

Analýza výsledkov merania zvislých posunov vybraných objektov jadrovej elektrárne V-1 v Jaslovských Bohuniciach

Marek Kožarík¹

Analysis of measurement results from the vertical displacements at some objects of the power station V-1 in Jaslovské Bohunice

Determining vertical displacements of some objects of the power station in Jaslovské Bohunice takes more than ten years. Some specific methods in deformation solutions are occurred, especially for vertical displacements. Mathematical statistic was applied into the consideration of the vertical displacements.

Key words: Power station, vertical displacements, levelling, test-statistics.

Úvod

Rozvoj spoločnosti je tesne spojený s rastom energetických požiadaviek človeka. Pri rozvoji energetiky naráža ľudstvo na veľké ťažkosti. Dnešné odhady zásob rozličných druhov paliva v hĺbinách našej planéty svedčia o tom, že tieto zásoby sú podstatne obmedzené. I napriek mnohým odborným i politickým polemikám o bezpečnosti využívania jadrovej energetiky, javí sa táto ako najefektívnejšia pre mnohé štáty sveta, ktorých prirodzené palivové zdroje sú obmedzené. Rádioaktívne palivá ako urán a tórium sú mimoriadne efektívne. Napríklad na prevádzku jedného bloku jadrovej elektrárne s výkonom 210 000 kW sa denne spaľuje niekoľko sto gramov uránu. Na získanie tohto výkonu by sme potrebovali 3 500 ton uhlia (Merkulov, 1986).

Na krytie energetických potrieb ľudstva neexistuje pri súčasnom stave poznania perspektívny zdroj, ktorý by nahradil jadrovú energiu. Za predpokladu presadzovania rýchlych množivých reaktorov možno zásoby uránu a tória považovať prakticky za nevyčerpatelné. Pri výrobe elektrickej energie v jadrovej elektrárni sa nespotrebovávajú kyslík, nevznikajú emisie oxidu uhličitého, síry a prachu, a tak z hľadiska ochrany životného prostredia je to za normálnej prevádzky veľmi čistý zdroj energie. I napriek tomuto tvrdeniu existujú opodstatnené obavy, týkajúce sa nielen bezpečnosti transportu a uskladnenia rádioaktívneho materiálu, ale najmä bezpečnosti prevádzky jadrovej elektrárne s ohľadom na možné nehody s katastrofálnymi následkami. V snahe predísť tejto situácii, využívajú sa popri mnohých technických špecifických metódach na získanie reálnych informácií o správaní sa objektov jadrovej elektrárne i rôzne geodetické metódy.

Spracovanie výsledkov geodetických meraní sa realizuje metódami matematickej štatistiky, ktorá v súčasnosti ponúka viacero metód a prístupov (Sedlák, 1999a; 1999b). V článku sú prezentované niektoré z týchto štatistických metód a ich aplikácie pri spracovaní výsledkov etapových meraní, vykonávaných od roku 1977 do roku 1997 na hornej základovej doske pod označením TG-11 v jadrovej elektrárni (JE) V-1 v Jaslovských Bohuniciach, s cieľom zistiť vzájomné väzby medzi veličinami, akými sú čas, posun a teplota.

Základné údaje o objekte a technológii výstavby JE V-1 Jaslovské Bohunice

Stavba JE V-1 Jaslovské Bohunice je budovaná v zložitých geologických a základových podmienkach. Podložie tvorí vrstva spraší a sprašových hĺn, ktoré sú uložené na íloch, pod ktorými sú štrkopiesky resp. piesky. Územie má pomerne stály hydrologický režim. Podzemná voda je v hĺbke 18 až 25 m pod terénom. Základy objektov sú založené v hĺbkach od 3,4 m do 12,8 m pod terénom. V oblasti elektrárne je sled geologických vrstiev vcelku pravidelný a sleduje povrch terénu.

Hlavný výrobný blok (HVB) pozostáva z dvoch energetických celkov. Po funkčnej a konštrukčnej stránke ho tvoria zariadenia primárneho a sekundárneho okruhu. Budova reaktorov je založená na súvislej základovej doske. Reaktory, použité v jadrových elektrárnach bývalej ČSFR, sú typu VVER 440 tepelné, ľahkovodné (moderátor), t.j. ľahkou vodou chladené a tlakovodné. Strojovňa v rade "A" je založená na železobetónových pásoch a v rade "B" na pilotoch typu "FRANKI", kombinovanými s podzemnými železobetónovými stenami.

Základy TG-11 tvoria betónové monolitické konštrukcie, ktoré pozostávajú zo základovej dosky, nosných stĺpov a horného turbínového stola. TG-11 pozostáva z dvoch nízkotlakových telies s tromi priečnikmi, ktoré sú súčasťou statorov. Železobetónové priečniky sú len v krajných vysokotlakových častiach a v časti generátora. Usporiadanie TG-11 je pozdĺžne.

Účel a význam merania zvislých posunov

¹ Ing. Marek Kožarík, Geodézia, a.s. Bardejov, Dlhý rad 1, Bardejov.
(Doručené 2.12.1999, revidovaná verzia doručená 15.5.2000)

Účelom merania posunov a pretvoreni stavebných objektov a ich častí je:

- ziskávať podklady pre posúdenie, ako sa správa základová pôda účinkom stavby a ako pôsobí stavebný objekt na blízke objekty,
- porovnávať namerané hodnoty posunov s očakávanými hodnotami, vypočítanými v stavebnom projekte a overovať tak správnosť výpočtových metód očakávaných posunov,
- sledovať stav, funkciu a bezpečnosť stavebných objektov,
- sledovať stav, funkciu a bezpečnosť doterajších stavebných objektov, ovplyvnených stavebnou činnosťou v okolí (ČSN 730405).

