

Geokinematika Slovenska z pohľadu spracovania údajov z referenčných staníc SKPOS (roky 2007-2017)

Pavol Ceizel

*Geodetický a kartografický ústav Bratislava, Chlumeckého 4, 827 45 Bratislava.
pavol.ceizel@skgeodesy.sk*

Branislav Droščák

*Geodetický a kartografický ústav Bratislava, Chlumeckého 4, 827 45 Bratislava.
branislav.droscak@skgeodesy.sk*

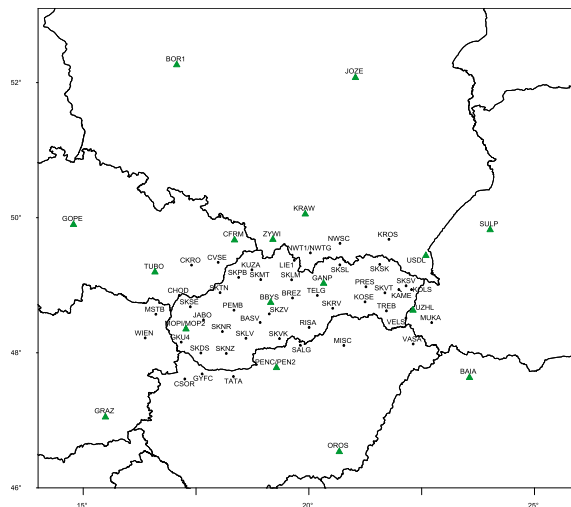
ABSTRAKT: Geokinematiku zemského povrchu územia Slovenskej republiky možno skúmať viacerými metódami. Od rozmachu využívania GNSS a sieti permanentných referenčných staníc, využívajú geodeti na tento účel práve tieto siete staníc GNSS. Princíp spočíva v presnom spracovaní údajov GNSS zaznamenaných referenčnými stanicami, zobrazení výsledkov vo forme časových radov a v odhade ich parametrov, t.j. vo vykonaní dekompozície časových radov. Najzaujímavejšou veličinou z pohľadu skúmania geokinematiky je odhad trendu jednotlivých súradnicových komponentov zoradených do časových radov, ktorý reprezentuje rýchlosť t.j. veľkosť a smer posunu, resp. zmeny jednotlivých súradnicových komponentov v čase. Za predpokladu spoľahlivej stabilizácie referenčnej stanice, dostatočne dlhej doby jej kontinuálneho chodu a spoľahlivého spracovania, predstavuje tento spôsob určovania geokinematických vlastností zemského povrchu veľmi kvalitnú a efektívnu metódu. Článok sa venuje určeniu geokinematiky Slovenska na základe parametrov trendu odhadnutých z časových radov súradníc referenčných staníc SKPOS zo spracovaných údajov z rozpätia rokov 2007 – 2017.

1 ÚVOD

Viacere permanentné referenčné stanice Slovenskej priestorovej observačnej služby (ďalej SKPOS) sú v kontinuálnej prevádzke už viac ako 10 rokov. Takéto dlhé obdobie nepretržitej prevádzky v kombinácii s nepretržitým monitorovaním polohy týchto staníc nám umožňuje interpretovať recentné geokinematické procesy na Slovensku oveľa spoľahlivejšie ako kedykoľvek predtým. Príspevok nižšie opisuje postup určenia časových zmien súradníc t.j. rýchlostí staníc SKPOS reprezentujúce rýchlostné pohyby zemského povrchu jednotlivých lokalít Slovenska a poukazuje na úskalia, ktoré napriek zdanlivo dlhej dobe sledovania môžu komplikovať ich samotný odhad.

