

Použitie GPS na meranie polohových posunov zemnej hrádze

Jozef Štubňa¹

Use of GPS method in the measurement of the positional shift of a ground dam

Because of qualitative changes in the precision of the apparatus and the methods of determination of the space position of points on the earth surface (GPS method), as well as because of the fact that in the measurement there are shifts (observed points) relatively to the near surroundings (reference points), possibilities of the use of these technologies and apparatus are studied also in the engineering geodesy – the field to which the measurements of deformation belong. The article presents results of the experimental confirmation of the GPS method in the determination of positional shifts of the ground dam Liptovská Mara.

Key words: Deformation measurement, earth dam, global positioning system, reference points, observed points, periodic measurements.

Úvod

Veľké a atypické stavebné diela medzi ktoré patria i priehrady, si vyžadujú v čase ich výstavby i počas prevádzky sledovanie ich stability a funkčnej spoľahlivosti. Posudzovanie stability sa robí prostredníctvom rozličných pozorovaní a meraní posunov. Pri vodohospodárskych stavbách je táto činnosť ustanovená i vyhláškou [1], ktorá určuje povinnosť technicko-bezpečnostného dohľadu na vodohospodárskych dielach I. a II. kategórie. Z hľadiska technicko-bezpečnostného dohľadu patrí priehrada Liptovská Mara k stavbám I kategórie. Medzi najdôležitejšie merania na vodných dielach sa radí meranie vodorovných posunov vo smere toku vody a meranie výškových zmien.

Posuny stavebného diela, ktoré charakterizujú pozorované body, sa posudzujú k blízkemu i vzdialenejšiemu okoliu, ktoré je reprezentované vzťahným bodovým poľom. Stabilita vzťahných bodov zohráva významnú úlohu pri určovaní posunov a presnosti výsledkov [2].

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 našich priehrad sa polohové merania robia zo vzťahného bodového poľa tvaru trigometrickej siete, klasickou trigonometrickou metódou, založenou na presnom meraní uhlov (dĺžok). Táto metóda je, pri požiadavke vysokej presnosti, časovo náročná. Preto sa hľadajú aj iné metódy a testujú sa aplikácie nových technológií.

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

Výsledky skúmania možnosti uplatnenia tejto technológie a prístrojového vybavenia i v oblasti merania deformácií zemnej hrádze sú náplňou tohto príspevku. V príspevku sú uvedené porovnávanie výsledkov experimentálneho merania polohy pozorovaných bodov zemnej hrádze Liptovská Mara určené metódou GPS a trigonometrickou metódou, posuny zemnej hrádze z dvoch etapových meraní a merania z dvoch aparatúr GPS, Trimble 4000Ssi a Ashtech ProMark2.

Charakteristika lokality

Lokalita 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 bolo uvedené do prevádzky v roku 1976. Jeho hlavnou funkciou je ročné vyrovnávanie 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 vo vodnej elektrárni, ktorá je predsunutá pred vzdušný svah zemnej hrádze. Vodná elektráreň je špičkovou na celkový výkon 198 MW.

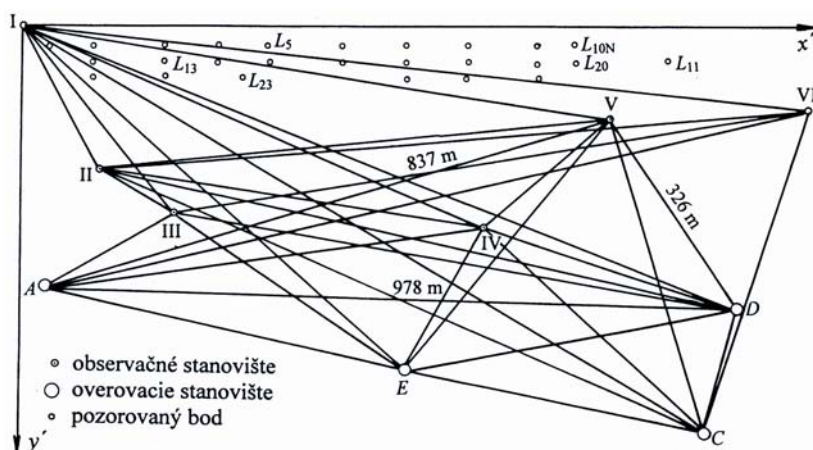
Zemná hrádza – objekt merania posunov, je sypaná, heterogénna, so šikmým zalomeným hlineným tesnením na návodnej strane. Dĺžka koruny hrádze je 1225 m, výška nad údolím je 43 m a nad základmi 52,5 m. Je to veľký objekt, orientovaný v smere severojužnom.

