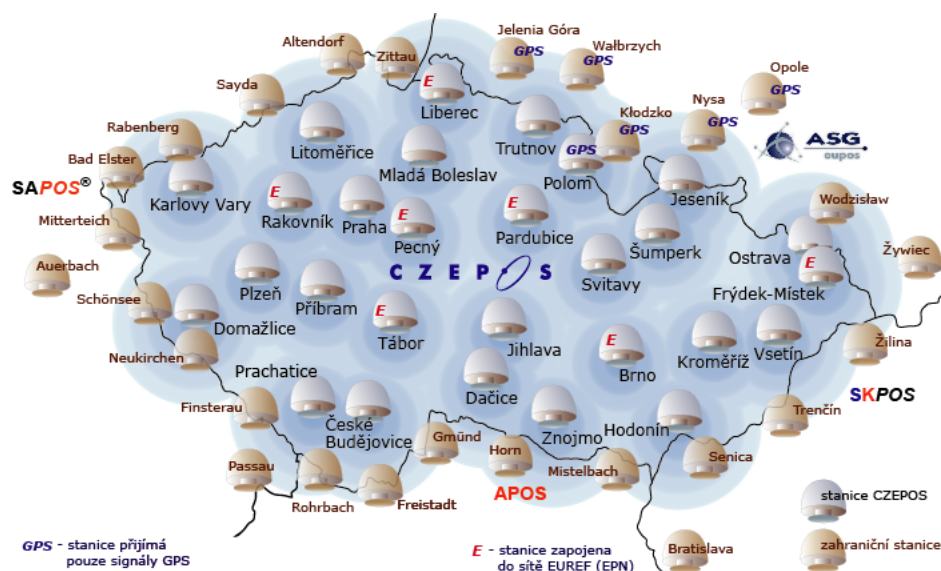
Na území České republiky se můžeme setkat se třemi sítěmi:

- CZEPOS, viz kapitola 3.8.1
- TopNET spravuje firma Geodis Brno. Její počátky spadají do roku 2004, kdy byla zprovozněna první stanice v Brně. V současnosti je do sítě zapojeno 35 stanic – 32 stanic v ČR a 3 stanice z Rakouska. [24]
- Trimble VRS Now Czech spravuje společnost Geotronics Praha, byla vybudována v roce 2009. V ČR se nachází 24 referenčních stanic, do sítě dodává data i 8 stanic Trimble z Německa, pro lepší pokrytí západních Čech. [25]

3.8.1. CZEPOS – ČESKÁ SÍŤ PERMANENTNÍCH STANIC PRO URČOVÁNÍ POLOHY

CZEPOS spravuje a provozuje Zeměměřický úřad (ZÚ) jako součást geodetických základů České republiky. Uživatelům poskytuje korekční data pro přesné určení pozice na území ČR.

Stanice CZEPOS jsou rovnoměrně rozmístěny po celém území republiky ve vzdálenosti asi 60 km. V současné době zahrnuje síť 28 stanic na území ČR (23 stanic umístěných na střechách katastrálních úřadů a pracovišť je ve správě Zeměměřického úřadu (ZÚ), pět stanic spravují vědecká a akademická pracoviště v rámci výzkumné sítě VESOG) a 27 příhraničních stanic státních sítí GNSS sousedních států.



Obr. 3-13: Rozmístění stanic sítě CZEPOS k 22. 4. 2014, czepos.cuzk.cz

Každá ze stanic sítě provádí nepřetržitou 24 hodinovou observaci s intervalem záznamu 1 sekunda. Data pro postprocessing jsou na centrální servery CZEPOS přenášena prostřednictvím zabudovaného ethernet portu v hodinových intervalech formou hodinových souborů. Všechny stanice ve správě ZÚ jsou vybaveny stejnými přijímači

Leica GRX 1200+ GNSS, které dokáží přijímat signál jak z GPS, tak z GLONASSu a jsou připravena pro příjem signálů z družic Galileo. Dále jsou všechny stanice ve správě ZÚ vybaveny anténou Leica AR 25 s prvky Dorne & Margolin, choke ring potlačuje multipath. Antény jsou dále opatřeny ochranným krytem a konstrukce je připojena k hromosvodu budovy. [23]

V rámci dat pro postprocessing poskytuje CZEPOS dvě služby:

- **RINEX s korekcemi GPS+GLONASS** (příp. pouze s korekcemi GPS) – data lze stáhnout z internetových stránek CZEPOS pro zadaný interval měření z předem zvolené stanice CZEPOS.
- **Virtuální RINEX s korekcemi GPS+GLONASS** (příp. pouze s korekcemi GPS) – data lze stáhnout pro zadaný interval měření ve standardním formátu RINEX z virtuální stanice o zadaných souřadnicích, virtuální RINEX se vygeneruje na základě síťového řešení.

3.8.2. DATA FORMÁTU RINEX

Aby mohla být kombinována data z aparatur různých výrobců a nebyli jsme omezeni použitím určitých softwarových prostředků, byl vyvinut jednotný formát dat s názvem RINEX (Receiver INdependent EXchange Format) v ASCII kódování.

První verze RINEX formátu byla přijata v roce 1989 v souvislosti se zpracováním velkých mezinárodních GPS kampaní. V následujícím roce byly provedeny určité změny, a tak vznikla druhá verze – RINEX verze 2. Zatím poslední verze podporující systémy Galileo a Beidou je RINEX verze 3, který je momentálně testován pro nasazení do plného provozu. Momentálně je RINEX používán nejčastěji ve verzi 2.11. [26]

V rámci poslední verze RINEX jsou definovány tři typy souborů:

- Soubor měřených dat
- Soubor vysílaných družicových navigačních dat
- Soubor meteorologických údajů

Každý soubor se skládá z hlavičky (header) a datové části (data session). Hlavička je umístěna na začátku dokumentu a popisuje obsah souboru a údaje, jež zůstávají stejné po celou dobu měření (např. název bodu, typ měřených dat, výška antény, přibližná poloha, parametry stavu ionosféry, rozdíl mezi časy GPST a UTC a další).

Datová část **souboru měření** je rozdělena na bloky, kde nalezneme fázová měření na jedné nebo obou frekvencích a kódová měření pseudovzdáleností pro jednotlivé epochy. Každý blok je uveden řádkem s údaji o datu, času, počtu a PRN přijímaných družic.

V souboru **navigačních dat** nalezneme orbitální data všech přijímaných družic, parametry hodin družic, informaci o zdraví družic a očekávanou přesnost měření

pseudovzdáleností. Obsahuje také veškeré navigační zprávy, které aparatura přijme za dobu měření.

Soubor meteorologických údajů obsahuje hodnoty barometrického tlaku (mb), suché teploty vzduchu (°C) a relativní vlhkost vzduchu (%).

3.9. SOUŘADNICOVÉ SYSTÉMY

Chceme-li pomocí GNSS určovat polohu bodu, musíme nejprve definovat příslušný souřadnicový systém, abychom mohli popsat pohyb družic, zpracovat naměřená data a správně interpretovat výsledky. V GNSS se používají systémy prostorové, pravoúhlé a geocentrické (jejich počátek se nachází v těžišti Země). Souřadnicový systém musí být definován konstantami, algoritmy a referenčním rámcem.

Referenční systém definuje počátek a orientaci základních rovin či os systém a je tak kompletní definicí toho, jak je souřadnicový systém vytvořen. [10]

Referenční rámec je praktická realizace referenčního systému prostřednictvím měření. Tvoří jej sada identifikovatelných základních bodů na nebi (hvězdy, kvasary) nebo na zemském povrchu a je popsán přesnými polohami a rychlostmi základních bodů v dané epoše. [10]

Družicová geodézie využívá dva základní souřadnicové systémy:

- Konvenční inerciální referenční systém sloužící k popisu pohybu družic
- Konvenční terestrický referenční systém k vyjádření poloh bodů

Oficiálním inerciálním referenčním systémem je od roku 1998 International Celestial Reference System (ICRS), jako systém rotující se Zemí, pro vyjádření polohy bodů se téměř výhradně využívá International Terrestrial Reference System (ITRS).

3.9.1. ITRS

ITRS je celosvětový prostorový souřadnicový systém realizovaný souřadnicemi stabilizovaných bodů na celém zemském povrchu, kdy se vzájemný pohyb tektonických desek řeší opakovanými realizacemi (rámci). Tyto rámce se nazývají ITRF (International Terrestrial Reference Frame).

ITRS má počátek ve hmotném středu Země a osu Z totožnou s konvenčním mezinárodním počátkem CIO. Osa X leží v rovině greenwichského poledníku a osa Y doplňuje systém na pravotočivý. Používá elipsoid GRS-80.

ITRF je tvořen množinou bodů s prostorovými kartézskými souřadnicemi a jejich časovými změnami. Těmito body jsou stanice měřící kosmickými metodami GPS, VLBI, SLR nebo DORIS. Do dnešního dne bylo realizováno 12 rámců – poslední nese označení ITRF2008. [27]

Systémy ICRS i ITRS jsou časově proměnné, ale platí mezi nimi převodní vztah. ITRS se mění kvůli jevům jako precese, nutace, pohybu pólů a kontinentů, ICRS zejména kvůli nestálosti kosmických objektů. ICRS je kvůli těmto jevům přesnějším systémem, než ITRS. [28]

3.9.2. ETRS89

European Terrestrial Reference System 1989 je odvozen od ITRS z epochy 1989, kdy byly oba systémy totožné. ETRS89 je však pevně spojen s euroasijskou kontinentální deskou, a tak dochází ke změnám v souřadnicích v řádu milimetrů za rok. Z praktických důvodů nemá konstantní polohu souřadnicových os, ale osy se natáčejí dle pohybu euroasijské kontinentální desky. [28]

V České republice je ETRS89 jedním ze závazných geodetických systémů podle Nařízení vlády ČR č. 430/2006 Sb. V současné době (od 2. 1. 2011 v čase 0 h GMT) je v platnosti nová realizace systému ETRS89 v ČR, a to rámec ETRF2000. Na území ČR se v tuto dobu nachází přibližně 46 tisíc trigonometrických a zhušťovacích bodů se souřadnicemi v ETRS89 v rámci ETRF2000. [30]

3.9.3. WGS84

World Geodetic System 1984 je světově uznávaný geodetický standard, ve kterém pracuje systém GPS, vydaný ministerstvem obrany USA, jež definuje souřadnicový systém, referenční elipsoid a geoid pro užití v geodézii a navigaci. Systém je zároveň standardizovaným geodetickým systémem armád NATO.

WGS84 je pravotočivá kartézská soustava souřadnic se středem v těžišti Země (včetně moří a atmosféry) s přesností cca dva metry. Kladná osa X směřuje k průsečíku rovin základního poledníku a rovníku, kladná osa Z směřuje k severnímu pólu a kladná osa Y je na obě kolmá ve směru doleva. [12]

Byl vytvořen na základě měření více než 1 500 stanic družicového navigačního systému TRANSIT (předchůdce GPS založený na Dopplerově principu) rozmístěných po celém světě. V podstatě je tedy definován jejich souřadnicemi. [16]

Systém WGS84 je pevně spojen se zemí a je definován pomocí primárních a sekundárních parametrů. Primární parametry definují rozměry referenčního elipsoidu, úhlovou rychlost rotace vůči nebeskému referenčnímu systému a součin gravitační konstanty a hmoty Země, soustředěné v referenčním elipsoidu. Sekundární parametry definují model zemského gravitačního pole. [29]

Systém používá zeměpisné souřadnice, kdy jsou jednotlivé body definovány zeměpisnou šířkou, zeměpisnou délkou a výškou. Hodnoty zeměpisné šířky a délky mohou být zapsány ve stupních, ve stupních a minutách nebo ve stupních, minutách a vteřinách včetně desetinného tvaru. Vždy je nutné uvést, zda se jedná o severní či jižní zeměpisnou šířku a východní či západní zeměpisnou délku. Výška je elipsoidická a uvádí se v metrech.

Přesnost geocentrických souřadnic určených v systému WGS84 pomocí systému GPS je charakterizována středními kvadratickými chybami v zeměpisné šířce B a zeměpisné délce L

$$m_B = m_L < 0,4 \text{ m}$$

a v geodetické výšce

$$m_H < 0,5 \text{ m.}$$

Do této chyby je započítána jak odchylka určení počátku souřadnicového systému, tak chyba v určení rozměru sítě a měřické chyby. [29]

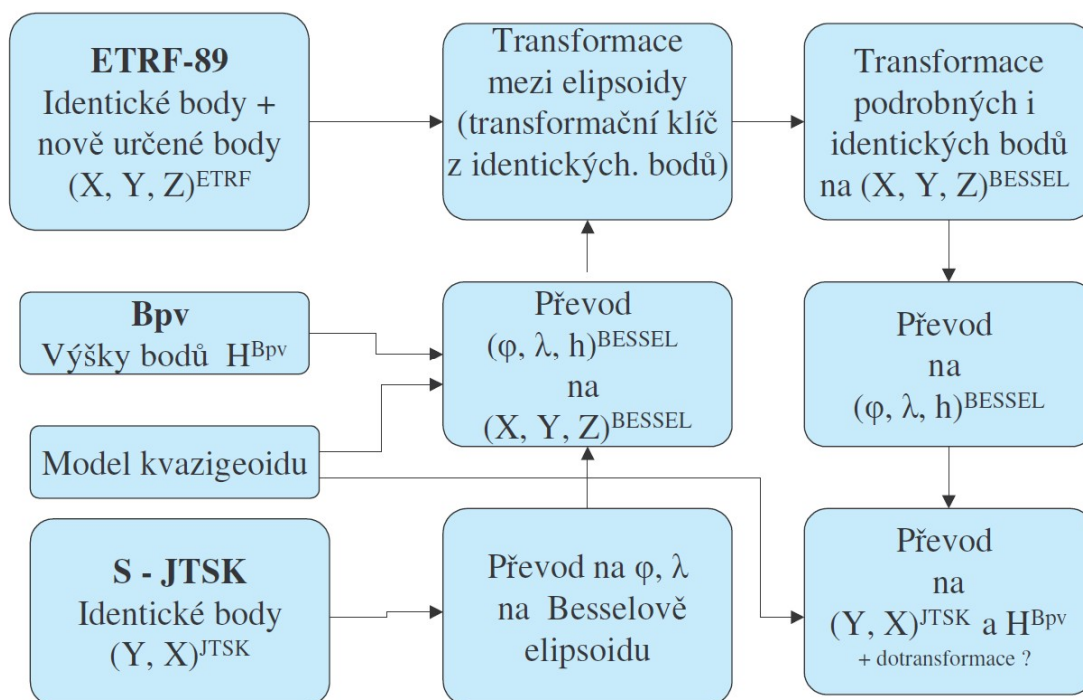
3.9.4. TRANSFORMACE SOUŘADNIC Z ETRS89 DO S-JTSK

Z měření GNSS získáme prostorové souřadnice bodů v geocentrickém prostorovém souřadnicovém systému, jež je vázán na euroasijskou kontinentální desku (ETRS). Pro většinu geodetických prací však potřebujeme znát souřadnice v systému JTSK.

