

# MĚŘENÍ POSUNŮ PŘEHRAD PŘESNÝMI TOTÁLNÍMI STANICEMI

*Prof. Dr. - Ing. habil. Michael Möser*

*Geodetický ústav Fakulty lesního a vodního hospodářství a geověd TU Drážďany*

*Doc. Ing. Pavel Hánek, CSc.*

*katedra speciální geodézie Fakulty stavební ČVUT v Praze*

## 1 Úvod

Měření posunů diskrétních bodů přehradních zdí patří k tradičním a prestižním úlohám inženýrské geodézie. Obecně je používána řada geodetických i fyzikálních metod, které se s přihlédnutím ke konkrétním podmínkám doplňují a poskytují vítanou možnost nezávislé kontroly [1]. Mezi ně kupříkladu patří periodicky opakovaná (etapová) měření:

- metodou záměrné přímky (alignment) s přímým čtením na příčné stupnici, pomocí příčně posuvného terče nebo s měřením paralaktického úhlu (např. [2]),
- sklonu,
- svislic,
- délek ve sparách extenzoměry,
- přesnou hydrostatickou nivelací,
- vodních průsaků a pórových tlaků elektronickými senzory atd.,

která jsou zpravidla nezávislá na vnějších referenčních systémech. Měření se však také týká sledování stability území v zájmovém okolí přehradní zdi. Do popředí pak vystupují metody, dovolující popis prostorových změn polohy v jednoznačně definovaném vztažném souřadnicovém systému:

- trigonometrické měření v přesné místní síti,
- přesná polygonizace,
- fotogrammetrické metody nebo laserové skenování,
- permanentní měření s využitím globálních navigačních satelitních systémů (GPS).

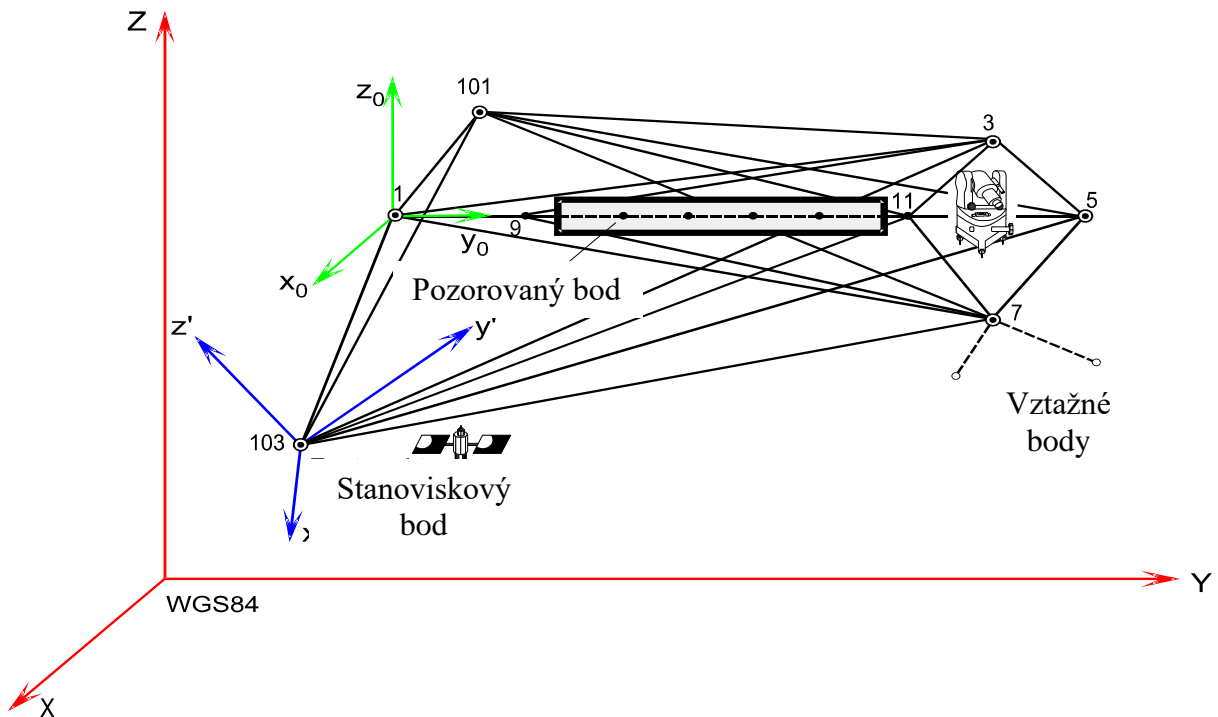
Při výstavbě, rekonstrukci nebo modernizaci hráze je pro projekt, vytýčení, vedení stavby a pozdější etapová kontrolní měření budována místní prostorová síť. Je nezávislá na státních souřadnicových systémech, přesnost je záležitostí rozborů. Trigonometrická měření pomocí totálních stanic vyšší přesnosti pak umožňují jednoznačně stanovit vzájemné posuny částí stavby i okolí. V dalším textu bychom rádi podali základní informaci na příkladě jedné gravitační hráze.