Meranie posunov stavieb má ďalekosiahly vedecký, technický a národohospodársky význam (Michalčák, 1985):

- Vedecký význam je v tom, že poznanie faktorov, pôsobiacich na stabilitu základov, napomáha rozvoju teórie zakladania, mechaniky zemín, stavebnej mechaniky, projektovaniu a rozvoju teórie merania, čo umožňuje lepšie využívanie prírodných podmienok pri efektívnom budovaní objektov v investičnej výstavbe.
- Technický význam spočíva v tom, že vyhodnotené výsledky merania posunov v priebehu výstavby umožňujú spresňovať stavebnú technológiu a postup výstavby objektu, alebo zavčasu urobiť opatrenia na odstránenie chýb pri zakladaní.
- Národohospodársky význam vyplýva z toho, že na základe výsledkov meraní a ich priebežného vyhodnotenia možno zavčasu urobiť opatrenia na záchranu alebo sanáciu objektov, prípadne vykonať opatrenia na zníženie hospodárskych škôd alebo na záchranu ľudských životov pri havárii objektu.

V JE V-1 Jaslovské Bohunice bola stanovená presnosť meraní vzhľadom na očakávaný malý prírastok zvislých deformácií úplnými empirickými štandardnými odchýlkami výsledných posunov, a to (Michalčák et al., 1983):

- pre určenie absolútnych hodnôt poklesov základov objektov vzhľadom k pevným výškovým bodom hodnotou 1 mm,
- pre výškové pripojenie pozorovaných bodov 1. a 2. sústavy TG-11 hodnotou 0,4 mm,
- pre určenie relatívnych hodnôt polohových deformácií pozorovaných bodov 2. a 3. sústavy hodnotou 0,2 mm,
- pre kontrolu stability pevných výškových bodov 0,25 mm.

Pozorované výškové body na základoch TG-11 sú umiestnené v troch sústavách:

1. sústavu tvoria pozorované výškové body na dolnej základovej doske (body sú na päťach nosných stĺpov) a slúžia na sledovanie deformácií základovej dosky;
2. sústavu tvoria výškové body v podlahe hornej základovej dosky (HZD) TG-11, stabilizované v miestach stĺpov a cca v polovici pozdĺžnikov a slúžia na sledovanie deformácií základovej dosky;
3. sústavu tvoria výškové body na zariadeniach TG-11, t.j. na ložiskových stojanoch, resp. na základových rámoch alebo na skriniach telesa TG-11 a slúžia na sledovanie deformácií TG-11.

Metódy merania zvislých posunov v JE V-1Jaslovské Bohunice

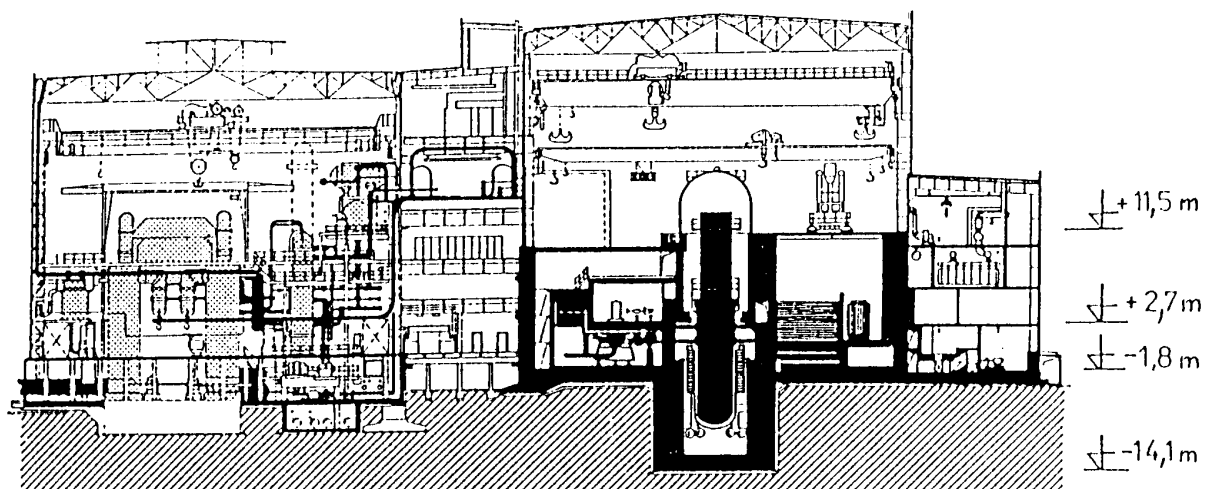
JE V-1Jaslovské Bohunice je budovaná v zložitých geologických a základových podmienkach, kde sú prognózované nerovnomerné hodnoty sadania základov objektov. Preto meranie posunov a pretváranie konštrukcií objektov HVB má mimoriadny význam z hľadiska spoľahlivosti a bezpečnosti prevádzky elektrárne. Z hľadiska životnosti a bezpečnosti elektrárne sú najzávažnejšie zvislé zložky posunov základov objektu reaktorovne, ktoré spôsobujú naklonenie zvislej osi reaktorov. Technickými predpismi pre výstavbu a prevádzku HVB sú vyžadované rozmanité systematické merania najmä zvislých posunov a naklonenia objektov reaktorov, ktoré tvoria najdôležitejšiu časť JE. Meranie zvislých posunov možno vykonať rôznymi fyzikálnymi metódami merania, medzi ktorými významné miesto majú geodetické metódy, najmä veľmi presná nivelácia (VPN) alebo presná nivelácia (PN) a hydrostatická nivelácia. Vyžadovaná presnosť merania zvislých posunov je 0,1 až 0,3 mm. Na kontrolu naklonenia osi reaktorov v JE V-1Jaslovské Bohunice sa osvedčili aj pendometre, najmä v optickom prevedení.