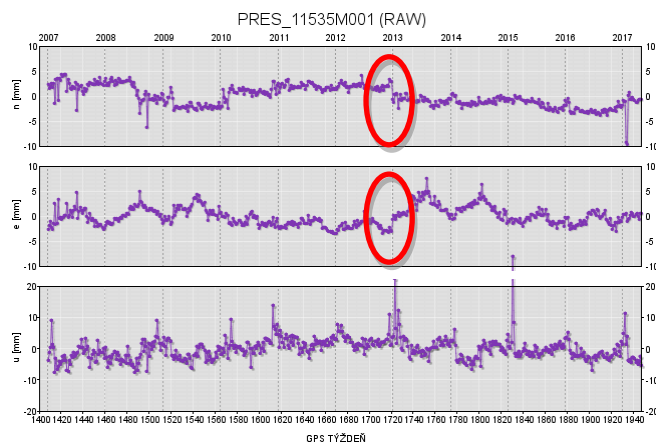
2 SPRACOVÁVANIE GNSS ÚDAJOV A TVORBA ČASOVÝCH RADOV

Na výpočet súradníc referenčných staníc SKPOS sa na Geodetickom a kartografickom ústave Bratislava (GKÚ) využíva vedecký softvér Bernese verzia 5.2 (Dach et al., 2015). Výpočet prebieha rutinne pre každý deň. Ako prvé sú počítané denné riešenia, ktoré sú kombinované do týždenných riešení, ktoré sú ukladané do tvaru SINEX. Údaje súborov SINEX sú použité na vykreslenie časových radov topocentrických súradníc referenčných staníc SKPOS v systéme ETRS89. Na obr. 1 sú zobrazené stanice SKPOS spolu so zahraničnými permanentnými stanicami a stanicami siete EUREF, ktoré sú súčasťou rutinného spracovania na GKÚ.



Obr 1. Permanentné GNSS stanice spracovávané na GKÚ. Stanice označené zeleným trojuholníkom sú súčasťou siete EUREF.

V rozpätí rokov 2007 – 2013 bola na presný výpočet súradníc referenčných staníc SKPOS využívaná verzia 5.0 programu Bernese, ktorá je podrobne popísaná v (Dach et al., 2007). Súradnice permanentných staníc boli pre toto obdobie určené v referenčnom rámci ITRF2005 (Droščák, 2013). Od roku 2013, kedy došlo k prechodu na novšiu verziu Bernese 5.2, sa prešlo na určovanie súradníc v referenčnom rámci ITRF2008. Napriek tomu, že sa súradnice oboch rámcov na ďalšie výpočty transformujú do ETRF2000, sa tento fakt nejednotného rámca prejavuje na viacerých časových radoch v podobe skoku začiatkom roka 2013 (obr. 2).



Obr 2. Ukážka skoku v súradniciach časových radov spôsobeného prechodom z ITRF2005 na ITRF2008.

Na základe tohto faktu sa pracovníci GKÚ rozhodli vykonať reprocessing celého obdobia v jednotnom rámci, ale vzhľadom na náročnosť a zdĺhavosť tohto procesu neboli tieto práce doposiaľ dokončené. Skoky v súradniciach spôsobené rozdielnym referenčným rámcom je možné na účely ďalších analýz vhodným postupom spracovania odhadnúť a odstrániť, a preto by nemali významne ovplyvniť výsledky ďalej prezentovaných analýz.

3 DEKOMPOZÍCIA ČASOVÝCH RADOV SÚRADNÍC STANÍC SKPOS

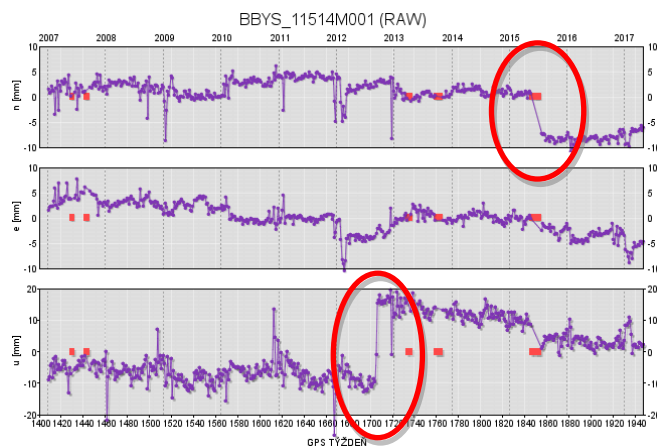
3.1 Odhad rýchlostí referenčných staníc SKPOS

