

Aplikácia technológie GPS pri meraní lokálnej geodetickej siete a monitorovane geodynamiky vodného diela Liptovská Mara

Doc. Ing. Jozef Štubňa, CSc., Katedra geodézie, Stavebná fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline, Komenského 52, 010 26 Žilina.

Ing. Vladimír Kováč, Topografický ústav Banská Bystrica, Ružova 8, 975 53 Banská Bystrica.

Anotácia

Vzhľadom na presnosť metód určenia polohy bodov na Zemskom povrchu pomocou GPS ako aj skutočnosť, že pri meraní posunov ide o relatívne posuny objektov (pozorované body) k blízkemu okoliu (vzťažné body), skúmajú sa možnosti uplatnenia tejto technológie a prístrojového vybavenia i v oblasti inžinierskej geodézie, kde meranie posunov patrí. Článok obsahuje závery z experimentálneho overenia metódy GPS na určenie polohových posunov zemnej hrádze Liptovská Mara.

1. Úvod

Veľké a atypické stavebné diela, medzi ktoré zemná hrádza Liptovská Mara patrí, si vyžadujú v čase ich výstavby i počas prevádzky, sledovanie ich stability a funkčnej spoľahlivosti. Posudzovanie stability sa robí geodetickými, fotogrametrickými, fyzikálnymi a inými metódami merania posunov. Medzi najdôležitejšie merania na vodných dielach sa radí meranie vodorovných posunov v smere toku vody a meranie výškových zmien. Posuny stavebného diela, ktoré charakterizujú pozorované body, sa posudzujú k blízkemu i vzdialenejšiemu okoliu, ktoré je reprezentované vzťažným bodovým poľom. Stabilita vzťažných bodov zohráva významnú úlohu pri určovaní posunov a spoľahlivosti výsledkov [1].

Geodetické metódy merania posunov vzhľadom na poskytovanie kváziabsolútnych posunov pri dlhodobých pozorovaniach sú nenahraditeľné a podávajú spoľahlivý obraz o polohovej a výškovej stabilite diela. Na väčšine priehrad sa polohové merania robia zo vzťažného bodového poľa tvaru trigonometrickej siete trigonometrickou metódou, založenou na presnom meraní uhlov alebo dĺžok. Táto metóda je pri požiadavke vysokej presnosti časovo náročná. Vzhľadom na výskumné aktivity autorov sa hľadajú aj iné metódy a testujú sa aplikácie nových technológií.

Medzi takéto nové meracie postupy patrí metóda určovania priestorovej polohy bodov globálnym systémom na určenie polohy (GPS), ktorý v poslednom desaťročí výrazne zvýšil svoju presnosť, čo dáva predpoklad pre jeho použitie i v oblasti inžinierskej geodézie na určovanie posunov stavebných objektov.

Výsledky skúmania možností uplatnenia metódy GPS a príslušného prístrojového vybavenia v oblasti merania posunov zemnej hrádze Liptovská Mara sú uvedené v tomto článku. V článku sú porovnané výsledky merania polohy vzťažných a pozorovaných bodov zemnej hrádze určené metódou GPS a trigonometrickou metódou. Článok obsahuje posúdenie stability vzťažnej siete dvomi etapovými meraniami s rovnakými prijímačmi GPS a porovnanie presnosti dvojfrekvenčnej aparatúry Trimble 4000SSi a jednofrekvenčnej Ashtech Promark 2.

2. Charakteristika lokality

Lokalitou merania je sústava vodných diel Liptovská Mara – Bešeňová. Je vybudovaná na rieke Váh, ako 17. a 18. dielo vážsko-oravskej sústavy hydroenergetických diel. Vodné dielo Liptovská Mara bola uvedená do prevádzky v roku 1976. Jej hlavnou funkciou je celoročné vyrovňovanie prietokov Váhu a tým zabezpečenie dostatku vody pre všetky hydroenergetické diela umiestnené na Váhu pod Liptovskou Marou. Celkový objem nádrže je 361,9 mil. m³. Pri maximálnej prevádzkovej hladine má nádrž plochu 2139,4 ha. Vežový odberný objekt je vysunutý pred teleso priehrady, z neho je voda privádzaná k dvom vertikálnym Kaplanovým a dvom reverzibilným čerpadlovým turbínam v elektrárni, ktorá je predsunutá pred vzdušný svah zemnej hrádze. Vodná elektráreň je špičkovou s celkovým výkonom 198 MW.

