

GEOKINEMATIKA SLOVENSKA NA ZÁKLADE ÚDAJOV Z SKPOS

GEOKINEMATICS OF SLOVAKIA BASED ON THE DATA FROM SKPOS

Ing. Martin Ferianc¹, Ing. Branislav Droščák, PhD.²

Abstract

Geodetic and Cartographic Institute Bratislava has been long time involved in the precise processing of the GNSS data tracked by SKPOS continuously operating reference stations. Taking into account the fact that the processed data represent the movements of the GNSS antennas and with fulfilling the condition of their firm connection with the earth, they represent the movements of the upper part of the earth's crust. The whole principle is based on precise processing of the GNSS observations and analysis of time series. The most important parameter in terms of geokinematics research is the trend of the individual coordinate components of time series, which represent a station velocity, its size, direction and time changes. The article describes geokinematics of Slovakia based on trend parameter estimation from SKPOS continuously operating reference stations time series from years 2007-2019.

1 Úvod

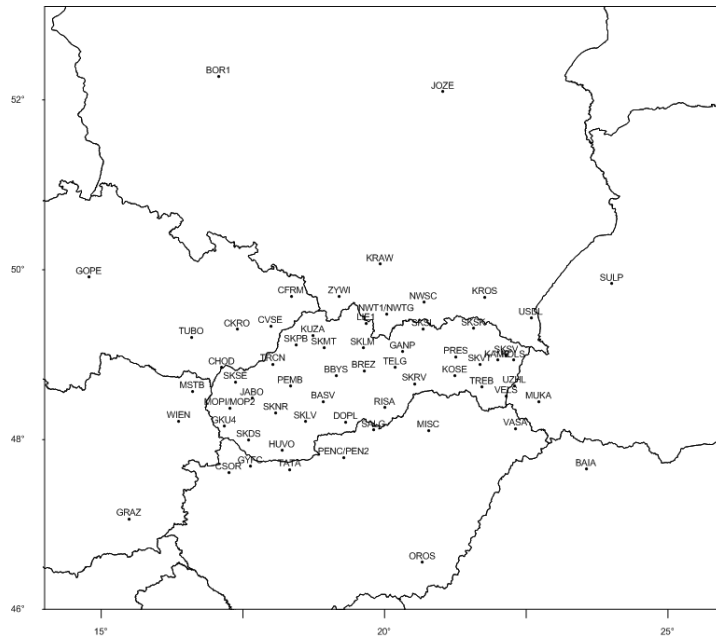
Slovenskú priestorovú observačnú službu (ďalej SKPOS) tvorí sieť referenčných permanentných staníc GNSS, z ktorých viaceré sú v nepretržitej prevádzke už viac ako 13 rokov. Permanentné stanice prijímajú signály z družíc GNSS, z ktorých je možné určovať ich polohy a na základe nich spoľahlivo interpretovať recentné geokinematické procesy na Slovensku. Predkladaný príspevok opisuje postup určenia časových zmien súradníc, t.j. rýchlostí staníc SKPOS reprezentujúcich okrem iného aj pohyby zemského povrchu Slovenska.

2 Spracovanie údajov GNSS a tvorba časových radov

Na výpočet súradníc referenčných staníc SKPOS sa na Geodetickom a kartografickom ústave Bratislava (ďalej GKÚ) využíva vedecký softvér Bernese verzia 5.2 (Dach et al., 2015). Pomocou softvéru prebieha rutinný výpočet denných a následne týždenných (kombinovaných) riešení, ktoré sa ukladajú v štandardizovanom výmennom formáte SINEX. Súbor SINEX obsahujú vypočítané geocentrické súradnice referenčných staníc SKPOS v realizácii IGS14, ktoré sa následne transformujú do ETRF2000 a načítavajú do aplikácie na vykresľovanie časových radov topocentrických súradníc staníc. Na obr. 1 sú zobrazené stanice SKPOS, zahraničné SKPOS a vybrané stanice siete EPN, ktoré sú súčasťou rutinného spracovania na GKÚ.