Transformace souřadnic je matematický proces, při kterém dochází k převodu souřadnic z jednoho souřadnicového systému do druhého. Proces je vyjádřen transformačními rovnicemi, tzv. transformačním klíčem. Abychom mohli transformační rovnice určit, potřebujeme znát identické body, což jsou body, u kterých známe souřadnice v obou systémech.

Nejpoužívanějším typem transformace pro převod mezi ETRS89 a S-JTSK s výškou v B_{pv} je prostorová sedmi-prvková podobnostní transformace, známá též jako Helmertova prostorová transformace. Transformační klíč je dán sedmi parametry – třemi posuny, třemi rotacemi a jedním měřítkem. Abychom mohli vyřešit sedm neznámých koeficientů, potřebujeme mít minimálně tři identické body.

Pro výpočet souřadnic bodů můžeme použít tzv. lokální transformační klíč nebo globální transformační klíč. Lokální transformační klíč je určen z identických bodů v blízkém okolí lokality, kde měříme. Parametry globálního transformačního klíče jsou určeny pro celé území státu. Kvůli místním deformacím v S-JTSK je však vhodný spíše pro méně přesné aplikace.



Obr. 3-14: Schéma transformace souřadnic mezi ETRS89 a S-JTSK doplněné o výšky v Bpv [23]

3.10. PROBLEMATIKA URČOVÁNÍ VÝŠEK Z MĚŘENÍ GNSS

Pokud měříme metodou GNSS, získáváme výšky vztažené k referenčnímu elipsoidu měřené po normále. Nadmořské výšky určované v systému Bpv jsou však tzv. normální Moloděnského, jež jsou vztaženy ke kvazigeoidu, což je plocha získaná z gravimetrického, astronomického a nivelačního měření, a jsou měřeny po tížnici.

Abychom mohli správně určit nadmořskou výšku H v Bpv z měření GNSS (elipsoidická výška h), musíme znát odlehlost plochy kvazigeoidu od elipsoidu ζ , která se mění s místem. Platí vztah

$$H = h - \zeta, [23]$$

4. MĚŘENÍ DAT A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

První měření zabývající se Diendorfsko-čebínským zlomovým pásmem byla provedena již v roce 2008. V návaznosti na výsledky první diplomové práce zabývající se tímto tématem, byla oblast shledána jako vhodnou a zajímavou pro opakované etapové měření.

4.1. PŘEDCHÁZEJÍCÍ ETAPY MĚŘENÍ

První měření v tetčické lokalitě provedl na přelomu let 2008 a 2009 Ing. Michal Witiska, jež byl prvním z diplomantů VUT v Brně, který se věnoval Diendorfsko-čebínskému zlomovému pásu.

Ing. Witiska zaměřil profil v kolmém směru na tektonický zlom jak metodou přesné nivelace pro určení vertikálních posunů (čtyři etapy), tak pomocí technologie GNSS pro určení horizontálních posunů (tři etapy). Profil byl vybudován na místní komunikaci podél železniční tratě Brno - Jihlava.

GPS měření však nebylo prováděno na vybudovaných pilířích, jako je tomu v aktuální etapě měření, ale observace byla prováděna na statech na bodech na začátku, konci a uprostřed profilu (101, 102, 105, 106, 109 a 110).

V návaznosti na výsledky diplomové práce Ing. Witisky, který uvádí, že oblast Tetčic je z hlediska pohybových tendencí zajímavá, byla v Tetčicích vybudována síť sedmi měřických pilířů a nivelačních značek jako společný projekt obce Tetčice a Ústavu geodézie, FAST VUT v Brně pro opakovaná nivelační, tíhová a GNSS měření.

V oblasti tak probíhá měření více technologiemi, které se navzájem doplňují. Jako stěžejní je zvolena metoda přesné nivelace, která poskytuje data pro prokázání či neprokázání vertikálních posunů. Přesnou nivelací bylo zaměřeno nejvíce etap, tento akademický rok se jí věnuje kolega Bc. Antonín Staněk, který zaměřil dvě nové etapy.

Tíhová měření prozatím v lokalitě neprobíhala, ať již z důvodu finančního nebo personálního. Teprve v létě roku 2013 byla zaměřena nultá etapa a následně první etapa na jaře 2014 diplomantkou Bc. Katarínou Bitalovou.

Měření technologií GNSS, kterým se zabývá i moje diplomová práce, má za úkol zjištění horizontálních pohybů jednotlivých bodů a zároveň může sloužit jako doplňková metoda pro určení vertikálních deformací. Svojí přesností sice neodpovídá přesnosti přesné nivelace, která je pro sledování vertikálních posunů vhodnější, ale může poskytovat např. informace o trendu posunů jednotlivých bodů a vytvářet tak komplexnější informaci o pohybech v lokalitě.

Nultou etapu na nově vybudovaných pilířích s hloubkovou stabilizací a nucenou centrací pro umístění aparatur GNSS, zaměřil v rámci své diplomové práce Ing. Radek Daniel v roce 2010. Pro měření GPS byla využita statická metoda s dlouhou dobou observace (přibližně 30 hodin). Měření proběhlo celkově na pěti bodech a to P1 (CIST),

P2 (UPOT), P5 (BUČI), P6 (VODJ) a P7 (BAST). Byly vynechány body P3 (URAD) a P4 (TROJ). Jako referenční byla zvolena stanice TUBO nacházející se na střeše FAST VUT v Brně náležící do permanentní sítě referenčních stanic CZEPOS a vědecké sítě VESOG, zhruba 15 km od zájmové lokality. V této etapě tedy došlo k prvotnímu polohovému zaměření pěti pilířů a nemohly být ještě vyhodnoceny pohybové tendence jednotlivých bodů.

První etapu zaměřil Ing. Jiří Dvořák na podzim roku 2010, **druhou etapu** na jaře roku 2011. V první etapě zaměřil body P3, P5, P6 a P7, ve druhé etapě to byly body P2, P4, P5, P6 a P7. Pro měření zvolil jako Ing. Daniel metodu dlouhé statické observace po dobu 24 hodin s připojením na referenční stanici TUBO. U bodů P3 a P4 se jednalo o prvotní určení souřadnic, u bodů P2, P5, P6 a P7 se již daly pozorovat tendence pohybu.

Moje diplomová práce se tedy bude týkat **třetí etapy měření**, jež proběhla v létě roku 2013 na čtyřech pilířích – P2, P4, P5 a P6.

4.2. PILÍŘE PRO MĚŘENÍ TECHNOLOGIÍ GNSS

V lokalitě bylo během let 2009 a 2010 vybudováno celkem sedm betonových pilířů s hloubkovou stabilizací, jež byly osazeny jak nivelačními značkami, tak nucenou centrací pro měření polohy metodou GNSS. Při měření letošní etapy, tzn. v roce 2013, bylo využito celkem čtyř pilířů rovnoměrně rozmístěných v zájmovém území. Pilíře se nacházejí ve velmi exponovaných lokalitách, a proto bylo důležité, aby byla zajištěna jejich obsluha minimálně po dvou lidech u každého z nich.

Pilíř č. 2 – Železniční nádraží (UPOT)

Pilíř je stabilizován zhruba 230 metrů západním směrem od budovy železničního nádraží v blízkosti účelové komunikace vedoucí do Rosic nedaleko vodního zdroje. Poskytuje relativně dobrý horizont pro měření metodou GNSS, jelikož k jeho zakrytí dochází spíše v severním směru v důsledku vzrostlých stromů podél strouhy.

Pilíř č. 4 – Kaple Nejsvětější Trojice (TROJ)

Pilíř č. 4 se nachází již v katastru města Rosice v blízkosti kaple Nejsvětější Trojice, jež stojí na jižním návrší města. Poskytuje panoramatický výhled na celou zájmovou lokalitu. Poloha pilíře zde není zvolena optimálně, jelikož kaple částečně zakrývá SZ obzor a společně s nižší výškou pilíře tak může docházet ke ztrátám některých družic.

Pilíř č. 5 – Bučín (BUČI)

Pátý pilíř je stabilizován v oblasti Přírodního parku Bobrava asi 1,5 km od centra Tetčic a 300 m JJV směrem od vrcholu Bučín. Pilíř se nachází v oboře lesní školky zhruba 20 m od lesní cesty. Vzhledem k zarostlému terénu vlivem náletových dřevin bylo nutné před samotnou observací vysekat jak přístupovou cestu, tak zhruba pětimetrový kruh kolem pilíře k zajištění dobré viditelnosti. Jedná se o nejvýše položený bod.

Pilíř č. 6 – Vodárna (VODJ)

Pilíř č. 6 se nachází v blízkosti velmi frekventované silnice druhé třídy č. 394 spojující ivančický region s dálnicí D1. Z důvodu velkého provozu a malé vzdálenosti od silnice docházelo během observace k různě velkým otřesům od projíždějících automobilů. Od centra Tetčic je vzdálen asi 1 km severním směrem.

4.3. POUŽITÉ PŘÍSTROJE PRO OBSERVACI

Pro observaci byly využity přístroje švýcarské firmy Leica Geosystems AG. Na dvou bodech byly nainstalovány přijímače řady GX1200 podporující jak systém GPS, tak systém GLONASS, na dvou bodech byly starší přístroje řady SR500, které podporují pouze americký systém GPS.

Č. bodu	Kód	Typ přijímače	Typ antény
P2	UPOT	Leica GX1230 GG, v.č. 471631	Leica AT504 GG
P4	TROJ	Leica SR520, v.č. 20733	Leica AT502
P5	BUCI	Leica GX1230 GG, v.č. 466813	Leica AT504 GG
P6	VODJ	Leica SR530, v.č. 20736	Leica AT502

Tab. 4-1: Přehled použitých přijímačů a antén

Přístroje řady GX1200 jsou 72 kanálové přijímače umožňující příjem všech dostupných GNSS signálů, tj. signály systémů GPS, WAAS, EGNOS, MSAT a GLONASS. Pro GPS je vyhrazeno 14 + 14 kanálů, pro GLONASS 12 + 12 kanálů a pro systém SBAS dva kanály. U statické metody uvádí výrobce přesnost pro dlouhé vektory při použití postprocessingu 3 mm + 0,5 ppm v horizontální poloze a 6 mm + 0,5 ppm pro výškovou složku, kde část ppm je závislá na délce vektoru. [34]



Obr. 4-15: GNSS přijímač Leica GX1230 GG s anténou [34]

Data se ukládají na CompactFlash kartu nebo do interní paměti (256 MB) a mohou se ukládat v intervalu od 0,05 do 300 sekund.

Anténa Leica AT504 GG je anténa typu Dorne & Margolin se zlatým eloxovaným choke ringem, jež dokáže přijímat signály z družic GPS a GLONASS. Potlačuje multipath efekt a stabilita fázového centra je lepší než 1 mm. Je vhodná pro přesné práce, zejména monitorování pohybu tektonických desek, zaměrování primární sítě a jako anténa referenčních stanic. [34]



Obr. 4-16: Anténa pro příjem GNSS signálu Leica AT504 GG [34]

Přístroje řady SR500 přijímají signály pouze z družic systému GPS. Přijímač SR530 se liší od SR520 podporou technologie RTK, jinak oba pracují na dvou frekvencích a poskytují celkově 24 kanálů pro příjem (12 + 12). Přesnost pro dlouhé vektory, statickou metodu a při použití standardní antény, udává výrobce 5 mm + 0,5 ppm pro polohu, pro výšky uvádí dvakrát zhoršenou přesnost, tudíž 10 mm + 0,5 ppm. [35]



Obr. 4-17: GPS přijímač Leica SR520 [35]

Data se ukládají v intervalu od 0,1 do 60 sekund na PCMCIA ATA Flash RAM kartu nebo do interní paměti. Anténa Leica AT502 je standardní anténa bez choke ringu pro použití na frekvencích L1 a L2 vyrobená pro použití s přístroji SR520 a SR530.

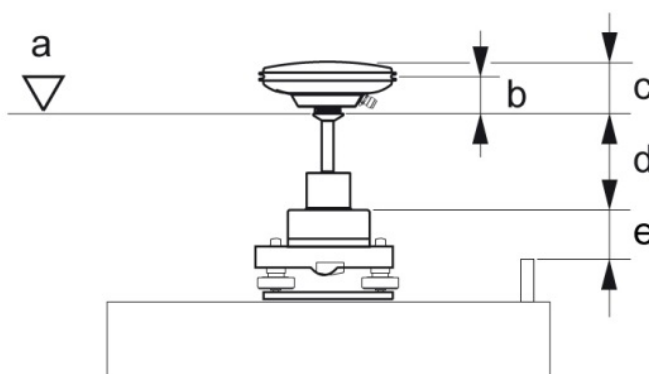
4.4. PRŮBĚH MĚŘENÍ

Začátek měření třetí etapy byl naplánován na pátek 26. 7. 2014 ve 14 hodin. Příjezd na lokalitu byl z důvodu instalování aparatur a seznámení jednotlivých osádek bodů s prostředím stanoven již na 11. hodinu. Body jsou relativně daleko od sebe, a proto bylo nutné přesouvat se mezi nimi osobními automobily, jak před samotným měřením, tak v jeho průběhu, kdy jsem kontrolovala jednotlivé body v rozmezí čtyř až šesti hodin.