Zemná hrádza, objekt merania posunov je sypaná, heterogénna, so šikmým zalomeným hlineným tesnením na návodnej strane. Dĺžka koruny hrádze je 1225 m, výška nad údolím je 43 m a nad základmi 52,5 m. Je to veľký objekt, orientovaný v smere severojužnom.

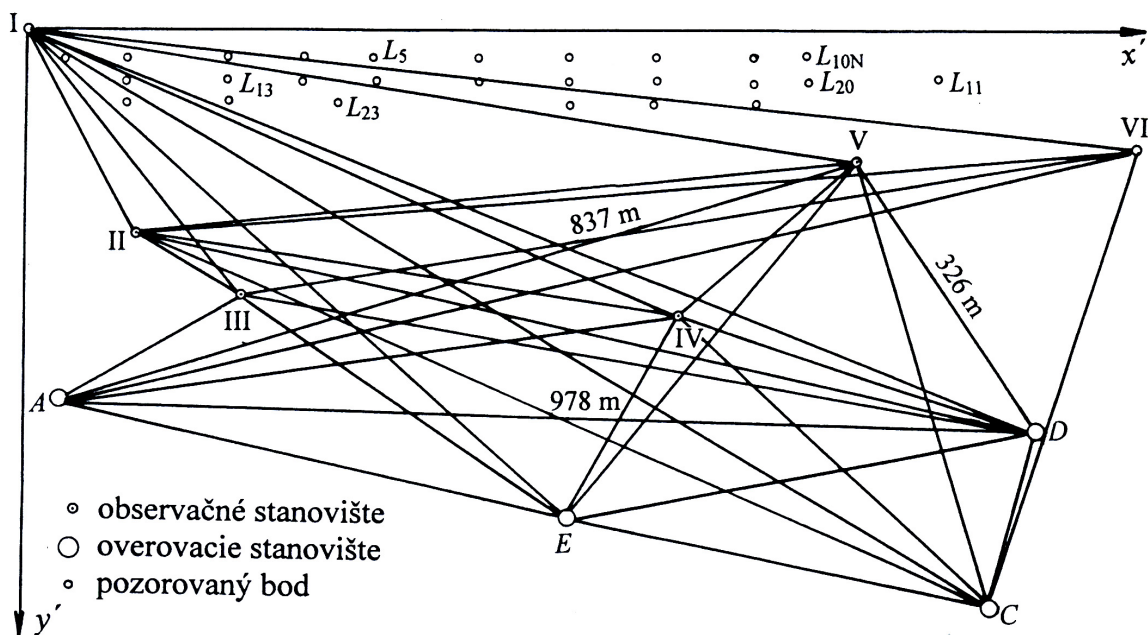
Stabilizácia pozorovaných a vzťažných bodov

Vzhľadom na vyžadovanú vysokú presnosť výsledkov merania sú pozorované i vzťažné body stabilizované ťažkou stabilizáciou. Vzťažné body sú betónové piliere so základom niekoľko metrov pod povrchom terénu. Piliere sú opatrené v hornej časti zariadením umožňujúcim závislé dostredenie prístroja a zámerných terčov. Umiestnenie vzťažných bodov do terénu v okolí stavebného objektu bolo navrhnuté po dôkladnom posúdení geológie územia geológom tak, aby zohľadňovali stabilitu územia a body nepodliehali deformačným vplyvom vodného diela a spĺňali i vhodný tvar siete.

Polohové posuny zemnej hrádze, ktorú reprezentujú pozorované body (L_i), sú vhodne umiestnené v niekoľkých priečných profiloch hrádze (obr.1), sa určujú v miestnom súradnicovom systéme. Vzťažné body I, II, IV, V, VI, A, B, C, D, E, tvoria trigonometrickú sieť pre klasické uhlové meranie. Takmer na všetkých bodoch (s výnimkou I, II, A, B) je dobrý (netienený) príjem signálov GPS čo umožňuje meranie posunov aj týmto spôsobom. Tvar siete, umiestnenie vzťažných a pozorovaných bodov ako aj dĺžkový rozmer siete je na obr.2.



