

URČOVÁNÍ DEFORMACÍ BETONOVÉ PŘEHRADNÍ HRÁZE ORLÍK POMOCÍ POZEMNÍHO InSAR

Milan Talich¹, Michal Glöckner², Ondřej Böhm³, Filip Antoš⁴

Abstract

GB InSAR technique plays an increasingly important role in determining the deformation of dams. The paper describes the use of GB InSAR technique for monitoring deformations of the Czech largest concrete dam Orlík on the Vltava river. After analyzing one month-long continuous measurement of the dam were detected non-linear movements. The relation between acting water level and resulting deformations were investigated in detail. The results confirm that GB InSAR technique is very suitable for monitoring deformations of this type of constructions. At the same time, the results may serve as a valuable source of data and information for further analysis in area of stability and for early warning systems.

1 Úvod

Tento příspěvek popisuje využití metody pozemní radarové interferometrie se syntetickou aperturou (GB InSAR, označované i GB-SAR nebo T-InSAR, česky též P-InSAR) pro měření vodorovných pohybů hrází údolních přehrad. Tato metoda umožňuje určit současně pohyby jednotlivých pixelů pokrývajících celou plochu hráze a to souvisle. Potřebná informace tak není omezena jen na osazené koutové odražeče nebo značky či senzory. Primárně jsou určovány pohyby ve směru záměry a metoda tak poskytuje mapy posunů sledovaných objektů s velkým prostorovým rozlišením (několika metrů) a vysokou přesností (až 0,1 mm). S využitím přirozeného

¹ Milan Talich, Ing., Ph.D. Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i., Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8, tel.: 266052440, e-mail: milan.talich@utia.cas.cz

² Michal Glöckner, Ing., Geodézie Ledec nad Sázavou s.r.o., Koželská 225, 584 01 Ledec nad Sázavou

³ Ondřej Böhm, Ing., Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i., Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8

⁴ Filip Antoš, Ing., Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i., Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8

odrazu radarového signálu od stěny hráze je možno pohyby měřit bezkontaktně. Radarová technologie nezávisí ani na vnějším osvětlení, a proto je možno měřit bez přerušení dnem i nocí prakticky za téměř jakéhokoli počasí.

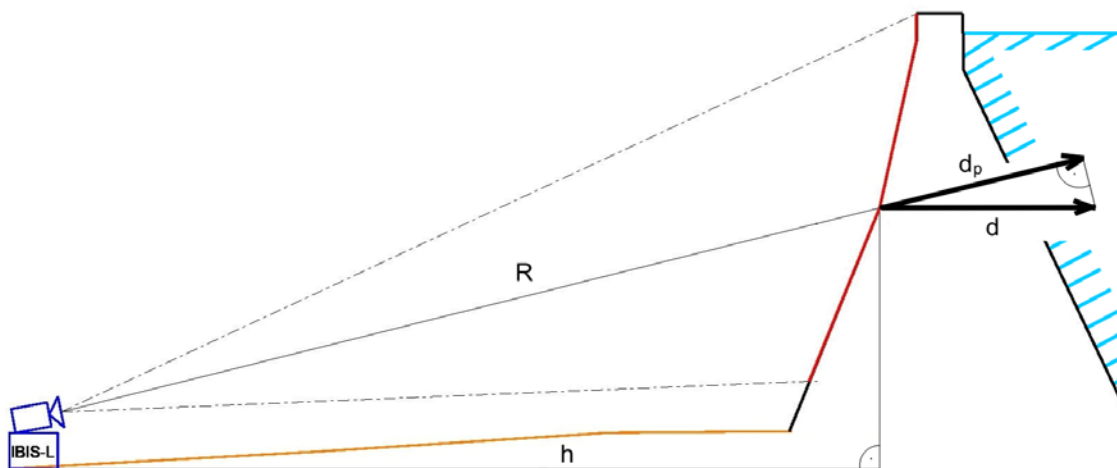
2 Principy technologie GB InSAR

Za posledních 10 až 15 let bylo vyvinuto několik senzorů pro praktické aplikace metody GB InSAR, viz např. [6] a [4]. Mezi ně patří i IBIS-L [2]. Ten byl také použit pro měření jehož výsledky jsou uváděny v tomto příspěvku. Dále proto budou uváděny pouze principy technologie GB InSAR používané přístrojem IBIS-L.

