

VÝSKUM RECENTNÝCH VERTIKÁLNYCH POHYBOV NA ÚZEMÍ SLOVENKA

A STUDY OF THE RECENT VERTICAL MOVEMENTS IN THE TERRITORY OF SLOVAKIA

Miroslava Majkráková¹, Juraj Papčo², Branislav Droščák³

Abstract

The recent vertical movements in the territory of Slovakia have been studied since 50 years of the 20th century. The most reliable method of this study is the very precise levelling which is founded on strict criteria for the accuracy and methodology of the measurements. The study of recent vertical movements is based on the comparison of three or more repeated levelling measurements realized in the different times. Currently, we have data from the Second Czechoslovak levelling, the First and Second repeated levelling and the latest realization of the Slovak national levelling network in the 1996–2002. The aim of this contribution is to analyse the levelling measurements for the study of recent vertical movements in the territory of Slovakia which are the results of the dynamic tectonic processes in the Earth and often the by the human activity.

1 Úvod

Pod pojmom recentný vertikálny pohyb (RVP) rozumieme vertikálny pohyb zemskej kôry, ktorý sa deje v súčasnej dobe a je odrazom niekoľkých faktorov. Ide v prvom rade o samotný pohyb bodu, resp. objektu na ktorom je bod stabilizovaný. Takéto body je potrebné odhaliť a odstrániť z množiny bodov, na ktorých sú RVP skúmané. Ďalšou skupinou sú lokálne pohyby vyvolané technogénnou činnosťou, napr. ťažba nerastných surovín, a nakoniec sú to pohyby vyvolané geodynamickými procesmi vo vnútri Zeme, ktoré sa snažíme pri výskume RVP odhaliť. Výskum je preto založený na precíznom výbere bodov a spoľahlivom spracovaní výsledkov opakovaných nivelácií realizovaných na našom území.

RVP na našom území boli skúmané od 50. rokov 20. storočia prevažne Výskumným ústavom geodetickým, topografickým a kartografickým v Prahe. Na Slovensku sa tomuto výskumu v 90. rokoch intenzívne venoval Ing. Vanko z Výskumného ústavu geodézie a kartografie, ktorý spolu s kolektívom spracovával údaje z Československej jednotnej niveláčnej siete (ČSJNS) a opakovaných nivelácií realizovaných zhruba do roku 1980. V tom čase mali možnosť spracovávať iba dve epochy merania. Dnes máme k dispozícii minimálne tri merania každého prevýšenia 1. rádu Štátnej niveláčnej siete (ŠNS), čo nás podnietilo k novému výpočtu RVP a dosiahnutiu presnejších výsledkov. Konkrétne disponujeme tromi kompletnými realizáciami Baltského výškového systému po vyrovnaní (Bpv), ktoré tvoria výsledky meraní I. rádu v ČSJNS realizované od 1949 až 1952, 1. a 2. československej opakovanej nivelácie (1961 až 1978) (Kruis, 1961) a meraniami 1. rádu ŠNS z rokov 1996 až

¹ Miroslava Majkráková, Ing., Katedra geodetických základov STU, Radlinského 11, 850 05 Bratislava, Geodetický a kartografický ústav Bratislava, Chlumeckého 4, 827 45 Bratislava, e-mail: miroslava.majkrakova@skgeodesy.sk

² Juraj Papčo, Ing., PhD., Katedra geodetických základov STU, Radlinského 11, 850 05 Bratislava, e-mail: juraj.papco@stuba.sk

³ Branislav Droščák, Ing., PhD., Geodetický a kartografický ústav Bratislava, Chlumeckého 4, 827 45 Bratislava, e-mail: branislav.droscak@skgeodesy.sk

2002 (Hudec a Ferienc, 2007). Okrem kompletných realizácií celej siete máme aj množstvo dát z čiastkových premeraní nivelačných ťahov, slúžiacich jednak k premeraniu problematických úsekov pozdĺž komunikácií a vodných tokov, ako aj ku kontrolne pri pripojení ťahov 2. rádu ŠNS. Všetky dostupné nivelačné merania bolo potrebné detailne spracovať a navrhnúť vhodnú metodiku výpočtu, ktorej výsledkom bude mapa recentných vertikálnych pohybov zemskej kôry na území Slovenska.