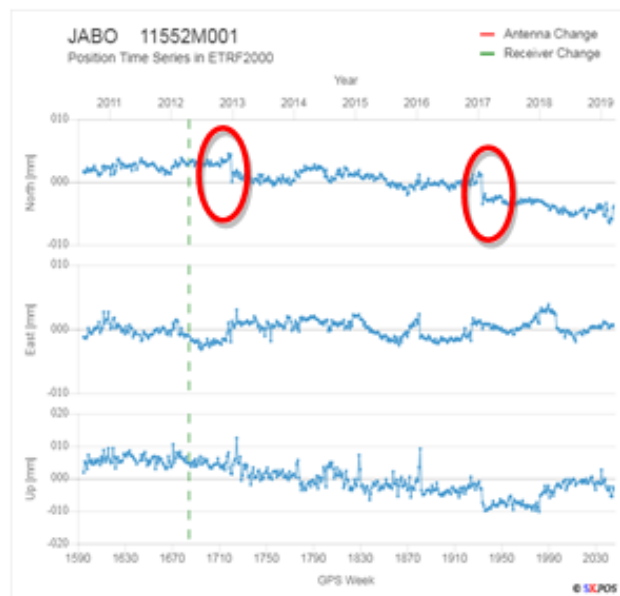
¹ Martin Ferianc, Ing., Geodetický a kartografický ústav Bratislava, Chlumeckého 4, 827 45 Bratislava, e-mail: martin.ferianc@skgeodesy.sk

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



Obr. 1. Permanentné stanice GNSS spracovávané na GKÚ (rok 2019).

V súčasnosti sú súradnice permanentných staníc určované v referenčnom rámci IGS14. V minulosti to bolo v referenčných rámcoch ITRF2005 a neskôr ITRF2008. (Ferianc, Droščák, 2019). Zmena rámcov, sa aj napriek ich transformácii do ETRF2000 prejavuje na viacerých časových radoch súradníc staníc v podobe skokov v rokoch 2013, resp. 2017, kedy došlo k zmenám rámcov ITRF, čo je vidno aj na príklade na obr.2.



Obr. 2. Ukážka skokov v súradniciach časových radov spôsobených zmenami referenčných rámcov pri výpočte.

Na základe týchto faktov sme sa na GKÚ rozhodli vykonať prepočet celého obdobia v jednotnom referenčnom rámci, ale vzhľadom na náročnosť a zdĺhavosť procesu neboli tieto práce ešte ukončené. Kým príde k ukončeniu týchto prác, sú takto spôsobené skoky v súradniciach na účely ďalších analýz vhodným postupom spracovania odhadované a odstraňované.

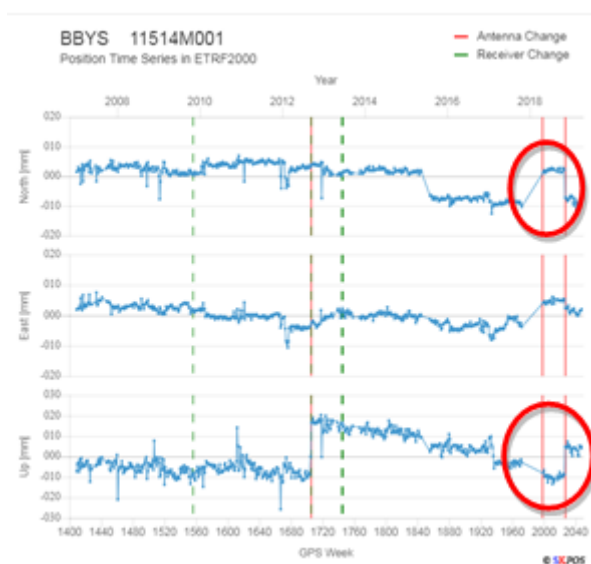
3 Dekompozícia časových radov

3.1 Odhad rýchlostí referenčných staníc SKPOS

Odhad rýchlostí referenčných staníc SKPOS spočíva v odhade trendu časového radu súradníc v systéme ETRS89. Pri analýze sa vychádza z predpokladu, že rýchlosť staníc, teda trend, je v čase nemenný a lineárny. Trend je odhadovaný pomocou lineárnej regresie metódou najmenších štvorcov. Smernica odhadnutej priamky reprezentuje trend t.j. predstavuje rýchlosť stanice alebo zmeny jej súradníc v čase. Súčasne s odhadom trendu sa odhadujú aj skoky v jednotlivých súradnicových zložkách v rovnakých okamihoch a ich veľkosti. K tým dochádza najmä po výmene hardvéru staníc (najčastejšie antény). Súčasne s odhadom skokov dochádza aj k odhadu sezónnej zložky časových radov s ročnou periódou. Rýchlosť staníc je určovaná zo súradníc v súradnicovom systéme ETRS89.