¹ doc. Ing. Jozef Štubňa, CSc., Katedra geodézie, SvF – ŽU v Žiline, Komenského 52, 010 26 Žilina, stubna@fstav.utc.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 11. 04. 2005)

Stabilizácia pozorovaných a vzťažných bodov

Vzhľadom na požadovanú vysokú presnosť výsledkov merania sú pozorované i vzťažné body stabilizované ťažkou stabilizáciou. Vzťažné body sú betónové piliere so základom niekoľko metrov pod povrchom terénu. Pilieri 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 zohľadňovalo stabilitu územia, aby body nepodliehali deformačným vplyvom tohoto objektu a splňali i vhodný na tvar siete.

Polohové posuny zemnej hrádze (ktorú reprezentujú pozorované body – L_i , vhodne umiestnené v niekoľkých priečných profiloch hrádze) 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. Tvar siete, umiestnenie vzťažných a pozorovaných bodov ako aj dĺžkový rozmer siete je na obr. 1.



Obr. 1. Sieť vzťažných a pozorovaných bodov
Fig. 1. A net of reference and observed points

Apriórna presnosť trigonometrického merania a meranie GPS

Trigonometrická metóda

Presnosť výsledkov trigonometrickej metódy merania závisí od presnosti uhlového merania a vzdialeností pozorovaných bodov. Presnosť uhlového merania teodolitom Wild T3 na danej lokalite je charakterizovaná strednými hodnotami empirických štandardných odchýlok vyrovnaných smerov na stanovisku $E(s_\varphi)$. Štandardná odchýlka meraného smeru na stanovisku je vypočítaná podľa známeho vzťahu:

$$s_\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i v_i}{s(s-1)(n-1)}} \quad (1)$$

Hodnota základnej štandardnej odchýlky je $\sigma_\varphi = 0,15$ mg a je vypočítaná ako kvadratický priemer z empirických štandardných odchýlok vyrovnaného smeru na stanovisku z 26 etáp meraní a základného merania (276 prvkov).

Hodnota základnej štandardnej odchýlky rozdielu dvoch smerov je vypočítaná zo vzťahu

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \sigma_\varphi \sqrt{2} \quad (2)$$

Jej hodnota je je $2,1^{cc}$. Pri vzdialenostiach 300 – 500 – 1000 m je dosahovaná presnosť určovaných posunov 1,0 – 1,6 – 3,3 mm.

Kvadratický priemer empirických štandardných odchýlok súradníc vzťažných bodov v 26. etapovom meraní – rok 2001, je $m_{xy} = 1,5$ mm, u pozorovaných bodov je $m_{xy} = 2,4$ mm, čo prakticky zodpovedá uvedeným hodnotám rozboru uvedenej uhlovej presnosti a vzdialenostiam bodov.

Metóda GPS

Dvojfrekvenčné prístroje GPS – Trimble 4000Ssi patria medzi najpresnejšie prístroje na určovanie priestorovej polohy. Ich vnútorná presnosť dosahuje mm hodnoty. Na uvedenej lokalite bola v roku 2001 pri počte 35 meraných bodoch priemerná hodnota polohy bodu určená s presnosťou 1,3 mm.

Pre určenie empirickej polohovej presnosti metódy GPS na uvedenej lokalite boli ako porovnávací etalón využité súradnice vzťažných aj pozorovaných bodov z trigonometrického merania a boli porovnané so súradnicami tých istých bodov určených metódou GPS pomocou transformácie súradníc v etape roku 2001.

Trochu zjednodušené je možné empirické polohové charakteristiky z transformačného kľúča $m_{xy} = 2,2$ mm a $m_p = 3,1$ mm považovať za empirickú presnosť výsledkov merania metódou GPS na tejto lokalite.

