

NOVÝ PRÍSTUP K SPRACOVANIU PRESNÝCH MERANÍ GEODYNAMICKEJ KAMPANE LGS TATRY

THE NEW APPROACH OF PRECISE GEODETIC MEASUREMENTS ADJUSTMENT IN GEODYNAMIC CAMPAIGN LGS TATRY

Branislav Droščák¹

Abstract

Every year from 1997 Geodetic and Cartographic Institute Bratislava together with some other partners organises precise GNSS epoch observations on the selected markers in Tatry mountains region. The aim of those observations is study and deformation analysis of the markers which are used for whole locality behaviour characterisation. From the experiences of permanent stations network adjustment we know, that GNSS equipment changes have deep impact on the quality of coordinates and velocity determination and in the case of their neglecting final results are biased. Because we know that antenna changes occurred in LGS Tatry a lot of times, it was recommended to use the new approach of campaign adjustment which will respect those changes. The new approach consists of filtering of outlying measurements caused by diverse equipment usage during particular years and uses a philosophy of zero based horizontal intraplate velocities for all sites.

Kľúčové slová

Spracovanie epochovej siete, eliminácia skokov, odhad rýchlosti, vplyv výmeny antén.

1 ÚVOD

V dnešnej dobe, ktorú môžeme z pohľadu využívania GNSS geodetmi a zememeračmi pokojne nazývať aj dobou permanentných staníc, je čoraz ťažšie nájsť aj uplatnenie pre epochovo merané siete, hoci tie boli ešte pár rokov dozadu nositeľmi vysoko-presných priestorových informácií a tvorili kostru pôvodných presných GNSS meraní. Jedným z atribútov, na základe ktorých sa v niektorých prípadoch aj naďalej pokračuje s observovaním takýchto sietí je udržanie kontinuity dlhodobých, z pohľadu GNSS možno povedať až historických meraní, alebo aj nemožnosť vybudovania permanentných staníc na takýchto miestach kvôli nedostupnému terénu či chýbajúcim zdrojom napájania. Takúto stále udržiavanú epochovú sieť na Slovensku predstavuje aj Lokálna Geodynamická Sieť Tatry (ďalej LGS Tatry), ktorá je observovaná každoročne už od roku 1997. Keď si uvedomíme, že vývoj v oblasti spracovania najmä permanentných GNSS meraní išiel v posledných rokoch významne dopredu, pričom časť týchto informácií a nových prístupov v spracovaní je možné využiť aj pri epochovo meraných sieťach, môže byť práve ich uplatnením výpovedná hodnota výsledkov po ich prepočte výrazne hodnotnejšia a môže viesť napríklad aj k potvrdeniu, alebo

¹ Ing. Branislav Droščák, PhD., Geodetický a kartografický ústav Bratislava, Chlumeckého 4, 827 45 Bratislava, tel.: +421 2 2081 6239, e-mail: branislav.droscak@skgeodesy.sk.

Slezský Dom	SDOM																				
Tatranská Kotlina	TAKO																				
Tichá Dolina	TIDO																				
Žiarska Chata	ZICH																				
Žiarske Sedlo	ZISE																				