3.2 Eliminácia skokov v časových radoch

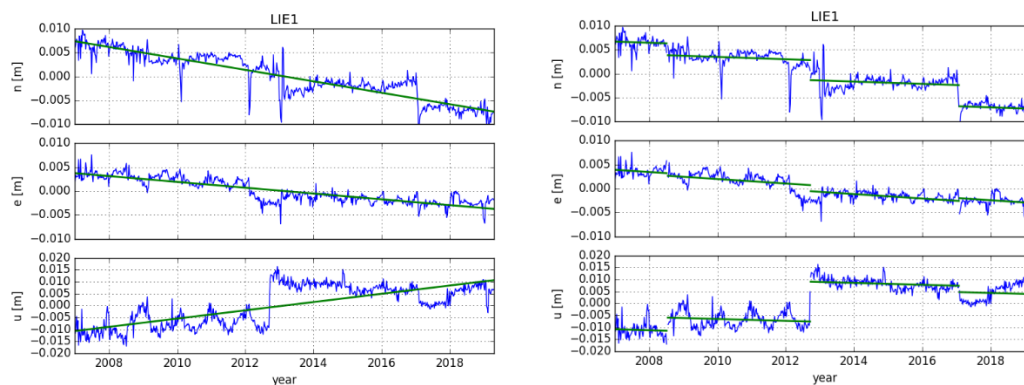
Časové rady súradníc staníc SKPOS obsahujú skoky, ktoré sú väčšinou spôsobené výmenou antény alebo prijímača na stanici. Príklady takýchto skokov spôsobených výmenou antény na stanici BBYS je možné vidieť na obr. 3.



Obr. 3. Ukážka skokov vo všetkých súradniciach časových radov spôsobených výmenou antény referenčnej stanice.

Eliminácia skokov z časových radov predstavuje najdôležitejší krok spracovania. Pre spoľahlivý odhad a elimináciu skokov z časových radoch je potrebné poznať okamihy, kedy ku skokom došlo. Pri veľkom množstve staníc a vzhľadom na skutočnosť, že nie všetky okamihy skokov zodpovedajú dátumom výmeny hardvéru na staniciach, by tento proces vyžadoval veľké množstvo času. Na uľahčenie prác pri vyhľadaní okamihov skokov bol preto použitý program FODITS, ktorý je súčasťou softvéru Bernese 5.2. Program na základe množiny štatistických testov určuje významnosť okamihov v ktorých potenciálne nastal skok s relatívne vysokou úspešnosťou.

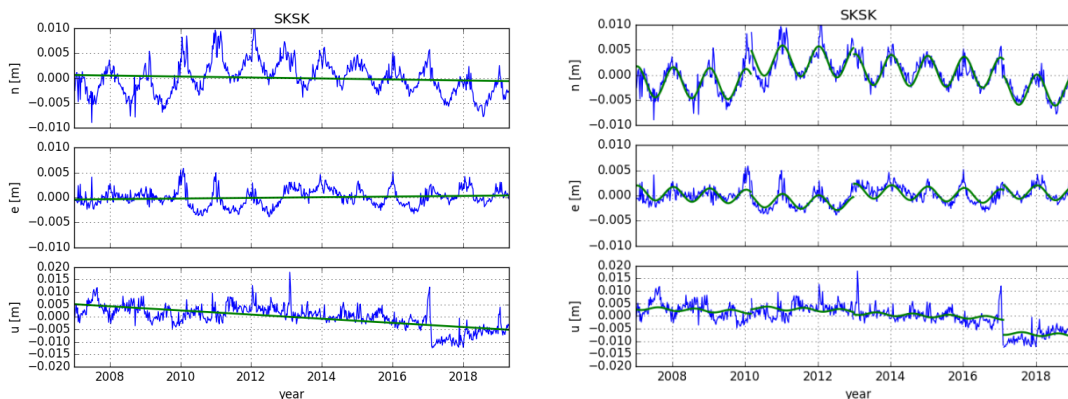
Na obr. 4 je zobrazená ukážka odhadu skokov na stanici LIE1 za predpokladu konštantnej (lineárnej) rýchlosti stanice počas celej doby observácie.



Obr. 4. Odhad lineárneho trendu bez uváženia skokov (vľavo) a s odhadom a uvážením skokov.

3.3 Odhad sezónnej zložky časových radov

Pri niektorých staniciach SKPOS bola časových radoch zistená významná sezónna variácia súradníc s ročnou periódou. Dôvodov na existenciu sezónnej variácie môže byť viacero, napríklad môže ísť o problém so stabilizáciou, hydrológiou, prípadne môžu na stanicu vplývať systematicky lokálne geodynamické procesy z jej okolia. Na obr. 5 sa nachádza príklad zobrazenia časového radu stanice SKSK s odhadom ročnej periódy súčasne s odhadom trendu.

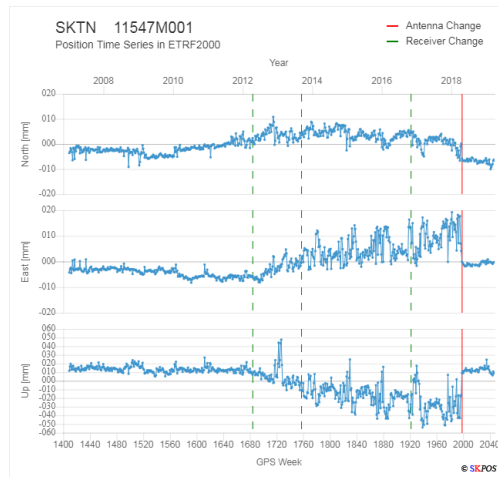


Obr. 5. Odhad lineárneho trendu zo „surových“ dát (vľavo) a s uvážením skokov a ročnej periódy (vpravo).