Meranie zvislých posunov a deformácií TG-11 sa realizuje PN a VPN. Súčasne s meraním posunov je potrebné zmerať aj teplotu výškových značiek. Tá sa meria digitálnym kontaktným teplomerom. Zvislé posuny a deformácie základov TG-11 sa určujú k pevným výškovým bodom. Deformácie hornej dosky a technologických zariadení TG-11 sa určujú k relatívne zvolenému vzťažnému pozorovanému bodu s predpokladanými najmenšími deformáciami. Za vzťažné body sú volené body z pevných výškových bodov s najlepšimi

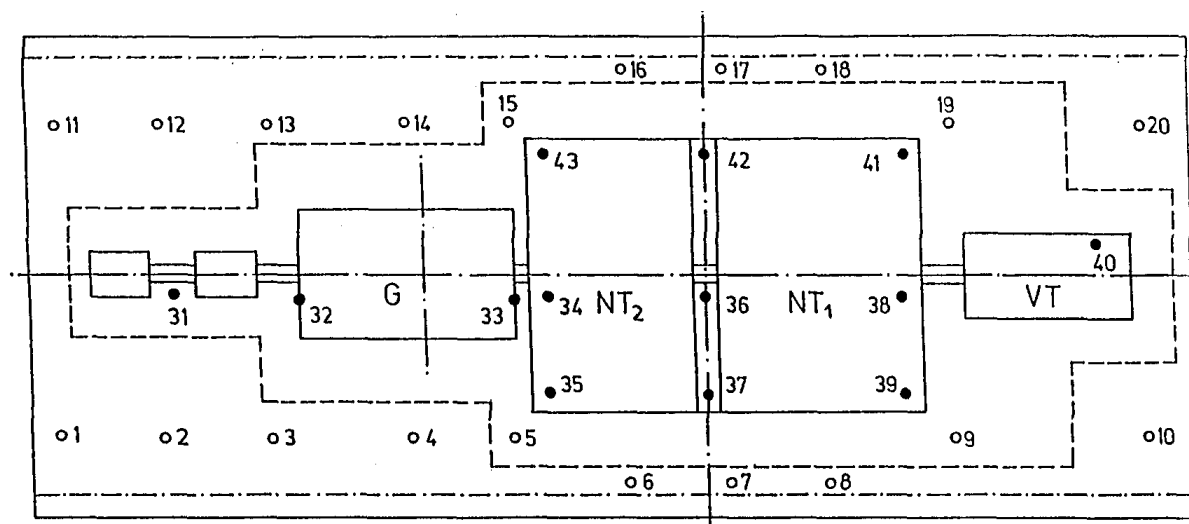
geologickými podmienkami a najmenej ovplyvnené výstavbou, resp. prevádzkou. Vzťažné body sú pripojené k pevným výškovým bodom.

Na úrovni základov reaktorovne (kóta 0,00 m a -1,80 m) sa sledujú absolútne hodnoty zvislých posunov s výškovým pripojením na vzťažné výškové body, situované na stavenisku elektrárne mimo sledovaného objektu. Nivelačné merania na úrovni postamentov reaktorov (kóta +11,50 m), hlavných cirkulačných čerpadiel (kóta 2,70 m), boxu parogenerátorov (kóta -1,80) a na prírube reaktorov sa vykonávajú uzavretými nivelačnými ťahmi (Michalčák et al., 1992).

Meranie zvislých posunov sa realizuje v piatich výškových úrovniach (obr.1). Objekt reaktorovne sa meria z hľadiska zvislých posunov základov na kóte 0,00, resp. -1,80 m. Vlastné reaktory sa sledujú v štyroch úrovniach. Na úrovni kóty + 11,50 m, t.j. na postamentoch reaktorov, sú osadené klincové značky pre PN a snímače automatických elektronických aparátúr. Na kóte + 2,70 m, t.j. na hlavných cirkulačných čerpadlách, sú osadené štyri klincové výškové značky a dva optické pendametre. Na úrovni kóty -1,80 m, t.j. na boxe parogenerátorov, sú osadené štyri klincové výškové značky pre PN. Počas odstávky prevádzky jednotlivých blokov sa PN merajú zvislé posuny na 24 bodoch na prírube reaktora HZD TG-11 (Michalčák et al., 1992). Článok prezentuje výsledky sledovania zvislých posunov HZD TG-11 na bodoch č. 1 až 20 (obr.2) (Kožarík, 1997).



Obr.1. Situácia zameriavaných výškových úrovní JE V-1 Jaslovské Bohunice.



- ZNAČKY NA TECHNOLOGII 31-43
- ZNAČKY NA BET. KONŠTRUKCII 1-20

Obr.2. Situácia zameriavaných bodov HZD TG-11 JE V-1 Jaslovské Bohunice.

Spracovanie meraní a analýza vývoja zvislých posunov vybraných objektov JE - V1 Jaslovské Bohunice

S cieľom porovnať výsledky jednotlivých epoch na vyhodnotenie výsledkov merania zo dňa 10. februára 1997, na ktorom som participoval, bola použitá tá istá nivelačná metóda ako pri vyhodnotení predchádzajúcich epochových meraní (VPN zo stredy). Epochálne merania zvislých posunov objektov JE-V1 Jaslovské Bohunice, realizované v októbri 1977, júli 1996 a februári 1997, sú spracované metódou najmenších štvorcov (MNS) (vyrovnanie podmienkových meraní). Pri meraní sa dodržiavalo stále to isté postavenie prístroja a lát, t.j. matica konfigurácie (meracej štruktúry) sa nemenila. Postup vyrovnania je v geodetickej praxi bežný, preto sa o ňom nebudem bližšie zmieňovať. Krajná hodnota pre uzáverovú odchýlku vo zvolenom uzavretom nivelačnom ťahu m_0 nepresahovala hodnotu 0,5 mm (0,4472 mm) a jednotková štandardná odchýlka m mala hodnotu 0,36 mm. Tab. 1 udáva výsledné hodnoty VPN na HZD TG-11. Relatívne výšky sú uvádzané ako prevýšenia vzhľadom na úroveň základov reaktorovne (kóta 0,00 m).

Tab. 1. Výsledné hodnoty VPN na HZD TG-11.

Bod	Dátum 10.77 Výška [m]	Dátum 07.96 Výška [m]	Dátum 02.97 Výška [m]	Zv.posun [mm]	Zv.posun [mm]
	(1)	(2)	(3)	(3)-(1)	(3)-(2)
1	-0,00883	-0,0094	-0,0095	-0,67	-0,1
2	0,02745	0,0259	0,0255	-1,95	-0,4
3	-0,00155	-0,0025	-0,0026	-1,05	-0,1
4	-0,00218	-0,0029	-0,0032	-1,02	-0,3
5	-0,00066	-0,0022	-0,0022	-1,54	0
6	0,0213	0,0179	0,0189	-2,4	1
7	0,00319	0,0006	0,0005	-2,69	-0,1
8	-0,00813	-0,0106	-0,0103	-2,17	0,3
9	-0,07012	-0,0715	-0,071	-0,88	0,5
10	0,06499	0,0645	0,0653	0,31	0,8
11	0	0	0	0	0
12	-0,0065	-0,008	-0,0081	-1,6	-0,1
13	-0,016	-0,017	-0,0176	-1,6	-0,6
14	-0,003	-0,0047	-0,0052	-2,2	-0,5
15	0,0473	0,0442	0,0451	-2,2	0,9
16	-0,00628	-0,0094	-0,009	-2,72	0,4
17	0,01718	0,0141	0,0148	-2,38	0,7
18	-0,00194	-0,0055	-0,0041	-2,16	1,4
19	-0,05044	-0,0521	-0,0508	-0,36	1,3
20	0,02701	0,0249	0,0264	-0,61	1,5

Do analýzy vývoja zvislých posunov zameriavaného objektu HZD T-G11 v JE-V1 Jaslovské Bohunice boli aplikované viaceré testovacie štatistiky, analýzy a testy (Kožarik, 1997). Z dôvodu obširnosti prezentácie výsledkov týchto matematických vyhodnotení sú v článku uvedené len niektoré vybrané body HZD TG-11. Analýzy, štatistiky a testy neuvažujú s teplotnými pomermi meraní ako s možnou treťou premennou.

Korelačná analýza:

Táto metóda matematickej štatistiky umožňuje skúmať štatistickú závislosť dvoch (prípadne viacerých) náhodných premenných. Empirický koeficient korelácie ρ_{XY} náhodných premenných X a Y je definovaný vzťahom (Diviš, 1988)

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - E(X)][Y_i - E(Y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [X_i - E(X)]^2 \sum_{i=1}^n [Y_i - E(Y)]^2}}, \quad (1)$$

kde $E(\cdot)$ je stredná hodnota náhodnej premennej X (čas) alebo Y (zvislý posun).

Vzťah (1) je mierou stochastickej závislosti medzi náhodnými premennými X a Y a analogicky sa vyskytuje v ďalšom texte v súvislosti s náhodnými premennými.

V súvislosti s vyšetrovaním stochastických väzieb medzi dvoma náhodnými premennými sa stretávame s problémom posúdiť, či medzi nimi existuje alebo neexistuje stochastická väzba. Testy na testovanie tejto hypotézy sú založené na testovaní nulovej hypotézy H_0 , kde empirický koeficient korelácie je rovný nule oproti alternatívnej hypotéze H_1 , keď empirický výberový koeficient nie je rovný nule (Kubáčková, 1990).

Testovacia štatistika T :

Táto metóda patrí k najpoužívanejším metódam hodnotenia korelácie. Testovacia štatistika T je daná vzťahom

$$T_{XY} = \frac{\rho_{XY}}{\sqrt{1 - \rho_{XY}^2}} \sqrt{n - 2}, \quad (2)$$

kde empirický výberový koeficient ρ_{XY} , udaný vzťahom (1), má Studentovo rozdelenie pravdepodobnosti s $n - 2$ stupňami voľnosti.

Ak pre realizáciu t testovacej štatistiky T pri danom riziku α platí: $|t| > t_{KRIT(n-2,\alpha)}$, neprijímame nulovú hypotézu na hladine významnosti α , pričom $t_{KRIT(n-2,\alpha)}$ je kritická hodnota Studentovho rozdelenia s $n - 2$ stupňami voľnosti pre obojstranný test.

Testovacia štatistika U :

Testovanie pomocou štatistiky U je ďalšou metódou matematickej štatistiky, kde testovacia štatistika U je určená vzťahom

$$U = \sqrt{n - 3} Z, \quad (3)$$

kde Z je Fisherova premenná definovaná vzťahom

$$Z = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \rho_{XY}}{1 - \rho_{XY}} \right), \quad (4)$$

ktorá má asymptotické rozdelenie pravdepodobnosti $N(0,1)$ (Kubáčková, 1990). Náhodná premenná N konverguje k normálnemu rozdeleniu pomerne rýchlo. Odporúča sa uvažovať ju ako normálne rozdelenú náhodnú premennú už pri $n > 10$, ak nie je ρ (náhodná hranica) blízke 1 alebo -1. Ak pre realizáciu testovacej

štatistiky U pri danom riziku α platí, že $\sqrt{n - 3} |Z| \geq u \left(\frac{\alpha}{2} \right)$, neprijímame nulovú hypotézu H_0 na hladine

významnosti α , pričom $u \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ je kritická hodnota normálneho rozdelenia, zodpovedajúca hladine významnosti α .

Na výpočet intervalu spoľahlivosti (konfidenčného intervalu) použijeme vzťahy

$$Z1_{XY \alpha} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \rho_{XY}}{1 - \rho_{XY}} \right) - \frac{F}{\sqrt{n - 3}}, \quad (5)$$

$$Z2_{XY \alpha} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \rho_{XY}}{1 - \rho_{XY}} \right) + \frac{F}{\sqrt{n - 3}}, \quad (6)$$

kde F je kvantilová funkcia normálne rozdelenej náhodnej premennej $N(0,1)$.

Realizáciu $r1_\alpha$ a $r2_\alpha$ náhodných hraníc intervalu $\rho1_\alpha$ a $\rho2_\alpha$ určíme zo vzťahov

$$r1_{XY \alpha_i} = \frac{\exp(2Z1_{XY \alpha_i}) - 1}{\exp(2Z1_{XY \alpha_i}) + 1}, \quad (7)$$

$$r2_{XY \alpha_i} = \frac{\exp(2Z2_{XY \alpha_i}) - 1}{\exp(2Z2_{XY \alpha_i}) + 1}. \quad (8)$$

Ani v jednom z testovaných výberových súborov neboli dokázané korelácie medzi časom a posunmi a ani korelácie medzi posunmi a teplotou.

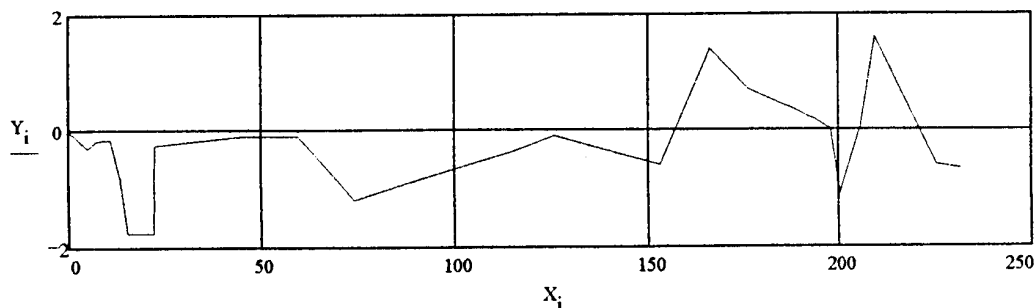
Aplikácia korelačnej analýzy a testovacích štatistík T a U na HZD TG-11

Náhodná premenná X , t.j. čas, ktorý uplynul od prvej po poslednú epochu merania, je vyjadrená v mesiacoch a náhodná premenná Y , t.j. zvislý posun v mm. Obr.3 prezentuje grafickú závislosť čas-posun pre bod č.1.

Bod č.1:

Výpočet korelačných koeficientov:	Testy o stochastických väzbách:
$r_{XY} = \left[\frac{xy}{\sqrt{xx.yy}} \right] = 0,373; \text{corr}(X, Y) = 0,373$	$n = 26; n - \text{rozsah výberového súboru}$
Testovacia štatistika T:	
$H_0: \rho_{XY} = 0, H_1: \rho_{XY} \neq 0$	$t_{KRIT}(24; 0,01) = 2,797$
$t_{XY} = \frac{r_{XY}}{\sqrt{1-r_{XY}^2}} \sqrt{n-2}, t_{XY} = 1,972$	$t_{KRIT}(24; 0,05) = 2,064$
$t_{KRIT} > t_{XY} $	Nulovú hypotézu $H_0: \rho_{XY} = 0$ nemáme dôvod zamietnuť.
$t_{KRIT} < t_{XY} $	Nulovú hypotézu $H_0: \rho_{XY} = 0$ nemáme dôvod zamietnuť.
Testovacia štatistika U:	
$H_0: \rho_{XY} = 0, H_1: \rho_{XY} \neq 0$	$\alpha = 0,01 \quad u_{KRIT} = (-\infty; -2,576) \quad U(2,576; \infty)$
$u_{XY} = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \ln \left(\frac{1+r_{XY}}{1-r_{XY}} \right), u_{XY} = 1,882$	$\alpha = 0,05 \quad u_{KRIT} = (-\infty; -1,960) \quad U(1,960; \infty)$
u_{XY} nepatrí do kritickej oblasti $u_{KRIT} \Rightarrow$ nulovú hypotézu $H_0: \rho_{XY} = 0$ nemáme dôvod zamietnuť.	
Empirický koeficient korelácie ρ_{XY} , realizovaný na základe náhodného výberu s rozsahom $n=26$, nie je možné považovať za signifikantne odlišný od nuly.	
Interval spoľahlivosti pre empirický koeficient korelácie:	
$I = 0 \dots 1$	F - kvantilová funkcia
$F_0 = 2,576$	pre $\alpha = 0,01$
$F_1 = 1,960$	pre $\alpha = 0,05$
$r1_{XY} \alpha_i = \frac{\exp(2Z1_{XY} \alpha_i) - 1}{\exp(2Z1_{XY} \alpha_i) + 1}$	$r2_{XY} \alpha_i = \frac{\exp(2Z2_{XY} \alpha_i) - 1}{\exp(2Z2_{XY} \alpha_i) + 1}$
$r1_{XY} \alpha = \begin{pmatrix} -0,144 \\ -0,016 \end{pmatrix}$	$r2_{XY} \alpha = \begin{pmatrix} 0,730 \\ 0,665 \end{pmatrix};$
Realizácia intervalu spoľahlivosti pre $r_{XY} = 0,373$	
$1-\alpha = 0,99$	$1-\alpha = 0,95$
$(-0,144; 0,730)$	$(-0,016; 0,665)$
rozsah výberu $n = 26$	

graf: čas - posun



Obr.3: Graf čas-posun pre bod č.1($i=0...25$).

Regresná analýza:

Ak pripustíme, že trend vývoja zvislých posunov môžeme aproximovať polynómom n -tého stupňa (Lamoš a Potocký, 1989; Krišťák, 1984; Sedlák, 1996; 1997; 1999) v tvare

$$y = B_0 + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 + \dots + B_mx^m, \tag{9}$$

nastáva otázka, aký stupeň m aproximácie zvolíť. Výsledky korelačnej analýzy dokazujú, že veličiny čas-posun a teplota-posun sú lineárne nekorelované. Tento fakt oprávňuje predpokladať, že hodnota parametra B_1 nie je významne odlišná od nuly. Zvoľme teda prvý stupeň aproximácie priamku a testujme štatistickú významnosť parametra B_1 . Odhad parametrov B_0 a B_1 vypočítame MNS.

Ďalej testujme hypotézu $H_0 : B_1 = 0$ oproti alternatíve $H_1 : B_1 \neq 0$ (Lamoš a Potocký 1989). Testovacia štatistika T_B regresnej analýzy bude daná vzťahom

$$T_B = \frac{B_1}{\sqrt{\frac{s^2}{\sum_i [X_i - E(X)]^2}}}, \tag{10}$$

kde $s = \sqrt{\frac{R_0^2}{n-2}}$, pričom R_0^2 je reziduálny súčet štvorcov (suma štvorcov opráv).