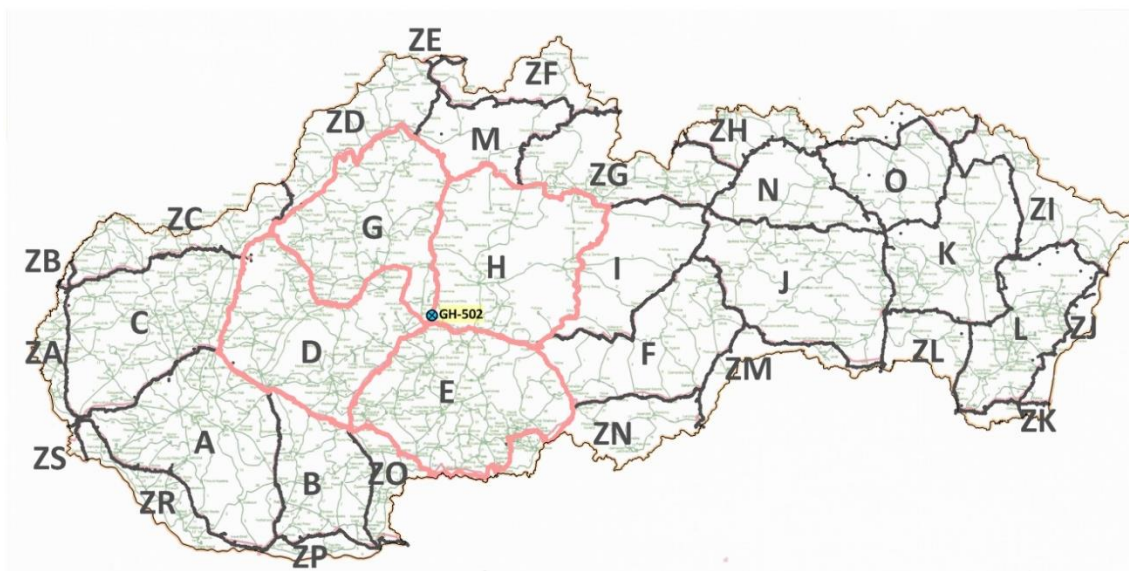
Tento príspevok sa venuje porovnaniu rôznych prístupov k spracovaniu nivelačných meraní a výpočtu recentných vertikálnych pohybov na testovacej lokalite okolo základného nivelačného bodu EH-V v Pitelovej.

2 Výpočet recentných vertikálnych pohybov

Pre experimentálny výpočet RVP bola zvolená lokalita stredného Slovenska tvorená polygómi D,E,G,H, v ktorej ťažisku sa nachádza základný nivelačný bod EH-V, Pitelová (Obr. 1). Na základe predchádzajúcich publikácií, hlavne (Vanko a Kvitkovič, 1990) alebo (Hefty a Vanko, 2005) bol bod vyhodnotený ako dlhodobý stabilný s minimálnymi pohybmi. Pre tento experiment bol za vzťažný bod použitý bod GH-502, uzlový bod ČSJSN s označením Žiar nad Hronom, ktorý sa nachádza v blízkosti základného nivelačného bodu. Je jednoznačne identifikovateľný a meraný už od 50. rokov. Súčasný uzlový bod pre uvedené polygóny EH-500 nebolo možné použiť, nakoľko bol stabilizovaný až v roku 1997 a je situovaný na frekventovanej križovatke.

V rámci experimentu boli použité tieto spôsoby odhadu rýchlosti:

- | | |
|---------------------------------------|----------------|
| 1. odhad rýchlostí použitím prevýšení | a) meraných |
| | b) vyrovnaných |
| 2. odhad rýchlostí použitím výšok | a) meraných |
| | b) vyrovnaných |



Obr. 1 Polygóny Štátnej nivelačnej siete spolu s výpočtovou oblasťou a vzťažným bodom pre rýchlosti bodov

2.1 Príprava nivelačných ťahov

Východiskovými pre spracovanie RVP boli trasy nivelačných ťahov 1. rádu ŠNS. Identifikáciou sa zistilo, že časť nivelačných ťahov bola navrhnutá po pôvodných trasách II. ale aj III. rádu ČSJNS. V týchto prípadoch bolo potrebné rozhodnúť, či je vhodnejšie použiť nižší rád ČSJNS, aby trasa súhlasila so súčasnou, alebo použiť trasu 2. rádu ŠNS, ktorá bola v minulosti I. rádom ČSJNS. Výsledné rozhodnutie bolo závislé hlavne od počtu meraní daného úseku v ČSJNS, resp. od kvality, ucelenosti a napojenia nivelačného ťahu. Na tomto mieste je potrebné zdôrazniť, že v ďalších úvahách budeme predpokladať rovnaké kritéria presnosti všetkých meraní nivelačných ťahov. Taktiež bol stanovený predpoklad, že merania nie sú zaťažené náhodnými či systematickými vplyvmi, resp. v každej epoche boli prevýšenia zaťažené týmito chybami rovnako.