3 TRADIČNÉ SPRACOVANIE MERANÍ GNSS V LGS TATRY

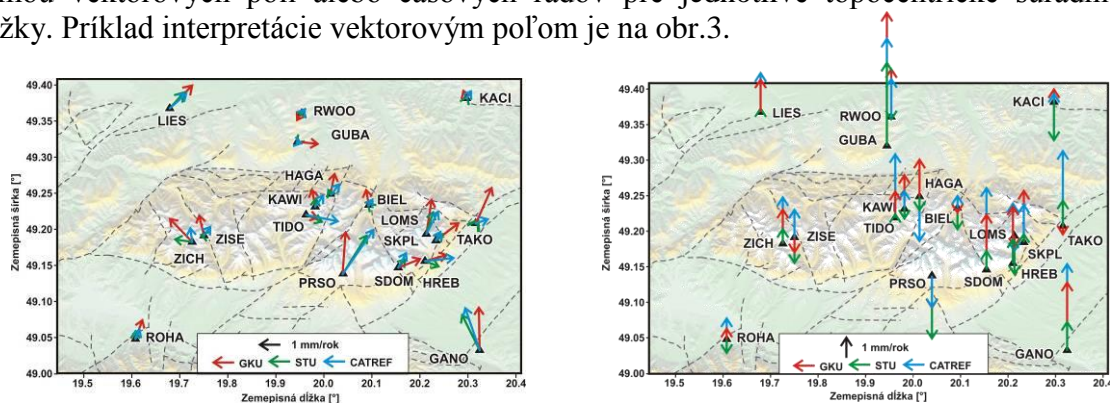
Tradičné spracovanie a vyhodnotenie meraní GNSS v LGS Tatry uvedené napríklad v (Papčo et al., 2009) pozostáva z týchto troch základných krokov, ktoré sú typické pre presné spracovania epochových meraní:

- spracovanie GNSS observácií vedeckým softvérom,
- odhad horizontálnych a vertikálnych rýchlostí,
- grafická interpretácia výsledkov.

Spracovanie GNSS observácií vedeckým softvérom pozostáva zo spoločného výpočtu základníc a vyrovnania siete bodov LGS Tatry a vybranej množiny bodov EPN siete určených na referencovanie. Pri spracovaní sa využívajú najnovšie poznatky, ako je napríklad uplatnenie absolútnych fázových centier antén a vyrovnanie prebieha k odporúčanému referenčnému rámcu (napr. ITRF2005). Štandardný výsledok predstavuje súbor súradníc bodov s kovariančnou maticou vzťahujú k strednej epoche ročníka v ITRS - ITRF_y.

Druhá fáza spracovania predstavuje určovanie rýchlostí bodov a predpokladá použitie štandardných matematických alebo vedeckých softvérov (napr. MathCAD, MATLAB, CATREF) schopných spracovať výstupy z prvej etapy. Postup odhadu rýchlostí pozostáva z odhadu globálnej rýchlosti bodov (rýchlosti obsahujúce aj pohyb Eurázijskej platne), následnej eliminácie tohto pohybu Eurázijskej tektonickej platne, napr. modelmi APKIM, ITRF2005 a nakoniec z konverzie súradníc a rýchlostí z geocentrického karteziánskeho tvaru na topocentrický. Celá filozofia prístupu odhadu rýchlostí využíva najmä uplatnenie rôznych matematických alebo štatistických metód, či váhovanie meraní na základe kovariančných matíc. Eliminácia skokov sa uplatňuje najmä pre body EPN na základe dostupných informácií, napr. na základe súboru EPN_discontinuity.SNX dostupného na (EPN ftp).

Treťou časťou je grafická interpretácia, ktorá pozostáva z vykreslenia odhadnutých rýchlostí formou vektorových polí alebo časových radov pre jednotlivé topocentrické súradnicové zložky. Príklad interpretácie vektorovým poľom je na obr.3.



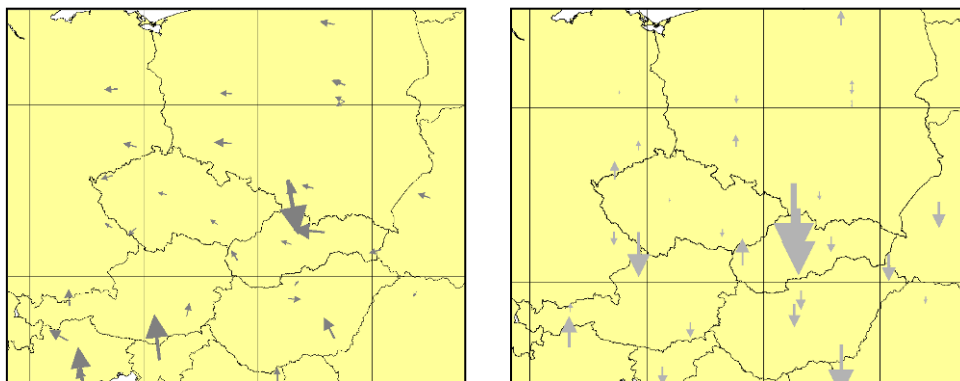
Obr. 3 Grafický výsledok tradičného spracovania LGS Tatry z obdobia 1998-2009, zdroj obr. (Papčo et al., 2009).

