

## 22. slovenské geodetické dni

Žilina 6. - 7. novembra 2014

---

# ZISŤOVANIE DEFORMAČNÝCH POSUNOV NA VODNOM DIELE STARINA

## DETECTION OF DEFORMATION DISPLACEMENTS AT THE WATER RESERVOIR STARINA

*Ivan Jankovský<sup>1</sup>*

### **Abstract**

*The main aim of this thesis is to perform detailed analysis of deformation displacements at the water reservoir Starina. Furthermore, the goal is to evaluate horizontal displacements within this area. Results from the 31st. and 32nd. control measurement were used. In order to analyze these, L-Test (Lenzmann1984 ) was applied. According to the results, the water reservoir Starina can be seen as safe and stabile. Finally, small movements common at loose embankments do not represent any danger for it's environment.*

## **1 Vodné dielo Starina**

### **1.1 Popis, konštrukcia a parametre vodnej nádrže**

Vodné dielo Starina je svojim celkovým objemom 59,9 mil. m<sup>3</sup> najväčšou vodárenskou nádržou na Slovensku. Jej výstavba prebiehala v rokoch 1981 až 1987. Z územia s plochou 131 km<sup>2</sup> bolo vysídlených 7 obcí s 3.463 obyvateľmi. Boli to obce Starina, Dara, Ostrožnica, Zvala, Smolník, Veľká Poľana a Ruské.

Akumulačný objem nádrže bol vytvorený prehradením údolia Cirochy v rkm 37,250 zemnou sypanou priehradou so stredovým hlinitým tesnením. Priehrada pri výške 50 m nad základovou škárou má dĺžku v korune 345 m [1]. Na okraji vodárenskej nádrže, v tzv. Darskej zátoke, sa nachádza bočná hrádza. Slúži na zachytávanie chemických a mechanických nečistôt, predovšetkým ako bezpečnostné opatrenie v prípade dopravnej nehody na blízkej ceste a následnému úniku nebezpečných látok do vody.

---

<sup>1</sup> Ing. Ivan Jankovský, Sudop TRADE, spol. s r.o. Krivá 23, 040 01 Košice tel.: +421-911908203, e-mail: jankovsky.ivan@gmail.com

Sklony svahov priehrady sú premenlivé, na návodnej strane od 1:2 do 1:3,75, na strane vzdušnej od 1 : 2 a 1:1,2,75. Plynulosť svahov prerušujú lavičky o šírke 3,0 m. V rozsahu kolísania hladín je návodný svah spevnený kamenným násypom hrúbky 80 cm, vzdušný svah je zahumusovaný a zatrávnený [2].

## **1.2 Pravidelné monitorovanie vodného diela**

Ku kontrole správania sa vodného diela Starina a kontinuálnemu posudzovaniu jeho bezpečnosti slúži pravidelný monitoring. Parametre pohybu podzemných a priesakových vôd sú sledované pozorovacím systémom, ktorý pozostáva z 33 sond, 22 dvojíc krátkych a 13 dvojíc hlbokých vztlakomerných vrtov, dvoch merných šácht na meranie priesakov, zachytávaných pravým a ľavým pätným drénom. Vývoj hladinového režimu je determinovaný tak morfológiou územia, ako aj existenciou tektonických porúch v podloží priehrady.

Deformačné pohyby sa zisťujú geodetickými metódami a to výškovým meraním metódou VPN, polohovým (terestrickým) meraním a kontrolným meraním zámernej priamky. Dodávateľské organizácie pri realizácii takýchto meraní ďalej tieto neanalyzujú ale výsledky jednotlivých meračských metód odovzdávajú vo forme meračských elaborátov pracovníkom

technicko-bezpečnostného dohľadu (TBD), ktorý patrí ku kľúčovým zložkám pre zaistenie bezpečnosti vodného diela. Vykonáva ho Vodohospodárska výstavba š.p.

## **1.3 Bodové pole na vodnom diele Starina**

Na vodnom diele Starina bolo inštalovaných sedem referenčných bodov, ktoré majú označenie PVB-1 až PVB-7. Všetky referenčné body na vodnom diele boli konštrukčne realizované ako observačné piliere s nútenou centráciou, ktoré sú zároveň opatrené nivelačnou čapovou značkou. Body boli osadené v rôznych vzdialenostiach od objektu hrádze, body PVB-5 a PVB-6 boli osadené do vzdialenosti 50 m, body PVB-1, PVB-3, PVB-4 a PVB-7 boli inštalované mimo deformačného územia, pričom bod PVB-2 bol inštalovaný vo vzdialenosti väčšej ako 400m od objektu hrádze.