3.4 Anomálne správania staníc

Na niektorých referenčných staniciach SKPOS sme po vykreslení ich časových radov súradníc zaznamenali nezvyčajný - anomálny charakter. Po vykonaní komplikovaných analýz bolo zistené, že sa jedná najmä o stanice s problémovým hardvérom, najmä chybnou anténou (Ceizel et al., 2017). Príklad časového radu stanice s problematickou anténou, ktorý sa prejavil formou anomálneho správania sa časového radu jej súradníc sa nachádza na obr. 6.

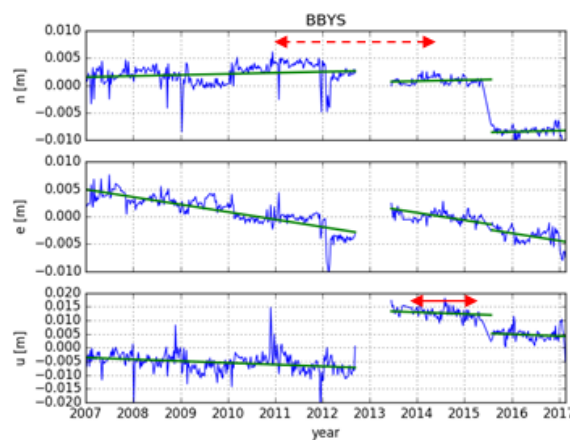
Konkrétny problém na uvedenej stanici SKTN bol vyriešený výmenou chybnej antény stanice za novú. Do odhadu rýchlostí boli všetky časové úseky z obdobia anomálneho správania zo spracovania vylúčené.



Obr. 6. Príklad časového radu stanice SKTN (Trenčín) s anomálnym charakterom.

3.5 Vylúčenie krátkych časových radov

Nie všetky stanice SKPOS sú v kontinuálnej prevádzke celých 13 rokov prevádzky služby, aj preto bola pre spoľahlivý odhad rýchlostí staníc zvolená podmienka minimálnej dĺžky časového radu vstupujúceho do odhadu rýchlosti na 3 roky. Stanice s kratším časovými radmi boli zo spracovania vylúčené. Druhou podmienkou bolo vylúčenie úsekov časových radov ohraničených detekovaným skokom kratších ako 1,25 roka. Uvedené podmienky akceptácie časových radov vstupujúcich do odhadu rýchlosti sú schematicky zobrazené na obr. 7.

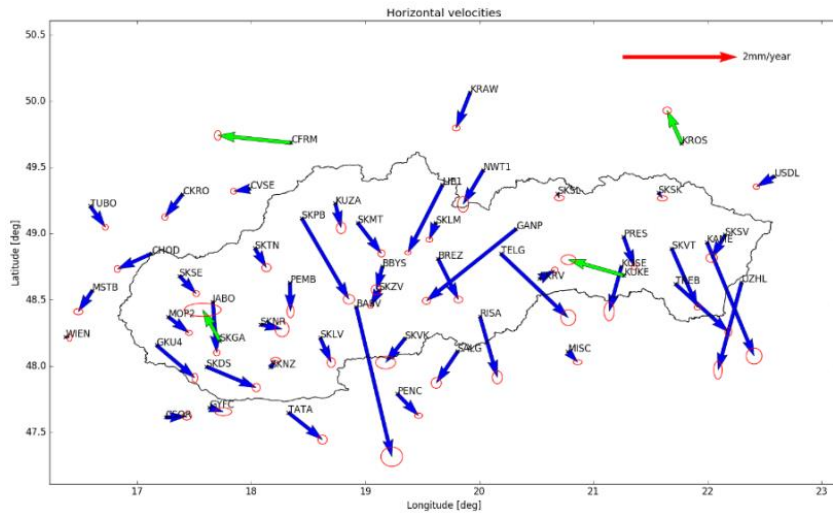


Obr. 7. Podmienky minimálnej dĺžky časového radu pre zahrnutie do spracovania. Neprerušovaná šípka reprezentuje minimálnu dĺžku čiastkového časového radu oddeleného skokmi v súradniciach. Prerušovaná šípka je minimálna dĺžka celého časového radu (suma dĺžok čiastkových akceptovaných časových radov).

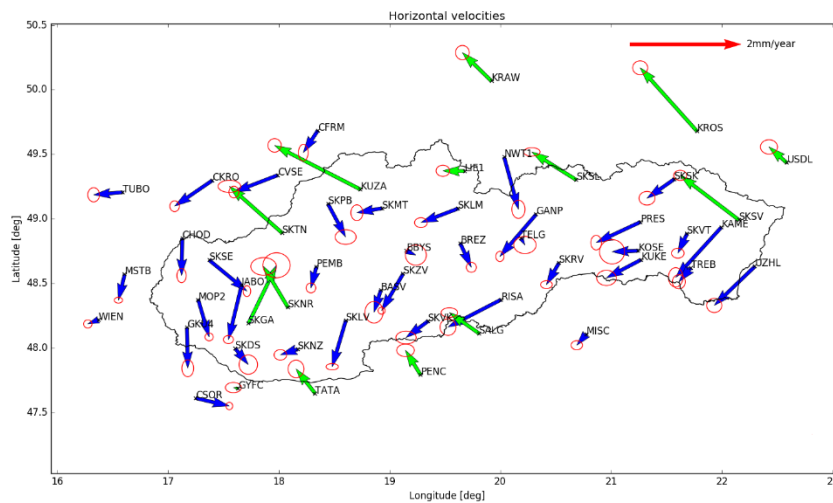
4 Odhad geokinematiky Slovenska

V texte nižšie sú graficky zobrazené horizontálne rýchlosti staníc SKPOS odhadnuté z topocentrických súradníc v systéme ETRS89 formou vektorového poľa. Ich porovnaním je možné pozorovať vplyv jednotlivých krokov spracovania na výsledný odhad rýchlostí. Ako prvé sú na obr. 8 zobrazené horizontálne rýchlosti odhadnuté z tzv. „surových“ časových radov v ktorých nie sú eliminované skoky, ktoré ako vidíme v porovnaní s ďalšími riešeniami znehodnocujú grafickú reprezentáciu výsledných rýchlostí. Na obr. 9 je zobrazené vektorové pole horizontálnych rýchlostí z časových radov v ktorých boli skoky eliminované, v ktorých boli vylúčené odľahlé hodnoty, v ktorých boli eliminované sezónne zložky s ročnou periódou a do odhadu ktorých vstupovali aj presnosti súradníc pre každé týždenné riešenie. Tieto

presnosti boli získané zo súborov formátu SINEX a v modeli vystupujú vo forme matice váh. Charakteristiky presnosti odhadnutých rýchlostí sú na obrázkoch nižšie zobrazené formou elíps stredných chýb v rovnakej mierke ako sú zobrazené samotné rýchlosti a reprezentujú 95% konfidenčný interval. Použitá farba odhadnutých vektorov rýchlosti reprezentuje jeho prevládajúci smer. Zelená farba reprezentuje vektory smerujúce na sever, modrá farba vektory smerujúce na juh.



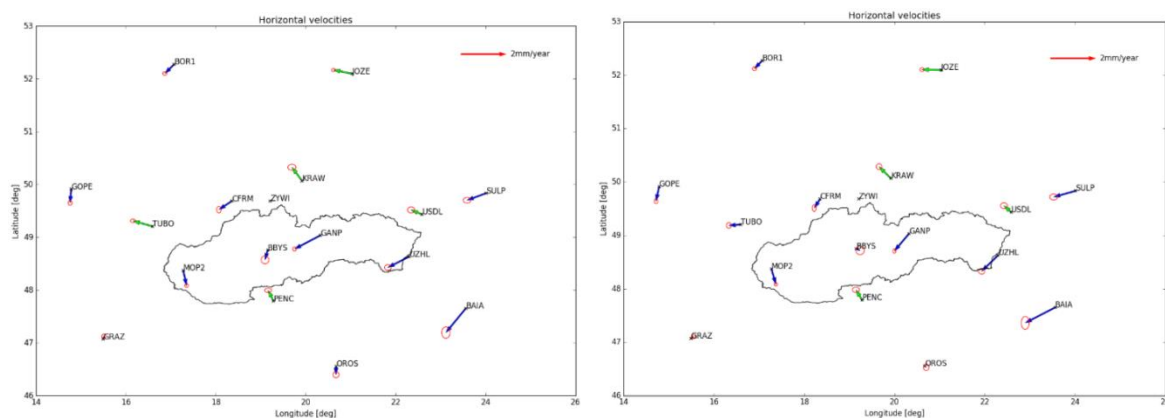
Obr. 8. Horizontálne rýchlosti staníc zaradených do spracovania GKÚ na základe odhadu zo „surových“ topocentrických súradníc v systéme ETRS89.