## 2 Vztažné systémy kontrolních měření

S ohledem na bodová pole se místní inženýrské sítě často stále dělí na polohové a výškové nebo podle použitých technologií na směrové, délkové nebo kombinované, přičemž mnohdy se rovinné (2D) souřadnice určují totálními stanicemi a výšky (1D) digitálními nivelačními přístroji. Moderní sítě pro analýzu posunů bodů stavebních objektů jsou ve vzrůstající míře koncipovány, měřeny a vyrovnávány jako prostorové (3D). Takovéto sítě, včetně uplatnění metod GPS, kladou na technologie měření a vyhodnocení nové požadavky.

Podle druhu posunů (deformací) jsou změny polohy diskrétních bodů objektu vztahovány k výchozímu stavu (relativní posuny) nebo k pevnému okolí v nadřazeném souřadnicovém systému (absolutní posuny). Geodetický vztažný systém se skládá ze souřadnicového systému a z bodového pole. Základem dvoustupňového určování absolutních posunů je místní síť s „pevnými“ vztažnými a s pozorovanými body a její připojení na

nadřazenou - obvykle státní - sít' pomocí GPS měření v systému WGS 84. Spojení relativních a absolutních posunů získaných terestrickými a GPS měřeními znázorňuje obr. 1.



Obr. 1

V místní síti  $x', y', z'$  podle obr. 1 mohou být posuny bodů stavebního objektu, např.



Obr. 2

přehrady, určeny trigonometricky jako absolutní, v systému  $x_0, y_0, z_0$  metodou záměrné přímky jako relativní. Místní síť jednotlivých geodetických metod bývají kombinovány a spojovány, často přesnými délkovými měřeními mezi pozorovanými a pozorovacími (stanoviskovými), případně i vztažnými body. Pro obtížnou viditelnost jsou vedle pozemních používána též GPS měření ( $X, Y, Z$ ). Síť jsou vyrovnávány v daném výškovém horizontu jako volné, což zachovává homogenitu a přesnost s vyloučením vzniku vnitřního pnutí.



Obr. 3

Stanoviskové body mají obvykle tzv. těžkou stabilizaci, zaručující dlouhodobou životnost a neměnnost polohy, tvořenou kupříkladu pilíři ze dvou souosých zaražených vybetonovaných rour (obr. 2). Identitu opakovaného postavení přístroje s vysokou přesností (0,1 mm) zaručuje nucená centrace pomocí tzv. freiberské koule (obr. 3).

Obdobné zásady platí též pro síť, sloužící k určování a předpovědi posunů instrumentovaných bodů nestabilního terénu [3].