Objektové body na objekte hrádze sú rozmiestnené tak, aby čo najlepšie zohľadnili geometriu hrádze a predpokladané tlaky vodnej hladiny na hrádzu. Body boli rozmiestnené na vtokovom objekte (body KNB-1 až KNB-4), v komunikačnej chodbe (body KNB-5 až KNB-40), na výtoku (body KNB-41 až KNB-56), v injekčnej chodbe – pravá strana (body KNB-59 až KNB-104), v injekčnej chodbe – ľavá strana (body KNB-105 až KNB-151), v spojovacej chodbe (body KNB-152 až KNB-155), na korune hrádze (body KBZP-1 až KBZP-9), na lavičke - kóta 335 m (KVSb-1, 3, 6, 10, 14, 18, 22, 26, 29, 31), na lavičke - kóta 325 m (KVSb-2, 4, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 30) ), na lavičke - kóta 315 m (KVSb-5, 8, 12, 16, 20, 24, 28) ), na päte hrádze (KVSb-9, 13, 17, 21, 25, KVB-2 až KVB-4), na búdkach výškomerných škatúl (MB-1 až MB-14), na schodoch vzdušnej strany hrádze (KNB-156 až KNB-180) na lavičke návodnej strany hrádze (KVB-5 až KVB-35)

## 2 Zisťovanie posunov na vodnom diele Starina

### 2.1 Trigonometrická metóda

Realizovaním tejto metódy bolo na VS Starina vykonané 32. polohové meranie vzťažných a pozorovaných bodov. Počas merania bolo prevažne daždivé počasie, teplota vzduchu sa pohybovala v medziach od +5°C do +15°C. Kóta hladiny vody v nádrži bola 336,1 m n. m. Meranie bolo vykonané kombinovanou metódou merania uhlov a dĺžok. Merania uhlov boli realizované metódou laboratórnej jednotky. Zamerané boli všetky vzťažné a pozorované body. Na meranie bola použitá univerzálna meracia stanica TOPCON GPT7002i v. č. OY0067 a obvyklé meračské príslušenstvo. Rektifikácia prístroja bola vykonaná pred meraním. Merania z niektorých RB boli sťažené, prípadne vylúčené z dôsledku nedostatočného vyčistenia vizúr.

Najskôr boli zamerané všetky prístupné dĺžky a uhly medzi referenčnými bodmi vodnej stavby ( PVB-1 až PVB-7). U dĺžok, ktoré boli merané z obidvoch strán proti sebe sa z nameraných údajov použila priemerná hodnota. V ďalších krokoch boli merané dĺžky a uhly na OB, podľa umiestnenia na jednotlivých lavičkách na vzdušnej strane hrádze. Namerané hodnoty boli redukované do jednotnej výškovej hladiny 300 m n. m.

Rozmiestnenie pozorovaných bodov vzhľadom ku vzťažným bodom ako aj schematické znázornenie postupu merania je znázornené na obrázku (Obr. 1). Kvôli prehľadnosti tu nie sú zakreslené všetky merania, ale na každý pozorovaný bod boli uskutočnené minimálne 3 nezávislé merania, pričom minimálne jedno z meraní bolo uhlové.

Približné súradnice vzťažných a pozorovaných bodov boli vypočítané v lokálnej súradnicovej sústave, ktorá bola zvolená tak, aby os y bola rovnobežná s osou hrádze a aby smerovala z prava do ľava, os x je na ňu kolmá a narastá smerom po vode. Na vyrovnanie polohovej LGS bol použitý výpočtový software Ing. Mateja Klobušiaka, PhD. MaKlo 1993-2001, v 1.2.

Výpočet súradníc bol vykonaný spoločným vyrovnaním meraných uhlov a dĺžok metódou najmenších štvorcov podľa sprostredkujúcich pozorovaní. Presnosť merania uhlov a dĺžok je charakterizovaná ich strednou chybou vypočítanou z vyrovnaní siete  $M_u = 1,0\text{cc}$  a  $M_d = 0,7$  mm. Maximálna stredná súradnicová chyba vyrovnaných súradníc je na bode KVSb-31 = 0,8 mm. Výsledky merania (Tab. 1), (Tab. 2) sú zostavené formou zoznamu súradníc, s uvedením stredných súradnicových chýb.