Jako první jsme nainstalovali GNSS aparaturu na bod U potoka (UPOT, P2). Měření na tomto bodě bylo spuštěno jako první v 11:45. Dále následoval bod u Kaple Nejsvětější trojice (TROJ, P4), bod na kopci Bučín (BUCI, P5) a jako poslední jsme spustili měření na bodu U vodojemu (VODJ, P6), což bylo v 13:55.

4.4.1. VÝŠKA ANTÉNY

Důležitou částí při instalaci aparatur na jednotlivých bodech, bylo přesné změření výšek antén. Výšku jsme určovali od roxoru zapuštěného v hlavě pilíře k vrchní ploše třínožky pomocí dvoumetru a pravítka, které tvořilo vodorovnou rovinu. K vodorovné ploše třínožky je totiž známa vertikální vzdálenost k bodu MRP (Mechanical Reference Point), což je bod, ke kterému jsou vztaženy vertikální vzdálenosti fázových center antény. Jak se můžeme dočíst v manuálu, u použitých antén je tato vzdálenost 109 mm.



Obr. 4-18: Měření výšky antény [37]

a – rovina MRP, b – vertikální ofset pro fázové centrum frekvence L1, c – vertikální ofset pro fázové centrum frekvence L2, d – známá výška 109 mm z uživatelského manuálu, e – měřená výška antény od roxoru po vodorovnou plochu třínožky

Fázové centrum se pro každou frekvenci nachází na jiném místě. Ve výpočetních softwarech (např. Leica Geo Office) pak bývají hodnoty vzdáleností od bodu MRP k fázovému centru uloženy. Pokud se však nechceme spoléhat jen na tyto hodnoty,

můžeme stáhnout soubor ANTEX s kalibračními údaji pro většinu typů antén z webových stránek National Geodetic Survey. [36]

Do výpočtu pak vstupuje výška antény jako součet námi změřené hodnoty k vodorovné ploše třínožky a známé hodnoty od ní k bodu MRP. Správné hodnota výšky antény je nutná ke správnému vyhodnocení výšky určovaného bodu.

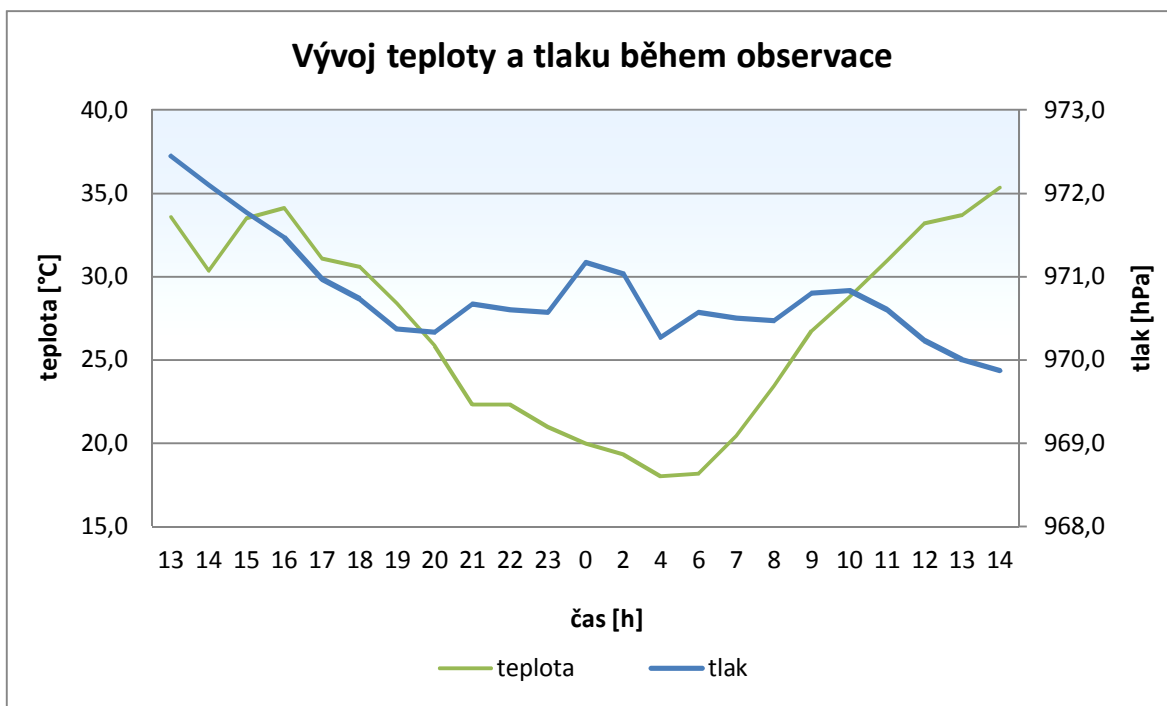
4.4.2. PARAMETRY MĚŘENÍ

Před spuštěním měření jsme na každém z přijímačů nastavili základní parametry měření, jako byl název zakázky, souřadnicový systém a typ antény. Dále název bodu, metoda měření a výška antény. Jedním z nejdůležitějších nastavení byl interval odečtů nastavený na 15 sekund a elevační maska, kterou jsme nastavili na 10°.

Většinu z uvedených nastavení lze upravovat před zahájením postprocessingu ve výpočetním programu, nejdůležitější je tedy správně nastavit elevační masku a interval odečtů.

4.4.3. ATMOSFÉRICKÉ PODMÍNKY

Během měření nebyly zaznamenány žádné srážky a po většinu dne i noci bylo jasno, místy polojasno. Nejvyšší denní teploty stoupaly téměř k 37 °C, naopak nejnižší noční teploty neklesly pod 16 °C. Nejvyšší naměřená teplota byla 36,8 °C v 14:00 v sobotu na bodu U vodojemu, nejnižší teplota byla na všech bodech změřena ve čtyři hodiny ráno. Nejchladněji bylo na bodu U vodojemu, kde jsme naměřili 16,3 °C. Vývoj teploty a tlaku během observace znázorňuje graf 4-1.



Graf 4-1: Vývoj teploty a tlaku během observace

Vysoké teploty napomohly tomu, že nedocházelo k velkému vybíjení baterií. K výměně tak došlo pouze na bodu Bučín (sobota, 6:00), zřejmě z důvodu horšího stavu baterií, a na bodu U potoka, kde se měnily externí baterie (pátek, 15:30) z důvodu kompatibility napájecích kabelů pro záložní zdroj na bodě U vodojemu.

Vlhkost vzduchu nebyla měřena na všech stanoviscích z důvodu rozdílného vybavení, ale z dostupných dat můžeme vyčíst, že se přes den pohybovala mezi 40 až 55 %. Nejvyšší byla kolem čtvrté hodiny ranní, kdy jsme naměřili hodnoty 90 % u kapličky a 96 % na bodě U vodojemu. Atmosférický tlak byl na všech stanoviscích stálý, rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou nepřekročil 2hPa.

Měření bylo ukončeno v sobotu po čtrnácté hodině tak, aby byl na všech bodech zajištěn 24 hodinový observační interval. Nejdřív došlo k současné demontáži na bodech U vodojemu a Trojice v 14:01, poté bylo ukončeno měření na bodech Bučín a U potoka. Zápisníky z měření obsahující naměřené meteorologické údaje, zákres horizontu a náčrt zobrazující, ke kterému bodu je měřena výška antény, můžeme nalézt v příloze č. 3.

4.5. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Dlouhé statické observace se zpracovávají pomocí postprocessingu ve výpočetních softwarech. Většina výrobců GNSS aparatur vyvíjí i svůj vlastní software pro zpracování měření. Tento software pak zajišťuje plnou kompatibilitu s naměřenými daty, ale dají se v něm samozřejmě zpracovávat data i z aparatur jiných výrobců či data formátu RINEX. Většina těchto softwarů pak nenabízí pouze zpracování GNSS měření, ale umožňují zároveň zpracovávat i data z nivelačního měření či data z totálních stanic a provádět vyrovnání sítě.

Mimo komerční programy je Astronomickým institutem Univerzity v Bernu vyvíjen vědecký program Bernese využívaný hlavně vědeckými ústavami pro zpracování dlouhodobých kampaní.

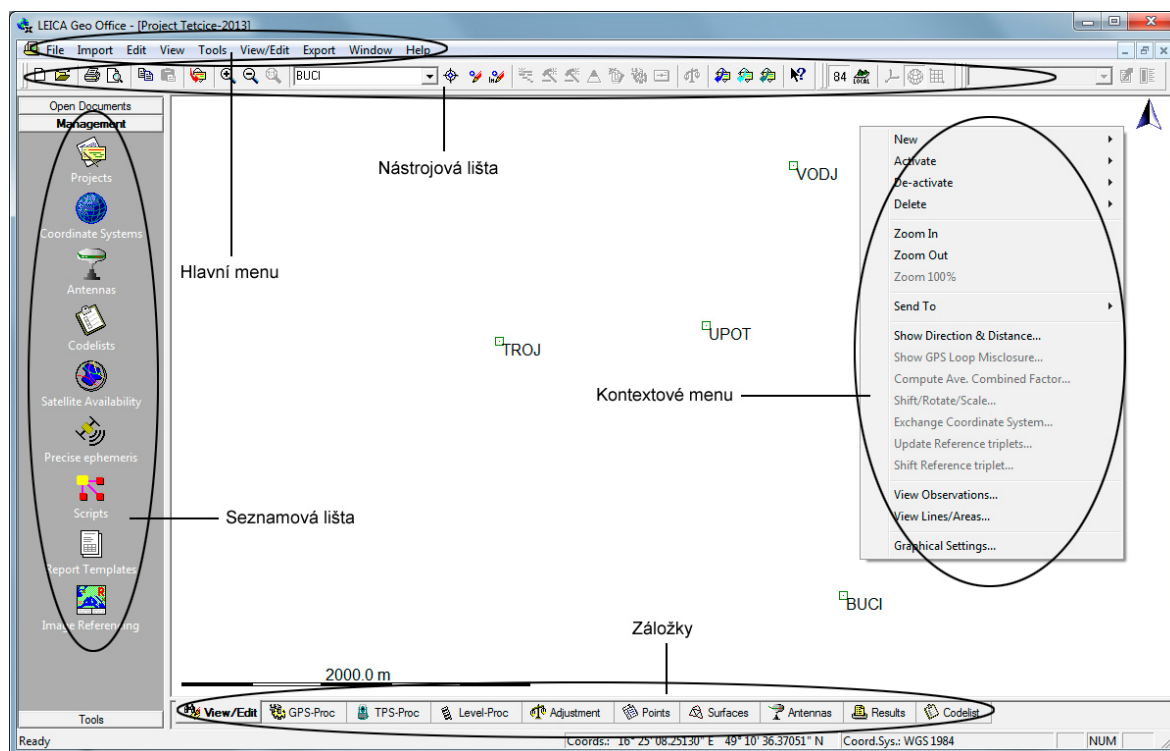
Data ze všech etap měření v Tetčicích byla zpracována v programu Leica Geo Office (LGO) od firmy Leica Geosystems AG, který je nainstalovaný v počítačových učebnách Ústavu geodézie a se kterým jsme byli seznámeni v rámci výuky.

LGO je kompletní balík programů, které umožňují jak zpracování dat po měření, tak podporu měření v reálném čase, správu dat a plánování měření. LGO tedy umožňuje zpracovat naměřená data až do finální podoby ve formě souřadnic určených bodů.

4.5.1. POSTUP ZPRACOVÁNÍ V LEICA GEO OFFICE

Do LGO lze importovat data v širokém množství formátů – od interních formátů firmy Leica, jež se s každou novou řadou GNSS přístrojů mění, tak formát RINEX, GSI nebo přesné efemeridy.

Uživatelské rozhraní programu se skládá z hlavního menu, nástrojové lišty, seznamové lišty, což je panel nástrojů a správy v levém sloupci, záložek, neboli programů, a kontextového menu, které se vyvolává pravým tlačítkem myši.



Obr. 4-19: Prostředí programu LGO

Než začneme počítat, musíme založit nový projekt s jedinečným názvem a navolit cestu, kam se projekt uloží. Dále můžeme navolit časové pásmo a maximální odchylku mezi dvěma různými řešeními pro polohu i výšku.

Další částí výpočtu je import dat. Data z aparatur byla nahrána v surovém formátu Leica („System 1200/GPS900 raw data“ a „GPS500/SR20 raw data“), data ze stanice TUBO ve formátu RINEX. Během import dat, můžeme nastavit, zda se mají sloučit intervaly, pokud došlo k přerušení statických observací nebo pokud máme data z referenčních stanic ve více souborech. Nesmíme zapomenout připojit importovaná data do našeho projektu. Nahráná data se nám pak graficky zobrazí v záložce View/Edit.