4 MOTIVÁCIE K NOVÉMU PRÍSTUPU SPRACOVANIA MERANÍ GNSS V LGS TATRY

Motivácií k novému prístupu spracovania doposiaľ vykonaných meraní GNSS v LGS Tatry bolo hneď niekoľko. Viaceré z nich vychádzali najmä z osobných skúsenosti zo spracovania rôznych iných sietí prevažne permanentných staníc (Droščák, 2010b), ale aj zo sledovania aktuálnych odporúčaní a požiadaviek na spracovanie GNSS meraní. Motivácie tak možno definovať nasledovne:

1. Horizontálne a vertikálne vnútroplatňové ročné rýchlosti niektorých bodov LGS Tatry (viď. obr.3) vykazujú niekoľko milimetrové hodnoty. Sú tieto čísla reálne? Nie sú ovplyvnené zle odfiltrovaným efektom?
2. Je odhad rýchlosti z epochových kampaňových meraní kvalitatívne ekvivalentný s odhadom rýchlosti získaných odhadom z permanentných meraní? Ak áno, na akej úrovni presnosti?
3. Môže neuváženie použitia odlišného GNSS vybavenia staníc, pri meraniach jednotlivých ročníkov bodov LGS Tatry, skresliť výsledné odhady rýchlostí?

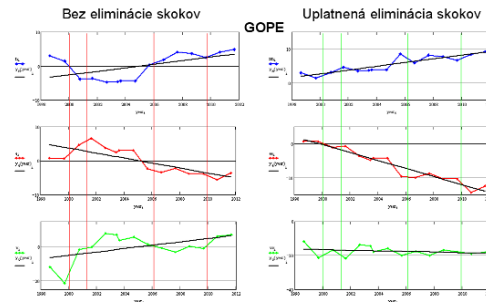
Motivácia č.1 vychádza z predpokladu práce (Droščák, 2010b), ktorá potvrdzuje, že centrálna časť Európy je v rámci Eurázijskej tektonickej platni „bezrýchlostná“ (viď. obr.4). To znamená, že ak sú na niektorých bodoch v tejto časti Európy detekované významnejšie vnútroplatňové rýchlosti, predpokladá sa, že ide o lokálny problém, alebo problém so stabilizáciou bodu.



Obr. 4 Takmer nulové horizontálne (vľavo) a vertikálne (vpravo) vnútroplatňové rýchlosti na bodoch EPN siete v centrálnej časti Európy (Droščák, 2010b).

Motivácia č.2 predstavuje zamyslenie sa nad otázkou, či je odhad rýchlosti z epochových meraní ekvivalentný s dnes preferovaným odhadom rýchlosti získaným iba na základe meraní permanentných staníc. Overenie takto položenej otázky je možné zdanlivo riešiť dvomi spôsobmi a to jednoduchým grafickým porovnaním výsledkov epochového a permanentného spracovania, alebo porovnaním numerických hodnôt odhadnutých rýchlosti z permanentných meraní určených raz z epochových meraní (odhad iba na základe týždenných úsekov meraní) a druhýkrát z kompletných permanentných observácií. Od prvej formy porovnania použitej napr. v (Papčo et al., 2009) sa upustilo, nakoľko takéto porovnanie nemusí vždy zabezpečiť totožnosť odhadu rýchlosti, najmä ak epochové merania spadajú do extrémnych okamihov. Na overenie tejto motivácie bol preto použitý druhý variant, na ktorý boli z výhodou použité body EPN siete, ktoré sú spracovávané spolu s bodmi LGS Tatry a pre ktoré poznáme aj presné vnútroplatňové rýchlosti dostupné na (EPN web). Takéto porovnanie rýchlostí bolo