Odhad rýchlostí referenčných staníc SKPOS spočíva v odhade trendu časového radu zostavených súradníc staníc v systéme ETRS89. Pri analýze sa vychádza z predpokladu, že rýchlosť staníc, teda trend, je lineárny v čase. 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. Ku tým dochádza najmä po výmene hardvéru staníc. Súčasne s odhadom skokov sa odhadujú aj sezónne zložky časových radov s ročnou periódou.

Rýchlosť staníc je určovaná zo súradníc v systéme ETRS89, preto sú výsledné rýchlosti v skutočnosti len reziduálne rýchlosti voči rýchlostnému modelu platnému pre ETRS89 a euroázijskú platňu pohybujúcu sa rýchlosťou cca 2 cm za rok severovýchodným smerom.

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 je možné pozorovať na obr. 3.



Obr 3. Ukážka skokov v súradniciach časových radov spôsobených výmenou hardvéru na referenčnej stanici.

Eliminácia skokov časových radov je najdôležitejší krok spracovania, nakoľko ich efekt by výrazne znehodnotil odhad výsledných rýchlostí staníc. Pre spoľahlivý odhad veľkosti skokov v časových radoch je potrebné poznať dátumy, kedy ku skokom došlo. Pri veľkom množstve staníc a vzhľadom na skutočnosť, že nie všetky dátumy skokov zodpovedajú dátumom výmeny hardvéru na staniciach, by tento proces vyžadoval veľké množstvo času pri manuálnom určovaní dátumov diskontinuit. Preto bolo rozhodnuté na účel určenia dátumov skokov v časových radoch využiť softvér Bernese 5.2, konkrétne program FODITS, ktorý na základe množiny štatistických testov určuje signifikantnosť okamihov v ktorých potenciálne nastal skok s relatívne vysokou úspešnosťou (Ostini, 2012).

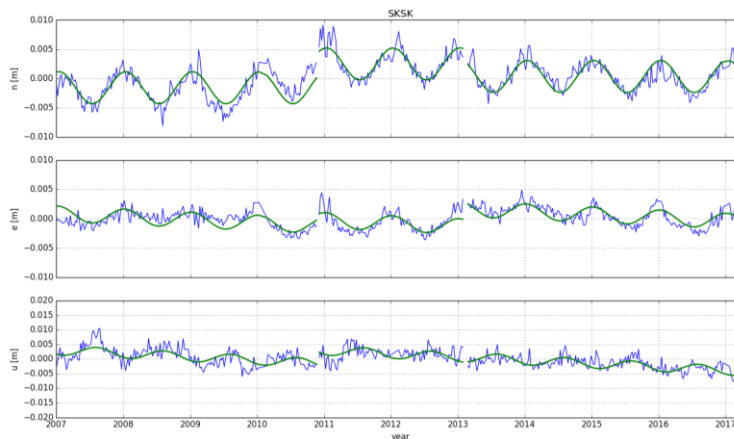
Odhad skokov za predpokladu konštantnej (lineárnej) rýchlosti stanice počas celej doby observácie je uvážený napr. na obr. 4. Princíp odhadov skokov je rovnaký ako je uvedené v práci (Rapinski et al., 2016).



Obr 4. Odhad lineárneho trendu spoločne so skokmi časových radov topocentrických súradníc stanice LIE1 (Liesek) v systéme ETRS89.