Z rozboru týchto dvoch metód vyplýva, že metódou GPS s prístrojmi Trimble 4000Ssi (alebo inými súčasnými dvojfrekvenčnými prístrojmi) je možné dosiahnuť prakticky rovnakú presnosť výsledkov ako pri klasickej trigonometrickej metóde.

Tab. 1. Súradnice vzťažných bodov – WGS 84

Tab. 1. Coordinates of reference points – WGS 84

Číslo bodu	B [° ' "]		L [° ' "]		H [m]		D _H [mm]
	2001	2004	2001	2004	2001	2004	
I	49 06 06,41943	,41919	19 28 58,69417	,69606	618,222	,219	3
II	49 05 59,4892	,94822	19 28 50,8496	,48510	573,523	,495	28
III	49 05 56,48203	,48201	19 28 49,12906	,12919	569,482	,483	- 1
IV	49 05 42,42114	,2114	19 28 55,8247	,28247	570,739	,739	0
V	49 05 39,7870	,37862	19 29 05,23324	,23328	590,296	,303	- 7
VI	49 05 30,8985	,98968	19 29 10,09852	,09872	606,396	,405	- 9
A	49 06 01,55625	,55671	19 28 41,56455	,56540	620,015	,031	- 16
C	49 05 31,00628	,00609	19 28 45,85156	,85151	586,515	,516	- 1
D	49 05 31,17904	,17890	19 28 55,06702	,06713	589,671	,678	- 7
E	49 05 44,59809	,59811	19 28 43,67662	,67669	569,079	,072	7

Tab. 2. Súradnice pozorovaných bodov – WGS 84

Tab. 2. Coordinates of observed points – WGS 84

Číslo bodu	B [° ' "]		L [° ' "]		H [m]		D _H [mm]
	2001	2004	2001	2004	2001	2004	
L 1	49 06 05,00595	,00601	19 28 57,96633	,96642	601,439	,433	6
2	49 06 03,02522	-	19 28 59,02365	-	599,975	-	-
3	49 06 00,05958	,05971	19 29 00,54253	,54267	599,509	,502	- 7
4	49 05 57,74350	,74351	19 29 01,74232	,74244	599,707	,706	1
5	49 05 55,45607	,45607	19 29 02,89048	,89089	600,054	,054	0
6	49 05 52,26029	,26034	19 29 04,52570	,52582	599,613	,620	- 7
7	4 4905 49,33772	,33773	19 29 06,00440	,00456	599,781	,789	- 8
8	49 05 46,65673	-	19 29 07,37242	-	599,545	-	-
9	49 05 43,67308	,67327	19 29 08,86877	,86871	600,302	,306	- 4
10	49 05 41,84076	,84076	19 29 09,54523	,54542	600,849	,848	1
11	49 05 37,68051	,68071	19 29 10,53704	,53735	600,204	,197	7
12	49 06 02,80395	,80393	19 28 58,01010	,01017	589,827	,826	1
13	49 05 59,83850	,83851	19 28 59,53836	,53846	589,820	,822	- 2
14	49 05 57,49686	,49693	19 29 00,72293	,72302	589,815	,813	2
15	49 05 55,24432	,24444	19 29 01,87443	,87453	589,777	,773	4
16	49 05 52,02249	,02245	19 29 03,52214	,52198	589,999	,996	3
17	49 05 49,14101	,14090	19 29 04,99487	,99508	589,729	,725	4
18	49 05 46,46838	,46839	19 29 06,35300	,35312	589,894	,894	0
19	49 05 43,44458	,44475	19 29 07,79278	,79309	590,013	,015	- 2
L 20	49 05 41,64639	,64637	19 29 08,44433	,44431	590,077	,074	3

Dokumentácia výsledkov merania

Hodnoty zemepisných súradníc namerané prístrojom Trimble 4000Ssi vo WGS – 84 metódou GPS v roku 2001 a 2004, [3] uvádzame v tabuľke 1 a tabuľke 2. Pre informáciu sú v tabuľkách uvedené i elipsoidické výšky a ich rozdiely z oboch etáp merania.