Vstupnými údajmi pre výpočet RVP boli merané prevýšenia opravené o korekcie z rozťažnosti invarového pásu, zo zakrivenia Zeme a refrakcie. Nivelované prevýšenia (aj historické) boli dostupné v digitálnej podobe vo výstupnom formáte z programu VLS (Klobušiak a Ferianc, 1991-2001), ktoré obsahujú merané prevýšenia tam a späť, ich opravy, dĺžky oddielov a dátum začiatku a konca merania daného nivelačného ťahu. Ukážka sa nachádza na Obr. 2.

ULS 2.0 (C) MaKlo 1994 Instalacia-GEODETICKY A KARTOGRAFICKY USTAU, Bratislava Z O S T A U E N I E N I U E L A C N Y C H M E R A N I Dat=25/11/1996 Cas=10.36																	
Etapa		SAB															
Nazov		Bylnice-Trenc.Teplá															
Obdobie od-do		0/ 8/50 - 10/ 8/50															
Komunikujúce objekty		:															
Namerane údaje		C:\241\LYDA\DODATKY\1-RAD\SAB\OPRAVA\sab-0.fnr															
Struktúra		C:\241\LYDA\DODATKY\1-RAD\SAB\OPRAVA\sab-0.fns															
Zoznam bodov		C:\241\LYDA\DODATKY\1-RAD\SAB\OPRAVA\sab.fnb															
SAB-I<BYLNICE;TRENČ.TE			T A M						S P A T						d = TAM+SPAT < 1 >		
oddiel	R [km]	Cq [mm]	cas	nz	h [m]	lo [mm]	<h+lo+Cq> [m]	cas	nz	h [m]	lo [mm]	<h+lo+Cq> [m]	d<h> [mm]	d<lo> [mm]	d<h+lo+Cq> [mm]		
BYLNICE																	
1	0.830	.....	.d	10	-9.03266	+0.00	-9.03266	.d	10	+9.03216	+0.00	+9.03216	-0.50	+0.00	-0.50
2	0.442	.....	p.	6	-0.12650	-0.00	-0.12650	.d	6	+0.12610	+0.00	+0.12610	-0.40	+0.00	-0.40	
3	1.060	.....	p.	13	-3.66210	-0.14	-3.66224	.d	13	+3.66195	+0.14	+3.66209	-0.15	+0.00	-0.15	
4	0.776	.....	.d	16	-6.63872	-0.26	-6.63898	.d	16	+6.63915	+0.26	+6.63941	+0.43	+0.00	+0.43
5	0.518	.....	p.	10	+6.91755	+0.27	+6.91782	.d	10	-6.91770	-0.27	-6.91797	-0.15	+0.00	-0.15	
6	0.482	.....	p.	10	-12.77200	-0.50	-12.77250	.d	10	+12.77185	+0.50	+12.77235	-0.15	+0.00	-0.15	

Obr. 2 Ukážka súboru s meranými prevýšeniami zo softvéru VLS (Klobušiak a Ferianc, 1991-2001)

Pre experiment boli dostupné tieto prevýšenia:

- 2. československá nivelácia – ČSJNS (1949 – 1957)
- 1. československá opakovaná nivelácia (1961 – 1972)
- 2. československá opakovaná nivelácia (1973 – 1978)
- ŠNS (1996 – 2002)
- dopĺňujúce a pripájacie merania 2. rádu ŠNS

Do experimentu boli použité všetky body, na ktorých existujú minimálne tri merania prevýšenia.