3.3 Odhad sezónnej zložky časových radov

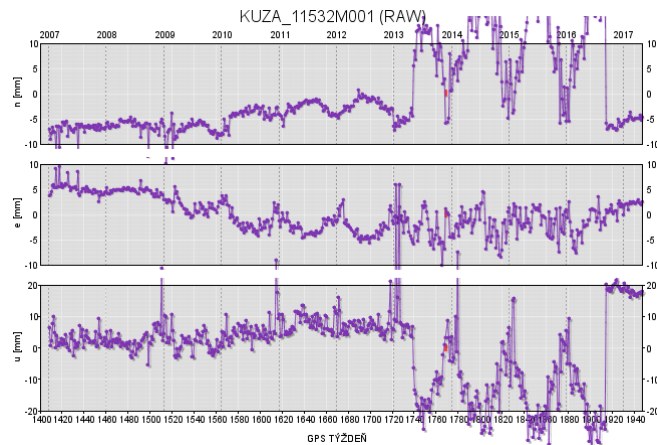
Pri niektorých staniciach SKPOS sa prejavuje sezónna variácia súradníc časového radu s ročnou periódou. Dôvodom na existenciu sezónnej variácie môže byť viacero, napríklad môže ísť o problém so stabilizáciou, hydrológiou, prípadne môžu na stanicu vplývať lokálne geodynamické procesy z jej okolia. Príklad odhadu ročnej periódy súradníc staníc odhadnutej súčasne s trendom je na obr.5.



Obr 5. Odhad lineárneho trendu spoločne so skokmi a ročnou periódou časových radov topocentrických súradníc stanice SKSK (Svidník) v systéme ETRS89.

3.4 Anomálne správanie staníc SKPOS

Na niektorých referenčných staniciach SKPOS sme po vykreslení ich časových radov súradníc zaznamenali anomálne správanie. Po vykonaní komplikovaných analýz sa zistilo, že sa jedná najmä o stanice s problémovým hardvérom (Ceizel et al., 2017). Príklad stanice s problematickou anténou, ktorý sa prejavil formou anomálneho správania časových radov jej súradníc sa nachádza na obr. 6.



Obr 6. Stanica KUZA (Žilina) s anomálnym časovým radom.

Konkrétny problém na vyššie uvedenej stanici KUZA bol vyriešený kompletnou výmenou hardvéru stanice. Pri odhade rýchlostí boli všetky časové úseky z obdobia anomálneho správania vylúčené zo spracovania.

3.5 Vylúčenie odľahlých hodnôt

Pri samotnom výpočte súradníc staníc SKPOS v programe Bernese dochádza k automatickému vylučovaniu odľahlých hodnôt podľa štandardne nastavených kritérií. Napriek tomu sa odľahlé hodnoty vyskytujú prakticky v každom časovom rade aj po základnej eliminácii, a bolo ich potrebné pri odhade rýchlostí staníc vylúčiť.

Nie všetky stanice SKPOS sú v kontinuálnej prevádzke celých 10 rokov, aj preto bola pre spoľahlivý odhad rýchlostí staníc zvolená podmienka minimálnej dĺžky časového radu 3 roky. Stanice s kratším časovými radmi boli zo spracovania vylúčené. Druhou podmienkou bolo vylúčenie úsekov časového radu ohraničených detekovaným skokom kratších ako 1.25 roka. Tieto podmienky akceptácie časového radu sú schematicky zobrazené na obr. 7.