možné navyše rozšíriť aj o posúdenie kvality uvažovania resp. neuvažovania eliminácie skokov spôsobených napríklad výmenou GNSS príslušenstva. Informácie o takýchto diskontinuitách na bodoch EPN boli čerpané zo súboru EPN_discontinuities.SNX, ktorý je dostupný na (EPN ftp). Zmysel princípu uplatňovania eliminácie skokov je zrejмый z obr.5.



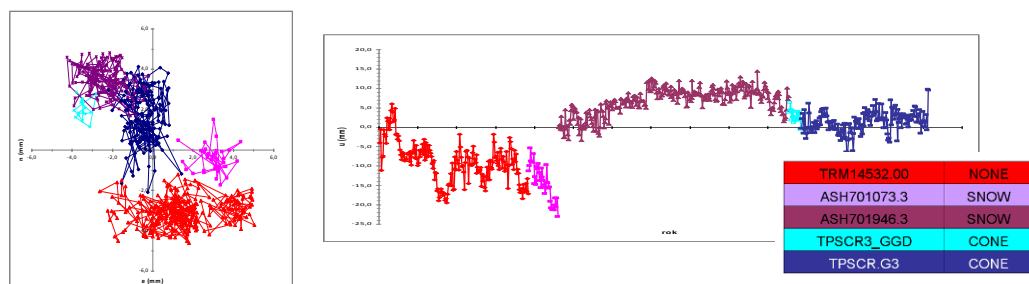
Obr. 5 Princíp uplatnenia eliminácie skokov (vertikálne čiary) na EPN stanici GOPE.

Takýmto spôsobom bolo vykonané porovnanie odhadnutých rýchlostí z epochových a permanentných meraní pre všetky stanice EPN, ktoré vstúpili do spoločného spracovania s bodmi LGS Tatry. Výsledky porovnania sú uvedené v tab.2. Ako si môžeme aj na základe nich všimnúť, uplatnenie skokov pri odhade rýchlostí z epochových meraní môže podľa očakávania zmeniť a tým pádom aj zrealniť výsledné hodnoty rýchlostí.

Tab. 2 Porovnanie rýchlostí odhadnutých epochovým a permanentným spôsobom.