Přístroj IBIS-L je založen na použití kombinace tří velmi dobře známých technologií:

1. souvislé frekvenční stupňovité vlny (angl. stepped-frequency continuous wave, zkráceně SF-CW),
2. technologie radarové interferometrie se syntetickou aperturou (angl. Synthetic Aperture Radar, zkráceně SAR),
3. diferenční interferometrie (angl. differential interferometry).

Všechny tři uvedené technologie jsou podrobněji popsány v různé literatuře, např. v [8]. Zde se omezíme pouze na konstatování, že výsledkem jsou posuny měřené ve směru záměry radar - objekt (angl. line of sight, zkráceně LOS), které je třeba přepočítat na posuny v předpokládaném směru pohybu. Princip přepočtu dle následujícího vzorce $d = d_p \cdot \frac{R}{h}$ je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1 Posuny ve směru záměry (d_p) a skutečné posuny (d)

Hlavní výhodou technologie GB InSAR je kromě vysoké přesnosti především poskytování souvislé mapy posunů. Lze tím odhalit všechny rizikové oblasti ve sledovaném území či na sledovaném objektu.

3 Přístrojové vybavení

Pro měření byl použit vysoce stabilní koherentní pozemní interferometrický radar IBIS-L [2]. Radar IBIS-L pracuje v mikrovlnném pásmu se střední frekvencí 17GHz. Při měření radar snímá odražené signály s krokovou vzorkovací frekvencí od 10 do 200Hz. Dosah měření radarem je možno dle potřeby zvolit až do maximální hodnoty 4 km. Směrodatná odchylka radarem zaměřených pohybů dle údajů výrobce je v ideálních



podmínkách až 0,1 mm. Rozlišovací schopnost jednotlivých sledovaných cílů v radiálním směru, tj. ve směru záměry, je 0,75 m (šířka radiální spádové oblasti) ve směru kolmém je rozlišovací schopnost 4,3 mrad x vzdálenost.

Obr. 2 Radar IBIS-L

4 Aplikace na konkrétní betonovou přehradu

Bylo provedeno sledování vodorovných pohybů hráze vodního díla Orlík na Sedlčansku. Přehrada Orlík jako součást Vltavské kaskády je jednou z nejvýznamnějších českých údolních nádrží a její hráz je tou největší.