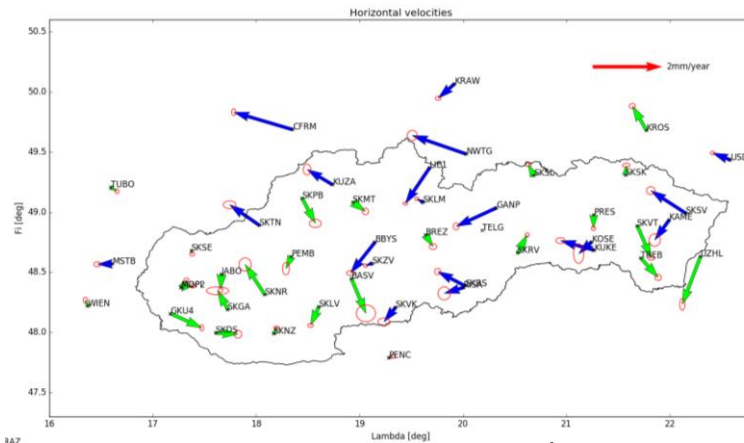
Obr 7. Podmienky minimálnej dĺžky časového radu pre zahrnutie do spracovania. Neprerušovaná šípka reprezentuje minimálnu dĺžku čiastkového časového radu oddeleného skokmi v súradniciach. Prerušovaná šípka je minimálna dĺžka celého časového radu (suma dĺžok čiastkových akceptovaných časových radov)

4 REPREZENTÁCIA GEOKINEMATIKY SLOVENSKA

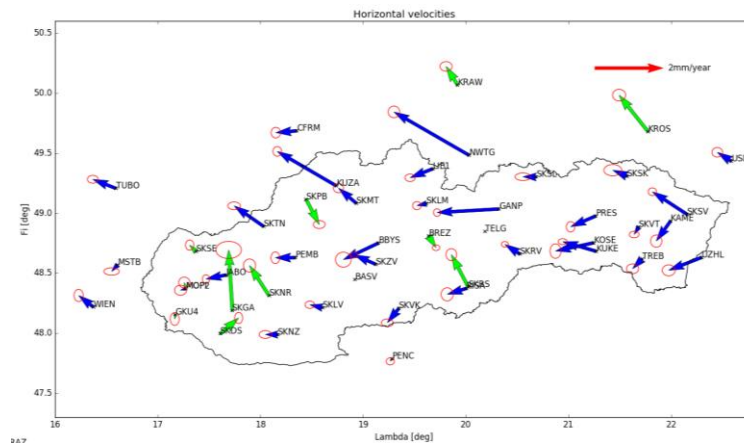
V tejto časti budú postupne graficky zobrazené horizontálne rýchlosti staníc SKPOS odhadnuté z topocentrických súradníc v systéme ETRS89 formou vektorového poľa. Ich porovnaním je možné pozorovať vplyv jednotlivých krokov spracovania na výsledný odhad rýchlostí.

Ako prvé sú na obr. 8 zobrazené horizontálne rýchlosti odhadnuté z tzv. „raw“ 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. Na obr. 10 je vektorové pole rýchlostí z obr. 9 upravené o vylúčené odľahlé hodnoty súradníc ku ktorému došlo ešte pred odhadom výsledných rýchlostí. Na obr. 11 je zobrazené vektorové pole rýchlostí z obr. 10 po eliminovaní sezónnej zložky s ročnou periódou. Nakoniec na obr. 12 je zobrazené vektorové pole rýchlostí do odhadu ktorých oproti predchádzajúcim riešeniam vstupovali aj presnosti súradníc pre každé týždenné riešenie. Tieto presnosti boli získané zo súborov formátu SINEX a v modeli vystupujú vo forme matice váh.