	LGS TATRY (uplatnenie diskontinuit)						LGS TATRY (neuplatnenie diskontinuit)						EPN - rýchlosti z (www.epncb.oma.be)						EPN - LGS TATRY (upl. disk.)			EPN - LGS TATRY (neupl. disk.)						
	n (mm/s)	σ (mm/s)	e (mm/s)	σ (mm/s)	u (mm/s)	σ (mm/s)	n (mm/s)	σ (mm/s)	e (mm/s)	σ (mm/s)	u (mm/s)	σ (mm/s)	n (mm/s)	σ (mm/s)	e (mm/s)	σ (mm/s)	u (mm/s)	σ (mm/s)	Δn (mm/s)	Δe (mm/s)	Δu (mm/s)	σ (mm/s)	Δn (mm/s)	Δe (mm/s)	Δu (mm/s)	σ (mm/s)		
BBYS	0,2	0,05	-0,6	0,07	-1,3	0,21	0,2	0,10	-0,7	0,12	0,3	1,22	0,18	0,01	-0,79	0,02	-0,93	0,26	-0,05	-0,24	0,36	-0,05	0,05	-0,34				
BOR1	0,0	0,05	-0,6	0,05	-1,1	0,11	0,2	0,08	-0,5	0,08	-1,1	0,13	0,04	0,00	-0,65	0,01	-0,46	0,10	0,08	-0,03	0,60	-0,04	-0,01	-0,09				
GAMP	0,2	0,24	-1,8	0,13	-1,8	0,71	1,0	0,29	-1,4	0,17	-2,5	0,73	-0,14	0,01	-1,52	0,01	-2,35	0,18	-0,35	0,31	-0,52	-0,12	-0,55	0,02				
GOPE	0,3	0,08	-0,5	0,08	-0,1	0,18	0,5	0,21	-0,7	0,18	1,0	0,46	0,14	0,01	-0,47	0,02	-0,46	0,20	-0,15	0,07	-0,40	-0,04	0,02	-0,14				
GRAZ	0,8	0,04	-0,1	0,05	-1,3	0,16	1,0	0,08	0,5	0,14	-0,6	0,19	0,87	0,00	-0,02	0,01	-1,13	0,12	0,12	0,05	0,21	-0,04	-0,04	-0,03				
JOZE	0,2	0,08	-0,5	0,11	-0,2	0,11	0,5	0,09	-0,7	0,12	-0,1	0,11	0,28	0,00	-0,56	0,00	-0,04	0,07	0,07	-0,09	0,14	-0,11	-0,04	-0,18				
MOPI	0,1	0,07	0,1	0,08	-0,8	0,38	0,5	0,10	0,1	0,09	0,1	0,41	0,57	0,00	-0,30	0,00	1,04	0,12	0,48	-0,41	1,85	-0,09	-0,26	-0,51				
PENC	0,4	0,08	0,2	0,04	-0,5	0,39	0,4	0,08	0,1	0,06	-0,7	0,51	0,34	0,01	0,13	0,01	-1,20	0,13	-0,02	-0,08	-0,72	-0,03	-0,26	-0,16				
TUBO	0,2	0,04	-0,1	0,06	1,0	0,18	0,2	0,14	-1,4	0,21	-1,0	0,36	0,31	0,01	-0,45	0,02	-0,47	0,17	0,07	-0,38	-1,43	-0,04	-0,01	-0,52				
UZHL	-0,4	0,05	-1,0	0,05	-1,2	0,14	-0,2	0,09	-0,8	0,12	-0,8	0,22	-0,15	0,00	-0,75	0,00	-1,31	0,15	0,20	0,21	-0,11	-0,05	0,01	0,13				
WTZR	0,1	0,04	-0,4	0,07	-0,9	0,13	0,4	0,07	-0,2	0,09	-1,0	0,16	0,29	0,00	-0,42	0,01	-0,78	0,05	0,18	-0,07	0,15	-0,06	-0,08	-0,14				
																			Priemer	0,16	0,18	0,59	0,22	0,27	0,63			

Na túto skutočnosť nadväzuje aj tretia motivácia, zaoberajúca sa práve otázkou vplyvu neuvažovania zmeny GNSS vybavenia staníc na výsledné rýchlosti. Skúsenosti zo spracovania siete permanentných staníc uvedených napr. v (Droščák, 2010a) ukazujú, že množstvo diskontinuit (skokov) v časových radoch je spôsobených najmä výmenami antén/prijímačov, reінštaláciami antén, v menšej miere poruchami antén, alebo dokonca zmenami v stratégii výpočtu, ale niekedy aj neznámymi príčinami. Ukážku vplyvu viacnásobnej výmeny antén na horizontálnu a vertikálnu polohu je možné vidieť z vykreslenia observácií permanentnej stanice GOPE (obr.6). Tieto informácie dokazujú, že aj výmena antény má jednoznačne vplyv na výsledný korektný odhad rýchlostí.



Obr. 6 Vplyv výmeny antén na horizontálnu (vľavo) a vertikálnu (vpravo) polohu EPN permanentnej stanice GOPE.

4.1 Body LGS Tatry z pohľadu výmeny prístrojového vybavenia

Takmer na každom bode LGS Tatry došlo v priebehu uskutočnenia doterajších kampaní k viacerým zmenám v použítom type prijímača a antény (viď. napr. tab. pri obr.8 a 9) v dôsledku:

- nedostupnosti rovnakého prístrojového vybavenia pre každú kampaň,
- porúch príslušenstva spojených s nutnosťou výmeny,
- zmeny partnerov participujúcich na kampaniach vlastným príslušenstvom.