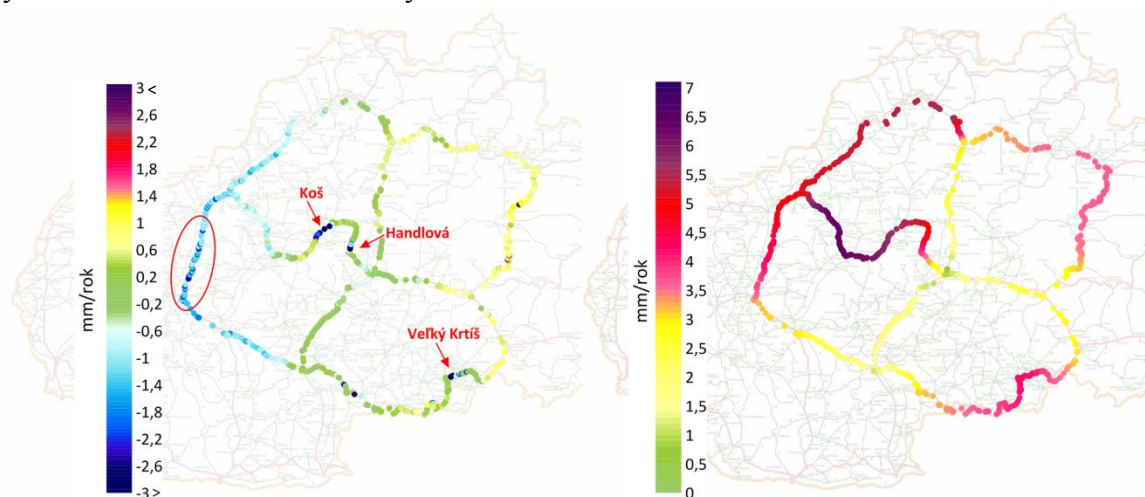
2.2 Výpočet a analýza ročných rýchlostí bodov

Ročné rýchlosti bodov boli odhadnuté metódou najmenších štvorcov (MNS) použitím štyroch prístupov k spracovaniu. Pri všetkých možnostiach sme predpokladali lineárny priebeh pohybu bodu. Výsledné rýchlosti vo všetkých prístupoch sú vzťahované k referenčnému bodu s teoretickou nulovou rýchlosťou GH-502.

1. Odhad rýchlostí z prevýšení
 - a) merané prevýšenia

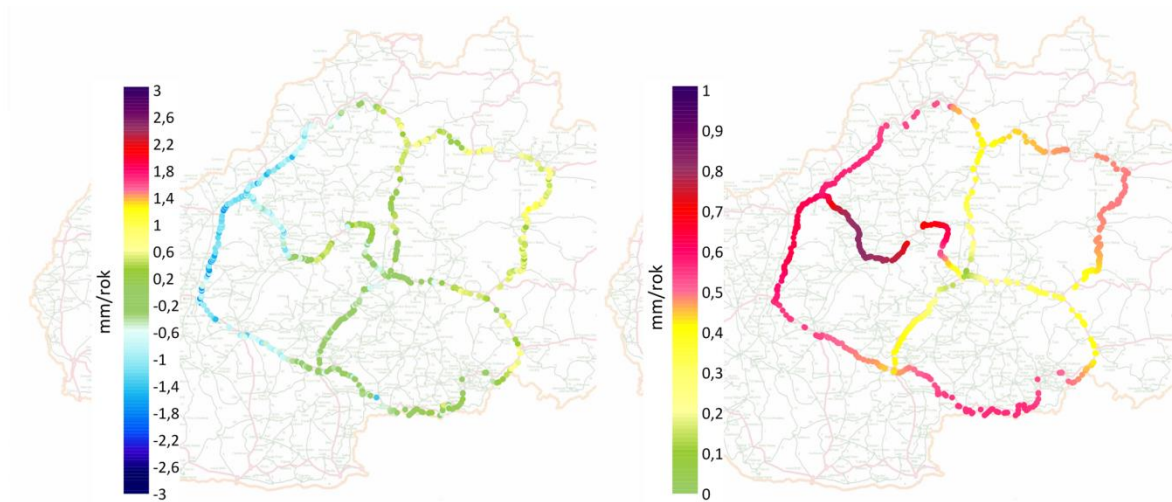
$$\Delta H_{AB}^0 - \Delta H_{AB}^I = v_B(t^I - t^0) - v_A(t^I - t^0), \quad (1)$$

kde ΔH_{AB}^0 je nivelované prevýšenie medzi bodmi A a B v základnej epoche, v čase, kedy bolo prvýkrát merané, ΔH_{AB}^I je nivelované prevýšenie medzi bodmi A a B v inej epoche, v_A a v_B sú ročné rýchlosti bodov A a B a $(t^I - t^0)$ je časový interval medzi meraniami. Pri tomto spôsobe je možné použiť rôzny počet meraní – nemusí byť identický pri každom prevýšení. Prevýšenia boli uvažované s rovnakými váhami.



Obr. 3 Odhadnuté rýchlosti bodov spolu so strednými chybami použitím meraných prevýšení

Na Obr. 3 sú znázornené výsledné odhadnuté ročné rýchlosti všetkých bodov spolu s charakteristikou presnosti – strednou chybou. Rýchlosti sú v rozsahu od -28,67 do 9,85 mm/rok so strednou chybou pohybujúcou sa medzi 0,51 do 6,41 mm/rok. Ako vidieť na obrázku, vo väčšine prípadov stredná chyba prevyšuje hodnotu rýchlosti. Na danom území sa však nachádzajú lokality, na ktorých dochádza k skokovým zmenám prevýšení aj o niekoľko metrov, z dôvodu ťažby či už súčasnej alebo v minulosti (Koš, Handlová, Veľký Krtíš), prípadne zosuv pôdy v 50. rokoch v okolí Handlovej. Tieto náhle zmeny v prevýšeníach spôsobujú narušenie predpokladaného lineárneho pohybu bodu, teda dochádza k výraznému zvýšeniu stredných chýb, ktoré sú rozšírené do celého územia. Tieto prevýšenia bolo potrebné z celkového riešenia vylúčiť a analyzovať ich samostatne. Ďalej bolo potrebné z celej množiny vylúčiť aj body, ktoré sa nachádzali pri frekventovanej ceste pozdĺž rieky Váh (Obr. 3 vľavo), z ktorých viaceré taktiež vykazovali náhle skokové zmeny. Z množiny bodov bolo potrebné vylúčiť niektoré body nachádzajúce sa zväčša na nestabilných priepustoch a mostoch. Testovaciu množinu, po uvedenej selekcii, nakoniec tvorilo 969 bodov.

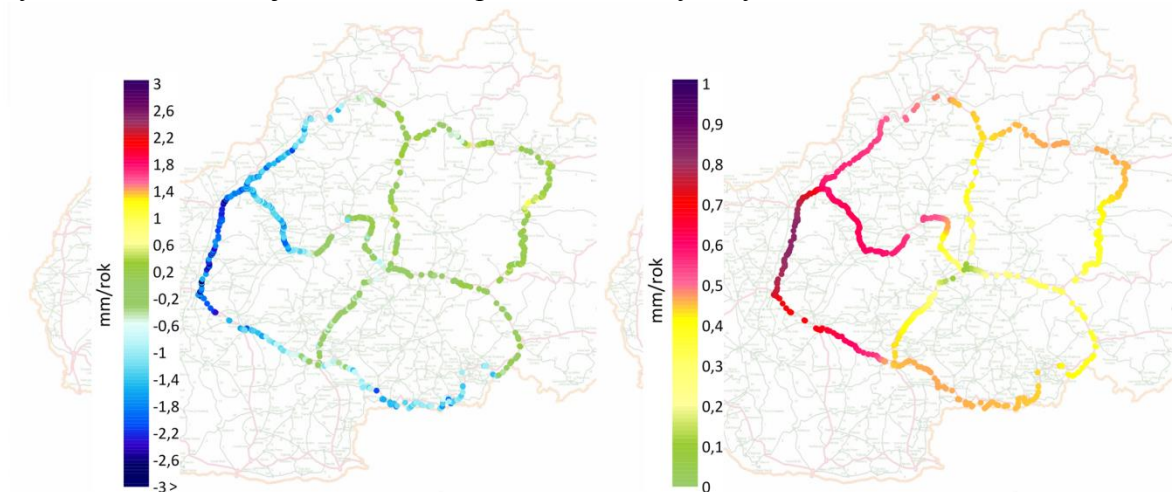


Obr. 4 Odhadnuté rýchlosti bodov spolu so strednými chybami použitím meraných prevýšení po odstránení „problematických“ lokalít a bodov

Na Obr. 4 sú vykreslené ročné rýchlosti bodov po vylúčení problematických lokalít a selekcii bodov. Rýchlosti sú v rozmedzí od -2,07 do 1,13 mm/rok a ich stredné chyby sa pohybujú od 0,07 do 0,82 mm/rok s priemerom 0,52 mm/rok.

b) vyrovnané prevýšenia

Pri tomto spôsobe boli najskôr vyrovnané prevýšenia na základe splnenia podmienky nulových uzáverov polygónov ŠNS a tie boli následne dosadené do vzťahu (1). Pri tomto type odhadu rýchlostí bolo potrebné použiť pri všetkých prevýšeníach rovnaký počet realizácií, podľa možnosti z približne rovnakých časových období, čo v našom prípade predstavovali tri epochy merania. Výhodou uvedeného riešenia je možnosť použitia stredných chýb odhadu prevýšení v kovariančnej matici meraní pri odhade ročných rýchlostí bodov.



Obr. 5 Odhadnuté rýchlosti bodov spolu so strednými chybami použitím vyrovnaných prevýšení

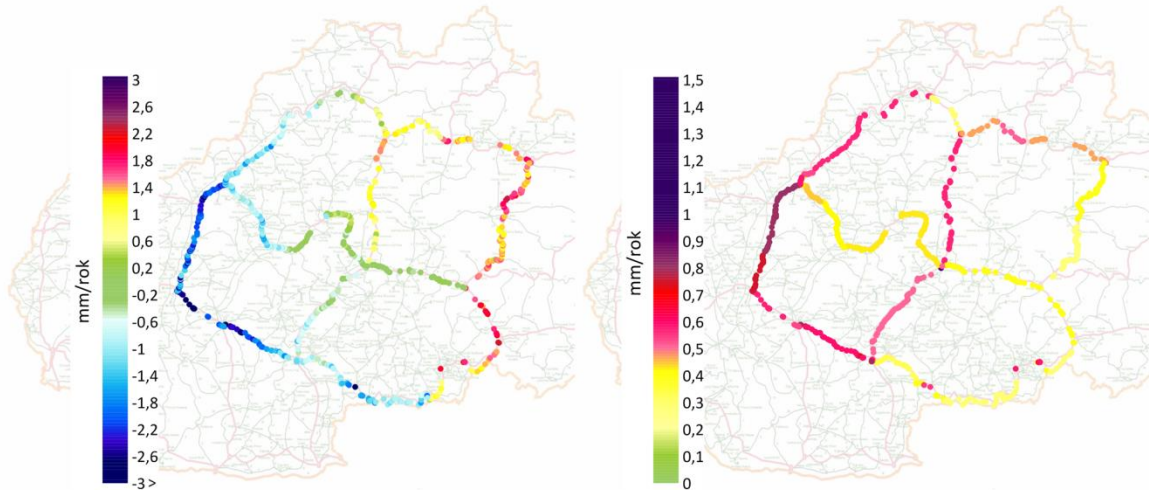
Odhadnuté rýchlosti bodov sú znázornené na Obr. 5 a sú v rozmedzí -3,42 až 0,99 mm/rok a ich stredné chyby dosahujú hodnoty podobné ako v predchádzajúcom prípade od 0,07 do 0,82 mm/rok so strednou hodnotou 0,49 mm/rok. Vyššie hodnoty odhadnutých rýchlostí oproti prípadu použitia priamo meraných prevýšení sú spôsobené tým, že je použitý menší počet prevýšení (iba 3 prevýšenia).

2. Odhad rýchlostí z výšok

a) merané výšky

$$H_A^I = H_A^{1972} + v_A(t^I - t^0), \quad (2)$$

kde H_A^I je nivelovaná výška bodu v určitej epoche, H_A^{1972} je výška bodu vo zvolenej strednej epoche, ktorá je spolu so svojou ročnou rýchlosťou v_A predmetom odhadu. V tomto prípade bola stredná epocha vypočítaná 3.8.1972. Podobne ako v predchádzajúcom prístupe bolo potrebné použiť rovnaký počet realizácií, t.j. tri merania.

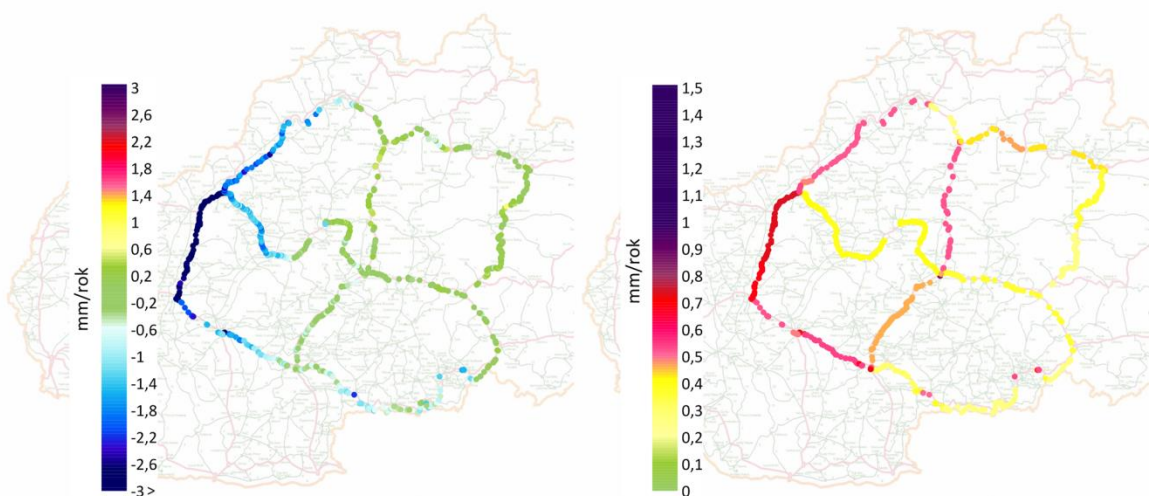


Obr. 6 Odhadnuté rýchlosti bodov spolu so strednými chybami použitím meraných výšok

Výsledky pri tomto prístupe boli ovplyvnené spôsobom nasčítavania prevýšení vo výpočte nivelovaných výšok, čo zapríčinilo hromadenie chýb v smere nasčítavania. Odhadnuté hodnoty rýchlostí na Obr. 6 sa pohybujú od -4,12 do 2,39 mm/rok a ich stredné chyby majú rozsah od 0,40 do 1,41 mm/rok s priemernou hodnotou 0,71 mm/rok.

b) vyrovnané výšky

Použitie boli výšky získané z prevýšení vyrovnaných na nulové uzávery a dosadené do vzťahu (2).



Obr. 7 Odhadnuté rýchlosti bodov spolu so strednými chybami použitím vyrovnaných výšok

Výsledky sú oproti použitiu iba nivelovaných výšok o niečo lepšie. Odhadnuté rýchlosti sa pohybujú medzi -4,49 a 0,81 mm/rok so strednou chybou 0,36 až 1,29 mm/rok (Obr. 7). Výhodou tohto spôsobu je, že dokážeme odhadnúť okrem rýchlosti bodov aj ich normálnu výšku vzťahnutú k strednému dátumu a získame nulové uzávery polygónov.

2.3 Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Zhrnutie výsledkov pre všetky štyri prístupy sa nachádza v tabuľke Tab. 1. Súčasťou experimentu bolo aj použitie rôznych váh p k meraným prevýšeniam pre prístup 1a) – výpočet z meraných prevýšení. Tab. 2 uvádza rozsah stredných chýb výsledných rýchlostí σ_v .

Tab. 1 Charakteristiky presnosti odhadu pre všetky metódy

	1.a) merané prevýšenia			1.b) vyrovnané prevýšenia			2.a) merané výšky			1.b) vyrovnané výšky		
	min	max	stred	min	max	stred	min	max	stred	min	max	stred
v (mm/rok)	-2,07	1,13	-0,26	-3,42	0,99	-0,73	-4,12	2,39	-0,35	-4,49	0,81	-0,89
σ_v (mm/rok)	0,07	0,82	0,52	0,07	0,82	0,49	0,40	1,41	0,71	0,36	1,29	0,65
σ_H 3.8.1972 (mm)							7,83	15,90	9,64	7,17	14,62	8,81

Tab. 2 Stredné chyby rýchlostí vypočítaných z meraných prevýšení pri použití rôznych váh, kde R je dĺžka oddielu a n je počet meraní jedného prevýšenia.

p	l			l/R			n			l/\sqrt{R}			n/\sqrt{R}		
	min	max	stred	min	max	stred	min	max	stred	min	max	stred	min	max	stred
σ_v (mm/rok)	0,07	0,82	0,52	0,11	0,94	0,72	0,07	0,95	0,57	0,08	0,79	0,55	0,09	0,91	0,60

Ako je zrejme z praktického experimentu, pohyby na testovacom území nevykazujú výrazné hodnoty, čo je dôkazom toho, že Slovensko je pomerne stabilné vo vertikálnom smere. Výsledné riešenie však výrazne závisí od metodiky spracovania, počtu meraní jednotlivých prevýšení, starostlivého výberu množiny bodov, ako aj uváženia všetkých potrebných korekcií a opráv v nivelácii. V tomto experimente sa ukázali výrazné poklesy iba na miestach postihnutých banskou činnosťou v oblasti Hornej Nitry, kde na niektorých miestach boli niveláciou od 50. rokov zaznamenané poklesy až 4 metre a v oblasti Veľkého Krtíša, kde máme k dispozícii prevýšenia od 70. rokov, poklesy do 1,5 metra.