Tab. 3. Súradnice vzťažných bodov

Tab. 3. Coordinates of reference points

Číslo bodu	y [m]		y-tra.	d _y	D _y	x [m]		x-tra.	d _x	D _x
	2001	2004	2004	[mm]	[mm]	2001	2004	2004	[mm]	[mm]
I	325,1511	,1133	,1149	37,8	36,2	720,6608	,6709	,6726	-10,1	- 11,8
II	505,1759	,1746	,1755	1,3	0,4	908,4080	,4298	,4306	-21,8	- 22,6
III	540,0810	,0784	,0792	2,6	1,8	1013,3073	,3081	,3085	- 0,8	- 1,2
IV	445,8873	,8873	,8886	0	- 1,3	1455,2469	,2469	,2454	0	1,5
V	251,1026	,1019	,1041	0,7	- 1,5	1563,0660	,0685	,0666	- 2,5	- 0,6
VI	170,7233	,7197	,7223	3,6	- 1,5	1828,4167	,4223	,4193	- 5,6	- 2,6
A	682,1816	,1634	,1635	18,2	18,1	846,2561	,2431	,2441	13,0	12,0
C	661,3167	,3181	,3186	- 1,4	- 1,9	1793,6002	,6060	,6030	- 5,8	- 2,8
D	474,4732	,4712	,4725	2,0	0,7	1801,3226	,3271	,3241	- 4,5	- 1,5
E	676,0182	,0167	,0170	1,5	1,2	1371,7441	,7436	,7424	0,5	1,7

Rozbor presnosti dosiahnutých výsledkov

Tab. 4. Súradnice pozorovaných bodov

Tab. 4. Coordinates of observed points

Číslo bodu	y [m]		y-tra.	d _y	D _y	x [m]		x-tra.	d _x	D _x
	2001	2004	2004	[mm]	[mm]	2001	2004	2004	[mm]	[mm]
L 1	342.9213	.9194	.9210	1.9	0.3	763.1820	.1803	.1818	1.7	0.2
2	325.7984	-	-	-	-	825.7064	-	-	-	-
3	301.4589	.4558	.4576	3.1	1.3	919.2298	.2260	.2268	3.8	3.0
4	282.1749	.1724	.1743	2.5	0.6	992.2880	.2879	.2884	0.1	- 0.4
5	263.8730	.8647	.8667	8.3	6.3	1064.3904	.3910	.3912	- 0.6	- 0.8
6	237.6728	.6703	.6724	2.5	0.4	1165.1689	.1676	.1674	1.3	1.5
7	214.0498	.0465	.0488	3.3	1.0	1257.3080	.3079	.3073	0.1	0.7
8	192.1449	-	-	-	-	1341.841	-	-	-	-
9	168.2945	.2953	.2978	- 0.8	- 3.3	1435.8929	.8870	.8857	5.9	7.2
10	158.5531	.5492	.5518	3.9	1.3	1493.3054	.3057	.3041	- 0.3	1.3
11	147.4434	.4367	.4393	6.7	4.1	1622.8900	.8843	.8822	6.7	7.8
12	346.7804	.7790	.7806	1.4	- 0.2	831.0900	.0908	.0920	- 0.8	- 2.0
13	322.2510	.2490	.2507	2.0	0.3	924.6209	.6208	.6217	0.1	- 0.8
14	303.3302	.3282	.3300	2.0	0.2	998.4453	.4432	.4458	2.1	- 0.5
15	284.8858	.8836	.8855	2.2	0.3	1069.4774	.4739	.4741	3.5	3.3
16	258.4894	.4927	.4947	- 3.3	- 5.3	1171.0764	.0774	.0774	- 1.0	- 1.0
17	234.8989	.8949	.8971	4.0	1.8	1261.9411	.9448	.9442	- 3.7	- 3.1
18	213.1765	.1740	.1763	2.5	0.2	1346.2087	.2086	.2076	0.1	1.1
19	190.5574	.5507	.5531	6.7	4.3	1441.4116	.4068	.4055	4.8	6.1
L 20	181.2467	.2472	.2497	- 0.5	- 3.0	1497.7373	.7379	.7363	- 0.6	1.0