Na základe týchto informácií existovali reálne predpoklady, že bez uváženia vplyvu týchto zmien môže pri odhadoch rýchlosti dochádzať ku skresleniam a tým pádom aj k chybným interpretáciám. Tieto skutočnosti nás preto viedli k použitiu nového prístupu spracovania LGS Tatry, ktorý by vyššie získané skúsenosti obsahoval a vplyv výmeny antén rešpektoval.

5 NOVÝ PRÍSTUP K SPRACOVANIU MERANÍ GNSS V LGS TATRY

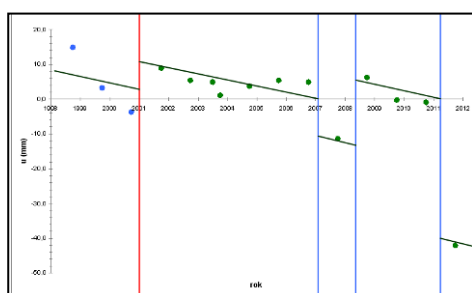
Navrhnutý nový prístup k spracovaniu meraní GNSS v LGS Tatry pozostával z opakovaného spracovania observácií jednotlivých ročníkov (1998-2011) a z odhadu rýchlosti bodov siete pri uvážení všetkých zistení a skúseností.

Na opakované spracovanie GNSS observácií bol použitý Bernský softvér verzia 5.0 (Dach at al., 2007), pri uplatnení nasledovných vstupov a nastavení: na vybraných bodoch EPN bola uplatnená podmienka MC (minimal constraint – no net translation), boli použité absolútne fázové centrá antén, IGS05 efemeridy alebo pre staršie ročníky „Dresden – Potsdam“ efemeridy (Steigenberger, 2006). Za referenčný rámec bol zvolený ITRF2005. Výstup predstavoval ITRF2005 súradnice s kovarianciami pre stredné epochy jednotlivých ročníkov.

Na odhad globálnych aj lokálnych (vnútroplatňových) rýchlostí bol použitý matematický softvér MathCAD 14. Eliminácia pohybu Eurázijskej platne bola zabezpečená priamou 14-parametrickou transformáciou z ITRF2005→ETRF2000 pomocou postupu odporučeného v (Boucher a Altamimi, 2011). Ďalší krok predstavovala konverzia geocentrických karteziánskych súradníc (XYZ) na topocentrické (neu), odhad a eliminácia diskontinuit spôsobených najmä výmenou prístrojového vybavenia a eliminácia odľahlých meraní na základe grafického zobrazenia.

5.1 Odhad a eliminácia diskontinuit spôsobených najmä výmenou antén

Odhad a eliminácia diskontinuit prebiehala pre EPN body a body LGS Tatry rovnako. Pre definovanie okamihov skokov bol pri EPN bodoch použitý súbor EPN_discontinuity.SNX dostupný na (EPN ftp). Pre body LGS Tatry sa skoky odhadovali pre okamihy ak došlo k výmene antény (iný typ antény, nie iné sériové číslo – červená čiara na obr.7), alebo ak bol skok evidentný na základe grafického vyobrazenia (subjektívny prístup – modré čiary na obr.7). Na odhad bola použitá jednoduchá lineárna regresia, pričom smernica priamky bola považovaná pre všetky okamihy rovnaká. Zápis odhadu jedného skoku uvádzajú vzťahy 1 a 2.