Obr. 3 Vodní dílo Orlík

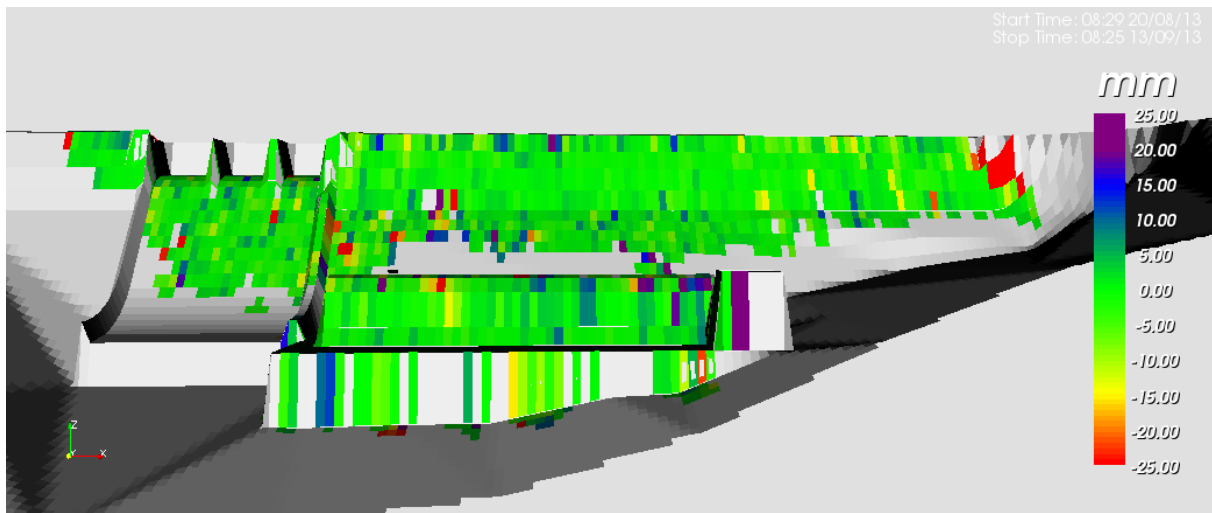
Těleso hráze je přímé, gravitační, betonové, o výšce 90,5 m. Hráz má délku 450 m. Průměrný roční průtok je $82,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Vodní plocha zaujímá 2 732 ha, maximální hloubka nádrže je 74 m a celkový objem představuje 716,6 mil. m³. Bezpečnostní přeliv tvoří tři pole šířky 15 m, o výšce segmentových uzávěrů 8 m.

Měření probíhalo nepřetržitě v době od 20. 8. do 2. 9. 2013, tj. po dobu 24 dní. Prvních 13 dní byl nastaven interval měření na 30 min, zbylých 11 dní

na 5 min. Akvizice dat probíhala ze střední vzdálenosti cca 350 m. Přístroj IBIS-L byl usazen na dočasné stanoviště, protože se neplánovalo opakované měření dalších etap. Data atmosférických měření byla převzata z nejbližší veřejné meteorologické stanice, což bylo dostatečné s ohledem na velmi krátkou vzdálenost mezi radarem a přehradou. Data s údaji o výšce hladin VD Orlík byla poskytnuta provozovatelem nádrže (Povodí Vltavy, státní podnik). Jsou v nich patrné pravidelné denní pohyby výšky hladiny při vypouštění vody z nádrže. Výraznější posun ve výšce hladiny nastává pouze v době mezi 5. až 9. září, kdy při souvislém upouštění klesla přibližně o 75 cm (Obr. 8).

4.1 Vyhodnocení a výsledky

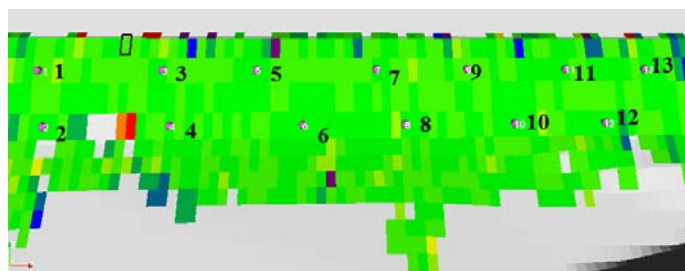
Základním výsledkem GB InSAR vyhodnocení měřených dat je **2D mapa určených posunů všech sledovaných pixelů za celou dobu měření**. Tato mapa byla pro snazší identifikaci pixelů umístěna na 3D model přehradní hráze jako její textura - viz Obr. 4.



Obr. 4 Posuny všech sledovaných pixelů za celou dobu 24 dní měření

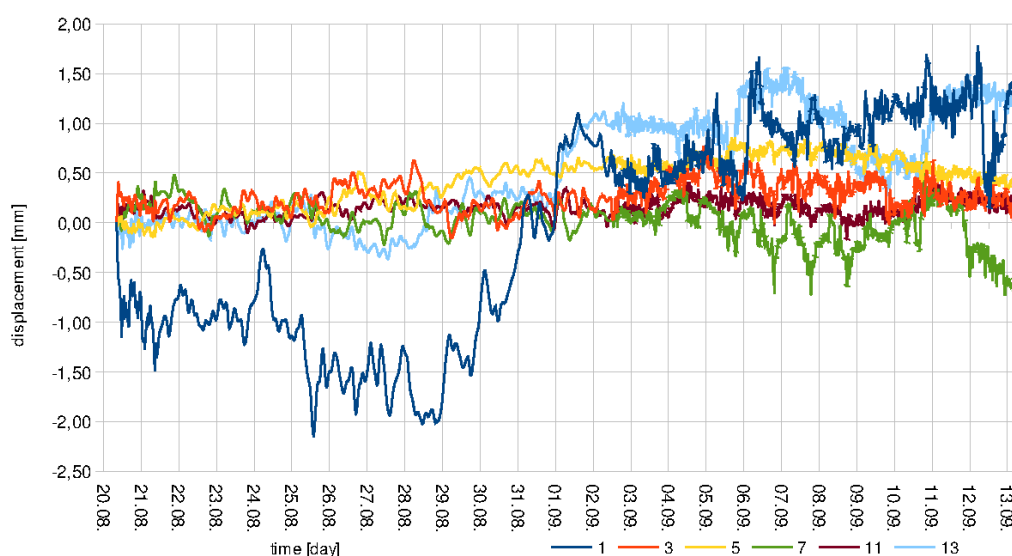
Na mapě pohybů všech pixelů (Obr. 4) jsou znázorněny kladné hodnoty pohybů směrem od radaru modrou barvou a záporné směrem k radaru červenou barvou. Jsou zde patrné body, které vykazují výrazný (neočekávaný) pohyb vzhledem ke svému okolí. Jde jednak o body na koruně hráze, které jsou ovlivněny pohybem kovových lamp veřejného osvětlení a zábradlí, na němž lampy stojí a které spadají do příslušných pixelů. Dále se jedná o body na skloněné části hráze v místech, kde jsou do hráze ukotveny vodící dráty elektrického vedení z elektrárny čímž dochází k ovlivňování odrazů radarového signálu. V případě bodů na budově elektrárny pak dochází k ovlivňování radarových odrazů řadou transformátorů a k nim vedoucích elektrických vedení umístěných před budovou elektrárny. U všech těchto pixelů (bodů) je tedy třeba považovat jejich pohyby za chybně určené a pro další analýzy je nepoužívat.

Pro ilustraci možností **určení vývoje pohybů jednotlivých bodů** po dobu měření byly vybrány body umístěné pod korunou hráze. Na Obr. 5 je

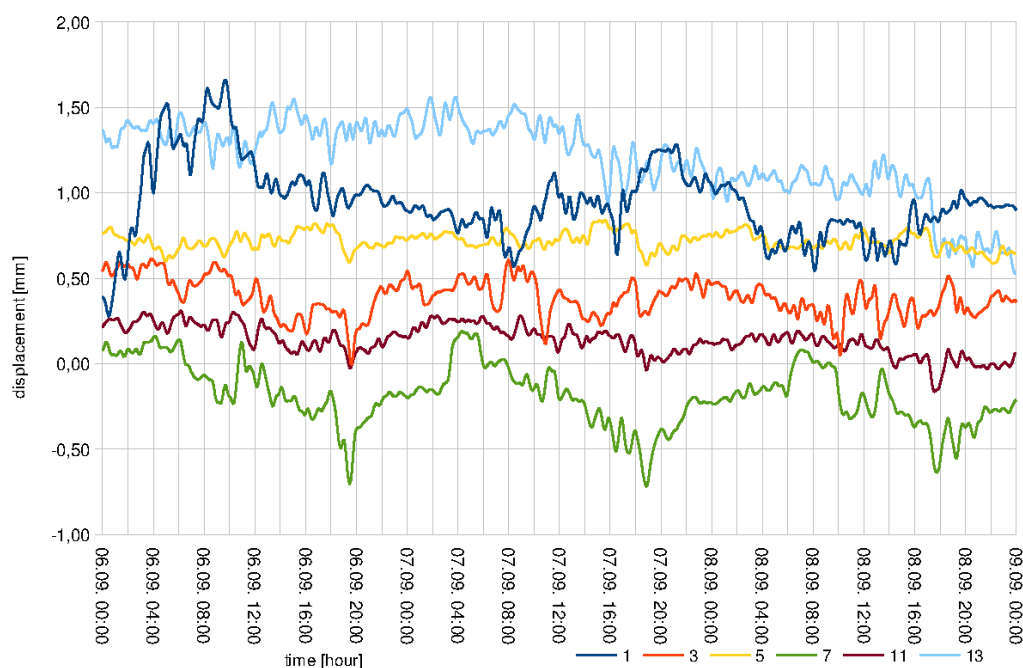


znázorněno jejich umístění. Na Obr. 6 a 7 je vývoj pohybů bodů 1, 3, 5, 7, 11 a 13 za celou dobu měření a detail za tři dny. Pohyby jsou v rozmezí ± 2 mm.

Obr. 5 Umístění vybraných bodů



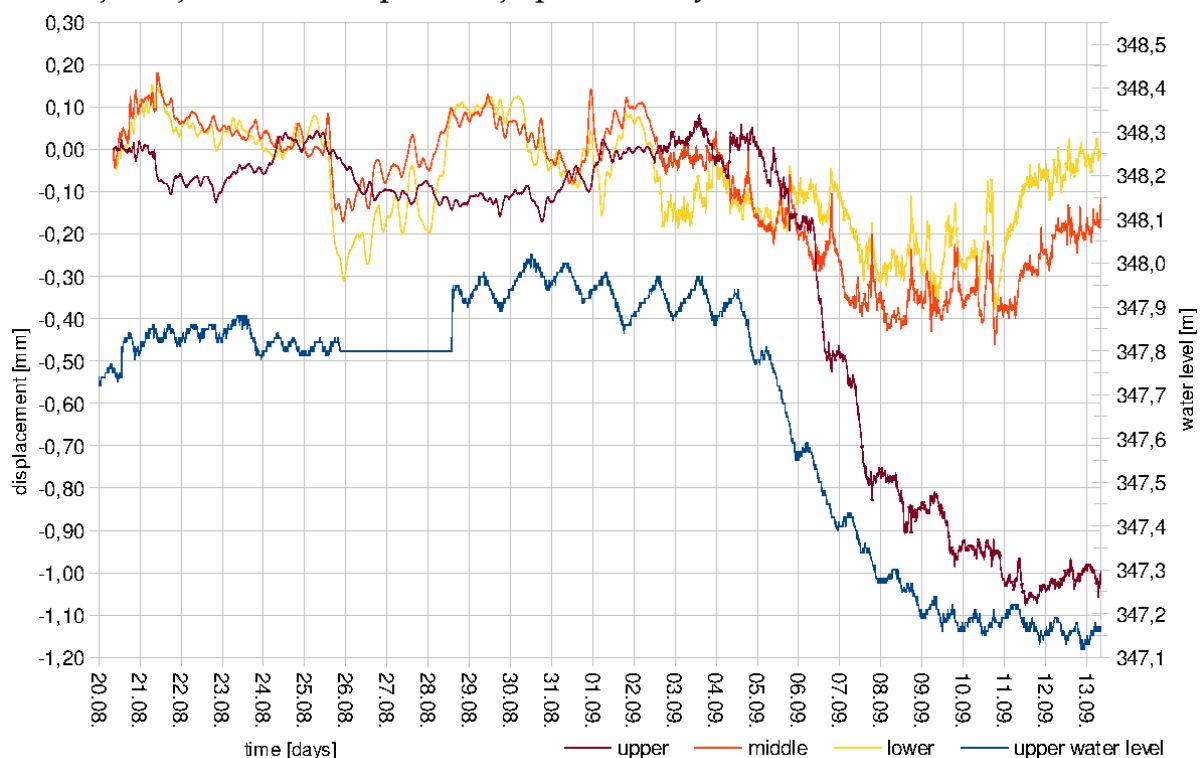
Obr. 6 Vývoj pohybů vybraných bodů za celou dobu 24 dní měření



Obr. 7 Vývoj pohybů vybraných bodů - detail za tři dny měření

U některých bodů lze pozorovat různé periodické pohyby. Především v období 6. až 9. září u bodů č. 7, 11 a 3, kde se jedná o jednodenní periody. Např. bod 7 se periodicky pohybuje v těchto dnech v rozmezí +0,2 až -0,7 mm. Příčinou bude nejspíše vliv teploty a oslunění stěny hráze. Příčina významného pohybu bodu č. 1 není známa.

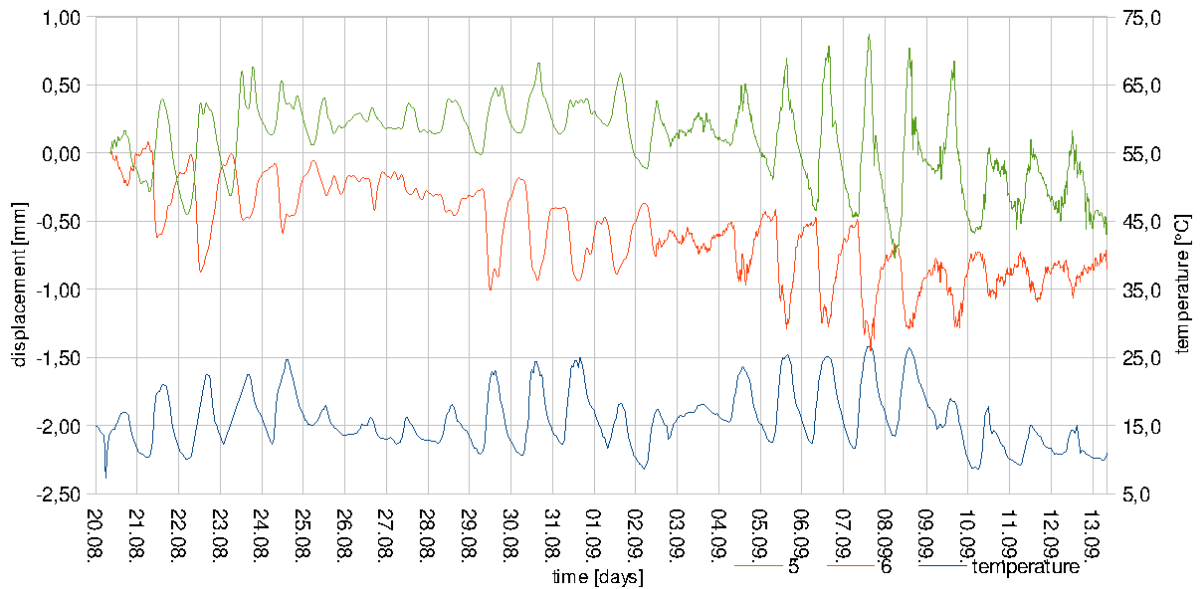
Pro detekci celkových pohybů jednotlivých částí stěny hráze byla tato rozdělena na tři přibližně stejně velké vodorovné oblasti: horní pod korunou hráze, střední a spodní. Na Obr. 8 je vývoj průměrných pohybů těchto oblastí za celou dobu měření 24 dní. Střední a spodní část hráze vykazují velmi dobrý soulad ve vývoji svých pohybů s přihlédnutím k přesnosti určování pohybů 0,1 mm. Ale horní oblast má vývoj jiný a liší se nejvíce v době od 5. do 9. září, kdy docházelo k velkému upouštění vody z přehrady. Velmi zajímavý je poznatek, že rychlé snížení hladiny o cca 0,75 m během čtyř dní vyvolalo pohyby hráze směrem po proudu vody. Přitom největší měrou o cca 0,9 mm se upouštění vody projevilo u horní části stěny hráze. Soulad vývoje pohybu horní části hráze s vývojem poklesu vodní hladiny je v tomto případě až zarážející a jednoznačně potvrzuje přesnost výsledků měření.



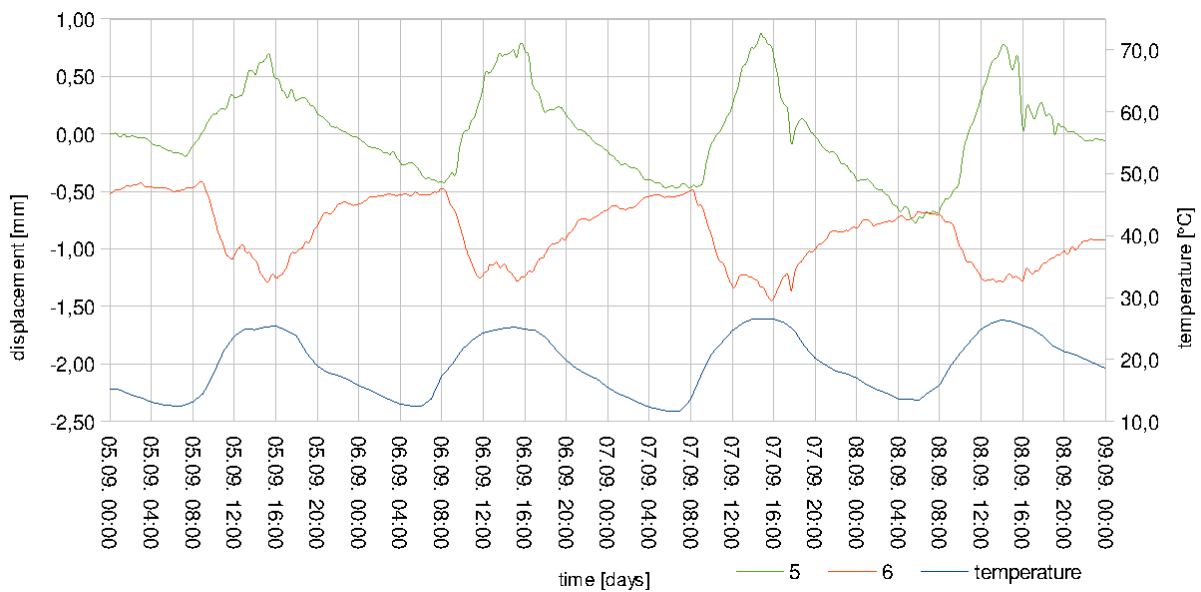
Obr. 8 Průměrné pohyby horní, střední a spodní části hráze

Jako součást celkového vyhodnocení byla vyčleněna i **analýza pohybů tří deskových uzávěrů bezpečnostních přelivů**. Podle předpokladu se na této části hráze měl vliv tlaku vodního sloupce na malou plochu zřetelně projevit. Na každém uzávěru byly vybrány k vyhodnocení dva body nacházející se symetricky od jeho svislé osy v jiné části uzávěru. Na Obr. 9 a 10 jsou pro

ilustraci výsledků zobrazeny pohyby bodů č. 5 a 6 ze třetího uzávěru za celou dobu měření 24 dní a dále detail za čtyři dny. Velmi výrazný je jejich symetrický periodický pohyb kde dochází-li k pohybu jednoho bodu po směru tlaku vody, druhý se pohybuje opačně. Denní perioda pohybů je nejspíše vyvolána změnami teploty a osluněním vlastních kovových uzávěrů.