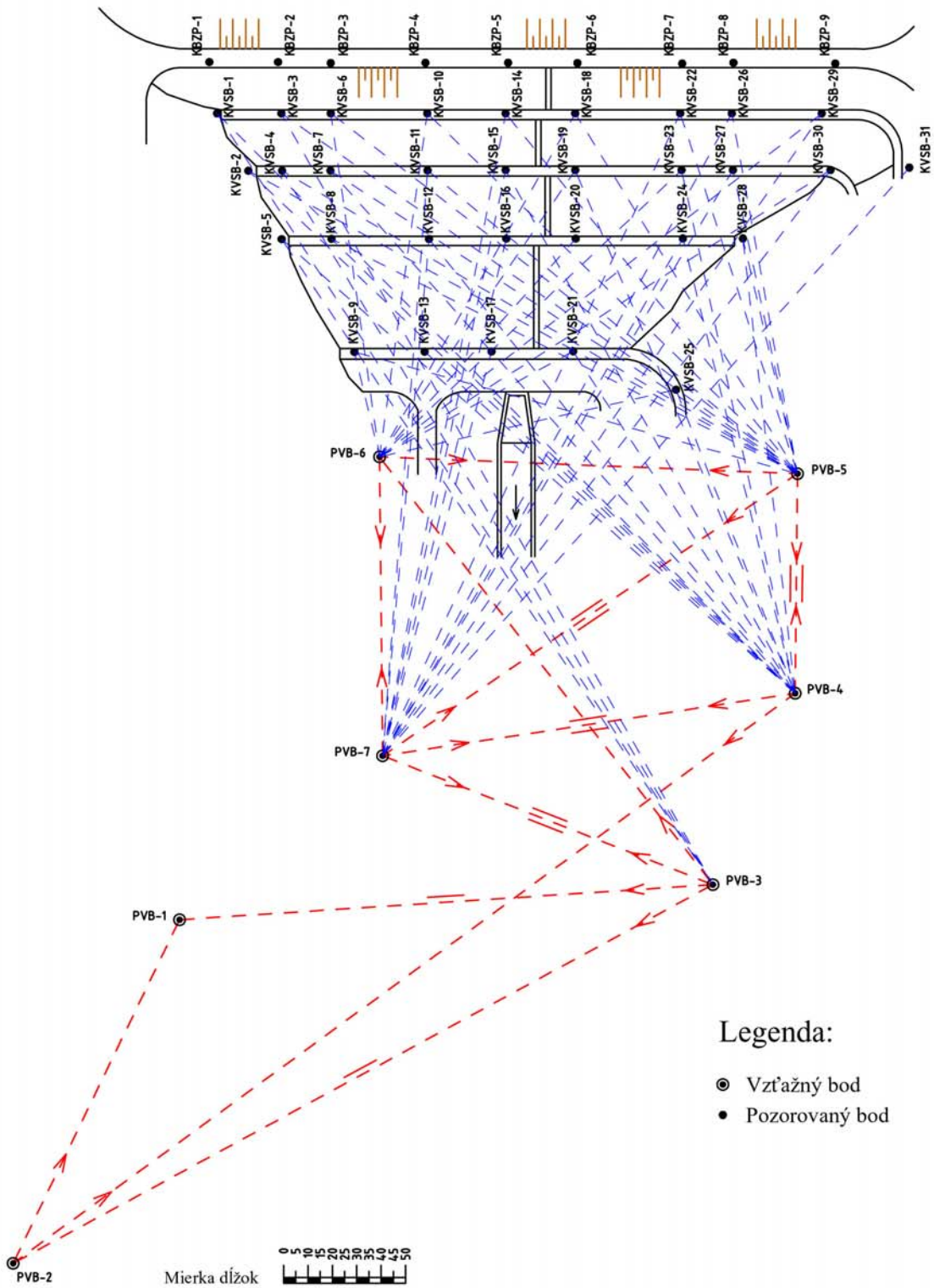
Tab. 1 Vyrovnané súradnice RB

BOD	Vyrovnané súradnice		Stredné súradnicové chyby	
	X [m]	Y [m]	$m_x$ [mm]	$m_y$ [mm]
PVB-1	631.8737	765.3166	0.3	0.4
PVB-2	773.2714	833.5613	0.5	0.5
PVB-3	617.4240	546.5415	0.2	0.2
PVB-4	538.6775	512.8025	0.2	0.2
PVB-5	448.3195	511.8415	0.1	0.2
PVB-6	441.3832	683.2793	0.2	0.2
PVB-7	564.4015	682.0241	0.1	0.3

Tab. 2 Vyrovnané súradnice OB

BOD	Vyrovnané súradnice		Stredné súradnicové chyby	
	X [m]	Y [m]	m <sub>x</sub> [mm]	m <sub>y</sub> [mm]
KVSB-1	300.0287	749.9592	0.6	0.5
KVSB-2	323.6529	737.0959	0.5	0.4
KVSB-3	300.0550	723.5353	0.8	0.6
KVSB-4	323.6047	723.2487	0.5	0.4
KVSB-5	351.7879	723.4480	0.5	0.6
KVSB-6	300.0053	703.2789	0.5	0.6
KVSB-7	323.5465	703.4424	0.7	0.3
KVSB-8	351.6868	702.9899	0.6	0.5
KVSB-9	398.2010	693.5904	0.5	0.5
KVSB-10	300.0184	663.7200	0.6	0.5
KVSB-11	323.5092	663.6042	0.5	0.2
KVSB-12	351.7275	663.0151	0.4	0.4
KVSB-13	398.0690	664.7802	0.4	0.2
KVSB-14	300.0239	631.5593	0.6	0.5
KVSB-15	323.3505	631.5810	0.4	0.2
KVSB-16	351.5549	631.3173	0.5	0.5
KVSB-17	398.0310	637.3531	0.3	0.2
KVSB-18	300.0108	603.0329	0.5	0.4
KVSB-19	323.3637	603.0097	0.6	0.5
KVSB-20	351.5836	602.8119	0.3	0.2
KVSB-21	397.9462	603.8705	0.2	0.2
KVSB-22	299.9948	559.9690	0.6	0.4
KVSB-23	323.3516	559.4040	0.4	0.5
KVSB-24	351.4812	558.8700	0.3	0.3
KVSB-25	413.7280	561.6924	0.6	0.3
KVSB-26	300.0302	538.7946	0.6	0.4
KVSB-27	323.3225	538.3434	0.4	0.5
KVSB-28	351.4773	534.2751	0.3	0.3
KVSB-29	300.0414	501.9309	0.5	0.6
KVSB-30	323.3300	498.3327	0.4	0.6
KVSB-31	322.3474	465.9933	0.8	0.7