Obr. 7 Grafické zobrazenie odhadu vnútroplatňovej rýchlosti na stanici KAWI.

$$y_a = kx_a + q_a \quad (1)$$

$$y_b = kx_b + q_b$$

$$k = \text{konšt.} \quad (2)$$

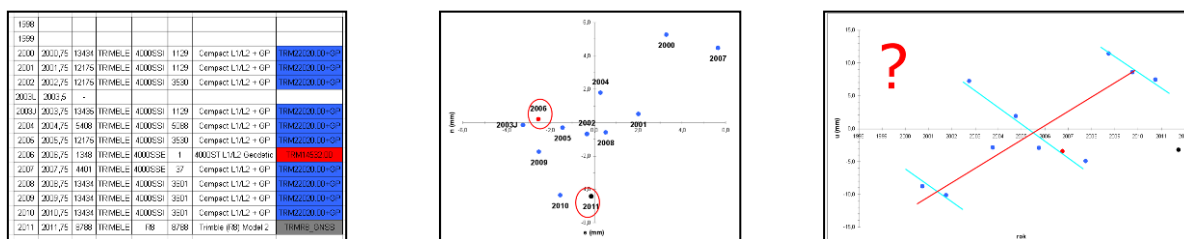
$$\text{skok} = q_a - q_b$$

5.2 Eliminácia odľahlých meraní

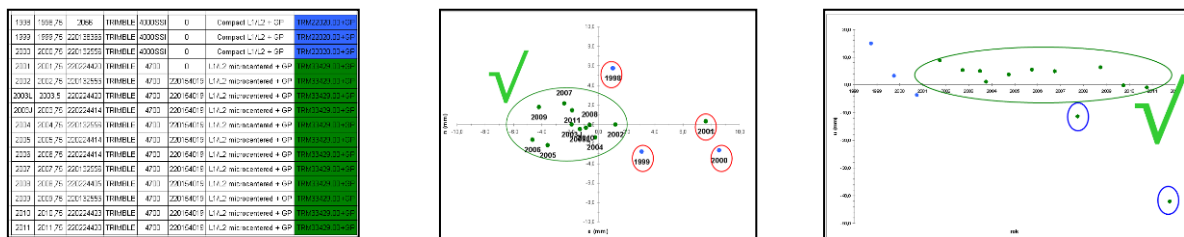
Eliminácia odľahlých (vybočujúcich) meraní bola uskutočnená subjektívnym spôsobom na základe vyhodnotenia grafického zobrazenia výsledných polôh jednotlivých ročníkov bodu (krúžky na obr.8 a 9). V prípade výškového komponentu išlo o klasické zobrazenie hodnôt pre jednotlivé ročníky, v prípade Hz polohy o zobrazenie jednotlivých polôh bodu v pôdoryse. Použitie rozdielneho typu antén bolo uplatnené farebne (obr. 8 a 9). Eliminované boli aj merania, ktoré boli niektorým typom antény uskutočnené iba raz.

5.3 Príklady charakteru správania sa niektorých bodov LGS Tatry

Zaujímavé správanie sa výškového komponentu bolo zistené na bode HREB. Odhad rýchlosti na bode bez uváženia typu antén pôsobí, že bod stúpa (červená priamka na obr.8), no ak merania rozdelíme na jednotlivé etapy podľa rovnakých antén, bod nadobúda klesanie (belasé čiary na obr.8). Iný príklad predstavuje bod KAWI, na ktorom bol dlhodobo používaný rovnaký druh antény, čo sa pozitívne prejavilo najmä v HZ polohe. Vo výške bolo napriek tomu niekoľko krát zaznamenané rozdielne správanie (modré krúžky na obr.9).



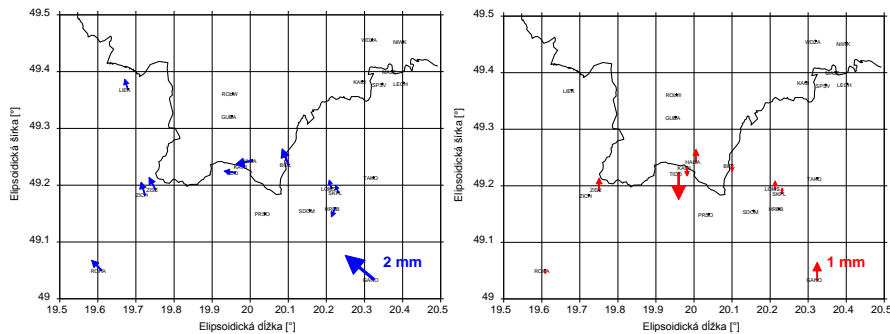
Obr. 8 Typy použitých antén a grafické zobrazenie správania sa bodu HREB.