Prehľadnejší obraz o polohe bodov podáva metrická miera, tak ako je to zvykom a preto ďalšie rozbor bude spracovaný vo forme súradníc bodov miestnej súradnicovej sústavy. Hodnoty zemepisných súradníc boli prevedené podľa vzťahov Křovákovo konformného zobrazenia na pravouhlé rovinné súradnice, ktoré neboli transformované do JTSK, pomocou identických bodov trigonometrickej siete v danej lokalite. Z tohto dôvodu hovoríme o miestnom súradnicovom systéme. Polohové súradnice vzťažných a pozorovaných bodov a ich rozdiely v porovnávaných etapách (rok 2001 a 2004) z priameho merania (y , d_y , x , d_x) a po transformácii (y -tra., D_y , x -tra., D_x) sú v tabuľke 3 a tabuľke 4.

Vzhľadom na to že ide o meranie posunov, transformované súradnice bodov etapy 2004 na predchádzajúcu etapu 2001 klasickou Helmetrovou transformáciou. Transformačný kľúč bol vypočítaný z bodov vzťažného bodového poľa. V tabuľke 3 sú tieto body zvýraznené. Stredná empirická štandardná odchýlka súradníc, určená z transformácie je $m_{yx} = 1,7$ mm, a polohová štandardná odchýlka $m_p = 2,4$ mm.

Súradnicové rozdiely vzťažných bodov I, II a A v tabuľka 3 sú väčšie ako dvojnásobky odhadnutej presnosti a preto do výpočtu transformačného kľúča neboli zaradené.

Súradnicové rozdiely medzi uvádzanými etapami merania pred transformáciou sú označené d_x , y a po transformácii $D_{x,y}$.

Hodnoty $D_{x,y}$ prekračujúce dvojnásobky $m_{yx} = 1,7$ mm sú v tabuľke 4 zvýraznené a predstavujú posuny bodov medzi uvedenými etapami.

Porovnanie výsledkov merania, prístrojom Ashtech ProMark2 a Trimble 4000Ssi

Naše pracovisko disponuje zatiaľ len jednofrekvenčným prístrojom firmy Ashtech ProMark2 na určenie priestorovej polohy metódou GPS. Testovanie jeho výsledkov merania bolo urobené na tej istej lokalite, v rovnakom období, priamym porovnaním získaných súradníc. Súradnice z oboch prístrojov a ich rozdiely sú v tabuľke 5 a 6.

Tab. 5. Súradnice vzťažných bodov určených prístrojmi Trimble a Ashtech
Tab. 5. Coordinates of reference points determined by the Trimble and Ashtech apparatus

Číslo Bodu	y [m]		d_y	x [m]		d_x
	Trimble	Ashtech	[mm]	Trimble	Ashtech	[mm]
I	325,1133	,1247	- 11,4	720,6709	,6206	50,3
II	505,1746	,1799	- 5,3	908,4298	,4303	- 0,5
III	540,0784	,0821	- 3,7	1013,3081	,3107	- 2,6
IV	445,8873	,8871	0,2	1455,2469	,2463	0,6
V	251,1019	,1014	0,5	1563,0685	,0695	- 1,0
VI	170,7197	,7232	- 3,5	1828,4223	,4183	4,0
A	682,1634	,1755	-12,1	846,2431	,2565	- 13,4
C	661,3181	,3146	3,5	1793,6060	,5994	6,6
D	474,4712	,4705	0,7	1801,3271	,3246	2,5
E	676,0167	,0183	-1,6	1371,7436	,7345	9,1

Pomerne veľké súradnicové rozdiely na vzťažných bodoch I a A v porovnaní s ostatnými bodmi, sú zrejme dôsledkom menej kvalitného príjmu signálu prístrojom Ashtech ProMark2 pri rušivom vplyve prostredia ako je to na týchto bodoch. Kvadratický priemer rozdielov súradníc zo všetkých bodov – vzťažných aj pozorovaných je:

$$\begin{aligned}d_y &= 4,7 \text{ mm} \\d_x &= 11,1 \text{ mm} \\d_{x,y} &= 8,5 \text{ mm}.\end{aligned}$$

Z uvedeného porovnania vidieť, vzhľadom na znalosť blízkosti okolia meraných bodov, že tienenie prijímaného signálu u jednofrekvenčného prístroja Ashtech ProMark2 značne vplyva na presnosť určenia priestorovej polohy bodov. Z vyhodnotených výsledkov súradnicových rozdielov a ich určených kvadratických rozdielov z tohto pomerne malého súboru vyplýva, že rozdiel v polohe bodov určených prístrojom Trimble 4000 Ssi a Ashtech ProMark2 je v súradniciach len jeden centimeter.