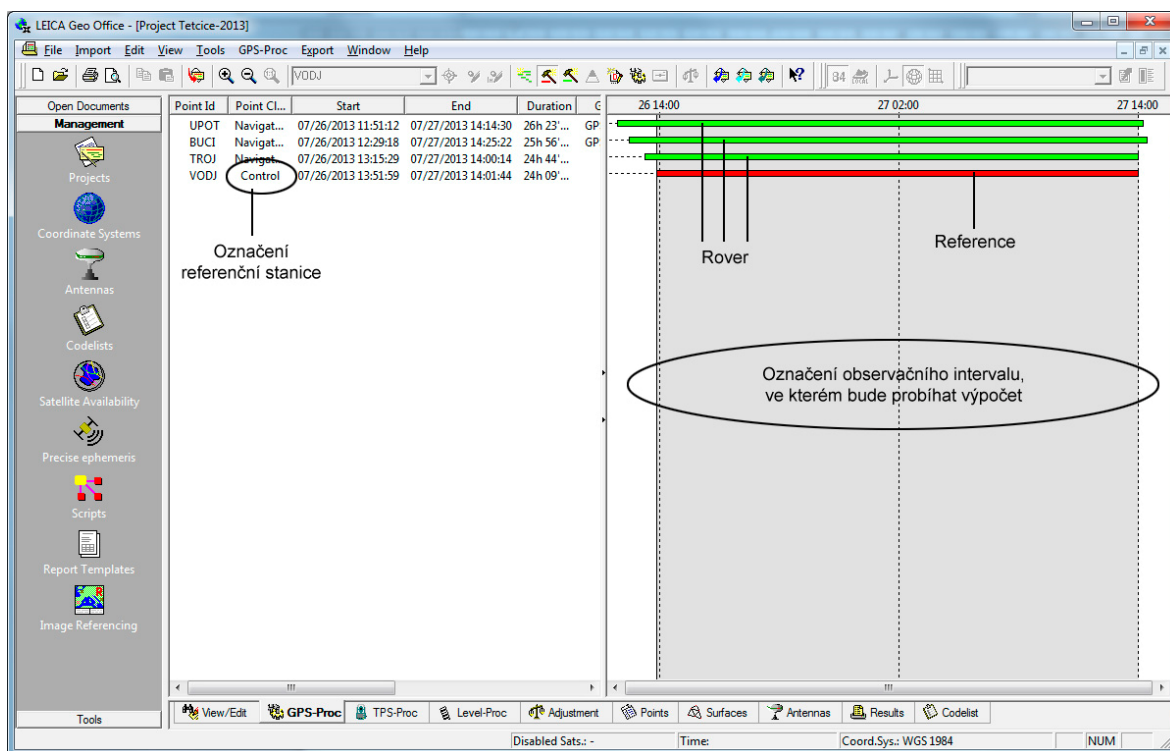
Posledním importem je nahrání přesných efemerid pro družice GPS i GLONASS, jež se dají stáhnout z internetu. Pro můj výpočet jsem použila efemeridy stažené z webových stránek http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html, které se pak ve výpočtu používají namísto efemerid vysílaných.

Dalším krokem je kontrola souřadnic referenční stanice, které jsou výchozím údajem pro všechny vektory. Správné souřadnice můžeme zjistit z webových stránek sítě referenčních stanic, v našem případě ze stránek CZEPOSu (<http://czeapos.cuzk.cz>). Nesmíme zapomenout nastavit třídu tohoto bodu jako Fixed (pevný). Vzhledem k faktu, že

výsledné souřadnice budeme chtít v ETRS89, nastavíme typ souřadnic Geodetic (geodetické) a zkontrolujeme tedy zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku a elipsoidickou výšku.

Pro přesné výpočty je nutné mít v programu hodnoty pro kalibraci antén. Těmito údaji jsou definice referenčního bodu antény, odsazení fázových center L1/L2, vzdálenost mezi referenčním bodem antény a místem měření výšky antény a korekční tabulka, která zobrazuje pohyby fázových center v závislosti na výškovém úhlu a azimutu družice. Pro všechny antény Leica jsou v LGO tyto hodnoty přednastaveny, popř. je můžeme vložit ručně či nahrát pomocí souboru ANTEX.

Po přípravě dat můžeme přistoupit k samotnému výpočtu vektorů, kdy určíme přesný relativní vztah mezi referenční stanicí a rovery. Po kliknutí na záložku GPS-Proc vidíme v levé části okna body, na kterých jsme observovali a v pravé části okna vidíme proužky, jež korespondují s časovým intervalem observace. Pokud je proužek šedý, obsahuje observační interval data pro postprocessing (v opačném případě by byl bílý). Nyní musíme určit referenční stanici, která nám délkou své observace určí interval, ve kterém se mohou počítat vektory. Referenční stanici určíme vybráním položky „Reference“ z kontextové nabídky, proužek se pak zbarví červeně. Ostatní body určíme jako „Rover“, jejich proužky budou zelené.



Obr. 4-20: Záložka GPS-Proc programu LGO

Důležitou součástí výpočtu je nastavení jeho parametrů v „Data processing parameters“. Na záložce General zaškrtneme „Show advanced parameters“, abychom mohli nastavit více parametrů.

Jelikož se jedná o etapové měření, bylo nutné spočítat novou etapu se stejnými parametry jako v předchozích etapách.

- Cut-off angle: 10° (data ze satelitů, které jsou pod tímto úhlem, nejsou zahrnuta do výpočtu)
- Ephemeris: Precise (vznikají post-processingem, k dispozici s asi 14 denním zpožděním, používají se pro přesné a vědecké práce)
- Solution type: Automatic (vybírání nejlepší dostupná fázová a kódová data do výpočtu)
- Frequency: L1/E1 a L2
- Tropospheric model: Hopfield
- Ionospheric model: Automatic

Po dokončení výpočtu, který spustíme tlačítkem „Process“ se nám automaticky otevře záložka „Results“, kde vidíme, zda byly vyřešeny ambiguity. Pokud ano, uložíme spočítané body pomocí „Store“ z kontextové nabídky. Pokud by ambiguity vyřešeny nebyly, museli bychom pomocí funkce „Analyze“ otevřít grafy odchylek, kde bychom mohli zjistit, která družice dodávala špatná data, např. kvůli překážce. V našem případě proběhl výpočet korektně, ambiguity byly vyřešeny na všech určených bodech. Následně si můžeme zobrazit jak souhrnný protokol, tak protokoly pro jednotlivé vektory. Nalezneme je v adresářové struktuře projektu ve složce „Protocol“. Výsledné protokoly třetí etapy jsou uvedeny v elektronických přílohách č. 4 a č. 5.

4.6. VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ GNSS MĚŘENÍ

Vzhledem k faktu, že měření v lokalitě probíhají a nadále by měla probíhat etapově dalších několik let, jsou výsledky prezentovány v souřadnicovém systému ETRS89 v prostorových souřadnicích, aby nebyly zatěžovány dalšími nepřesnostmi, např. z transformace do S-JTSK, a aby nebylo nutné zohledňovat pohyb euroasijské desky, na kterou je vázaný celosvětový systém WGS84.

Pokud určíme polohu bodu pomocí relativního určení, musíme brát v potaz fakt, že přesnost souřadnic závisí na délce vektoru. Proto je nutné počítat výsledky jednotlivých etap ke stejným referencím, jako byly použity v předchozích měřeních, abychom zajistili homogenitu výsledků. Výsledky jsou tedy vztaženy jednak k referenční stanici TUBO, která je vzdálena asi 15 km od lokality a která byla použita ve všech etapách měření a zajišťuje tak určení polohy bodů ve vztaženém souřadnicovém systému, a jednak na jeden z bodů sítě, kdy můžeme určovat relativní vztahy mezi jednotlivými body.

4.6.1. TŘETÍ ETAPA, 26. – 27. 7. 2013

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné souřadnice pilířů ve třetí etapě počítané z referenční stanice na bodu TUBO.

ETAPA 3	č. bodu	název bodu	φ		λ		H_{el} m	
			°	'	°	'		
	P2	UPOT	49	10	22,98681	16 24	22,82607	340,4502
	P4	TROJ	49	10	20,09742	16 23	24,15874	399,1852
	P5	BUCI	49	09	33,08524	16 25	01,65918	480,5432
	P6	VODJ	49	10	52,65775	16 24	47,40992	406,2798

Tab. 4-2: Výsledné souřadnice měřených bodů, reference TUBO

Abychom zjistili, zda má měření potřebnou přesnost, i když počítáme 15 km dlouhé vektory, je vhodné spočítat souřadnice i z kratších vektorů. Toho docílíme tak, že referenční stanici zvolíme na jednom z bodů sítě. Tento bod bude mít nastavené pevné souřadnice, které jsme vypočetli z řešení na bodu TUBO. V tomto případě jsem použila jako pevný bod VODJ, protože jsou k němu známy výsledky i z první a druhé etapy zaměřené Ing. Dvořákem a na bodu BAST, který použil Ing. Daniel, nebylo měřeno.

ETAPA 3	č. bodu	název bodu	φ		λ		H_{el} m	
			°	'	°	'		
	P2	UPOT	49	10	22,98674	16 24	22,82613	340,4471
	P4	TROJ	49	10	20,09734	16 23	24,15866	399,1830
	P5	BUCI	49	09	33,08512	16 25	01,65922	480,5446
	P6	VODJ	49	10	52,65775	16 24	47,40992	406,2798

Tab. 4-3: Výsledné souřadnice měřených bodů, reference VODJ (P6)

Jelikož se bod VODJ nachází v zájmové lokalitě, délka vektorů na další měřené body je krátká (nejvíce 2,5 km na bod BUCI) a tudíž mají takto spočítané souřadnice vyšší vnitřní přesnost. V následující tabulce jsou vypočítány rozdíly souřadnic z řešení TUBO a z řešení z bodu VODJ.

P6 - TUBO				
č. bodu	název bodu	φ "	λ "	H_{el} m
P2	UPOT	-0,00007	0,00006	-0,0031
P4	TROJ	-0,00008	-0,00008	-0,0022
P5	BUCI	-0,00012	0,00004	0,0014
P6	VODJ	0,00000	0,00000	0,0000

Tab. 4-4: Rozdíly absolutních souřadnic z referencí VODJ – TUBO

Nejvyšší rozdíl určených souřadnic je $-0,00012''$ v souřadnici φ , což je po přepočtu na délkovou míru zhruba 4 mm. Ve výšce se rozdíly pohybují od jednoho do tří milimetrů, což můžeme označit za velmi uspokojivý výsledek s tím, že souřadnice z TUBO jsou v tomto ohledu věrohodné a můžeme je tedy porovnávat s předchozími etapami. Na tomto místě připomenu, že přesnost statické metody při použití dlouhých vektorů je u námi použitých aparatur 3 až 6 mm + 0,5 ppm v poloze a 5 až 10 mm + 0,5 ppm ve výšce.

Samotné zpracování naměřených dat proběhlo bez problémů – na všech bodech a u obou typů řešení byly vyřešeny ambiguity, jež jsou potřeba pro jednoznačné určení přesné polohy (viz kapitola 3.4.1.). Ukazatel GDOP se na bodech BUCI a UPOT, kde byly použity antény s choke-ringem pro omezení efektu multipath a kde byly přijímány signály jak z družic GPS, tak z GLONASS, pohyboval mezi 1,1 až 4,8. Na bodu VODJ byl tento ukazatel horší, nejhorší hodnotou bylo 8,5. Nejhorší faktor DOP byl zaznamenán na bodu TROJ, kde dosáhl až hodnoty 25,3, což mohlo být způsobeno jednak použitím antény bez choke-ringu, tak použitím antény a přijímače pouze s podporou systému GPS a dalším, dosti výrazným vlivem, byla ne úplně vhodná poloha bodu, kdy dochází k zakrytí severozápadní části obzoru kapličkou a severovýchodní části obzoru vzrostlým stromem. Bez překážek byla pouze jižní část mezi azimuty 60° a 170° . Z tohoto důvodu bych doporučovala, aby se v dalších etapách měření používala na bodu TROJ anténa podporující GPS i GLONASS pro větší pokrytí signály z družic a anténa s choke-ringem pro omezení multipath efektu. 24 hodinová observace však poskytuje velký prostor pro dostatečnou změnu konfigurace družic a tím pádem dostatek dat pro přesné určení polohy bodu, kdy jsou eliminovány systematické chyby působící v určitých epochách observace.

Výpočetní protokoly pro řešení s referencí na bodu TUBO jsou k dispozici v příloze č. 4, výpočetní protokoly pro referenci na bodu VODJ jsou v příloze č. 5.

4.6.2. POROVNÁNÍ S PŘEDCHOZÍMI ETAPAMI

V předchozích etapách měření byla jako referenční stanice pro výpočet souřadnic bodů v systému ETRS89 zvolena stanice TUBO a výsledky byly počítány i relativně vždy na jeden z bodů sítě pro určení vnitřní přesnosti a relativních vztahů mezi body. Bohužel jsou tyto výsledky nehomogenní, protože v nulté etapě bylo počítáno s referencí na bodě BAST, kdežto v první a druhé etapě byl jako referenční stanice použit bod VODJ. Ve třetí etapě ani nebylo na bodě BAST měřeno.

Ing. Dvořák sice ve své diplomové práci přepočítal výsledky pro referenční stanici na bodě VODJ, ale vzhledem k faktu, že přebírané souřadnice z nulté etapy uvedené v jeho diplomové práci (str. 66, [6]) neodpovídají souřadnicím originálním, uvedeným v diplomové práci Ing. Daniela (str. 65, [5]), nemůžeme se se stoprocentní jistotou na tyto výsledky spoléhat. Rozdíly v souřadnicích uvedené Ing. Dvořákem a Ing. Danielem pro nultou etapu se v φ a λ pohybují mezi $0,00018''$ až $0,00035''$ a ve výšce 46 až 55 mm. Nevěrohodnost výsledků pak dokládá i fakt, že Ing. Dvořák uvádí souřadnice bodu URAD

v nulté etapě (str. 66, [6]), i když na tomto bodě Ing. Daniel měření neprováděl (str. 64 a 65, [5]).

Ing. Dvořák dále neuvádí ve své práci podrobné protokoly z LGO, pouze tzv. Processing summary bez doplňkových dat jako je např. informace o použitém přijímači a anténě, výška antény, délka měření, parametry určovaného vektoru nebo informace o hodnotách DOP či počtu použitých satelitů. Přílohou jeho diplomové práce nejsou originální naměřená data, a proto nemůžeme určit, jak se k výsledným souřadnicím dopočítal, ani proč se jím uváděné souřadnice nulté etapy liší v řádu centimetrů. V textu diplomové práce se o přepočítání souřadnic nezmiňuje.