### 3 Měření přesnou totální stanicí

Předpokladem pro kvalitní měření a správné výroky o posunu je použití ověřené (nejlépe certifikované) přesné totální stanice a zavedení všech potřebných matematických

a fyzikálních oprav. Charakteristikou přesnosti, dosažené metodou a senzorem (přístrojem), jsou směrodatné odchylky  $\sigma$ , resp.  $s_x$ . Mnohaletá zkušenost stanoví vztah mezi přesností měření a očekávaným posunem (deformací)  $\Delta x$ :

$$s_x : \Delta x = 1:3 . \quad (1)$$

Dodržení vztahu (1) zajistí spolehlivost výroku o prokázaném posunu oproti nejistotě měření, způsobené vlivem neznámých technologických odchylek (v německé praxi tzv. malých hrubých chyb).

Pro optimalizaci měření v místní síti jsou v rámci vyhodnocení sledovány vstupní přesnosti. Simulovaná vyrovnání s různými hodnotami umožní najít optimální konfiguraci, využívající předností totální stanice. Tím se též ověří, zda uvažovaný přístroj je schopen splnit požadované nároky na přesnost a efektivitu měření. Kritériem je vnitřní a vnější hodnověrnost. Mimořádný význam mají nadbytečná pozorování, která jsou podmínkou kontrolovatelnosti souborů pomocí tzv. „Data-snooping“ - testu odlehlých pozorování pro vyhledání „malých hrubých chyb“, které jinak způsobují nejistotu analýzy výsledků a tedy i výroku o posunu.

V přeурčené síti jsou souřadnice bodů výsledkem vyrovnání, v němž pozorované stabilizované body jsou považovány za nezávislé neznámé. Tím je zachována geometrie a vnitřní přesnost sítě jako předpoklad závěrečné analýzy posunů.

Pro určení posunů bodů objektu jsou měření v síti etapově opakována. Cílem analýzy je důkaz stability bodů, případně nalezení bodů, jejichž poloha se mezi dvěma etapami měření signifikantně změnila, a určení vektoru jejich posunu. Přesnost souřadnice bodů je hodnocena v etapách, posuny jako rozdíly souřadnic téhož bodu ve dvou etapách jsou definovány statistickými postupy. Protože měřené hodnoty nevypovídají o poloze, orientaci a měřítku sítě, jsou volné vyrovnané sítě navázány na pevné body.

Analýza vychází z testu shody sítě v obou etapách. Pomocí testů je třeba objasnit, zda zjištěné rozdíly v souřadnicích mezi etapami jsou důsledkem skutečných změn polohy bodu nebo důsledkem náhodných chyb měření. Při dodržení podmínky metody nejmenších čtverců lze vypočítat průměrnou přesnost vektoru posunu

$$\Theta^2 = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{P}_{dd} \mathbf{d}}{r} , \quad (2)$$

kde  $r$  je stupeň volnosti,

$\mathbf{d}$  je vektor rozdílů,

$\mathbf{P}$  je matice vah,

a porovnat ho se střední variancí  $s_0^2$  obou etap pomocí  $F$ -testu za předpokladu nulové hypotézy  $H_0$  „oba soubory jsou statisticky stejně přesné“:

$$H_0 : F = \frac{\Theta^2}{s_0^2} \geq F_{1-\alpha; f_1; f_2} , \quad (3)$$

kde  $f_1, f_2$  jsou stupně volnosti hodnot z čitatele a jmenovatele.

Pokud nerovnost neplatí, je nutno hypotézu  $H_0$  zamítnout. Bod s největším podílem na hodnotě vektoru posunu je nutno podrobit ověření významnosti posunu:

$$d = x_2 - x_1 > s_d \cdot t_{f; 1-\alpha/2} , \quad (4)$$

kde  $s_d$  je směrodatná odchylka rozdílů, tvořená z kofaktorů inverzní matice,

$t_{f; 1-\alpha/2}$  je kritická hodnota Studentova  $t$ -rozdělení,

$f$  je stupeň volnosti společných sítí.

Po případném vyloučení tohoto bodu je třeba postup opakovat.