Tab. 6. Súradnice pozorovaných bodov určených prístrojmi Trimble a Ashtech
 Tab. 6. Coordinates of observed points determined by the Trimble and Ashtech apparatus

Číslo bodu	y [m]		d _y	x [m]		d _x
	Trimble	Ashte	[mm]	Trimble	Ashte	[mm]
L 1	342,9194	,9165	2,9	763,1803	,1830	- 2,7
2	325,-	,7956	-	825,	,7097	-
3	301,4558	,4597	- 3,9	919,2260	,2263	- 0,3
4	282,1724	,1737	- 1,3	992,2879	,2887	- 0,8
5	263,8647	,8752	- 10,5	1064,3910	,3896	,4
6	237,6703	,6724	- 2,1	1165,1676	,1711	- 3,5
7	214,0465	,0520	- 5,5	1257,3079	,3051	2,8
8	192,	,1385	-	1341,	,8423	-
9	168,2953	2947	0,6	1435,8870	,8938	- 6,8
10	158,5492	,5484	0,8	1493,3057	,3138	- 8,1
11	147,4367	,4412	- 4,5	1622,8843	,8963	-12,0
12	346,7790	,7784	0,6	831,0908	,0911	- 0,3
13	322,2490	,2487	0,3	924,6208	,6137	7,1
14	303,3282	,3290	0,8	998,4432	,4370	6,2
15	284,8836	,8888	- 5,2	1069,4739	,4642	10,3
16	258,4927	,4961	- 3,4	1171,0774	,0734	4,0
17	234,8949	,8895	5,4	1261,9448	,9461	- 1,3
18	213,1740	,1733	0,7	1346,2086	,2157	- 7,1
19	190,5507	,5500	0,7	1441,4068	,4109	- 4,1
L 20	181,2472	,2496	- 2,4	1497,7379	,7375	0,4

Záver

Z uvedeného porovnania výsledkov metódy trigonometrického merania a metódy GPS pri určovaní polohy bodov zemnej hrádze v otvorenom priestore a z rozboru týchto dvoch metód vyplýva, že metódou GPS s prístrojmi Trimble 4000Ssi (alebo inými súčasnými dvojfrekvenčnými prístrojmi) je možné prakticky dosiahnuť rovnakú presnosť výsledkov ako pri klasickej trigonometrickej metóde. Čo sa týka časovej náročnosti, metóda GPS je o jednu tretinu rýchlejšia (v dňoch je to 2:3 terénnych prác na tejto lokalite).

Z porovnania výsledkov merania jedno frekvenčným prístrojom Ashtech ProMark2 s dvojfrekvenčným Trimble 4000 Ssi môžeme konštatovať, že určenie polohy bodu voči Trimble je rádovo o cm menej presné.

Záverom je možné vysloviť predpoklad, že pri takom rýchlom technickom rozvoji elektrotechniky aký prežívame, môžeme v dohľadnej dobe očakávať ešte presnejšie a výkonnejšie prístroje na určenie polohy metódou GPS.

Literatúra – References

Vyhláška ministerstva lesného a vodného hospodárstva SSR č.169/1975 Zb. O odbornom technicko-bezpečnostnom dohľade na niektorých vodohospodárskych dielach a o technicko- bezpečnostnom dozore národných výborov nad nimi.

Štubňa, J., Seidlová, A.: Stabilita vzťažných bodových polí na meranie posunov a pretvorení stavebných objektov. *GaKO*, 50/92, 2004 č.3, s.45-50.

Lihocký, J.: Určenie polohových zmien zemnej hrádze Liptovská Mara metódou GPS. *Záverečná práca Bc. štúdia geodézie, SvF ŽU v Žiline*, 2004.