4.6.2.1. REFERENCE NA BODU TUBO

V následujících tabulkách jsou jako souřadnice nulté etapy uváděny vždy originální souřadnice převzaté od Ing. Daniela. V tabulkách dále uvádím pro přehlednost i body, na kterých se v dané etapě neměřilo. V této části jsou porovnávány souřadnice vypočítané z řešení s referenční stanicí TUBO a jsou zde uvedeny výsledky ze všech dosavadních etap.

ETAPA 0: Jaro 2010, 10. - 11. 4. 2010, Ing. Daniel						
č. bodu	název bodu	φ		λ		H_{el} m
		°	' "	°	' "	
P1	CIST					
P2	UPOT	49 10	22,98693	16 24	22,82666	340,4757
P3	URAD					
P4	TROJ					
P5	BUCI	49 09	33,08532	16 25	01,65989	480,5729
P6	VODJ	49 10	52,65780	16 24	47,41062	406,2968
P7	BAST	49 10	23,35839	16 25	14,30110	349,5713

Tab. 4-5: Výsledné souřadnice nulté etapy zaměřené Ing. Danielem, reference TUBO

ETAPA 1: Podzim 2010, 24. - 25. 9. 2010, Ing. Dvořák					Etapa 1 - Etapa 0				
č. bodu	název bodu	φ		λ		H_{el} m	φ "	λ "	H_{el} m
		°	' "	°	' "				
P1	CIST								
P2	UPOT								
P3	URAD	49 10	13,42393	16 24	21,30522	342,9163			
P4	TROJ								
P5	BUCI	49 09	33,08498	16 25	01,65931	480,5332	-0,00034	-0,00058	-0,0397
P6	VODJ	49 10	52,65752	16 24	47,41010	406,2489	-0,00028	-0,00052	-0,0479
P7	BAST	49 10	23,35801	16 25	14,30055	349,5166	-0,00038	-0,00055	-0,0547

Tab. 4-6: Výsledné souřadnice první etapy zaměřené Ing. Dvořákem včetně porovnání s nultou etapou, reference TUBO

ETAPA 2: Jaro 2011, 16. - 17. 4. 2011, Ing. Dvořák								
č. bodu	název bodu	φ		λ		H_{el} m		
		°	'	°	'			
P1	CIST							
P2	UPOT	49	10	22,98658	16	24	22,82605	340,4197
P3	URAD							
P4	TROJ	49	10	20,09704	16	23	24,15912	399,1977
P5	BUCI	49	09	33,08493	16	25	01,65925	480,5215
P6	VODJ	49	10	52,65753	16	24	47,40992	406,2512
P7	BAST	49	10	23,35804	16	25	14,30038	349,5167

Tab. 4-7: Výsledné souřadnice druhé etapy zaměřené Ing. Dvořákem, reference TUBO

č. bodu	název bodu	Etapa 2 - Etapa 0			Etapa 2 - Etapa 1		
		φ	λ	H_{el}	φ	λ	H_{el}
		"	"	m	"	"	m
P1	CIST						
P2	UPOT	-0,00035	-0,00061	-0,0561			
P3	URAD						
P4	TROJ						
P5	BUCI	-0,00039	-0,00064	-0,0514	-0,00005	-0,00006	-0,0117
P6	VODJ	-0,00028	-0,00071	-0,0456	0,00001	-0,00019	0,0023
P7	BAST	-0,00035	-0,00072	-0,0546	0,00003	-0,00017	0,0001

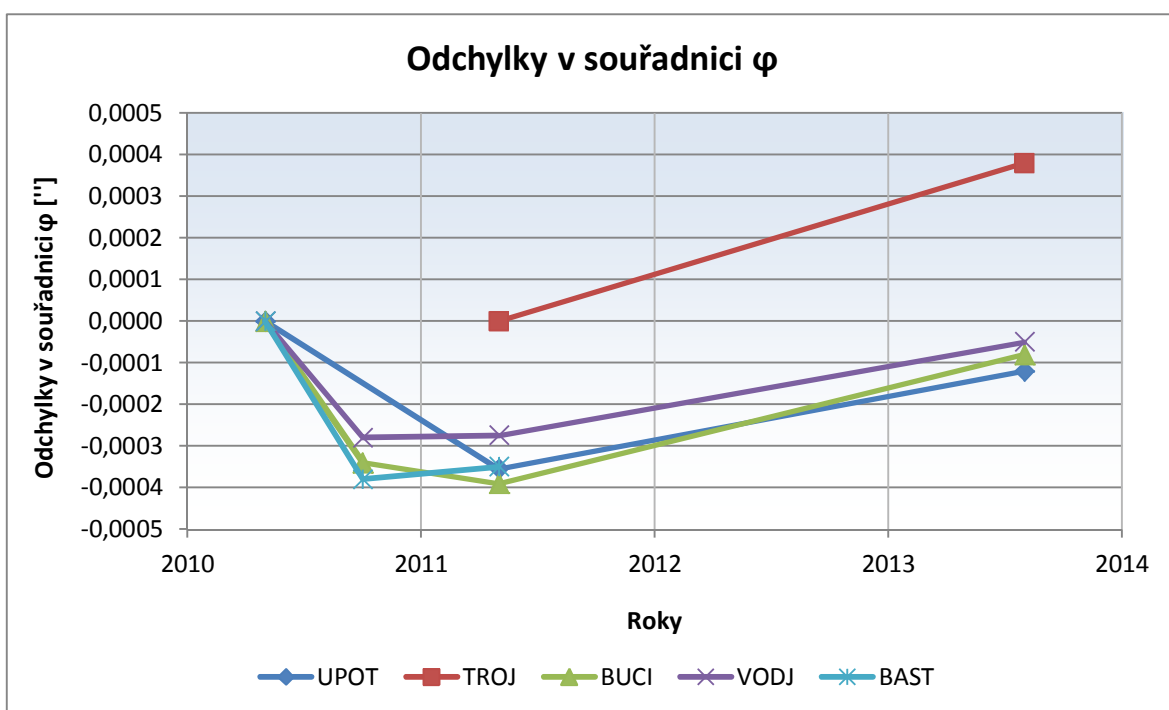
Tab. 4-8: Porovnání druhé etapy s předchozí etapou a nultou etapou, reference TUBO

č. bodu	název bodu	Etapa 3 - Etapa 0			Etapa 3 - Etapa 2		
		φ	λ	H_{el}	φ	λ	H_{el}
		"	"	m	"	"	m
P1	CIST						
P2	UPOT	-0,00012	-0,00059	-0,0255	0,00023	0,00003	0,0306
P3	URAD						
P4	TROJ				0,00038	-0,00038	-0,0125
P5	BUCI	-0,00008	-0,00071	-0,0297	0,00031	-0,00007	0,0217
P6	VODJ	-0,00005	-0,00070	-0,0170	0,00023	0,00002	-0,0286
P7	BAST						

Tab. 4-9: Porovnání třetí etapy s předchozí etapou a nultou etapou

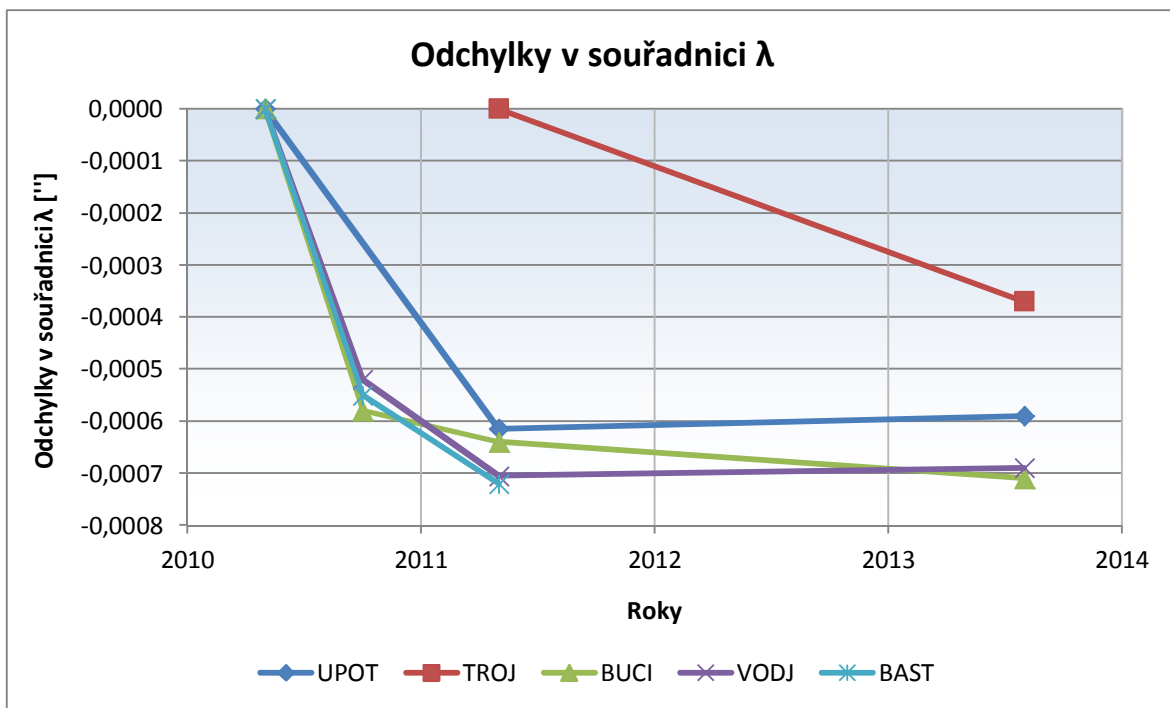
Na většině bodů proběhlo málo měření na to, abychom mohli s jistotou tvrdit, že na bodu dochází k posunům, či mluvit o různých tendencích pohybu. Na bodě CIST dokonce nemáme k dispozici žádná data – bod byl sice měřen v nulté etapě, ale z důvodu výpadku měření jak na CIST, tak na TUBU nebylo možné spočítat jeho souřadnice v ETRS89. Na bodu URAD byly prozatím určeny jen prvotní, vztažné, souřadnice. Bod TROJ byl měřen ve dvou etapách a bod UPOT ve třech. Nejvíce dostupných dat máme z bodů BUCI a VODJ, které byly měřeny ve všech uskutečněných etapách.

Pro lepší ilustraci výsledků jsme zpracovala pohyb bodů pro jednotlivé souřadnice do grafů, které jsou uveřejněny níže. V grafech jsou vyneseny odchylky od nulté etapy měření bodu, jež se nemusí shodovat s celkovou nultou etapou (u bodu TROJ).



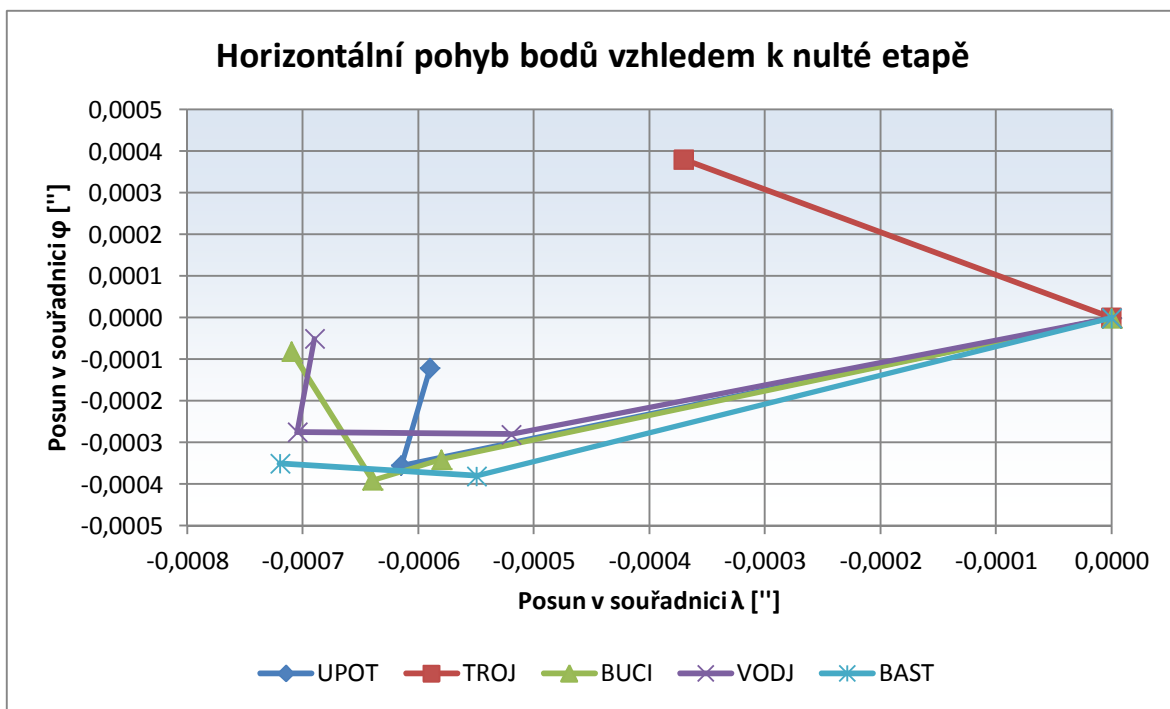
Graf 4-2: Odchylky v souřadnici φ, reference TUBO

Z grafu odchylek v souřadnici φ můžeme vidět, že došlo k většímu posunu mezi nultou a první etapou na všech měřených bodech, kdy největší odchylka byla -0,00038“ na bodu BAST, což je asi 12 mm. Druhá etapa pak nevykazovala prakticky žádné posuny vzhledem k první a ve třetí etapě se body částečně vrátily k souřadnicím z nulté etapy. Z dat vystupuje měření na bodě TROJ, který byl poprvé zaměřen až ve třetí etapě a máme tedy srovnání jen ze dvou měření, ale dle dostupných dat se pohybuje na opačnou stranu, než zbytek bodů, z čehož by se dalo usoudit, že se body nachází na dvou různých geologických celcích, které se pohybují protisměrně. Pro prokázání této domněnky je však třeba pokračovat v etapovém měření, jelikož máme zejména na tomto bodu málo naměřených dat.