Obr. 1 Pozorované body na hrádzi Liptovská Mara



Obr.2 Sieť vzťahných a pozorovaných bodov

3. Apriórna presnosť trigonometrického merania a metóda GPS

Trigonometrická metóda

Presnosť výsledkov trigonometrickej metódy merania závisí od presnosti uhlového merania a vzdialeností pozorovaných bodov od stanovísk merania. Presnosť uhlového merania teodolitom Wild T3 na danej lokalite, je charakterizovaná strednými hodnotami empirických smerodajných odchýlok vyrovnaných smerov na stanovisku $E(s_\varphi)$. Smerodajná odchýlka meraného smeru na stanovisku je vypočítaná podľa známeho vzťahu: $s_\varphi = \sqrt{\sum vv / [s(s-1)(n-1)]}$. Hodnota základnej smerodajnej odchýlky je $\sigma_\varphi = 0,15 \text{ mg}$ a je určená ako kvadratický priemer z empirických smerodajných odchýlok vyrovnaného smeru na stanovisku z 26 etáp meraní a základného merania (276 prvkov).

Hodnota základnej smerodajnej odchýlky rozdielu dvoch smerov vypočítaná zo vzťahu $\sigma_{\Delta\varphi} = \sigma_\varphi \sqrt{2}$ je $0,2 \text{ mg}$. Pri vzdialenostiach 300 - 500 - 1000 m dostávame presnosť určených posunov 1,0 - 1,6 - 3,3 mm.

Kvadratický priemer empirických smerodajných odchýlok súradníc vzťahných bodov v 26. etapovom meraní (rok 2001) je $m_{xy} = 1,5 \text{ mm}$, u pozorovaných bodov je to $m_{xy} = 2,4 \text{ mm}$, $m_p = 3,4 \text{ mm}$, čo prakticky zodpovedá uvedeným hodnotám rozboru uhlovej presnosti a vzdialenostiam bodov.

Metóda GPS

V júni 2001 bol realizovaný zber dát dvojfrekvenčnými prijímačmi Trimble 4000SSi s anténami Microcentered L_1/L_2 GP, ktoré patria medzi najpresnejšie aparatúry na určovanie polohy pomocou GPS. Ich vnútorná presnosť dosahuje mm hodnoty. Na presnosť má veľký vplyv stabilita fázového centra antény. Použité antény sa každoročne kalibrujú a vykazujú submilimetrové hodnoty. Použili sme statickú metódu určovania polohy, pričom ako referenčný bod bol zvolený bod SGRN - permanentná stanica BBYS. Druhý referenčný bod sme zvolili bod IV, ktorý sa nachádza uprostred vzťahnej siete a následne slúžil pre určenie

polohy ostatných bodov. Na vzťažnom bode IV bola observácia 12 hodín, počas celého zberu dát na pozorovaných a vzťažných bodoch. Na určovaných bodoch boli cca 15 minútové observácie s intervalom zberu 15 sekúnd. Zaregistrované dáta boli spracované v programe Trimble Geomatics Office (TGO). V prvom rade sme vypočítali súradnice bodu IV z permanentnej stanice BBYS, pričom TGO určil presnosť výpočtu na $m_p = 0,4$ mm a $m_h = 2,3$ mm. Následne sme súradnice vzťažného bodu IV použili ako referenčné pre výpočet ostatných bodov v uvedenej lokalite. Pri uvádzanom experimente v počte 35 meraných bodoch, sa priemerná hodnota polohy bodu určila s presnosťou 1,3 mm.

V apríli 2004 bol vykonaný druhý zber dát v rámci záverečnej práce [3], pričom boli použité tie isté aparatúry firmy Trimble a ten istý postup ako v roku 2001. Opäť referenčný bod bola permanentná stanica BBYS a navyše sme zvolili ešte jeden referenčný bod SGRN s označením ROHA 2643LM-9, na ktorom sme vykonali zber dát (9 hod) z ktorých sa určil vzťažný bod IV. Na ostatných určovaných bodoch boli 30 minútové observácie s intervalom zberu 15 sekúnd. Zaregistrované dáta sme spracovali programom TGO výpočtom vzťažného bodu IV, ktorý bol v ďalšom výpočte opäť zvolený ako referenčný pre ostatné určované body. Vnútna presnosť výpočtu bola $m_p = 0,5$ mm a $m_h = 2,3$ mm.

Program TGO má nastavený výpočet základníc do 5 km z dát nazbieraných dvojfrekvenčným prijímačom len z frekvencie L_1 a vzhľadom na dĺžku základníc (max. 750m) medzi referenčným bodom IV a pozorovanými bodmi nás priviedlo k myšlienke použiť na meranie aj jednofrekvenčné prijímače GPS. Z tohto dôvodu a tiež na porovnanie presnosti bola realizovaná ešte jedna séria meraní na bodoch vzťažnej siete s jednofrekvenčnými prijímačmi Ashtech Promark 2 s externou anténou.

4. Interpretácia dosiahnutých výsledkov

Porovnanie metódy GPS a trigonometrického merania

Porovnávanie výsledkov určenej polohy identických pozorovaných bodov metódou GPS a trigonometrického merania vo zvolenej lokalite sme vykonali pomocou programu [2] Helmertovej transformácie súradníc.

Rovinné súradnice z vypočítaných hodnôt zemepisných súradníc vo WGS-84, získaných metódou GPS, sme previedli podľa učebnicových vzťahov Křovákovo konformného zobrazenia na pravouhlé rovinné súradnice, ktoré sa ďalej netransformovali do S-JTSK. Z tohoto dôvodu hovoríme o lokálnom súradnicovom systéme. Do transformačného kľúča neboli zaradené body I, II, A, pretože pri výpočte polohy v programe TGO boli na týchto bodoch najväčšie elipsy chýb (Obr. 3), čo vyplýva z ich umiestnenia v teréne. Výsledný súbor pre výpočet transformačného kľúča aj s charakteristikami presnosti transformácie je v tabuľke 1. Označenie polohových súradníc vzťažných a pozorovaných bodov z metódy GPS je x' , y' , z trigonometrického merania Y_g , X_g , odchýlky pri výpočte transformačného kľúča D_y , D_x .

Z výsledkov transformácie môžeme empirické polohové charakteristiky transformačného kľúča $m_{xy} = 2,5$ mm trochu zjednodušene považovať, že sú na rovnakej úrovni ako pri trigonometrickej metóde. Presnosť výsledkov metódy GPS pri transformácii len nepatrne ovplyvnila charakteristiky presnosti transformácie, z čoho dedukujeme že presnosť metódy GPS je vyššia. Presnosť metódy GPS by sa ešte

zvýšila dlhšou observáciou na pozorovaných bodoch (30min). Teleso hrádze tieni signály GPS prichádzajúce z východného smeru hlavne na spodných lavičkách. Predĺžením observácie by sa zaregistrovalo dostatočné množstvo dát pre spresnenie výpočtu polohy bodu. Z rozboru týchto dvoch metód vyplýva, že metódou GPS s prijímačmi Trimble 4000SSi a anténou Microcentered L₁/L₂ GP (alebo inými súčasnými prijímačmi GPS) je možné dosiahnuť prakticky rovnakú alebo vyššiu presnosť výsledkov ako pri klasickej trigonometrickej metóde.

Tab. 1 Hellmertova transformácia súradníc

Súradnice porovnávaných bodov použitých pre výpočet transformačného kľúča						
Číslo Bodu	y'	x'	Y _g	D _v	X _g	D _x
M						
III	540.0805	90013.3043	1280.9408	0.0010	1230.2632	0.0030
IV	445.8869	90455.2438	1299.3777	0.0017	1681.8771	-0.0024
V	251.1021	90563.0629	1137.3962	-0.0002	1834.7095	-0.0002
VI	170.7229	90828.4137	1125.3803	-0.0011	2111.7879	0.0014
C	661.3163	90793.5971	1592.1219	0.0020	1956.2633	0.0011
D	474.4727	90801.3195	1412.9896	0.0028	2010.1282	0.0001
E	676.0178	90371.7410	1501.6433	0.0013	1543.8328	-0.0043
L02	325.7980	89825.7033	1026.7334	0.0028	1101.6766	0.0060
L03	301.4585	89919.2267	1026.3641	0.0016	1198.3368	0.0005
L04	282.1744	89992.2849	1025.8084	-0.0042	1273.9181	0.0018
L05	263.8726	90064.3873	1025.9737	-0.0037	1348.3302	0.0038
L06	237.6724	90165.1659	1025.6068	-0.0005	1452.4841	-0.0001
L07	214.0494	90257.3050	1025.5873	-0.0025	1547.6262	-0.0044
L08	192.1445	90341.8441	1025.3516	0.0011	1634.9879	0.0017
L09	168.2940	90435.8890	1025.5861	0.0004	1732.0322	-0.0036
L10	158.5527	90493.3023	1030.3984	-0.0006	1790.0888	0.0017
L11	147.4429	90622.8869	1051.7981	-0.0042	1918.4096	-0.0020
L13	322.2506	89924.6179	1047.8521	0.0039	1198.4009	0.0021
L14	303.3298	89998.4422	1047.8400	-0.0006	1274.6332	0.0022
L15	284.8854	90069.4744	1047.5972	-0.0043	1348.0364	-0.0030
L16	258.4890	90171.0733	1047.2477	0.0028	1453.0390	-0.0018
L17	234.8985	90261.9380	1046.9401	-0.0025	1546.9469	0.0026
L18	213.1760	90346.2056	1046.8135	0.0009	1633.9955	0.0040
L20	181.2463	90497.7343	1053.4916	0.0025	1788.7490	0.0009
L21	369.4057	89836.6426	1071.7025	0.0007	1101.4419	-0.0034
L22	345.0668	89930.4857	1071.4150	0.0014	1198.4176	-0.0030
L23	317.1249	90038.0146	1071.0329	0.0013	1309.5516	-0.0002
L25	238.2078	90343.0790	1070.2888	-0.0033	1624.7462	-0.0016
L26	211.6195	90452.4220	1071.6714	-0.0006	1737.2974	-0.0034
m_y = 0.0023, m_x = 0.0027, m_{yx} = 0.0025, m_p = 0.0036						

Porovnanie meraní metódou GPS z rokov 2001 a 2004

Merania v oboch rokoch boli vykonané rovnakými prijímačmi Trimble 4000SSi a anténami Microcentered L₁/L₂ GP a spracované tým istým programom TrimbleGeomatics Office, čo dáva predpoklad objektívneho porovnania presnosti určenia súradníc. V prvom rade sme porovnali kvaziabsolútnu stabilitu vzťažného bodu IV určeného z permanentnej stanice BBYS (ROHA). Program TGO síce určil presnosť výpočtu na $m_p = 0,5$ mm a $m_h = 2,3$ mm, ale reálna presnosť vyplýva z rozdielu vypočítaných súradníc, ktoré sú uvedené v tabuľke 2. Z uvedených hodnôt vyplýva, že bod IV vykazuje dobrú stabilitu a môže slúžiť ako referenčný pre výpočet polohových zmien ostatných vzťažných a pozorovaných bodov.

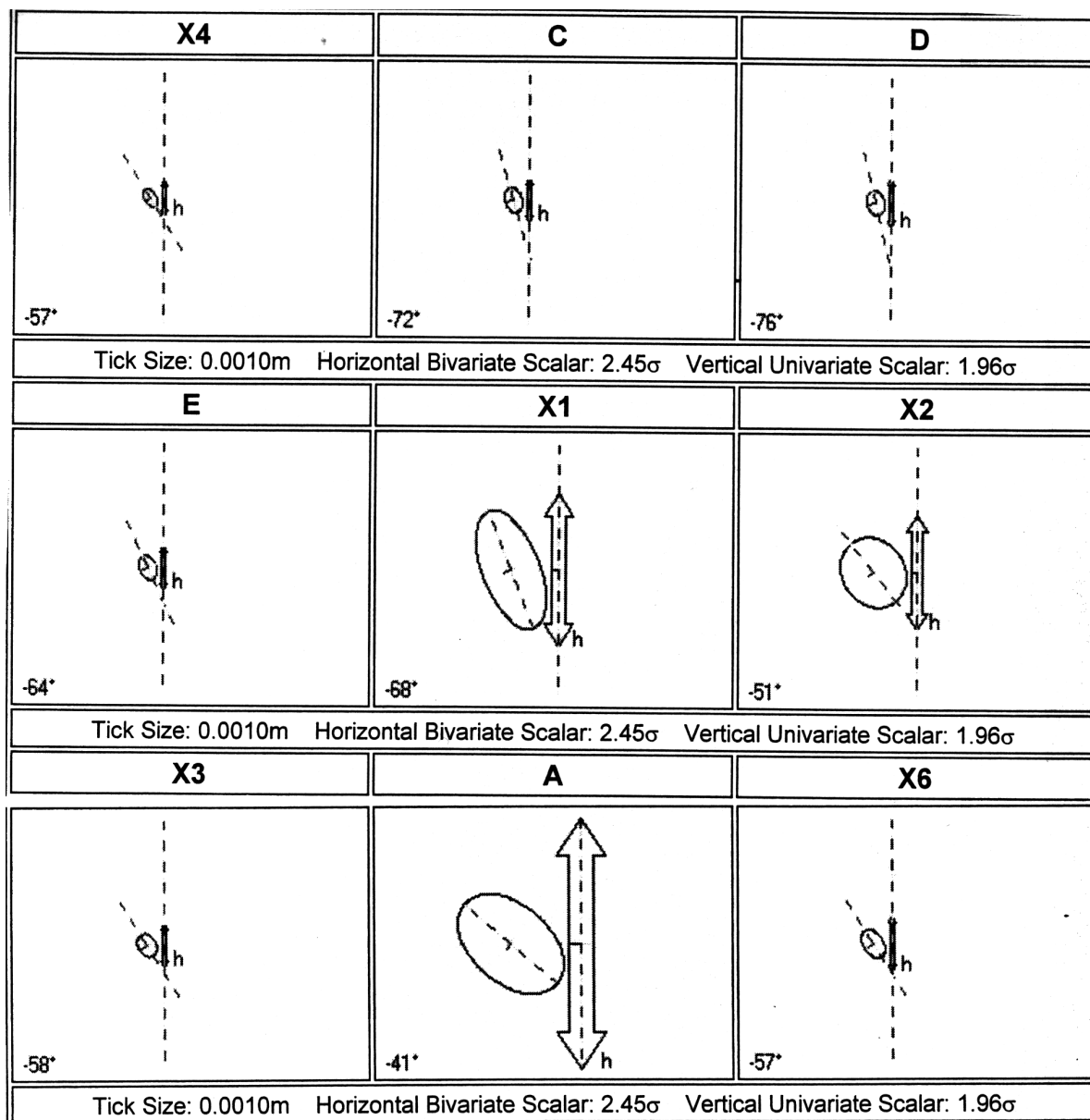
Tab. 2 Súradnicové rozdiely bodu IV medzi meraniami v rokoch 2001-2004

Č.B	ΔY [m]	ΔX [m]	Δh [m]
IV	0.001	-0.001	0.003

Ostatné body vzťažnej siete boli spracované tak, že aj dáta z roku 2001 boli prepočítané na hodnotu referenčného bodu IV určeného v roku 2004. Transformačným programom boli súradnice z WGS-84 pretransformované do S-JTSK. Súradnicové rozdiely bodov vzťažnej siete sú uvedené v tabuľke 3. Súradnicové rozdiely na bodoch I, II, A dosahujú vysoké hodnoty čo je spôsobené ich umiestnením v teréne (svah s lesným porastom). Na túto skutočnosť upozorňuje aj program TGO vysokými elipsami chýb (Obr. 3) a potvrdzuje ich nevhodnosť pre merania metódou GPS. Na ostatných bodoch dosahujú rozdiely milimetrové hodnoty, čo vyjadruje dobrú stabilitu vzťažnej siete a vhodnosť jej merania metódou GPS.

Tab. 3 Súradnicové rozdiely vzťažných bodov medzi meraniami v rokoch 2001-2004

Č.B	ΔY [m]	ΔX [m]	Δh [m]
IV	0.000	0.000	0.000
I	0.038	-0.010	0.003
II	0.001	-0.022	0.028
III	0.003	-0.001	-0.001
V	0.001	-0.002	-0.007
VI	0.004	-0.005	-0.009
A	0.018	0.013	-0.016
C	-0.001	-0.006	-0.001
D	0.002	-0.005	-0.007
E	0.001	0.001	0.007