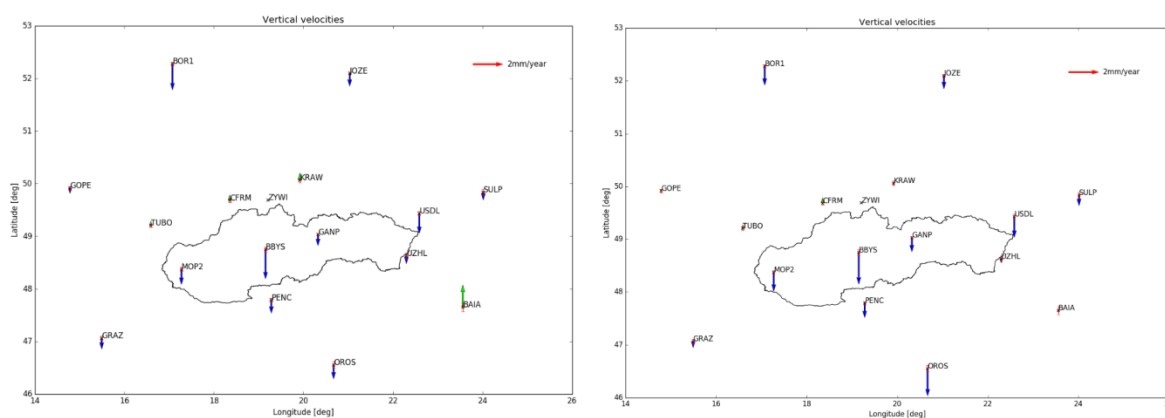
Obr. 9. Horizontálne rýchlosti staníc zaradených do spracovania GKÚ na základe odhadu z topocentrických súradníc v systéme ETRS89 s uvážením skokov súradníc, odstránením odľahlých hodnôt, sezónnej zložky s ročnou periódou a s uvážením presnosti určenia súradníc vo forme matice váh.

5 Porovnanie rýchlostí permanentných staníc z riešení GKÚ a EPN

Odhad rýchlostí permanentných staníc GNSS sa okrem GKÚ vykonáva napr. aj pre celú sieť EPN v rámci tzv. EPN riešenia, ktoré je výsledkom kombinovaného spracovania súradníc EPN staníc viacerými analyzačnými centrami EPN. Výsledné súradnice a rýchlosti sú publikované vo forme SSC súboru dostupného na web stránke EPN. Porovnaním odhadu rýchlostí staníc riešenia GKÚ s riešením EPN je možné čiastočne overiť korektnosť a spoľahlivosť nášho riešenia a tým aj celého spracovania. Porovnanie je vykonané graficky na obr. 10 a 11 a číselne v tab. 1. Zobrazené odhady rýchlostí z EPN riešenia uvažujú iba s lineárnym trendom bez odstránenia sezónnej zložky. V odhade rýchlostí GKÚ riešenia je uvažovaný okrem lineárneho trendu aj odhad sezónnej zložky s ročnou periódou.



Obr. 10. Horizontálne rýchlosti staníc získané z EPN riešenia (vľavo) a GKÚ riešenia (vpravo).



Obr. 11. Vertikálne rýchlosti staníc získané z EPN riešenia (vľavo) a GKÚ riešenia (vpravo).

Tab. 1. Porovnanie rýchlostí staníc z EPN a GKÚ riešenia.

Stanica	EPN riešenie (mm/rok)			GKÚ riešenie (mm/rok)			Rozdiely (mm/rok)		
	v_n	v_e	v_u	v_n	v_e	v_u	Δv_n	Δv_e	Δv_u
BAIA	-1,1	-0,9	1,5	-0,7	-1,3	-0,2	-0,4	0,4	1,7
BBYS	-0,4	-0,1	-2,0	-0,1	0,2	-2,1	-0,3	-0,3	0,1
BOR1	-0,4	-0,4	-1,7	-0,4	-0,4	-1,3	0,0	0,0	-0,4
CFRM	-0,4	-0,6	0,4	-0,4	-0,3	0,4	0,0	-0,3	0,0
GANP	-0,6	-1,1	-0,7	-0,8	-0,7	-1,0	0,2	-0,4	0,3
GOPE	-0,6	-0,1	-0,3	-0,6	-0,1	0,1	0,0	0,0	-0,4
GRAZ	0,1	0,0	-0,7	0,1	0,1	-0,4	0,0	-0,1	-0,3
JOZE	0,2	-0,8	-0,9	0,0	-0,8	-0,9	0,2	0,0	0,0
KRAW	0,6	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,2	0,1	0,0	0,7
MOP2	-0,7	0,2	-1,0	-0,7	0,2	-1,3	0,0	0,0	0,3
OROS	-0,4	0,0	-0,9	-0,1	0,1	-1,8	-0,3	-0,1	0,9
PENC	0,5	-0,2	-0,9	0,4	-0,3	-1,0	0,1	0,1	0,1
SULP	-0,3	-0,9	-0,5	-0,3	-1,0	-0,7	0,0	0,1	0,2
TUBO	0,2	-0,9	0,3	0,0	-0,5	0,2	0,2	-0,4	0,1
USDL	0,2	-0,5	-1,3	0,3	-0,3	-1,4	-0,1	-0,2	0,1

UZHL	-0,5	-0,9	-0,5	-0,7	-0,7	-0,3	0,2	-0,2	-0,2
-------------	------	------	------	------	------	------	-----	------	------

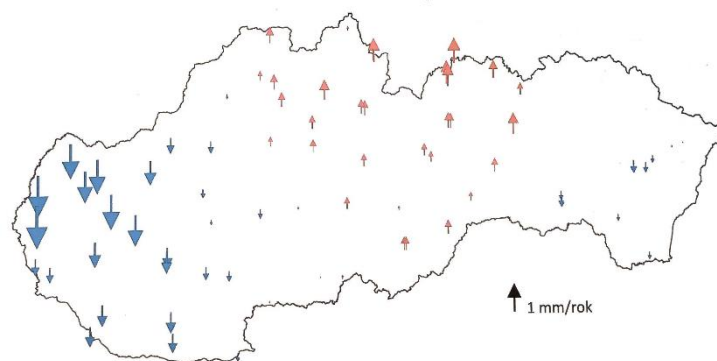
Z grafického porovnania (obr. 10 a 11) a z tab. 1 je zrejme, že obidve riešenia sú si veľmi podobné. Ako je možné vidieť, charakteristiky presnosti sú o rad nižšie ako samotné odhadnuté rýchlosti. Najvýznamnejšie rozdiely v horizontálnych rýchlostiach sú na staniciach BBYS a OROS a vo vertikálnych rýchlostiach na staniciach BAIA a OROS. Pravdepodobnou príčinou rozdielnych rýchlostí je rozdielna dĺžka časových radov súradníc vstupujúcich do spracovania. Vo všeobecnosti sú stanice v rámci siete EPN spracovávané dlhšie ako na GKÚ, ktoré sa začalo až v roku 2007. Dĺžky všetkých časových radov permanentných staníc, pre ktoré boli odhadované rýchlosti (riešenie GKÚ) sa nachádzajú v tab. 2. Dĺžky sú uvedené po odstránení odľahlých hodnôt a období (viď. kapitolu 3.5). Zároveň, rýchlosti publikované na EPN sú výsledkom kombinovaného spracovania a výpočtu viacerými analyzačnými centrami.

Tab. 2. Dĺžky časových radov vstupujúcich do odhadu rýchlostí permanentných GNSS staníc.

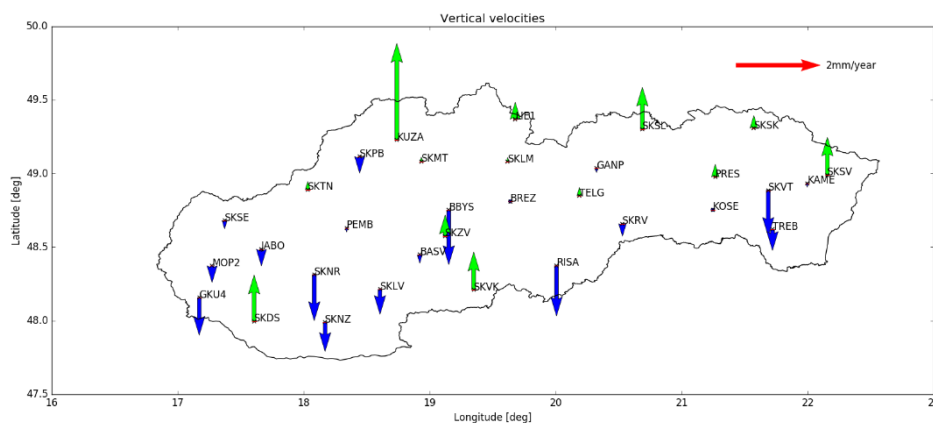
Stanica	Dĺžka (rokov)	Stanica	Dĺžka (rok)	Stanica	Dĺžka (rok)	Stanica	Dĺžka (rok)
BAIA	8,0	JABO	8,6	PENC	12,3	SKSL	12,3
BASV	5,3	JOZE	12,3	PRES	12,3	SKSV	7,3
BBYS	10,5	KAME	5,3	RISA	5,3	SKTN	5,0
BOR1	12,3	KOSE	6,1	SALG	10,5	SKVK	10,3
BREZ	8,5	KRAW	12,3	SKDS	7,4	SKVT	9,0
CFRM	12,3	KROS	10,0	SKGA	4,8	SKZV	12,3
CHOD	12,3	KUKE	5,8	SKLM	12,3	SULP	8,0
CKRO	12,3	KUZA	8,3	SKLV	10,9	TATA	12,2
CSOR	12,2	LIE1	12,3	SKMT	9,6	TELG	5,3
CVSE	12,3	MISC	12,2	SKNR	6,5	TREB	8,6
GANP	10,3	MOP2	11,0	SKNZ	9,3	TUBO	12,3
GKU4	12,3	MSTB	11,4	SKPB	6,3	USDL	11,2
GOPE	12,3	NWT1	5,2	SKRV	12,3	UZHL	10,5
GRAZ	12,3	OROS	8,0	SKSE	12,3	WIEN	12,3
GYFC	10,6	PEMB	5,6	SKSK	12,3		