Realizácia testovacej štatistiky ani v jednom prípade vybraných objektov JE V-1Jaslovské Bohunice neprekročila kritickú hodnotu. To znamená, že hodnota parametra B_1 nie je významne odlišná od nuly, preto môže byť tento člen zanedbaný, a teda trend vývoja zvislých posunov vzhľadom na čas je konštantný, t.j. $y = B_0$. Pre úplnosť uvedieme ešte určenie konfidenčného intervalu pre priamku. Pre každú hodnotu nezávisle premennej $X = x_i$ môžeme s pravdepodobnosťou $1 - \alpha$ očakávať strednú hodnotu $E(Y)$ medzi číslami (Krišťák, 1984)

$$y_i + t\left(n-2, \frac{\alpha}{2}\right) s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{[x_i - E(x)]^2}{\sum_{i=1}^n [x_i - E(x)]^2}}, \tag{11}$$

$$y_i - t\left(n-2, \frac{\alpha}{2}\right) s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{[x_i - E(x)]^2}{\sum_{i=1}^n [x_i - E(x)]^2}}, \tag{12}$$

kde $t\left(n-2, \frac{\alpha}{2}\right)$ je pre zvolené α tabuľkovaná kritická hodnota Studentovho rozdelenia s $n-2$ stupňami voľnosti.

Aplikácia regresnej analýzy na HZD TG-11

Bod č.8:

n – rozsah výberového súboru	k – počet určovaných parametrov
B_0, B_1 - parametre regresnej priamky	$B = \begin{pmatrix} -1,343 \\ 0,002 \end{pmatrix} = \begin{matrix} B_0 \\ B_1 \end{matrix}$
σ - disperzia	$\sigma = \sqrt{\frac{ R_0 }{n-k}}, \sigma = 1,674 \text{ mm}$
R_0 - reziduálny súčet štvorcov	
$\text{var}(\mathbf{B})$ - kovariančná matica vektora \mathbf{B}	\mathbf{A} - konfiguračná matica
$\text{var}(\mathbf{B}) = \sigma^2 \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1}$	$\text{var}(\mathbf{B}) = \begin{pmatrix} 0,276 & -0,002 \\ -0,002 & 1.55 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}$

Charakteristiky presnosti odhadnutých parametrov:

$$m_{B_0} = \sqrt{\text{var}(B)_{0,0}}, \quad m_{B_0} = 0,525 \text{ mm}$$

$$m_{B_1} = \sqrt{\text{var}(B)_{1,1}}, \quad m_{B_1} = 0,525 \text{ mm.mes}^{-1}$$

Testovanie hypotézy o nulovosti koeficientu B_1 :

Nulová hypotéza $H_0: B_1 = 0$, Alternatívna hypotéza $H_1: B_1 \neq 0$

Testovacia štatistika T :

$$t_B = \frac{B_1}{\sqrt{\frac{s^2}{\sum_i (X_i - E(X))^2}}}, \quad t_B = 0,285 \quad s = \sqrt{\frac{R_0^2}{n-2}} \text{ [mm]}$$

$$t_{KRIT} (25;0,01)=2,787$$

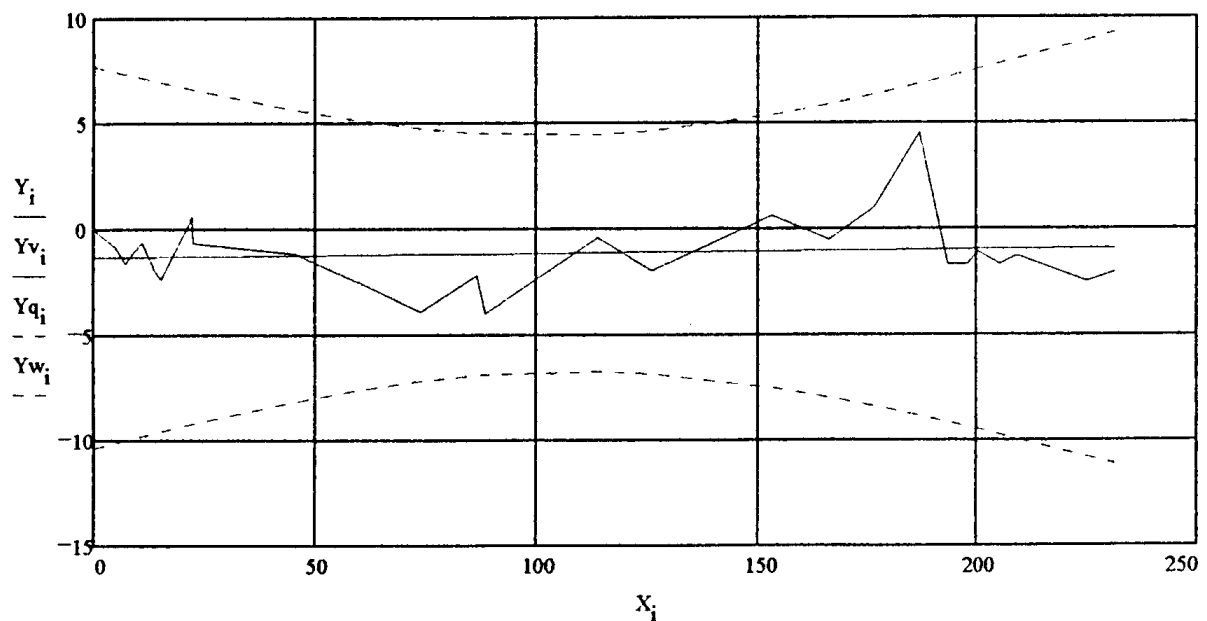
$$t_{KRIT} (25;0,05)=2,060$$

$t_{KRIT} > |t_B|$ Nulovú hypotézu $H_0: B_1=0$ nemáme dôvod zamietnuť

$$Y_{W_i} = Y_{V_i} - 2,060 s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{[X_i - E(X)]^2}{\sum_{i=0}^{26} [X_i - E(X)]^2}}, \quad Y_{g_{ii}} = Y_{V_i} + 2,060 s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{[X_i - E(X)]^2}{\sum_{i=0}^{26} [X_i - E(X)]^2}}$$

$$Y_V = B_0 + B_1 X$$

Obr.4 prezentuje grafický výstup regresnej analýzy pre bod č. 8.



Obr.4. Regresná súvislosť – LRM a jej interval spoľahlivosti pre bod č. 8.