3 Záver

Pre prvotný výskum recentných vertikálnych pohybov na Slovensku bola zvolená testovacia lokalita na strednom Slovensku. Oblasť bola vytvorená nivelačnými polygónmi 1. rádu ŠNS, v ktorých centre je základný nivelačný bod EH-V (Pitelová). Výsledné odhadnuté lineárne rýchlosti sú vzťahnuté k blízkemu bodu GH-502, ktorý bol v minulosti uzlovým bodom ČSJNS (Žiar nad Hronom). Testovaciu množinu tvorilo po odstránení nestabilných bodov a lokalít postihnutých banskou činnosťou a zosuvmi 969 nivelačných bodov. V rámci experimentu boli zvolené prístupy, v ktorých boli použité nivelované a vyrovnané prevýšenia, resp. výšky. Za najspoľahlivejšie výsledky na základe tejto štúdie sú považované rýchlosti odhadnuté priamo z meraných prevýšení, kde je možné brať do úvahy všetky prevýšenia, vrátane doplnkových meraní, ktoré boli k dispozícii. Pohyby na danej lokalite dosahovali

hodnoty v rozpätí -2 do +1 mm/rok s presnosťou do 0,8 mm/rok, čo znamená, že na niektorých územiach sú odhadnuté rýchlosti na hranici štatistickej významnosti.

Pri vyrovnaní polygónov na nulové uzávery v troch epochách bola dosiahnutá takmer rovnaká presnosť, avšak rýchlosti bodov boli väčšie, od -3,5 do 1 mm/rok. Tento rozdiel je spôsobený tým, že jednak pri uzatváraní polygónov a rozdelení opráv mohli byť rýchlosti čiastočne potlačené a jednak tým, že boli použité iba tri realizácie každého prevýšenia. V prípade použitia výšok je situácia podobná, v oboch prípadoch (pri meraných aj vyrovnaných) sú použité iba tri realizácie a výsledok je závislý aj od spôsobu nasčítavania prevýšení. Rýchlosti v kladnom aj zápornom smere majú výrazne väčšie hodnoty. Pri použití nivelovaných výšok je to od približne -4 do 2,4 mm/rok s presnosťou do 1,4 mm/rok a pri použití vyrovnaných výšok pohyby od -4,5 do 0,8 mm/rok s presnosťou do 1,3 mm/rok. Tento spôsob nám však poskytuje možnosť spätne vyrovnať 1. rád ŠNS v minimálne troch rôznych epochách a určiť tak výsledné rýchlosti porovnaním troch epoch závažných normálnych výšok. Takisto je možné otestovať aj iné modely vyrovnanie prevýšení, výšok bodov alebo geopotenciálnych kót (nielen vyrovnanie uzáverov) pre jednotlivé epochy, čo je cieľom ďalšieho výskumu. Pri vyrovnaní je potrebné dbať na to, aby prevýšenia v rámci jednej epochy pochádzali približne z rovnakého časového obdobia.

Literatúra

Hefty, J. a Vanko, J., 2005. Výsledky geodetických meraní využiteľných na štúdium neotektonických pohybov na území Slovenska. *Geodetický a kartografický obzor*, Issue 9, pp. 185-195.

Hudec, M. a Ferianc, D., 2007. *Štátna nivelačná sieť*. Podbanské, Geodetické siete a priestorové informácie.

Klobušiak, M. a Ferianc, D., 1991-2001. *Výškové lokálne siete a systém na spracovanie nameraných údajov - VLS*, Bratislava: MaKlo Analýza a softvér.

Kruis, B., 1961. *Budování československých výškopisných základů*, Praha: Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický.

Vanko, J. a Kvitkovič, J., 1990. Recentné vertikálne pohyby Západných Karpát pre epochu 1951-1976. *Geografický časopis*, pp. 345-356.