# Vodná stavba STARINA



Obr. 1 Schematické znázornenie postupu merania

### 3 Transformačná metóda testovania na vodnom diele Starina

#### 3.1 Vstup údajov a zisťovanie diferencií

Na základe spracovaných údajov z polohových meraní na vodnom diele Starina boli do deformačného šetrenia transformačnou metódou zostavené vektory vyrovnaných súradníc  $C$  ( 31. polohové meranie) a  $C'$  ( 32. polohové meranie). Z ich rozdielov boli určené diferencie  $dC = [dX \ dY]$  podľa (1),

$$dC_i = C'_i - C_i = \varepsilon_i C'_i + T_i \quad (1)$$

kde vektor (2)

$$dC_i = \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} = C'_i - C_i = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

je definovaný súradnicovými rozdielmi pre bod  $B_i(t)$  zo súradníc  $C_i$ , určených v epoche  $t$  a súradníc určených v epoche  $t'$ , ktoré je možné získať geodetickým meraním. Vektor  $\varepsilon_i$  je tenzor celkovej deformácie podľa (3).

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Z diferencií súradníc boli ďalej vypočítané dĺžky vektorov posunu  $dh$  na jednotlivých bodoch a tiež ich orientácie  $\sigma_{dh}$  podľa vzťahu (4), [3]

$$dh = \sqrt{dX^2 + dY^2} \quad \sigma_{dh} = \arctg \frac{dY}{dX} \quad (4)$$

ktoré nám poskytujú základné, primárne informácie o pohybovom správaní sa územia (Tab. 3), (Tab. 4), (Tab. 5).

Tab. 3 Primárne informácie o RB (PVB-1 až PVB-7)

<b>X Y</b>	<b>C<sup>I</sup> (m)</b>	<b>C<sup>II</sup> (m)</b>	<b>dC<sup>I,II</sup> (mm)</b>	<b>dh (mm)</b>	<b>σdh (g)</b>
X-PVB-1	631.8701	631.8737	3.6	<b>4.6</b>	42.0833
Y-PVB-1	765.3138	765.3166	2.8		
X-PVB-2	773.2651	773.2714	6.3	<b>6.6</b>	17.7171
Y-PVB-2	833.5595	833.5613	1.8		
X-PVB-3	617.4209	617.4240	3.1	<b>3.7</b>	363.5238
Y-PVB-3	546.5435	546.5415	-2.0		
X-PVB-4	538.6758	538.6775	1.7	<b>2.0</b>	363.4386
Y-PVB-4	512.8036	512.8025	-1.1		
X-PVB-5	448.3182	448.3195	1.3	<b>3.5</b>	323.8905
Y-PVB-5	511.8448	511.8415	-3.3		
X-PVB-6	441.3814	441.3832	1.8	<b>2.8</b>	56.3451
Y-PVB-6	683.2771	683.2793	2.2		
X-PVB-7	564.4002	564.4015	1.3	<b>1.3</b>	0.0000
Y-PVB-7	682.0241	682.0241	0.0		

Tab. 4 Primárne informácie o OB (KVSb-1 až KVSb-19)