Testy náhodnosti:

Testy náhodnosti umožňujú testovať nulovú hypotézu H_0 tak, že predložené pozorovania sú považované za realizácie vzájomne nezávislých náhodných premenných. Používajú sa pri analýze časových radov, ktoré sú tvorené údajmi, vznikajúcimi ako chronologicky usporiadané pozorovania (Cipra, 1986). Pri aplikácii testov

náhodnosti do zisťovania zvislých posunov vybraných objektov JE V-1Jaslovské Bohunice boli použité nasledujúce testy:

- *Test založený na znamienkach diferencii (znamienkový test).* Tento test je založený na počte kladných prvých diferencii daného radu y_1, \dots, y_n , t.j. na počte bodov, v ktorých daný rad rastie (tzv. body rastu). Ak sú niektoré susedné hodnoty rovnaké, potom ich z radu jednoducho vyškrtne.

Definujme náhodné veličiny V_t predpisom: $V_t = 1$ pre $y_{t+1} > y_t$ a $V_t = 0$ pre $y_{t+1} < y_t$. Označme symbolom k počet bodov rastu a n rozsah výberového súboru (radu). Potom pri väčšom

n hypotézu H_0 zamietame na hladine významnosti α , ak $\frac{\left|k - \frac{(n-1)}{2}\right|}{\sqrt{\frac{n+1}{12}}} \geq u\left(\frac{\alpha}{2}\right)$, kde $u\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ je

kritická hodnota normálneho rozdelenia, zodpovedajúca hladine významnosti α .

- *Test založený na bodoch zvratu.* Bod y_t je horným bodom zvratu uvažovaného radu, ak $y_{t-1} < y_t > y_{t+1}$, $t = 2, \dots, n-1$. Analogicky sa definuje dolný bod zvratu. Ak sú niektoré susedné hodnoty rovnaké, potom ich až na jednu z daného radu vyškrtne. Nech r označuje celkový počet horných a dolných bodov zvratu. Potom pri väčšom n hypotézu H_0 zamietame, ak

$$\frac{\left|r - \frac{2(n-2)}{3}\right|}{\sqrt{\frac{16n-29}{90}}} \geq u\left(\frac{\alpha}{2}\right).$$

Test založený na znamienkach diferencii sa používa sa pri podozrení na existenciu lineárneho trendu (t.j. systematického posunu smerom hore alebo dole) v testovanom rade. Naopak, pri podozrení na zmeny periodického charakteru sa odporúča *test založený na bodoch zvratu*.

Aplikácia testov náhodnosti na HZD TG-11

Bod. č. 18:

Test založený na znamienkach diferencii (W):

Počet bodov rastu $k = 11$ Rozsah výberového súboru $n = 27$

$$W = \frac{k - \frac{n-1}{2}}{\sqrt{\frac{n+1}{12}}}, \quad W = 1,309$$

Kritická hodnota normálneho rozdelenia na hladine významnosti $\alpha = 0,05$ $u_{KRIT}(\alpha/2) = 1,960$

Kritická hodnota normálneho rozdelenia na hladine významnosti $\alpha = 0,01$ $u_{KRIT}(\alpha/2) = 2,576$

Keďže $u_{KRIT} > |W| \Rightarrow$ nulovú hypotézu nemáme dôvod zamietnuť.

Test založený na bodoch zvratu (Q):

Počet bodov zvratu $r = 15$

$$Q = \frac{r - \frac{2(n-2)}{3}}{\sqrt{\frac{16n-29}{90}}}, \quad Q = -0,788$$

Kritická hodnota normálneho rozdelenia na hladine významnosti $\alpha = 0,05$ $u_{KRIT}(\alpha/2) = 1,960$

Kritická hodnota normálneho rozdelenia na hladine významnosti $\alpha = 0,01$ $u_{KRIT}(\alpha/2) = 2,576$

Keďže $u_{KRIT} > |Q| \Rightarrow$ nulovú hypotézu nemáme dôvod zamietnuť.

V testovaných súboroch nebola dokázaná ani lineárna, ani periodická závislosť medzi časom a posunmi na hladine významnosti $\alpha = 0,01$. Na hladine významnosti $\alpha = 0,05$ nulovú hypotézu o nezávislosti medzi časom a posunmi zamietame.

Interpretácia výsledkov

Výsledky epochových merania v rokoch 1977 až 1997

Ak si označíme hodnotu pozorovaného vertikálneho posunu δh , potom pri danej štandardnej odchýlke $m_{\delta h}$ meraného posunu môžeme predpokladať, že ak platí (Michalčák et al., 1992):

1. $\delta h < m_{\delta h} \Rightarrow$ posun nenastal,
2. $m_{\delta h} < \Delta h < 2,5 m_{\delta h} \Rightarrow$ možno pripustiť, že posun nastal,
3. $\Delta h > 2,5 m_{\delta h} \Rightarrow$ sme o posune presvedčení s rizikom 1%.

Na základe posúdenia veľkosti štandardnej odchýlky posunu $m_{\delta h} = 0,506$ mm a uvedených kritérií môžeme konštatovať, že od etapy v júli 1996 na bodoch č. 18, 19 a 20 sme o zvislom posune presvedčení s rizikom 1%, kým na bodoch č. 10, 13, 15 a 17 možno pripustiť, že nastal zvislý posun.

Výsledky získané korelačnou analýzou dokazujú, že zvislé posuny pozorovaných bodov č. 1, 8 a 18 sú s časom lineárne nekorelované. To znamená, že medzi nimi neexistuje štatisticky významná lineárna závislosť. Tento fakt potvrdzujú aj výsledky regresnej analýzy, pomocou ktorej bol dokázaný konštantný trend vývoja zvislých posunov v čase, t.j. $y = B_0$. Teda posun nie je závislý od času. Tento na prvý pohľad paradoxný záver som pochopil, až keď som si uvedomil, že ide o relatívne posuny vzťahované k zvolenému bodu na HZD (bod č. 11). V tejto situácii nie je možné zistiť posun, ak celá doska klesne alebo stúpne rovnomerne (spolu so vzťažným bodom). Sme schopní zaregistrovať iba nerovnomerné posuny. Na základe tejto úvahy a predchádzajúcich výsledkov môžeme konštatovať, že nedochádza k nerovnomerným posunom bodov (body č. 1, 8 a 18) a keďže rovina je daná 3 bodmi, môžeme toto tvrdenie vzťahovať na celú HZD TG-11.