Obr. 9 Pohyby bodů č. 5 a 6 ze třetího uzávěru za celou dobu měření 24 dní



Obr. 10 Pohyby bodů č. 5 a 6 ze třetího uzávěru - detail za čtyři dny

5 Závěr

Výše popsaným měřením bylo ověřeno, že technologií GB InSAR je možno úspěšně sledovat vodorovné pohyby hrází údolních přehrad. Úspěšnost a kvalita vyhodnocení závisí na kvalitě odrazu, kterou hráz poskytuje. Měření však může být v některých místech stěny hráze ovlivněno vícenásobnými odrazy signálu, nebo odrazy od různých rušivých součástí hráze (ukotvení drátů elektrického vedení, pohyby zábradlí či lamp osvětlení na koruně hráze atd.).

Bylo současně ověřeno, že vodorovné pohyby konkrétní zkušební hráze údolní přehrady Orlík nabývají takových hodnot a probíhají takovou rychlostí, že je nutné provádět dlouhodobé observace. Jedná se především o periodické pohyby v závislosti na různých vnějších vlivech, jako jsou teplota, oslunění přehradní zdi, změna výšky hladiny vypouštěním vody atd. Byly zaznamenány například periodické denní pohyby na některých bodech hráze pod její korunou o velikostech cca 0,9 mm. Při analýze pohybů tří deskových uzávěrů bezpečnostních přelivů se detekovaly opět denní periodické pohyby jednotlivých bodů na těchto uzávěrech o velikostech až 1,5 mm. Potvrdily se i předpoklady o vlivu změny výšky hladiny na pohyby stěny hráze. Rychlé snížení hladiny o cca 0,75 m během čtyř dní vyvolalo celkové pohyby horní části stěny hráze směrem po proudu vody o cca 0,9 mm.

Tento příspěvek byl podpořen Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR, v rámci programu TIP, projekt „Výzkum možností pozemního InSAR pro určování deformací rizikových objektů a lokalit“ č. FR-TI4/436.

Literatura

- [1] Alba, M., Bernardini, G., Giussani, A., Ricci, P., Roncoroni, F., Scaioni, M., Valgoi, P. and Zhang, K., 2008. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. In: ISPRS Congress, Beijing, China, Jul 3–11, 2008, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B1, 2008.
- [2] Bernardini, G., De Pasquale, G., Bicci, A., Marra, M., Coppi, F., Ricci, P. and M. Pieraccini, 2007. Microwave interferometer for ambient vibration measurements on civil engineering structures: 1. Principles of the radar technique and laboratory tests. In: *Proc. of EVACES'07, Porto, Portugal, 24-26 Oct, on CDROM*.

- [3] Ferretti, A., Monti Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Massonet, D., 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, Noordwijk, The Netherlands.
- [4] Harries, N., Noon, D., and K. Rowley, 2006. *Case Study of Slope Stability Radar used in Open Cut Mines*. In: *Proc. of Int. Symp. on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Eng.*, Cape Town, South Africa, 3-6 Apr, pp. 335-342.
- [5] Pieraccini, M., Luzi, G., Mecatti, D., Noferini, L., Macaluso, G., Atzeni, C., 2006. *Ground-Based radar interferometry for monitoring unstable slopes*. In: *3rd IAG/12 FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006*.
- [6] Rudolf, H., Leva, D., Tarchi, D., and J. Sieber, 1999. *A mobile and versatile SAR system*. In *Proc. of IGARSS '99, Vol. 1, 28 June-2 July, Hamburg, Germany*, pp. 592-594.
- [7] Sărăcin, A., Coșarcă, C., Jocea, A., 2012. *Dam deformation measurements using terrestrial interferometric techniques*, University "1 Decembrie 1918" of Alba Iulia, GeoCAD 2012.
- [8] Talich M., Glöckner M., Böhm O., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Šolc J., 2014. *The Application of the Ground-based InSAR technique for the deformation monitoring of concrete hydropower dam Orlik on Vltava river*. In: *INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying, Prague, Czech republic, April 3-4, 2014*, pp. 203-210.
- [9] Niemeier, W., Lehmann, M., 2014. *Slow motion deformations: Potential and quality assessment of ground based radar systems*. In: *INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying, Prague, Czech republic, April 3-4, 2014*, pp. 195-202.