<b>X Y</b>	<b>C<sup>I</sup> (m)</b>	<b>C<sup>II</sup> (m)</b>	<b>dC<sup>I,II</sup> (mm)</b>	<b>dh (mm)</b>	<b>σdh (g)</b>
X-KVSb-1	300.0271	300.0287	1.6	<b>3.2</b>	66.9501
Y-KVSb-1	749.9564	749.9592	2.8		
X-KVSb-2	323.6531	323.6529	-0.2	<b>0.6</b>	320.4833
Y-KVSb-2	737.0953	737.0959	0.6		
X-KVSb-3	300.0578	300.0550	-2.8	<b>4.0</b>	50.0000
Y-KVSb-3	723.5381	723.5353	-2.8		
X-KVSb-4	323.6056	323.6047	-0.9	<b>1.1</b>	362.5666
Y-KVSb-4	723.2481	723.2487	0.6		
X-KVSb-5	351.7886	351.7879	-0.7	<b>1.8</b>	324.8668
Y-KVSb-5	723.4463	723.4480	1.7		
X-KVSb-6	300.0047	300.0053	0.6	<b>1.5</b>	325.7762
Y-KVSb-6	703.2803	703.2789	-1.4		
X-KVSb-7	323.5476	323.5465	-1.1	<b>1.2</b>	27.1599
Y-KVSb-7	703.4429	703.4424	-0.5		
X-KVSb-8	351.6926	351.6868	-5.8	<b>6.1</b>	19.1572
Y-KVSb-8	702.9917	702.9899	-1.8		
X-KVSb-9	398.2035	398.2010	-2.5	<b>3.3</b>	44.4781
Y-KVSb-9	693.5925	693.5904	-2.1		
X-KVSb-10	300.0159	300.0184	2.5	<b>4.2</b>	340.3631
Y-KVSb-10	663.7234	663.7200	-3.4		
X-KVSb-11	323.5092	323.5092	0.0	<b>0.9</b>	99.2927
Y-KVSb-11	663.6033	663.6042	0.9		

X-KVSB-12	351.7297	351.7275	-2.2	<b>2.2</b>	0.0000
Y-KVSB-12	663.0151	663.0151	0.0		
X-KVSB-13	398.0677	398.0690	1.3	<b>2.1</b>	341.5615
Y-KVSB-13	664.7819	664.7802	-1.7		
X-KVSB-14	300.0228	300.0239	1.1	<b>1.1</b>	0.0000
Y-KVSB-14	631.5593	631.5593	0.0		
X-KVSB-15	323.3534	323.3505	-2.9	<b>3.7</b>	357.3133
Y-KVSB-15	631.5787	631.5810	2.3		
X-KVSB-16	351.5595	351.5549	-4.6	<b>4.6</b>	0.0000
Y-KVSB-16	631.3173	631.3173	0.0		
X-KVSB-17	398.0332	398.0310	-2.2	<b>2.3</b>	14.2270
Y-KVSB-17	637.3536	637.3531	-0.5		
X-KVSB-18	300.0077	300.0108	3.1	<b>3.2</b>	382.0120
Y-KVSB-18	603.0338	603.0329	-0.9		
X-KVSB-19	323.3642	323.3637	-0.5	<b>0.5</b>	24.2238
Y-KVSB-19	603.0099	603.0097	-0.2		

Tab. 5 primárne informácie o OB (KVSB-20 až KVSB-31)

<b>X Y</b>	<b>C<sup>^</sup> I. (m)</b>	<b>C<sup>^</sup> II. (m)</b>	<b>dC<sup>^</sup> I,II. (mm)</b>	<b>dh (mm)</b>	<b>σdh (g)</b>
X-KVSB-20	351.5874	351.5836	-3.8	<b>3.9</b>	388.4028
Y-KVSB-20	602.8112	602.8119	0.7		
X-KVSB-21	397.9470	397.9462	-0.8	<b>1.8</b>	70.4833
Y-KVSB-21	603.8721	603.8705	-1.6		
X-KVSB-22	299.9914	299.9948	3.4	<b>3.4</b>	3.7405
Y-KVSB-22	559.9688	559.9690	0.2		
X-KVSB-23	323.3511	323.3516	0.5	<b>0.5</b>	387.4334
Y-KVSB-23	559.4041	559.4040	-0.1		
X-KVSB-24	351.4823	351.4812	-1.1	<b>1.4</b>	43.6549
Y-KVSB-24	558.8709	558.8700	-0.9		
X-KVSB-25	413.7330	413.7280	-5.0	<b>5.1</b>	10.1003
Y-KVSB-25	561.6932	561.6924	-0.8		
X-KVSB-26	300.0280	300.0302	2.2	<b>2.3</b>	385.7730
Y-KVSB-26	538.7951	538.7946	-0.5		
X-KVSB-27	323.3219	323.3225	0.6	<b>1.1</b>	62.5666
Y-KVSB-27	538.3425	538.3434	0.9		
X-KVSB-28	351.4796	351.4773	-2.3	<b>3.1</b>	47.1083
Y-KVSB-28	534.2772	534.2751	-2.1		
X-KVSB-29	300.0392	300.0414	2.2	<b>4.4</b>	66.5905
Y-KVSB-29	501.9271	501.9309	3.8		
X-KVSB-30	323.3286	323.3300	1.4	<b>3.1</b>	70.4833
Y-KVSB-30	498.3299	498.3327	2.8		
X-KVSB-31	322.3472	322.3474	0.2	<b>3.7</b>	96.5622
Y-KVSB-31	465.9896	465.9933	3.7		



Stredná chyba vyrovnaných súradníc z druhej epochy je uvedená k jednotlivým pozorovaným bodom v tabuľkách (Tab. 1), (Tab. 2).

Zaujímavé sú v uvádzané hodnoty polohového vektora  $dh$  (Tab. 3), (Tab. 4), (Tab. 5), ktoré by sa mohli zdať vzhľadom na závery výslednej analýzy príliš vysoké. Predpokladám, že k takýmto hodnotám je možné dospieť aj v prípadoch, keď jednotlivé epochy kontrolných meraní na tom istom objekte realizuje vždy iný subjekt, s inou technológiou a s iným prístupom. Obdobné veľkosti  $dh$  sú viditeľné aj zo súradnicových rozporov z predchádzajúcich elaborátov.

### 3.2 Určenie deformačných parametrov územia

Deformačné parametre (DP) bolo možné zistiť na základe vypočítaných súradnicových rozporov (Tab. 3), (Tab. 4), (Tab. 5), a voľby vhodného transformačného modelu medzi  $dC$  a  $DP$  pre danú množinu sledovaných bodov. Medzi súradnicami  $C$  a  $C'$  platí všeobecný lineárny (zjednodušený) transformačný vzťah (5) [4],

$$C' = FC + t = (I + dF)C + t \quad (5)$$

kde:  $F$  je matica deformácií,  $t = [t_x \ t_y]^T$  sú translačné zložky premiestnenia bodu,  $I$  je jednotková matica a  $dF$  je tenzor deformácií. Následne, po úprave (5) sú k dispozícii deformačné rovnice (pre jeden bod) v tvare podľa (6).

$$\begin{bmatrix} dX \\ dY \end{bmatrix}_i = \left( \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{yx} & e_{yy} \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} 0 & \omega_{xy} \\ -\omega_{yx} & 0 \end{bmatrix}_i \right) \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}_i \quad (6)$$

takže

$$\begin{aligned} dX_i &= e_{xx} X_i + e_{xy} Y_i + \omega_{xy} Y_i + T_x, \\ dY_i &= e_{yy} Y_i + e_{yx} X_i - \omega_{yx} X_i + T_y, \end{aligned} \quad (7)$$

kde deformačné parametre tvoria vektor (8)

$$\Theta = [e_{xx} \ e_{xy} \ e_{yy} \ \omega_{xy} \ T_x \ T_y]^T. \quad (8)$$

Vektor deformačných posunov vyjadrených zmenami súradníc bodu  $B_i$  a jeho okolia v smeroch súradnicových osí je možné následne vyjadriť vzťahom (9)

$$dC_i = H_i \cdot \Theta \quad (9)$$

Vzťahy medzi posunmi bodov  $dC$  a deformačnými parametrami  $\Theta$  pre  $n$  bodov môžeme zapísať podľa (10)

$$(2n,1) dC = (2n,6) H \cdot (6,1) \Theta \quad (10)$$

Kde

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X'_1 & X_1 & Y'_1 & 0 \\ 0 & 1 & -Y'_1 & 0 & X'_1 & Y'_1 \\ \vdots & & & & & \\ 1 & 0 & X'_i & X_i & Y'_i & 0 \\ 0 & 1 & -Y'_i & 0 & X'_i & Y'_i \\ \vdots & & & & & \\ 1 & 0 & X'_n & X_n & Y'_n & 0 \\ 0 & 1 & -Y'_n & 0 & X'_n & Y'_n \end{bmatrix}, \quad \Theta = [t_x \quad t_y \quad \omega_{xy} \quad e_{xx} \quad e_{xy} \quad e_{yy}]^T. \quad (11)$$

Na základe posúdenia uvedených prvotných informácií o získaných súradnicových rozporoch (Tab. 5), (Tab. 6), (Tab. 7). z jednotlivých pozorovaných etáp som volil prácu s komplexným 2D modelom. Odhad deformačných parametrov bol vypočítaný prostredníctvom riešenia MNŠ, podľa (12),

$$\hat{\Theta} = \left( H^T Q_{dC}^{-1} H \right)^{-1} H^T Q_{dC}^{-1} (C' - C) \quad (12)$$

pričom kofaktorovú maticu súradnicových rozporov som pre tento prípad volil  $Q_{dC} = 1$ . [5]

Tab. 6 Vyrovnané hodnoty deformačných parametrov

$\hat{\Theta}$ (6,1)	-0.000071 $t_x$
	-0.000505 $t_y$
	1.000430 $\omega_{xx}$
	-1.000430 $e_{xx}$
	0.000000 $e_{xy}$
	1.000431 $e_{yy}$

### 3.3 Určenie deformačných posunov územia

Vypočítane hodnoty (Tab. 6) boli použité na transformáciu súradníc, podľa vzťahu (13)

$$C_{tH} = -H_H \cdot \hat{\Theta}_H + C' \quad (13)$$

a z transformovaných súradníc mohli byť vyjadrené ich súradnicové rozporo podľa (14).

$$dC_{tH} = v_{ct} = C_{tH} - C = -H_H \cdot \hat{\Theta}_H + C' - C \quad (14)$$

Zistené súradnicové rozpory medzi transformovanými súradnicami a súradnicami z prvej epochy sú identické s rozpormi získanými podľa štandardného modelu Helmertovej transformácie. Pre nedostatok priestoru uvádzam len referenčné body (Tab. 7). V tabuľke vidno veľkosť polohového vektoru posunu  $dh_t$  na jednotlivých bodoch po transformácii a pre informáciu je znázornená aj zmena jeho veľkosti oproti pôvodnému vektoru  $dh$ .

Tab. 7 Porovnanie deformačných vektorov (PVB-1 až PVB-7)

X Y	$dC_t$ (mm)	$dC_{tH}$ (mm)	$dh_t$ (mm)	$dh$ (mm)	zmena $dh$ po transformácií
X-PVB-1	-0.01	-0.01	<b>2.67</b>	4.56	-1.90
Y-PVB-1	2.67	2.67			
X-PVB-2	-0.02	-0.02	<b>1.60</b>	6.55	-4.96
Y-PVB-2	1.60	1.60			
X-PVB-3	0.02	0.02	<b>1.97</b>	3.69	-1.72
Y-PVB-3	-1.97	-1.97			
X-PVB-4	0.02	0.02	<b>1.04</b>	2.02	-0.99
Y-PVB-4	-1.04	-1.04			
X-PVB-5	0.02	0.02	<b>3.23</b>	3.55	-0.32
Y-PVB-5	-3.23	-3.23			
X-PVB-6	-0.01	-0.01	<b>2.15</b>	2.84	-0.69
Y-PVB-6	2.15	2.15			
X-PVB-7	0.00	0.00	<b>0.07</b>	1.30	-1.23
Y-PVB-7	-0.07	-0.07			

### 3.4 Testovanie významnosti horizontálnych posunov

K testovaniu horizontálnych posunov bol použitý L-test (Lenzmann1984). Testovacou štatistikou na posúdenie významnosti horizontálnej diferencie na bode  $P_i$  z množiny  $p$  testovaných bodov je náhodná premenná (15) [6].

$$T = \frac{n - k - d}{d} \frac{R_i}{v^T v - R_i} \approx F(f_1, f_2) \quad (15)$$

kde je  $n$  - počet meraní (súradníc),

$k$  - počet transformačných parametrov,

$d$  - rozmer testovanej premennej, t.j.  $d = 2$ ,

$v$  -  $n \times 1$  vektor opráv (súradnicových rozporov),

$R_i$  - kvadratická forma súradnicových rozporov pre bod  $P_i$ ,

$v_i = [v_{xi}, v_{yi}]^T$  - opravy súradníc bodu  $P_i$ ,

$Q_{vi} = \text{diag}(q_{v_{xi}}, q_{v_{yi}})$  - submatice pre bod  $P_i$  z matice  $Q_v$ ,

$H_i$  - projektor opráv  $v_{xi}, v_{yi}$  z vektora  $v$  do matice  $R_i$ ,

$f_1 = d$ , stupeň voľnosti F-rozdelenia,

$f_2 = n-k-d$ , stupeň voľnosti F-rozdelenia,  
 $Q_v = I - AN^{-1}A^T$  - kofaktorová matica opráv

Štatistické údaje zobrazuje tabuľka (Tab. 8), kritická hodnota F- rozdelenia sa určila podľa 16) [6].

$$T_{krit} = F(1 - \alpha; f_1, f_2) \quad (16)$$

Tab. 8 Štatistické údaje

k =	<b>6</b>	<i>Počet transformač. Parametrov</i>
n =	<b>76</b>	<i>Počet súradníc</i>
d =	<b>2</b>	<i>Rozmer siete</i>
$\alpha$ =	<b>0.05</b>	<i>Hladina významnosti</i>
$f_1$ =	<b>2</b>	<i>d</i>
$f_2$ =	<b>68</b>	<i>n - k - d</i>
$T_{KRIT}$ =	3.131671971	<i>Kritická hodnota testovania</i>

a hodnotu kvadratickej formy súradnicových rozporov  $R_i$  určuje vzťah podľa (17)

$$R_i = v^T H_i (H_i^T Q_v H_i)^{-1} H_i^T v = v_i^T Q_{vi}^{-1} v \quad (17)$$

Výsledky vyplývajúce z horizontálneho deformačného šetrenia sú zobrazené v tabuľke (Tab. 9). V nej sú jednotlivé body zoradené podľa veľkosti k nim prislúchajúcich posunov. Podľa vykonaného testovania sú štatisticky významné pohyby na bodoch KVSb-10, KVSb-31 a KVSb-29. Na bodoch PVB-3, PVB-5 a KVSb-30 síce nebola prekročená kritická hodnota  $T_{KRIT}$ , no štatistická hodnota testovacieho kritéria  $T_i$  sa u týchto bodov približuje ku kritickej hodnote, čo je zrejme aj z pohľadu na veľkosti jednotlivých posunov.

Tab. 9 Výsledky štatistického testu

Názov bodu	Horizontálny posun (mm)	Štatistická Hodnota (Ti)
kritická hodnota:		3.13167197
KVSB-16	0.00	0.00000005
KVSB-14	0.01	0.00000231
KVSB-12	0.02	0.00020539
KVSB-23	0.04	0.00036416
PVB-7	0.07	0.00119263
KVSB-19	0.18	0.00802017
KVSB-22	0.26	0.01836356
KVSB-26	0.43	0.04619842
KVSB-17	0.51	0.06902279
KVSB-2	0.53	0.06900457
KVSB-4	0.54	0.07235198
KVSB-7	0.55	0.08317104
KVSB-20	0.72	0.13934173
KVSB-25	0.76	0.14767518
KVSB-24	0.85	0.18700207
KVSB-18	0.87	0.20282929
KVSB-11	0.88	0.20289344
KVSB-27	0.97	0.25626581
PVB-4	1.04	0.27686132
KVSB-6	1.45	0.57171204
KVSB-21	1.59	0.58754380
PVB-2	1.60	0.67236906
KVSB-5	1.63	0.70772539
KVSB-13	1.73	0.81529770
KVSB-8	1.85	0.94044733
PVB-3	1.97	1.04321922
KVSB-28	2.03	1.11064842
PVB-6	2.15	1.25999905
KVSB-9	2.15	1.27807503
KVSB-15	2.30	1.46130877
PVB-1	2.67	1.96882336
KVSB-1	2.72	2.04426852
KVSB-3	2.86	2.33385852
KVSB-30	2.90	2.40489028
PVB-5	3.23	2.95918856
KVSB-10	3.42	3.41249084
KVSB-31	3.82	4.41113156
KVSB-29	3.90	4.59652295

## 4 Záver

Počas 32. kontrolného polohového merania na vodnom diele Starina bolo zameraných 7 referenčných a 31 pozorovaných (objektových bodov) rozmiestnených po jednotlivých úrovniach na vzdušnej strane hrádze.

Merania boli vykonané kombinovanou metódou merania uhlov a dĺžok. Všetky uhly boli merané laboratórnou jednotkou. Stredná náhodná chyba laboratórnej jednotky nepresiahla hodnotu  $m_0 = 2,5\text{cc}$ . Približné súradnice bodov boli vypočítané v lokálnej súradnicovej sústave. Výpočet súradníc bol vykonaný spoločným vyrovnaním meraných uhlov a dĺžok metódou najmenších štvorcov podľa sprostredkujúcich pozorovaní. Presnosť merania uhlov a dĺžok je charakterizovaná ich strednou chybou vypočítanou z vyrovnania siete  $M_u = 1,0\text{cc}$  a  $M_d = 0,7\text{ mm}$ . Maximálna stredná súradnicová chyba vyrovnaných súradníc neprekročila hodnotu  $0,8\text{ mm}$ .

Pre deformačné šetrenie sa využili všetky body trigonometrického merania. Použitá bola metóda transformačnej analýzy, forma komplexného 2D deformačného modelu. Štatistické testovanie potvrdilo pohyb na troch bodoch z 38 pozorovaných bodov (KVSb-10, KVSb-29 a KVSb-31). Najväčší horizontálny posun bol zaznamenaný na bode KVSb-29, polohový deformačný vektor tu dosiahol hodnotu  $3,9\text{ mm}$ .

K uvedenému šetreniu je vhodné dodať, že pri vodných stavbách so sypanou hrádzou nie je takýto pohyb na objektových bodoch ničím výnimočný a pozorované polohové zmeny na uvádzaných bodoch nepredstavujú zmenu stability a bezpečnosti vodného diela.

## Literatúra

- [1] AB AFFY, Dušan st. - PANENKA, Peter, Príspevok na Medzinárodnej konferencii o bezpečnosti vodných stavieb, ktorá sa konala v dňoch 12. - 14.10.2010 v Bratislave
- [2] BEDNÁROVÁ, Emília: XII. Okresné dni vody v Michalovciach, príspevok je súčasťou riešenia projektu VEGA 1/0318/13
- [3] KOLCUN, Štefan – SÜTTI, Juraj: Acta Montanistica Slovaca, Ročník 5 (2002),1, s.71-76
- [4] SÜTTI, Juraj – GAŠINEC, Juraj : Acta Montanistica Slovaca, Ročník 6 (2001),2, s.109-116
- [5] SABOVÁ, Janka – JAKUB, Vincent : Geodetické deformačné šetrenie. Košice : TUKE, 2007. 128 s. ISBN 978-80-8073-788-7
- [6] SÜTTI, Juraj – JAKUB, Vincent – SABOVÁ, Jana: Acta Montanistica Slovaca, Ročník 5 (2000),2, s.121-129