Graf 4-3: Odchylky v souřadnici λ , reference TUBO

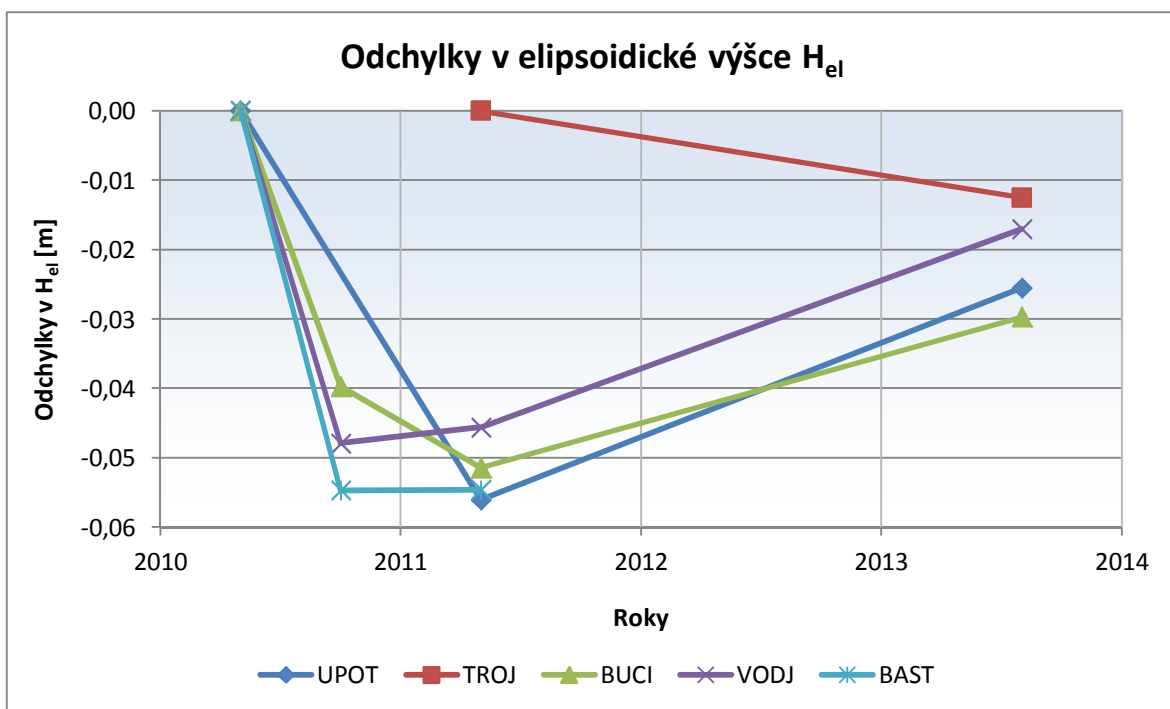
V souřadnici λ mají všechny měřené body podobnou tendenci ve směru pohybu. Opět vidíme větší rozdíl mezi nultou a první etapou (nejvíce -0,00058“ na bodu BUCI, což je 18 mm) a minimální posun mezi první a druhou etapou. Na rozdíl od směru pohybu v souřadnici φ , nedošlo v souřadnici λ téměř k žádnému posunu mezi druhou a třetí etapou. V tomto ohledu opět vystupuje z měření bod TROJ, kde dosahuje posun skoro jednoho centimetru.



Graf 4-4: Horizontální pohyb bodů vzhledem k nulté etapě, reference TUBO

Podíváme-li se na graf horizontální pohybu, který je vytvořen z odchylek v souřadnicích φ a λ od nulté etapy, zjistíme velice podobné tendence pohybu na bodech UPOT, BUCI, VODJ a BAST. Ty se nejdříve pohybovaly směrem na jihozápad (v první a druhé etapě), ve třetí etapě se však body UPOT, BUCI a VODJ pohnuly naopak severním směrem, přičemž se dostaly do téměř stejné pozice v souřadnici φ jako v nulté etapě. Na bodě BAST není měření ze třetí etapy dostupné.

Samotnou kapitolou je bod TROJ, který byl poprvé určen až ve druhé etapě. Z grafu můžeme vidět, že má mezi druhou a třetí etapou podobný směr pohybu jako bod BUCI, tudíž na severozápad a dokonce i stejně velkou odchylku v souřadnici φ mezi dvěma etapami.



Graf 4-5: Odchytky v elipsoidické výšce H_{el} , reference TUBO

Na grafu odchylek elipsoidických výšek je vidět klesající tendence na všech měřených bodech mezi nultou a první etapou a dále téměř žádný posun ve druhé etapě, kromě bodu BUCI, který klesl o více než 11 mm. Tento pokles byl zřejmě způsoben budováním oplocené lesní školky, kdy se v blízkosti pilíře pohybovala těžká technika, i když na bodu nebyly vidět žádné viditelné změny (str. 66, [6]). Ve třetí etapě naopak došlo ke zdvihu bodů UPOT, BUCI i VODJ, kdežto bod TROJ prokazuje mírný pokles. Největší rozdíl mezi druhou a třetí etapou je na bodu UPOT, kde odchylka dosáhla hodnoty 30,6 mm.

GNSS metoda má být pro určování výškových posunů pouze doplňkovou metodou k metodě přesné nivelace. Jelikož však dochází k nivelování pouze bodů v intravilánu obce a pilíře se nachází v jejím extravilánu, nemáme u většiny bodů přímé srovnání. Do nivelovaných profilů bývají zařazeny body UPOT a CIST, u kterého však nemáme

potřebná GNSS data. Bod URAD bývá zařazen do nivelačního měření také, ale zde máme k dispozici pouze jednu etapu GNSS.

Přímé srovnání tedy můžeme provést pouze u bodu UPOT. Dle dat kolegy Staňka, vykázal tento bod mírný zdvih v roce 2011 a dále klesl až o šest milimetrů od nulté etapy v zimě roku 2011. Na jaře 2012 byla jeho odchylka od nulté etapy necelé 2 mm a až do jara 2014 prakticky nevykazoval žádné posuny a držel se na konstantní hodnotě -2 mm od nulté etapy. Podobnou tendenci vykazuje i při určení výšky metodou GNSS, kdy na jaře roku 2011 klesl o 56 mm a následně vykázal zdvih v etapě zaměřené v létě 2013 o 30 mm, což je v součtu -25 mm od nulté etapy.

Pokud srovnáme výškové tendence v globálním měřítku, tak můžeme říct, že i přes odlišnou přesnost GNSS metody a přesné nivelace, se dají pozorovat podobné trendy v pohybu bodů. Všechny body zaměřené nivelací i GNSS vykazují v zájmovém území v dlouhodobém trendu klesající tendenci od nulté etapy.

4.6.3. REFERENCE NA BODU VODJ (P6)

Pokud provádíme etapová měření, můžeme porovnávat nejen souřadnice bodů v závazném referenčním systému, ale můžeme porovnávat relativní vztahy pomocí reference na jednom z určovaných bodů.

Ovšem jak již bylo nastíněno v kapitole 4.6.2, nejsou tyto výsledky homogenní, jelikož nultá etapa byla počítána s referencí na bodě BAST, kdežto první a druhá etapa s referencí na bodu VODJ. Ing. Dvořák následně provedl přepočítání výsledků k referenci na bodu VODJ, ale z již zmíněných důvodů jako je odlišnost souřadnic v nulté etapě, nemůžeme na tyto výsledky stoprocentně spoléhat. Protože nebylo na bodu BAST ve třetí etapě měřeno, jsou výsledky z této etapy vztaheny k bodu VODJ.

V následujících tabulkách tedy uvádím souřadnice převzaté z diplomové práce Ing. Dvořáka (str. 67, [6]) a vypočtené souřadnicové rozdíly k bodu VODJ. Odlišnou barvou řádku je vyznačena referenční stanice VODJ.

Jaro 2010: 10. - 11. 4. 2010, Ing. Daniel					Souřadnicové rozdíly od P6						
č. bodu	název bodu	φ		λ		H _{el} m	Δφ DEG	Δλ DEG	ΔH _{el} m		
		°	'	"	°					'	"
P1	CIST	49	10	10,89737	16	25	06,08674	334,3904	-0,011600	0,005188	-71,8595
P2	UPOT	49	10	22,98673	16	24	22,82631	340,4124	-0,008242	-0,006829	-65,8375
P3	URAD	49	10	13,42400	16	24	21,30534	342,8810	-0,010898	-0,007251	-63,3689
P4	TROJ										
P5	BUCI	49	09	33,08510	16	25	01,65962	480,5130	-0,022103	0,003958	74,2631
P6	VODJ	49	10	52,65760	16	24	47,41027	406,2499			
P7	BAST	49	10	23,35820	16	25	14,30078	349,5013	-0,008139	0,007470	-56,7486

Tab. 4-10: Výsledné souřadnice nulté etapy zaměření Ing. Danielem včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

Podzim 2010: 24. - 25. 9. 2010, Ing. Dvořák					Souřadnicové rozdíly od P6						
č. bodu	název bodu	φ		λ	H _{el}	Δφ	Δλ	ΔH _{el}			
		°	'	"	°	'	"	m	DEG	DEG	m
P1	CIST										
P2	UPOT										
P3	URAD	49	10	13,42394	16	24	21,30527	342,9020	-0,010898	-0,007251	-63,3469
P4	TROJ										
P5	BUCI	49	09	33,08498	16	25	01,65933	480,5182	-0,022103	0,003958	74,2693
P6	VODJ	49	10	52,65752	16	24	47,41010	406,2489			
P7	BAST	49	10	23,35802	16	25	14,30057	349,5014	-0,008139	0,007470	-56,7475

Tab. 4-11: Výsledné souřadnice první etapy zaměřené Ing. Dvořákem včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

č. bodu	název bodu	Etapa 1 - Etapa 0		
		φ	λ	H _{el}
		"	"	m
P1	CIST			
P2	UPOT			
P3	URAD	0,00002	0,00010	0,0220
P4	TROJ			
P5	BUCI	-0,00004	-0,00012	0,0062
P6	VODJ			
P7	BAST	-0,00010	-0,00004	0,0011

Tab. 4-12: Porovnání první a nulté etapy, souřadnicové rozdíly, reference VODJ

Jaro 2011: 16. - 17. 4. 2011, Ing. Dvořák					Souřadnicové rozdíly od P6						
č. bodu	název bodu	φ		λ	H _{el}	Δφ	Δλ	ΔH _{el}			
		°	'	"	°	'	"	m	DEG	DEG	m
P1	CIST										
P2	UPOT	49	10	22,98660	16	24	22,82606	340,4187	-0,008242	-0,006829	-65,8325
P3	URAD										
P4	TROJ	49	10	20,09710	16	23	24,15898	399,1772	-0,009045	-0,023125	-7,0740
P5	BUCI	49	09	33,08494	16	25	01,65928	480,5211	-0,022103	0,003958	74,2699
P6	VODJ	49	10	52,65752	16	24	47,40991	406,2512			
P7	BAST	49	10	23,35804	16	25	14,30044	349,5174	-0,008139	0,007470	-56,7338

Tab. 4-13: Výsledné souřadnice druhé etapy zaměřené Ing. Dvořákem včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

č. bodu	název bodu	Etapa 2 - Etapa 0			Etapa 2 - Etapa 1		
		φ "	λ "	H_{el} m	φ "	λ "	H_{el} m
P1	CIST						
P2	UPOT	-0,00005	0,00011	0,0050			
P3	URAD						
P4	TROJ						
P5	BUCI	-0,00008	0,00002	0,0068	-0,00004	0,00014	0,0006
P6	VODJ						
P7	BAST	-0,00008	0,00002	0,0148	0,00002	0,00006	0,0137

Tab. 4-14: Porovnání druhé etapy s nultou a předcházející etapou, reference VODJ

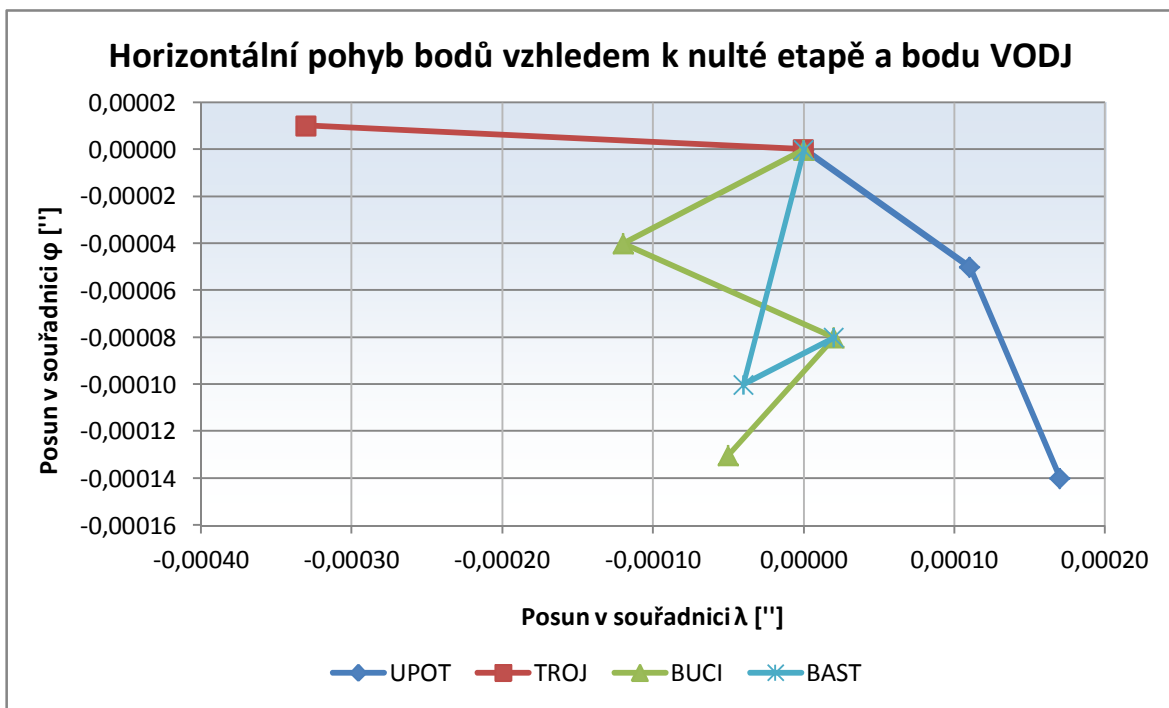
Léto 2013: 26. - 27. 7. 2013					Souřadnicové rozdíly od P6		
č. bodu	název bodu	φ ° ' "	λ ° ' "	H_{el} m	$\Delta\varphi$ DEG	$\Delta\lambda$ DEG	ΔH_{el} m
P1	CIST						
P2	UPOT	49 10 22,98674	16 24 22,82613	340,4471	-0,008242	-0,006829	-65,8327
P3	URAD						
P4	TROJ	49 10 20,09734	16 23 24,15866	399,1830	-0,009045	-0,023125	-7,0968
P5	BUCI	49 09 33,08512	16 25 01,65922	480,5446	-0,022104	0,003958	74,2648
P6	VODJ	49 10 52,65775	16 24 47,40992	406,2798			
P7	BAST						

Tab. 4-15: Výsledné souřadnice třetí etapy včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

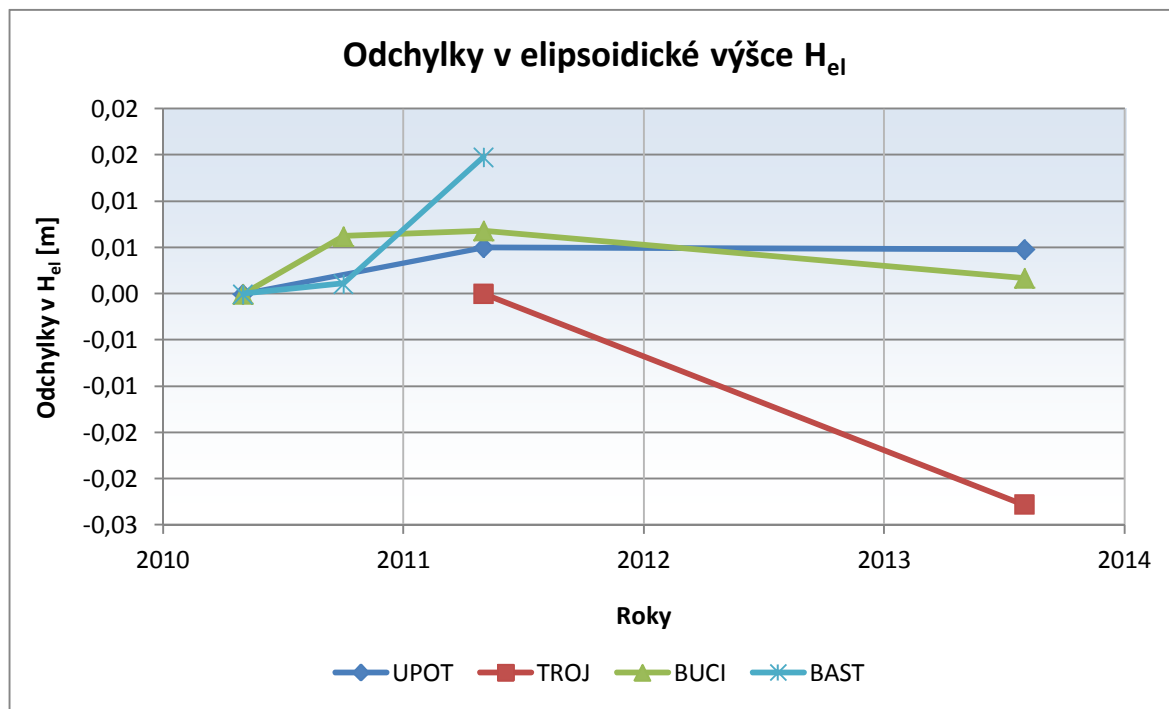
č. bodu	název bodu	Etapa 3 - Etapa 0			Etapa 3 - Etapa 2		
		φ "	λ "	H_{el} m	φ "	λ "	H_{el} m
P1	CIST						
P2	UPOT	-0,00014	0,00017	0,0048	-0,00009	0,00006	-0,0002
P3	URAD						
P4	TROJ				0,00001	-0,00033	-0,0228
P5	BUCI	-0,00013	-0,00005	0,0017	-0,00005	-0,00007	-0,0051
P6	VODJ						
P7	BAST						

Tab. 4-16: Porovnání třetí etapy s nultou a předcházející etapou, reference VODJ

Pro lepší demonstraci výsledků uvádím graf s vyznačením změny polohy jednotlivých bodů a graf se změnou výšky jednotlivých bodů.



Graf 4-7: Horizontální pohyb bodů (změna souřadnicových rozdílů) vzhledem k nulté etapě, reference VODJ



Graf 4-6: Odchyly v elipsoidické výšce H_{el} od bodu VODJ, reference VODJ

4.7. GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ

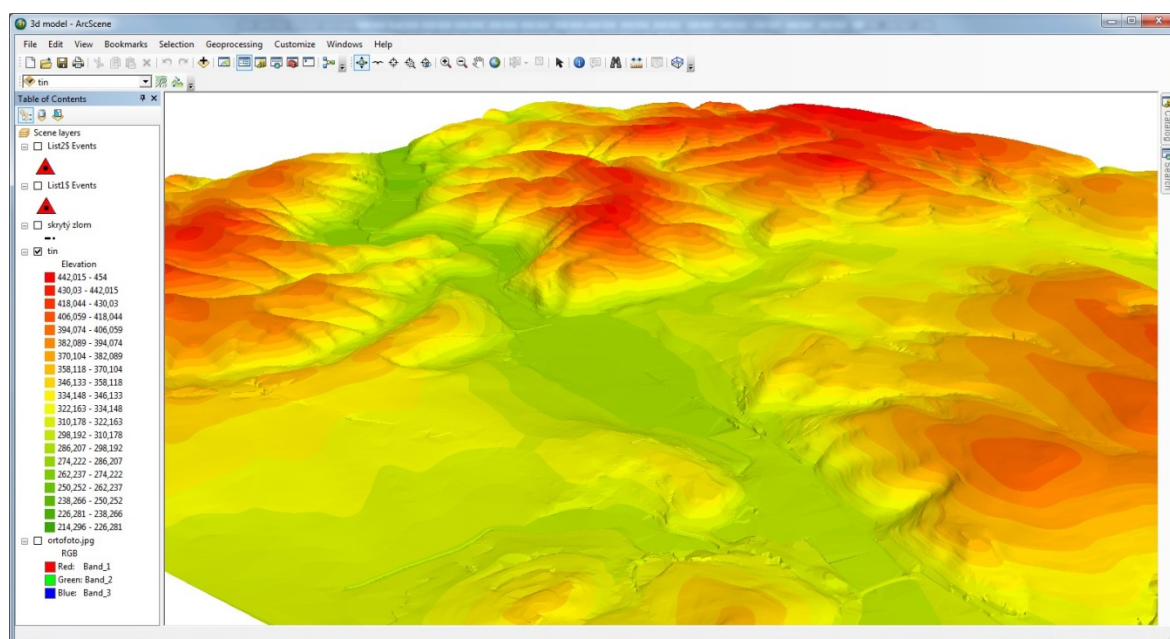
Abychom si lépe udělali představu o naměřených datech, je vhodné zobrazit je v grafické podobě, ať už ve formě grafů, map nebo schémat.

Základním interpretačním prostředkem v této diplomové práci jsou grafy, které zobrazují horizontální i vertikální pohyby jednotlivých bodů v závislosti na čase. Tyto grafy byly vytvořeny v tabulkovém procesoru Microsoft Excel 2010 a jsou součástí samotného textu práce.

Další grafické výstupy jsou již ve formě příloh a byly v převážné většině vytvořeny v programovém řešení od firmy ESRI, a to konkrétně v ArcGIS 10.2 for Desktop.

ArcGIS for Desktop slouží především pro zobrazování dat GIS, jejich analýzu a tvorbu mapových výstupů. Dále je vhodný pro vytváření, úpravu a správu vektorových datových formátů jako jsou geodatabáze a shapefile nebo pro kontrolu topologie dat. Obsahuje řadu vzájemně propojených aplikací jako je ArcMap – centrální aplikace pro veškeré mapové úlohy, včetně editace dat a tvorby kartografických výstupů, ArcCatalog pro organizaci a správu dat, ArcToolbox pro zpracování prostorových dat (geoprocessing) jako je transformace mezi souřadnicovými systémy, konverze dat či prostorové a statistické analýzy nebo ArcScene pro vizualizaci 3D dat. [39]

Jedním z mapových výstupů je **3D model zájmového území** vytvořený za pomoci programů ArcScene a ArcMap. Jako podkladová data pro tvorbu modelu sloužila data ZABAGED[®], která zapůjčil Zeměměřický úřad pro účely vyhotovení této diplomové práce, v rozsahu mapových listů 24-34-01, 24-34-02, 24-34-06 a 24-34-07 Základní mapy ČR 1 : 10 000.



Obr. 4-21: 3D model TIN v prostředí programu ArcScene

Z výškopisu (vrstevnice, terénní hrany, výškové kóty) jsem vytvořila model TIN (Trinagulated Irregular Network), nejprve ve 2D, následně ve 3D. Pro zvýraznění výškových poměrů a větší přehlednost jsem zdvojnásobila měřítko výšek. Rastrový model byl následně pokryt ortofotem zájmového území, které opět poskytl Zeměměřický úřad, a doplněn o značky měřických pilířů a průběh geologických zlomů.

Na 3D model zájmového území se můžeme podívat v příloze č. 8.

Dalším mapovým výstupem je **geologická mapa území**. Tato mapa ve 2D byla vytvořena za pomoci podkladových dat od České geologické služby a jejich mapového serveru v prostředí programu ArcMap, kde byla doplněna legenda, severka a další popisné informace. Výstupem, který byl vytvořen obdobným postupem, je **přehled měřické sítě**, kde jsou jednotlivé body zobrazeny na podkladovém ortofotu. V tomto případě jsou podkladová data převzata z prohlížečí WMS služby (WMS – Ortofoto) ČÚZK. Na přehledu měřické sítě jsou zobrazeny všechny pilíře, které se na území Tetčic nacházejí, i když na nich nebylo ve třetí etapě měřeno.

Geologická mapa území se nachází v příloze č. 7, přehled měřické sítě pak v příloze č. 1.

Poslední mapou je **mapa geodynamických jevů**. Tato mapa zobrazuje na podkladovém ortofotu pohyb sledovaných bodů, přičemž jsou rozdíly v poloze mezi jednotlivými etapami znázorněny v měřítku 1 : 1. Mapa byla vytvořena taktéž v programu ArcMap. Podklad tvoří ortofoto převzaté z WMS služby ČÚZK.

Mapu geodynamických jevů si můžeme prohlédnout v příloze č. 6.

Posledními grafickými výstupy v této práci jsou **místopisy bodů** nakreslené v programu Microstation Powedraft V8i. V příloze č. 2 uvádím místopisy pouze těch pilířů, na kterých bylo ve třetí etapě měřeno.

5. ZÁVĚR

GNSS měření na polygonu Tetčice probíhá již od roku 2008. První měření však probíhala ještě na stativech na původním profilu tvořeného body 101 až 110 v kolmém směru na geologický zlom procházející lokalitou. Na hloubkově stabilizovaných pilířích s nucenou centrací se měří od roku 2010, kdy provedl zaměření nulté etapy Ing. Daniel.

Obsahem této diplomové práce bylo zaměření třetí etapy, celkově tedy čtvrtého měření. Jako metoda měření byla zvolena dlouhá statická observace s 15 s intervalem zápisu dat a 10° elevační maskou jako v předcházejících etapách. Začátek měření byl v pátek 26. 7. od 14 hodin a měření bylo ukončeno v sobotu 27. 7. ve 14 hodin.

Data z měření byla zpracována v programu Leica Geo Office 8.2 se stejnými parametry výpočtu jako v předcházejících etapách, aby bylo možné data porovnat. Jako referenční stanice byla zvolena stanice TUBO pro určení prostorových souřadnic v systému ETRS89 a dále jeden z bodů sítě (VODJ) pro určení relativních vztahů mezi body.

Metoda dlouhé statické GNSS observace slouží v oblasti Tetčic pro prokázání horizontálních posunů. Její výhoda spočívá v nezávislosti na počasí či denní době, mezi její nevýhody však patří přesnost klesající s délkou vektoru a vysoké nároky na vybavení související i s personálním obsazením, kdy je nutné, aby každou aparaturu hlídali alespoň dva lidé. Z těchto důvodů tak asi nebude nikdy možné sledovat všech sedm pilířů zároveň v jedné etapě. Vhodné by však bylo, aby bylo vždy v dalších etapách měřeno na pilířích BUCI a VODJ, jelikož jsou to jediné dva body, na kterých proběhlo měření ve všech etapách. S referencí na bodě VODJ se pak dají porovnávat relativní vztahy mezi body a souřadnicové rozdíly ze všech etap.

Pro určení vertikálních pohybů v zájmové oblasti slouží metoda přesné nivelace, které se věnovali a věnují jiní diplomanti. Metoda GNSS je zde spíše jako doplňková pro sledování trendů v oblasti, jelikož neposkytuje dostatečnou přesnost. Tři ze sedmi pilířů bývají zahrnuty do nivelačního polygonu, při porovnávání absolutních výšek pak nesmíme zapomenout, že výšky z nivelace se vztahují k nivelační značce osazené v dolní části pilíře, kdežto výšky určené metodou GNSS jsou vztahované k roxoru zapuštěného do hlavy pilíře.

Z dosavadních výsledků za čtyři roky měření pak můžeme odvodit, že k určitým pohybům v oblasti skutečně dochází. Z grafu Graf 4-4 odchylek v horizontální poloze nebo z mapy geodynamických jevů (příloha č. 6) můžeme vyčíst pohyb bodů nejprve jihozápadním a posléze severním směrem. Největší odchylky mezi etapami dosahují až centimetrových hodnot a je škoda, že nemáme souvislá data ze všech bodů.

Etapy jsou prozatím dost nerovnoměrně rozloženy – na některých bodech máme pouze jedno měření, které nám určilo prostorovou polohu, na některém dvě či tři a pouze na dvou bodech se měřilo v každé etapě.

Jelikož se pohyby geologických celků dají správně posuzovat až po více letech, kdy není měření ovlivněno sezónními vlivy, je vhodné, aby měření v Tetčicích pokračovalo dalšími etapami. Není nutné provádět měření GNSS každým rokem stejně jako u metody přesné nivelace, ale měření např. ve dvouletých rozestupech nám dokáže poskytovat relevantní hodnoty pro určení tendencí pohybů na jednotlivých bodech. S větším množstvím dat také budeme moci pohyby predikovat, což při nynějším malém rozsahu dat není vhodné a při extrapolaci bychom se dopouštěli hrubých chyb.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CHLUPÁČ, Ivo, Rostislav BRZOBOHATÝ, Jiří KOVANDA a Zdeněk STRÁNÍK. *Geologická minulost České republiky*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002, 436 s. ISBN 80-200-0914-0.
- [2] *Tetčice - oficiální stránky obce* [online]. září 2012 [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://www.tetcice.cz/>
- [3] Tetčice. In: *Wikipedie* [online]. 28. 5. 2013 [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tet%C4%8Dice>
- [4] WITISKA, Michal. *Opakovaná přesná nivelace a GPS měření na Diendorfsko - Čebínském zlomu*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. RNDr. Lubomil Pospíšil, CSc.
- [5] DANIEL, Radek. *Opakovaná přesná nivelace a GPS měření na polygonu Tetčice*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. RNDr. Lubomil Pospíšil, CSc.
- [6] DVOŘÁK, Jiří. *Opakovaná GPS měření na polygonu Tetčice a jejich interpretace*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. RNDr. Lubomil Pospíšil, CSc.
- [7] Global Positioning System. In: *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 4 November 2013 [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [8] NATIONAL COORDINATION OFFICE FOR SPACE-BASED POSITIONING, Navigation, and Timing. *GPS.gov* [online]. October 23, 2013 [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/>
- [9] ODBOR KOSMICKÝCH TECHNOLOGIÍ A DRUŽICOVÝCH SYSTÉMŮ. *Český kosmický portál: Informační stránky Koordinační rady ministra dopravy pro kosmické aktivity* [online]. 2013 [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/>
- [10] MACHOTKA, Radovan a Jan FIXEL. *Geodetická astronomie a kosmická geodézie II: Modul 01: Kosmická geodézie* [intranet]. 2007 [cit. 2013-11-13].
- [11] KVAPIL, Jiří. Kosmický segment GPS a jeho budoucnost. *Aldebaran Bulletin: Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie*. AGA, 2005, roč. 3, č. 2. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_02_gps.php
- [12] ČÁBELKA, Miroslav. *Úvod do GPS* [online]. 2008 [cit. 2013-11-16]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps>
- [13] GPS Ground Segment. In: *ESA Navipedia* [online]. 18 March 2012 [cit. 2013-11-17]. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Ground_Segment

- [14] GLONASS General Introduction. In: *ESA Navipedia* [online]. 7 December 2012 [cit. 2013-11-24]. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_General_Introduction
- [15] Constellation status. INFORMATION-ANALYTICAL CENTRE, Korolyov, Russia. *Federal Space Agency: Information analytical centre of GLONASS and GPS controlling* [online]. 2005-2013 [cit. 2013-11-24]. Dostupné z: <http://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>
- [16] RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy* [online]. Ostrava, 2002 [cit. 2013-11-25]. ISBN 80-248-0124-8. Dostupné z: <http://gis.vsb.cz/dokumenty/dns-gps/view>
- [17] GLONASS Ground Segment. In: *ESA Navipedia* [online]. 19 June 2012 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Ground_Segment
- [18] Navigační systém Galileo slaví historický milník, zaměřil svůj první cíl. *Mobil.idnes.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-01-30]. Dostupné z: http://mobil.idnes.cz/prvni-cil-galileo-0ze-/navigace.aspx?c=A130312_215722_navigace_hro#utm_source=rss&utm_medium=feed&utm_campaign=mobil&utm_content=main
- [19] *Český kosmický portál: Informační stránky Koordinační rady ministra dopravy pro kosmické aktivity* [online]. 2013 [cit. 2014-01-30]. Dostupné z: <http://www.czechspaceportal.cz/>
- [20] Time Scales: UT1, UTC, TAI, ET, TT, GPS time. SCHLYTER, Paul. [online]. 2013-07-10 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: <http://stjarnhimlen.se/comp/time.html>
- [21] Time References in GNSS. *ESA Navipedia* [online]. 10 January 2014 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/Time_References_in_GNSS
- [22] Galileo and GPS ‘synchronise watches’: new time offset helps working together. *ESA* [online]. 3 May 2013 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_and_GPS_synchronise_watches_new_time_offset_helps_working_together
- [23] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Josef WEIGEL a Radovan MACHOTKA. *Seminář GPS: Metodika GPS měření a vyhodnocení* [intranet]. 2007 [cit. 2014-02-04].
- [23] Specifikace permanentních stanic CZEPOS. *Zeměměřický úřad* [online]. [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: http://czepos.cuzk.cz/_specifikace.aspx
- [24] O síti TopNET. *TopNET* [online]. 2012 [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: <http://topnet.geodis.cz/topnet/topnet.aspx>
- [25] Specifikace sítě. *Trimble VRS Now Czech | GEOTRONICS Praha, s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: <http://www.geotronics.cz/specifikace-site>
- [26] Interfaces and Protocols. In: *ESA Navipedia* [online]. 3 December 2013 [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: http://navipedia.net/index.php/Interfaces_and_Protocols

- [27] The International Terrestrial Reference Frame (ITRF). *International Earth Rotation and Reference Systems service* [online]. 9 Jan 2013 [cit. 2014-02-07]. Dostupné z: http://www.iers.org/iers/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html?_nnn=true
- [28] ETRS-89. *Přesná transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK* [online]. 5. května 2009 [cit. 2014-02-07]. Dostupné z: http://transformace.webst.fd.cvut.cz/Iframe/ETRS_iframe.htm
- [29] WGS-84. *Přesná transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK* [online]. 5. května 2009 [cit. 2014-02-07]. Dostupné z: <http://transformace.webst.fd.cvut.cz/WGS.htm>
- [30] Nová realizace systému ETRS89 v ČR. *ČÚZK* [online]. © 2013 [cit. 2014-02-09]. Dostupné z: <http://www.cuzk.cz/Zememerictvi/Geodeticke-zaklady-na-uzemi-CR/GNSS/Nova-realizace-systemu-ETRS89-v-CR.aspx>
- [31] Boskovická brázda. In: *Wikipedie* [online]. 24. 1. 2014 [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Boskovick%C3%A1_br%C3%A1zda
- [32] Kapitola 3: Geologická stavba České republiky. *Geologická stavba České republiky a vztah geologických procesů k životnímu prostředí* [online]. 8. 12. 2008 [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: <http://kurz.geologie.sci.muni.cz/kapitola3.htm>
- [33] Český masiv. *Geologický park: Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze* [online]. © 2011-13 [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: <http://www.parkgeo.cz/mapa.htm>
- [34] LEICA GEOSYSTEMS AG. *Leica GPS1200 Series: Technical Data* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://www.edisurveys.co.uk/pdf/GPS1200_TechnicalData.pdf
- [35] LEICA GEOSYSTEMS AG. *GPS Surveying - System 500* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gps/gps_system500/brochures-datasheet/System%20500_Tech%20Data_en.pdf
- [36] Antenna Calibrations. *National Geodetic Survey* [online]. Jan 08 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>
- [37] LEICA GEOSYSTEMS AG. *Leica GPS1200: System Field Manual* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://gik.wilsig.tu.koszalin.pl/docs/lgik/GPS1200_SysField_en.pdf
- [38] GEFOS A.S. *Leica Geo Office: Návod pro rychlý start* [online]. Prosinec 2007 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.gefos-leica.cz/ftp/GPS/Navody/CZ_Rychlonavody/LGO_rychlonavod.pdf
- [39] ArcGIS for Desktop. *Geografické informační systémy (GIS) - ARCDATA PRAHA* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/software/arcgis/arcgis-for-desktop/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1-1: Pohled na obec Tetčice od kaple Nejsvětější Trojice (bod TROJ)
- Obr. 2-2: Lokalizace obce Tetčice, mapy.cz
- Obr. 2-3: Výskyt variských hornin ve střední Evropě, výřez ze Schematické geologické mapy České republiky, www.ig.cas.cz
- Obr. 2-4: Příčný profil boskovickou brázdou v rosicko-oslavanské části [1]
- Obr. 3-5: Konfigurace GPS družic v roce 2013 [8]
- Obr. 3-6: Družice systému GPS, blok IIR-M [8]
- Obr. 3-7: Modulace nosné vlny [11]
- Obr. 3-8: Struktura navigační zprávy
- Obr. 3-9: Rozmístění stanic kontrolního segmentu systému GPS [8]
- Obr. 3-10: Družice ruského systému GLONASS, Uragan-M
- Obr. 3-11: Rozmístění kontrolního a řídicího segmentu systému GLONASS [14]
- Obr. 3-12: Vliv konfigurace družic na hodnotu DOP
- Obr. 3-13: Rozmístění stanic sítě CZEPOS k 22. 4. 2014, czepos.cuzk.cz
- Obr. 3-14: Schéma transformace souřadnic mezi ETRS89 a S-JTSK doplněné o výšky v Bpv [23]
- Obr. 4-15: GNSS přijímač Leica GX1230 GG s anténou [34]
- Obr. 4-16: Anténa pro příjem GNSS signálu Leica AT504 GG [34]
- Obr. 4-17: GPS přijímač Leica SR520 [35]
- Obr. 4-18: Měření výšky antény [37]
- Obr. 4-19: Prostředí programu LGO
- Obr. 4-20: Záložka GPS-Proc programu LGO
- Obr. 4-21: 3D model TIN v prostředí programu ArcScene

SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1: Přehled použitých přijímačů a antén

Tab. 4-2: Výsledné souřadnice měřených bodů, reference TUBO

Tab. 4-3: Výsledné souřadnice měřených bodů, reference VODJ (P6)

Tab. 4-4: Rozdíly absolutních souřadnic z referencí VODJ – TUBO

Tab. 4-5: Výsledné souřadnice nulté etapy zaměřené Ing. Danielem, reference TUBO

Tab. 4-6: Výsledné souřadnice první etapy zaměřené Ing. Dvořákem včetně porovnání s nultou etapou, reference TUBO

Tab. 4-7: Výsledné souřadnice druhé etapy zaměřené Ing. Dvořákem, reference TUBO

Tab. 4-8: Porovnání druhé etapy s předchozí etapou a nultou etapou, reference TUBO

Tab. 4-9: Porovnání třetí etapy s předchozí etapou a nultou etapou

Tab. 4-10: Výsledné souřadnice nulté etapy zaměření Ing. Danielem včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

Tab. 4-11: Výsledné souřadnice první etapy zaměřené Ing. Dvořákem včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

Tab. 4-12: Porovnání první a nulté etapy, souřadnicové rozdíly, reference VODJ

Tab. 4-13: Výsledné souřadnice druhé etapy zaměřené Ing. Dvořákem včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

Tab. 4-14: Porovnání druhé etapy s nultou a předcházející etapou, reference VODJ

Tab. 4-15: Výsledné souřadnice třetí etapy včetně souřadnicových rozdílů k bodu VODJ, reference VODJ

Tab. 4-16: Porovnání třetí etapy s nultou a předcházející etapou, reference VODJ

SEZNAM GRAFŮ

Graf 4-1: Vývoj teploty a tlaku během observace

Graf 4-2: Odchylky v souřadnici φ , reference TUBO

Graf 4-3: Odchylky v souřadnici λ , reference TUBO

Graf 4-4: Horizontální pohyb bodů vzhledem k nulté etapě, reference TUBO

Graf 4-5: Odchylky v elipsoidické výšce H_{el} , reference TUBO

Graf 4-7: Horizontální pohyb bodů (změna souřadnicových rozdílů) vzhledem k nulté etapě, reference VODJ

Graf 4-6: Odchylky v elipsoidické výšce H_{el} od bodu VODJ, reference VODJ

SEZNAM PŘÍLOH

1. Přehled měřické sítě, 1 s.
2. Geodetické údaje, 2 s.
3. Zápisníky z GPS měření, pouze elektronicky, 8 s.
4. Protokoly z výpočtu souřadnic v LGO, reference TUBO, pouze elektronicky, 19 s.
5. Protokoly z výpočtu souřadnic v LGO, reference VODJ, pouze elektronicky, 15 s.
6. Mapa geodynamických jevů, 1 s.
7. Geologická mapa, 1 s.
8. 3D model zájmové lokality Tetčice, 1 s.