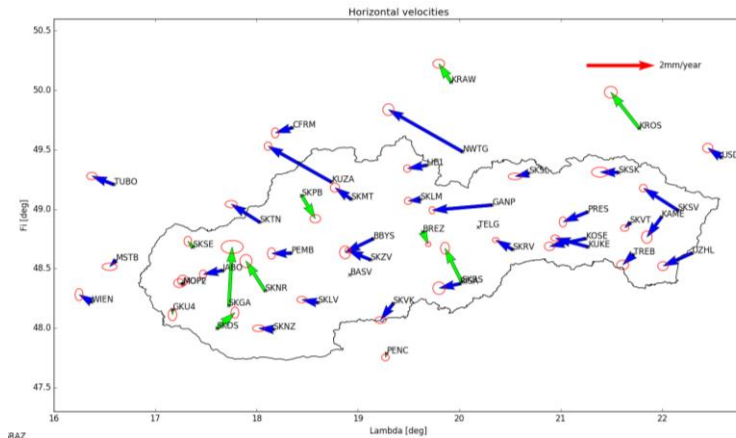
Charakteristiky presnosti odhadnutých rýchlostí sú na obrázkoch nižšie zobrazené formou elíps stredných chýb v rovnakej mierke ako sú zobrazené samotné rýchlosti a reprezentujú 95% konfidenčný interval. Použitá farba odhadnutých vektorov rýchlosti reprezentuje jeho prevládajúci smer. Modrá farba reprezentuje vektory smerujúce najviac na západ, zelená reprezentuje ostatné smery vektorov.



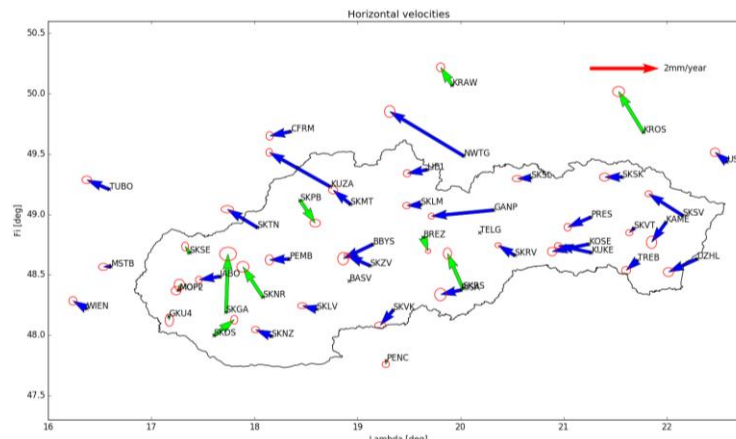
Obr 8. Horizontálne rýchlosti staníc zaradených do spracovania GKÚ na základe odhadu z „raw“ topocentrických súradníc v systéme ETRS89.



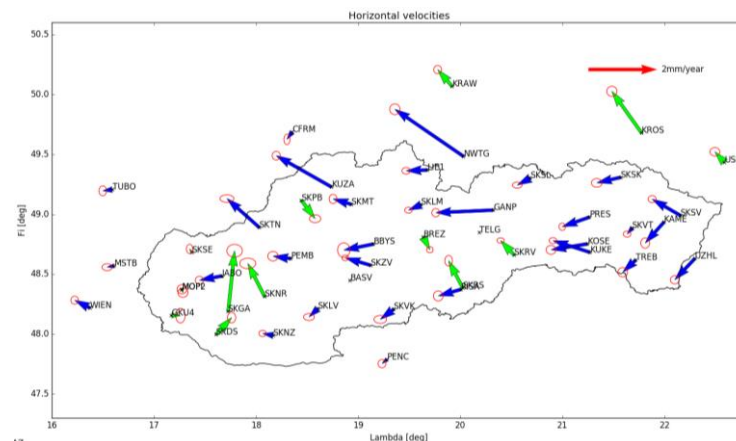
Obr 9. Horizontálne rýchlosti staníc zaradených do spracovania GKÚ na základe odhadu z topocentrických súradníc v systéme ETRS89 s uvažovaním skokov súradníc.



Obr 10. Horizontálne rýchlosti staníc zaradených do spracovania GKÚ na základe odhadu z topocentrických súradníc v systéme ETRS89 s uvážením skokov súradníc a odstránením odľahlých hodnôt.



Obr 11. Horizontálne rýchlosti staníc zaradených do spracovania GKÚ na základe odhadu z topocentrických súradníc v systéme ETRS89 s uvážením skokov súradníc, odstránením odľahlých hodnôt a sezónnej zložky s ročnou periódou.