Vplyv teploty na vývoj zvislých posunov pozorovaných bodov (č. 1, 8 a 18) taktiež nebol dokázaný. Tento výsledok je treba brať s rezervou, pretože do roku 1985 bola teplota meraná len raz pre celú etapu, neskôr na viacerých výškových značkách a v súčasnosti pre každú značku osobitne. Rozdielna kvalita vstupných údajov mohla do určitej miery ovplyvniť výsledky spracovania, pretože rozdiely medzi teplotami meranými jednotlivito na každom bode dosahujú niekde až 20 °C. No aj napriek tomu, nie je toto vysvetlenie postačujúce, lebo skutočný vplyv teploty na vývoj zvislých posunov z daného výberového súboru nie je možné jednoznačne určiť.

Pre úplnosť bola testovaná aj periodická závislosť medzi časom a posunmi, pretože lineárna korelácia a lineárna regresia nemusia túto závislosť odhaliť. Periodická závislosť medzi časom a posunmi sa prejavila pri testovaní bodu č. 1, pre ktorý na hladine významnosti $\alpha = 0,05$ zamietame nulovú hypotézu H_0 , takže čas a posuny sú periodicky nezávislé.

Záver

Na základe výsledkov spracovania údajov etapových meraní možno formulovať nasledujúce poznatky a odporúčania pre sledovanie zvislých posunov na vybraných objektoch JE V-1Jaslovské Bohunice:

- Nedochádza k nerovnomernému pohybu (sadaníu) HZD.
- Nebol dokázaný vplyv teploty na vývoj zvislých posunov.
- Pokračovať v meraní teploty na každej výškovej značke, aby bolo možné reálne posúdiť vplyv teploty na vývoj zvislých posunov.
- Zvislé posuny sú pravdepodobne spôsobené faktormi, ktorých vplyv nebol pri analýze uvažovaný. Určiť tieto faktory predpokladá znalosť správanie sa konštrukcie HZD účinkom iných vplyvov, než sú geotektonické pohyby.
- Na bode č.1 sa prejavila periodická závislosť medzi časom a posunmi.
- Pokračovať v meraní zvislých posunov spolu s registráciou predpokladaných možných vplyvov geotektoniky záujmového územia lokality JE V-1Jaslovské Bohunice.

Článok vznikol v súvislosti s riešením grantového projektu č. 1/7335/20: "Deformačné modelovanie geotektonických recentných pohybov košickej kotline" ako doplnujúci článok k teoretickým poznatkom z deformačných štetení.

Literatúra

- Bartalošová, E.: Štatistická analýza recentných vertikálnych pohybov zemského povrchu. *GaKO*, č. 5/1990.
- Böhm, J. a Svoboda, L.: Geometrická nivelace. *STNL, Praha, 1960.*
- Cipra, A.: Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii. *STNL, Praha, 1986.*
- ČSN 730405: Měření posunů stavebních objektů. *ÚNM, Praha, 1986.*
- Diviš, V.: Změny tíhového pole v prostoru přečerpávací vodní elektrárny Čierny Váh. *GaKO*, č. 3/1988.
- Hefty, J.: Možnosti sledovania pohybov zvislíc. *GaKO*, č. 11/1980.
- Kožarík, M.: Analýza výsledkov merania zvislých posunov vybraných objektov jadrovej elektrárne. *Dipl. Práca, SvF STU Bratislava, 1997.*
- Krišťák, V.: Matematická štatistika II. *Alfa, Bratislava, 1984.*
- Kubáčková, L.: Metódy spracovania experimentálnych údajov. *Veda, Bratislava, 1990.*
- Lamoš, J. a Potocký, I.: Pravdepodobnosť a matematická štatistika. *Alfa, Bratislava, 1989.*
- Marčák, J., Priam, V. a Pecár, J.: Výskum recentných tektonických pohybov zemského povrchu pre potreby rozvoja jadrovej energetiky. *GaKO*, č. 4/1986.
- Marčák, J.: Exogénne pohyby na experimentálnych lokalitách v Malých Karpatoch a Podunajskej nížine. *Geografický časopis*, č. 1/1984.
- Merkulov, K., 1986: Hľadanie energie budúcnosti. *Alfa, Bratislava, 1986.*
- Michalčák, O., Lukáč, Š a David, S., 1983: Meranie deformácií základov objektov JE V-1Jaslovské Bohunice. *GaKO*, č. 4/83.
- Michalčák, O. a kol.: Inžinierska geodézia I. *Alfa, Bratislava, 1985.*
- Michalčák, O. a kol.: Rozvoj meračských systémov na meranie zvislých posunov a náklonu jadrových reaktorov. *Záverečná správa výskumnej úlohy B/1/12/4/91/V, SvF STU, Bratislava, 1992.*
- Priam, J.: Z výzkumu recentných pohybov lokalít atómových elektrární na území Slovenska. *GaKO*, č. 11/1992.
- Sedlák, V.: Matematické modelovanie lomových bodov v poklesových kotlinách. *Acta Montanistica Slovaca, roč. 1, č. 4/1996, 317-328.*
- Sedlák, V.: Modelling Subsidence Development at the Mining Damages. *Monograph, Štroffek, (vyd.), Košice, 1997, 52pp.*
- Sedlák, V.: Zem a priestorové súradnicové systémy. *Monografia, Štroffek, (vyd.), Košice, 1999, 78s.*
- Vyskočil, J.: Roční kolísání nivelačních bodů a jeho důsledky. *GaKO*, 1980, č.11/1973.
- Trakal, B.aTrešl, L.: Vliv přemístování vodních hmot na přesná tíhová měření. *GaKO*, 11/1980.
- Zeman, K.: Deformace zemského povrchu způsobené zatížením vodní hmotou. *GaKO*, č. 4/1979.