Obr. 3 Elipsy chýb na vzťahných bodoch

Porovnanie meraní medzi dvojfrekvenčnými a jednofrekvenčnými prijímačmi GPS

Zber dát bol realizovaný jednofrekvenčnými prijímačmi Ashtech Promark 2 s externou anténou a dvojfrekvenčnými prijímačmi Trimble 4000SSi s anténami Microcentered L_1/L_2 GP. Na referenčnom bode IV bol na zber dát pre obidve sesie ten istý prijímač Trimble 4000SSi. Dáta z prijímača Ashtech Promark 2 boli konvertované do medzinárodného formátu RINEX a spracované programom TGO. Súradnicové rozdiely bodov vzťahnej siete bez problémových bodov (I, II, A) sú uvedené v tabuľke 4. Z dosiahnutých výsledkov môžeme usúdiť, že pri budovaní lokálnych sietí je možné použiť aj jednofrekvenčné prijímače GPS s externou anténou. Pre spravenie výsledkov by bolo dobré prekontrolovať stabilitu fázového centra externej antény ASH 110454, čo našom prípade nebolo vykonané.

Tab. 4 Súradnicové rozdiely medzi meraniami prijímačmi Trimble 4000SSi a Ashtech Promark 2

Č.B	ΔY [m]	ΔX [m]	Δh [m]
IV	0.000	0.000	0.000
III	-0.004	-0.002	0.009
V	0.001	-0.001	0.014
VI	-0.004	0.004	0.010
C	0.003	0.007	0.001
D	0.001	0.002	0.012
E	-0.002	0.009	-0.002

5. Záver

Z uvedeného porovnania výsledkov metódy trigonometrického merania a metódy GPS pri určovaní polohy bodov zemnej hrádze a rozboru týchto dvoch metód vyplýva, že metódou GPS je možné prakticky dosiahnuť rovnakú presnosť výsledkov ako pri klasickej trigonometrickej metóde. Na zvýšenie presnosti je potrebné zvoliť observačný čas cca 30 min, pretože dochádza k tieneniu signálov telesom hrádze. Určované body na spodnej lavičke dosahovali vyššie hodnoty stredných chýb.

Z porovnania etapových meraní v rokoch 2001 a 2004 vyplýva, že vzťažná sieť a hrádze Liptovská Mara vykazuje dobrú stabilitu. Referenčný bod IV je stabilný aj v porovnaní s bodmi SGRN (BBYS resp. ROHA). Metóda GPS navyše umožňuje aj dobrú kontrolu stability vzťažnej siete k vzdialenejšiemu okoliu na rozdiel od klasických geodetických metód.

Vzhľadom na dĺžku základníc (max. 750m) medzi vzťažným (referenčným) bodom IV je možné použiť na meranie vodorovných posunov aj jednofrekvenčné prijímače GPS s externou anténou s dobrou stabilitou fázového centra.

Metóda GPS je o jednu tretinu rýchlejšia ako klasické trigonometrické meranie. Meranie nie je závislé na poveternostných podmienkach a na subjektívnych vlastnostiach geodeta ako pri klasickej metóde.

Perspektívne ďalšou ekonomickou výhodou pri určovaní polohových zmien metódou GPS by bolo, že nie je potrebné vybudovať taký veľký počet vzťažných bodov ako pre trigonometrickú metódu. Na určovanie polohových zmien pozorovaných bodov by postačovali 2-3 vzťažné body, ktorých stabilita by sa kontrolovala vzhľadom na body SGRN.

Záverom môžeme konštatovať, že metóda GPS si našla uplatnenie v inžinierskej geodézii. Pri súčasnom rýchlom technickom rozvoji elektrotechniky, môžeme v blízkej budúcnosti očakávať ešte presnejšie a výkonnejšie aparatúry GPS čím sa ešte zvýšia možnosti jej využitia.

Literatúra

- [1] Štubňa, J. – Seidlová, A.: Stabilita vzťažných bodových polí na meranie posunov a pretvorení stavebných objektov. Gako, 50/92, 2004 č.3, s.45-50.
- [2] Hodas, S. akol.: HELTRANS – Výpočtový program podobnostnej Helmertovej transformácie, SvF – ŽU v Žiline, 1999.
- [3] Lihocký, J.: Určenie polohových zmien zemnej hrádze Liptovská Mara metódou GPS. Záverečná práca Bc. štúdia geodézie, SvF – ŽU v Žiline, 2004.