Obr. 9 Typy použitých antén a grafické zobrazenie správania sa bodu KAWI.

6 GRAFICKÉ ZOBRAZENIE VÝSLEDNÝCH RÝCHLOSTÍ

Uplatnením nového prístupu spracovania a vyššie uvedených eliminácií boli odhadnuté vnútroplatňové HZ a V rýchlosti pre „spôhlivé“ body a tie boli vykreslené do máp (obr.10).



Obr. 10 Horizontálne (vľavo) a vertikálne (vpravo) vnútroplatňové rýchlosti odhadnuté na základe spracovania bodov LGS Tatry novým prístupom.

7 ZÁVER

Na základe skúseností získaných zo spracovania LGS Tatry novým prístupom uvažujúcim vplyv používania rôzneho typu antén počas jednotlivých ročníkov, možno vysloviť nasledovné závery:

- napriek tomu, že má každý bod LGS Tatry veľmi špecifické správanie, čo čiastočne odzrkadľuje používanie rôzneho príslušenstva počas jednotlivých ročníkov, korešpondujú výsledné odhadnuté rýchlosti všetkých spoľahlivých bodov (okrem bodu GANO) s riešením EPN a s predpokladom vysokej stability centrálnej Európy,
- spoľahlivý odhad novým prístupom sa prejavil najmä na bodoch s používanou rovnakou anténou počas viacerých ročníkov, preto do budúcnosti odporúčame používať rovnaké antény v čo najväčšom možnom rozsahu (najlepšie dodržiavať aj rovnaké sériové čísla),
- na viacerých bodoch nepomohol spresniť odhad ani nový prístup, čo je spôsobené zrejme aj inými vplyvmi ako iba zmenou antény (poveternostné podmienky, veľké zákryty atď.),
- oveľa presnejší odhad správania sa bodov by bolo možné získať na základe permanentných observácií, ale je zřejmé, že na viacerých bodoch nie je alebo ani nebude možné zriadiť permanentnú stanicu, preto sme odkázaný naďalej aj na epochové merania.

LITERATÚRA

Boucher C., Altamimi Z. 2011: *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF campaign*. Version 8: 18-05-2011.

Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. etc. 2007: *Bernese GPS software version 5.0*. Astronomical institute, University of Bern. 612s.

Droščák B. 2010a: SKPOS permanent stations stability monitoring. In: *Proceedings of the "International Symposium on Global Navigation satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications"*. Brussels, Belgium, 28-29. November 2010.

Droščák B. 2010b: Homogenizácia výsledkov dlhodobého monitorovania polohy pomocou GNSS a ich geodynamická interpretácia. Dizertačná práca č.SvF-3207-17650. STU Bratislava, stavebná fakulta. Bratislava 2010.

EPN ftp: ftp server EUREF permanentnej siete staníc - <ftp.epncb.oma.be>.

EPN web: webová stránka EUREF permanentnej siete staníc - www.epncb.oma.be.

Papčo J., Hipmanová L., Droščák B., 2009: Geokinematika Vysokých Tatier – 10 rokov meraní GNSS. In: zborník referátov z odborného seminára s medzinárodnou účasťou „Globálne navigačné družicové systémy ako efektívny prostriedok na určovanie priestorovej polohy“, SSGK, KGZ STU, GKÚ Bratislava, Tatranská Lomnica, 29-30. september 2009.

Steigenberger P., Rothacher M., Dietrich R., Fritsche M., Rülke A., Vey S. 2006: Reprocessing of a global GPS network. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, DOI: [10.1029/2005JB003747](https://doi.org/10.1029/2005JB003747), 05/2006.