Výhodou geodetických trigonometrických měření z bodů, ležících mimo území vlivů vyvolávajících posuny, je nyní to, že po osazení odrazných hranolů nebo fólií na pozorované body lze celý postup automatizovat. K tomu se používají motorizované totální stanice vyšší přesnosti (např. Leica TCA 2003, Trimble 5600), které periodicky automaticky vyhledávají cíle a opakují měření. To vede k vývoji monitorovacích systémů a jejich použití pro permanentní sledování inženýrských děl s plnoautomatickým přenosem a zpracováním dat z různých senzorů v reálném čase s možností plné vizualizace. K signalizaci pozorovaných bodů se vedle dosavadních značek pro směrová měření (obvykle nesoucích kontrastní soustředná mezikruží) stále častěji používají spojení dvou odrazných hranolů, orientovaných na různé stanoviskové body (obr. 4).



Obr. 4

#### 4 Porovnání trigonometrického měření a metody záměrné přímký

Na gravitační hrázi délky zhruba 200m s výškou 40m provedli pracovníci Geodetického ústavu TU Drážďany trigonometrické měření přístrojem Leica TC 2003 ( $\sigma_\varphi = 0,15$  mgon,  $\sigma_d = 1\text{mm} + 1\text{ppm}$ ) ve 3 skupinách, při němž se měly určit příčné posuny bodů s přesností  $\leq 1\text{mm}$ .



Obr. 5

Síť na obr. 1 má rozměry zhruba 200x400 m. Pozorované body byly vzdušné straně (líci) hráze osazeny způsobem podle obr. 4, na koruně hráze byly stabilizovány speciálními kuželi (obr. 5) vyráběnými saskou firmou FPM Holding GmbH. K vybavení patřily přesné hranoly GPHP1 s terčí GZT1 a držáky hranolů délky 1,69m (obr. 6). Odklon osy kužele od svislice ve směru kolmém k ose hráze je určen třikrát opakovaným urovnáním koincidenční sázečí libely (opět výrobek FPM) citlivosti 10" s mikrometrickým šroubem se střídavou koincencí třikrát zleva a třikrát zprava s výslednou přesností 2". Na základě zjištěného odklonu a známé délky držáku je zaváděna oprava polohy cíle.



Obr. 6

Metoda měřické přímký (alignment) byla prováděna speciálním optickým přístrojem firmy FPM s 65-ti násobným zvětšením. Na pozorovaném bodě byl na stabilizačním kuželu na držáku osazen záměrný terč, v příčném směru posunovaným mikrometrickým šroubem. Příčný posun bodu je opět rozdílem opravených čtení mikrometru ve dvou etapách s udávanou přesností 0,3mm. Měření obou metod byla opakována v různých kombinacích, úpravách a ročních obdobích. Přehradní zeď vykazuje charakteristické příčné posuny, závislé na rozdílu teplot návodní a vzdušné strany

hráze a na tlaku vody. Maximální posuny, vztažené k základní (nulté) etapě, dosáhly 5,2mm.

Výsledky prokazují, že požadovaná přesnost  $\leq 1\text{mm}$  určení příčných posunů totální stanicí, splňující podmínku (1), je dosažena pro vzdálenosti do 100m. Trigonometrická

metoda oproti metodě záměrné přímký umožňuje stanovení prostorových souřadnic v jednotném systému.

*Tento text byl zpracován v rámci spolupráce pracovišť inženýrské geodézie TU Dresden a ČVUT v Praze pro projekt VZ MSM 6840770001 Spolehlivost, optimalizace a trvanlivost stavebních materiálů a konstrukcí.*

### **Literatura**

- [1] WELSCH, W. - KUHLMANN, H. - HEUNECKE, O.: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Svazek z řady MÖSER, M. et al.: Handbuch Ingenieurgeodäsie. Heidelberg, Wichmann Verlag, 2000.
- [2] MICHALČÁK, O. - VOSIKA, O. - VESELÝ, M. - NOVÁK, Z.: Inženýrská geodézia I, II. Bratislava, Alfa Bratislava – SNTL Praha, 1985.
- [3] BUBENÍK, F. - HÁNEK, P. (JR.) - HÁNEK, P. - JANŽUROVÁ, I.: Geodätische Messungen von Hangrutschungen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 113, 2006, č. 8-9, s. 310-315.

***Publikováno v GaKO 55/97, 2009, č. 6, s. 132-135***