6 Porovnanie vertikálnych rýchlostí s rýchlosťami z nivelačných meraní

Na obr. 12 sú zobrazené odhadnuté vertikálne rýchlosti určené z nivelačných meraní v štátnej nivelačnej sieti z obdobia rokov 1949 až 2016 (Majkráková, 2019). Z výsledkov práce a z obr.12 vyplýva, že na základe veľmi presných nivelačných meraní vykazuje centrálna časť Slovenska mierny zdvih, zatiaľ čo západ a východ Slovenska mierny pokles územia, pričom nulové línie prechádzajú Považskou Bystricou, Prievidzou a Levicami na západe, resp. Svidníkom, Prešovom a Košicami na východe. Tento predpoklad je relatívny vzhľadom na naviazanie meraní na centrálny bod Pitelová. V záujme overenia tohto predpokladu z výsledkami získanými zo spracovania GNSS meraní boli v rámci analýzy za účelom korektného porovnania naftované vertikálne rýchlosti získané z GNSS meraní na rýchlosti získané z veľmi presnej nivelácie opravením odhadnutých vertikálnych rýchlostí permanentných staníc SKPOS o priemernú hodnotu rýchlostí na staniciach prechádzajúcich vyššie uvedenými „nulovými“ oblasťami. Výsledkom je podľa nás porovnateľná mapa (obr. 13) recentných vertikálnych pohybov územia Slovenska odhadnutých z presných meraní GNSS.



Obr. 12. Vertikálne rýchlosti odhadnuté z nivelačných meraní z rokov 1949 – 2016 (Majkráková, 2019).



Obr. 13. Vertikálne rýchlosti odhadnuté z GNSS po nafitovaní na rýchlosti z nivelačných meraní.

7 Záver

Výsledky prezentované v príspevku potvrdzujú fakt, že Slovensko sa nachádza z pohľadu Európy a eurázijskej tektonickej platne na jej stabilnej časti, nakoľko odhadnuté vnútroplatinové rýchlosti dosahujú zväčša iba submilimetrové hodnoty. V príspevku je podrobnejšie zobrazený aj vplyv jednotlivých krokov procesu odhadu rýchlostí na ich výslednú veľkosť. Z tohto pohľadu sa ako najdôležitejší faktor spoľahlivého odhadu rýchlostí permanentných staníc javí kontinuálna dĺžka ich observácie. Odhadnuté vertikálne rýchlosti permanentných staníc SKPOS naznačujú klesajúci pohyb južnej časti územia Slovenska.

Literatura

- [1] Dach, R. - Lutz, S. - Walser, P. – Fridez, P. (Eds): *Bernese GNSS Software Version 5.2. [User manual]*. Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9, 2015.
- [2] Ferienc, M. - Droščák, B.: *Geokinematika Slovenska z pohľadu spracovania údajov z referenčných staníc SKPOS (roky 2007-2019)*. In: CD zborník referátov „Geodézia, Kartografia a Geoinformatika 2019“. XI. Medzinárodno-odborná konferencia. Fakulta BERG, TU Košice, UPJŠ, STU, ČVUT, HB Prievidza, SBS, Demänovská dolina, Nízke Tatry, 10.-13.september 2019. ISBN 978-80-553-3340-3.
- [3] Ceizel, P., Smolík, K., Droščák, B.: *Skúsenosti z analýzy hardvéru referenčných staníc SKPOS*. In: Zborník referátov „Družicové metody v geodézii a katastru“. Seminář s mezinárodní účastí. VUT Brno, 2.2.2017. ISBN 978-80-86433-64-6.

- [4] *Majkráková, M.: „Výpočet novej realizácie výškového systému na Slovensku“. Prezentácia stavu plnenia koncepcnej úlohy. GKÚ Bratislava. 15.03.2019. Interné*