Obr 12. 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 presností určenia súradníc vo forme matice váh.

Z obr. 8 až 12 vidno, že s výnimkou kroku uvažujúceho odstránenie skokov v časových radoch (obr. 9), dochádza pri ostatných krokoch spracovania len k nepatrnej zmene odhadu hori-

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

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

Tab. 2. Dĺžky časových radov pri odhade rýchlostí permanentných GNSS staníc.

stanica	Dĺžka (rokov)	stanica	Dĺžka (rokov)	stanica	Dĺžka (rokov)	stanica	Dĺžka (rokov)
BAIA	5,6	KRAW	10,3	RISA	3,3	SKSL	9,3
BBYS	9,2	KROS	8,1	SKDS	4,3	SKSV	6,3
BOR1	8,9	KUKE	5,9	SKGA	3,9	SKTN	5,0
BREZ	6,8	KUZA	6,1	SKLM	9,2	SKVK	5,0
CFRM	8,6	LIE1	10,0	SKLV	10,3	SKVT	7,1
GANP	8,0	MOP2	8,1	SKMT	7,7	SKZV	10,3
GKU4	10,2	MOPI	9,9	SKNR	4,6	SULP	4,9
GOPE	9,6	MSTB	8,2	SKNZ	10,3	TREB	6,0
GRAZ	10,3	NWTG	4,5	SKPB	4,3	TUBO	9,3
JABO	6,8	OROS	6,0	SKRS	6,2	USDL	7,2
JOZE	10,1	PEMB	4,3	SKRV	10,3	UZHL	8,6
KAME	3,3	PENC	9,8	SKSE	8,8	WIEN	10,3
KOSE	4,2	PRES	10,3	SKSK	10,3		

6 POROVNANIE ODHADU HORIZONTÁLNYCH RÝCHLOSTÍ Z PREDCHÁDZAJÚCIMI RIEŠENIAMÍ

Na obr. 17 sú zobrazené rýchlosti staníc SKPOS prezentované v práci (Droščák, 2013). Ich porovnanie s rýchlosťami získanými v tomto článku je v tab. 3. Rýchlosti staníc z oboch riešení nie sú úplne totožné, rozdiely v extrémnych prípadoch dosahujú hodnoty okolo 1 mm. Aj to poukazuje na dôležitosť dĺžky časových radov a v prípade analýzy kratších časových radov môže dôjsť veľmi ľahko k nepresnej interpretácii.

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 vnútroplatňové rýchlosti dosahujú iba milimetrové 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 rýchlosti permanentných staníc javí ich kontinuálna dĺžka observácie. Odhadnuté vertikálne rýchlosti permanentných staníc SKPOS naznačujú klesajúci pohyb južnej časti územia Slovenskej republiky, čo taktiež korešponduje s inými riešeniami.

LITERATÚRA

Ceizel, P., Smolík, K., Droščák, B. (2017). Skúsenosti z analýzy hardvéru referenčných staníc SKPOS. Družicové metódy v geodézii a katastru. Česká republika.

Dach, R. U., Lutz, S., Walser, P., and Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.

Dach, R. U., Hugentobler U., Fridez, P., Meindl M. (2007). Bernese GNSS Software Version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.

Droščák, B. (2013). Časové rady permanentných staníc SKPOS (2007-2013). In zborník referátov z vedecko-odborného seminára s medzinárodnou účasťou *Nové poznatky z realizácie a interpretácie geodetických meraní*. KGZA Svf STU, SSGK, GKÚ. Štrbské pleso. 21.-22.11.2013

Rapinski J., Kowalczyk K. (2016). Detection of discontinuities in the height component of gnss time series. University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland

Ostini, L. (2012). Analysis and Quality Assessment of GNSS-Derived Parameter Time Series. PhD thesis, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland