

Geofyzikálny prieskum kostola sv. Kataríny, Slovensko

Jaroslava Pánisová¹, Marek Fraštia², Tina Wunderlich³ a Roman Pašteka⁴

1 Geofyzikálny ústav, Slovenská akadémia vied, Bratislava, Slovensko, geofjapa@savba.sk

2 Katedra geodézie, Slovenská technická univerzita, Bratislava, Slovensko

3 Ústav geovied, Christian Albrechts Univerzita, Kiel, Nemecko

4 Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovensko

Zrúcanina kláštora a kostola sv. Kataríny je významným príkladom slovenského kultúrneho dedičstva. Integrovaný geofyzikálny prístup za účelom identifikácie a popisu podzemných archeologických štruktúr bol použitý v hlavnej lodi bývalého kostola. Kombinácia mikrogravimetrie a georadaru je veľmi efektívny nástroj pre takéto mapovanie. Výsledky z 36 georadarových profilov boli zobrazené vo forme horizontálnych a vertikálnych časových rezov. Na mape reziduálnych Bouguerových anomálií boli nájdené viaceré tiažové minimá. Na odhad hĺbky a tvaru anomálnych zdrojov boli použité poloautomatické metódy, konkrétne Eulerova dekonvolúcia a harmonická inverzia.



Úvod

Použitie mikrogravimetrie na vyhľadávanie dutín pri prieskume historických stavieb si vyžaduje výpočet dodatočných korekcií, ktoré berú do úvahy gravitačné účinky okolitých umelých štruktúr (budov, známych podzemných priestorov). Digitálna fotogrametria je značne využívaná v oblasti archeologického prieskumu a pamiatkovej dokumentácie. Potenciál blízkej fotogrametrie zdokonalíť postup spracovania mikrogravimetrických údajov je predstavený v [4], kde bola použitá nová metóda na výpočet antropogénnych korekcií založená na fotogrametrickej rekonštrukcii. Nasledujúca prípadová štúdia ilustruje použitie tejto novej metódy pri mikrogravimetrickom prieskume realizovanom na slovenskej archeologickej lokalite Katarínka.

Popis lokality

Zrúcanina kláštora sv. Kataríny sa nachádza v lesoch Malých Karpát na skalnatom výbežku na západnom Slovensku, 20 km severozápadne od Trnavy. Geologická stavba lokality pozostáva zo stredotriasových karbonátov (svetlé masívne vápence nedzovského príkrovu hronika) a kvartérnych sedimentov. Františkánsky kláštor bol založený v roku 1618 na mieste, kde stála gotická kaplnka z 15. storočia. Bolo to nábožensky významné miesto vďaka legendám popisujúcim údajné zjavenia sv. Kataríny Alexandrijskej. Pôvodný kostol bol prestavaný

v roku 1646 na väčší ranobarokový objekt s rozmermi 52×13.5 m a s 30 m vysokou vežou. Kláštorňý komplex zanikol rozhodnutím panovníka Jozefa II. v roku 1786 [3].

Obnova ruín začala v roku 1994. Projekt záchrany kláštora je organizovaný miestnym občianskym združením Katarína (www.katarinka.sk). Dôležitou súčasťou projektu je komplexný historický, archeologický, antropologický a geofyzikálny výskum, ktorý tu bol realizovaný od roku 1997 [3]. Hlavným cieľom geofyzikálneho prieskumu bolo identifikovať potenciálne oblasti pre ďalší archeologický výskum.

Fotogrametrické spracovanie

Pre priestorovú rekonštrukciu kostola bola použitá metóda konvergentnej viacsnímkovej fotogrametrie. Snímky boli vyhotovené digitálnymi fotoaparátmi C-8080 a Nikon D-200. Oba fotoaparáty boli pred samotným snímkaním kalibrované na testovacom a kalibračnom bodovom poli [1]. Fotogrametrické spracovanie projektu bolo realizované v systéme PhotoModeler 6 (www.photomodeler.com). Exteriér a interiérová časť kostola boli spracované samostatne. Obe časti boli spojené do jedného projektu pomocou vlícovacích bodov meraných totálnou stanicou.

Interiér veže vyžadoval odlišný prístup, keďže jej úzky a pretiahnutý tvar neumožňoval fotogrametrické vyhodnotenie. Na rekonštrukciu interiéru veže boli preto použité merania prístrojom Trimble VX so zabudovanou kamerou. Úplný vektorový model, zobrazený na obr. 1a, obsahuje všetky plochy interiérových aj exteriérových častí kostola a veže (8148 trojuholníkov). Celková presnosť modelu (priestorová stredná chyba) vypočítaná zo všetkých bodov dosiahla 1.8 m.

Mikrogravimetria

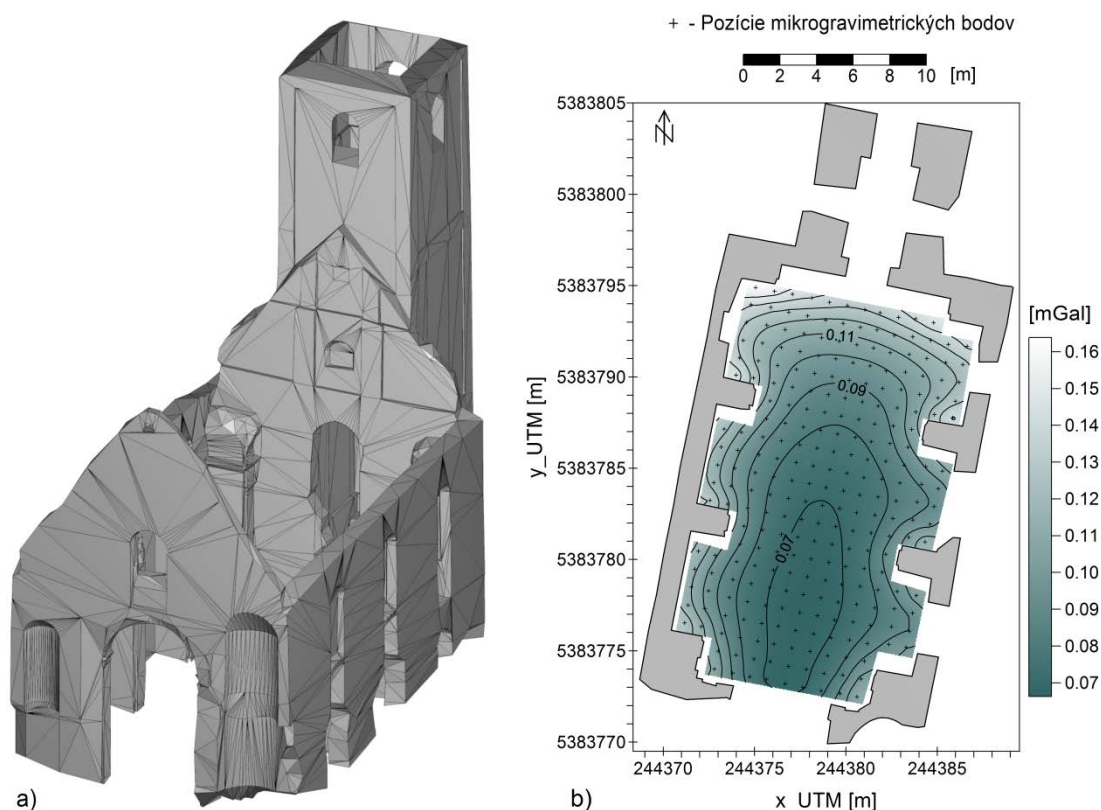
Mikrogravimetrický prieskum bol uskutočnený za účelom zmapovania hlavnej lode bývalého kostola, kde by sa okrem známej stredovekej krypty preskúmavnej v roku 2001 (čiarkovaný pôdorys na obr. 2; [6]) mali nachádzať ďalšie dve krypty. Táto oblasť bola premeraná na pravidelnom gride tvorenom 258 bodmi, s krokom merania 1 m (obr. 1b). Na zber tiažových údajov bol použitý gravimeter Scintrex CG-5. Reziduálne chody prístroja boli odhadnuté na základe opakovaných meraní v hodinových intervaloch na vybranom základnom bode. Štatistická analýza opakovaných meraní na vybraných bodoch gridu z rôznych dní poskytla strednú chybu meranej tiaže menšiu ako $4 \mu\text{Gal}$.

Následné spracovanie údajov obsahovalo Fayeovu korekciu (na voľný vzduch), rovinnú Bouguerovu, terénnu a antropogénnu korekciu. Terénna korekcia bola vypočítaná do vzdialenosti 5.24 km. Pri výpočte rovinnej Bouguerovej a terénnej korekcie bola použitá hustota 2.4 g/cm^3 . Pri výpočte antropogénnej korekcie slúžil výsledný model kostola (obr. 1a) ako priamy vstup do programu Polygrav [4], ktorý je založený na 3D mnohostennej aproximácii telies body predstavenej v [2]. Antropogénna korekcia (obr. 1b) bola vypočítaná pre priemernú hustotu 2.2 g/cm^3 . Výsledky mikrogravimetrického prieskumu sú zobrazené vo forme mapy reziduálnych Bouguerových anomálií (obr. 2a) s odstráneným regionálnym trendom.

Metóda harmonickej inverzie [5] umožňuje nájsť pozíciu a tvar systému anomálnych telies uložených v apriórne známom horizontálne zvrstvenom prostredí. Metóda poskytuje viaceré prípustné hustotné modely pre konkrétne reziduálne tiažové pole, takže porovnanie s inými interpretačnými metódami ako aj inými geofyzikálnymi metódami je nevyhnutné, aby bolo možné vybrať to najreálnejšie. Štruktúrny index v Eulerovej dekonvolúcii, ktorý vyjadruje

rýchlosť poklesu potenciálového poľa s rastúcou vzdialenosťou od zdroja, bol nastavený na hodnotu 1, vyhľadávajúc tak horizontálny valec v gravimetrii.

Na obr. 2c je zobrazené hustotné rozdelenie pre hĺbku 1.8 m získané pomocou harmonickej inverzie spolu s riešeniami z Eulerovej dekonvolúcie vyznačenými čiernymi krúžkami. Obr. 2d ukazuje vybrané vertikálne rezy z hustotného modelu v dvoch profiloch križujúcich hlavné tiažové minimum, ktoré je generované známou kryptou. Priemerné hĺbky (cca 1.6–2.0 m) zhlukov Eulerových riešení sa zhodujú s odhadnutou pozíciou prázdnej krypty získanej prostredníctvom harmonickej inverzie.



Obr. 1: a) Mnohostenný model kostola. **b)** Vypočítaná antropogénna korekcia v mGal, zobrazená v pôdoryse kostola.

Georadar

Kvôli zredukovaniu nejednoznačnosti charakteristickej pre mikrogravimetriu bola mapa reziduálnych Bouguerových anomálií prekrytá a porovnaná s georadarovými výsledkami z východnej časti hlavnej lode (obr. 2b). Na merania bol použitý GSSI SIR-20 systém s jednou 400 MHz anténou. Bolo vytýčených a odmeraných 36 georadarových profilov v „zig-zag“ móde s konštantným 0.15 m rozostupom. Rýchlosť šírenia vln v podloží kostola bola pre účely konverzie času na hĺbky odhadnutá metódou napasovania difrakčnej hyperboly ako 0.09 m/ns. Spracovanie jednotlivých profilov sa skladalo z t_0 -korekcií, odstránenia offsetu, usporiadania profilov do správneho smeru a vytvorenia časových rezov.

V horizontálnom časovom reze (obr. 2b), dve zreteľné anomálie indikujú prítomnosť dvoch štruktúr s archeologickým potenciálom. Vertikálny georadarový časový rez prezentovaný na obr. 2e (Profil A na obr. 2b) korešponduje s hĺbkami 0–3.2 m. Vrchný okraj známej prázdnej krypty je indikovaný silným, takmer horizontálnym reflexom (C1), ktorý je spôsobený kontrastom v dielektrickej permitivitve medzi zeminou alebo betónom a vzduchom.

Hyperbolický reflex tesne pod ním je spôsobený jednou z lešenárskych rúr, ktoré slúžia ako podpory istiace krycí betónový preklad preskúmanej krypty [3]. Druhý, takmer horizontálny reflex okolo 25 ns je možné interpretovať ako spodný okraj krypty, berúc do úvahy vysokú rýchlosť šírenia vln vo vzduchu (0.30 m/ns). Chaotické vzory reflexov štruktúr C2 a C3 naznačujú, že predpokladané krypty sú zničené a vyplnené sutinou. Hĺbky k ich horným okrajom odhadujeme na cca 0.5 m pod povrchom.

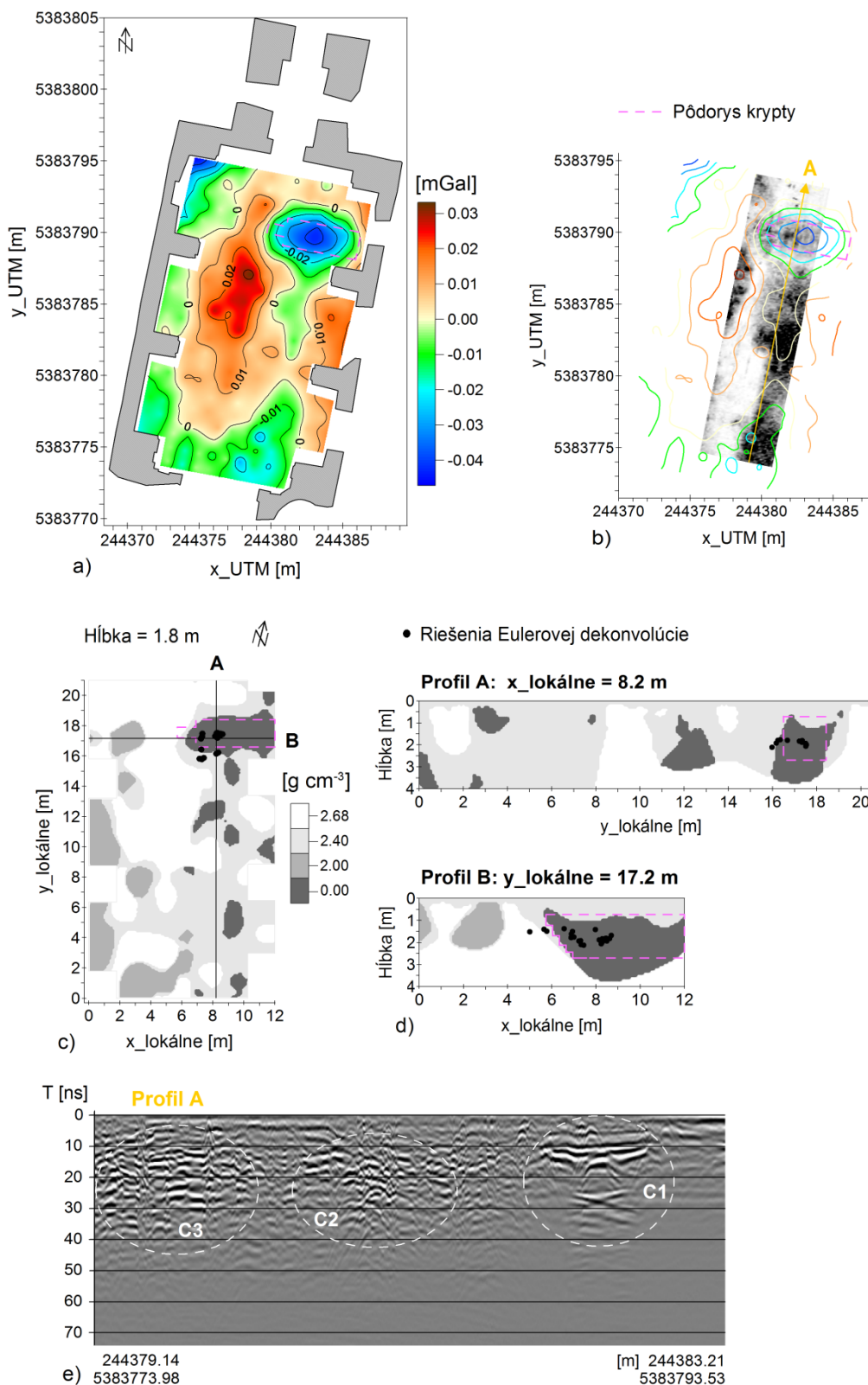
Vertikálny hustotný rez (Profil A, obr. 2d) je v korelácii s vertikálnym georadarovým časovým rezom (obr. 2e). V prípade odkrytej krypty, preskúmanej v roku 2001, boli jej rozmery (5×1.9×2 m) a pozícia (jej vrchný okraj leží v hĺbke 0.6–0.8 m pod povrchom) potvrdené oboma geofyzikálnymi metódami. Ďalšie dve štruktúry, ktoré boli úspešne detekované oboma metódami, sú s najväčšou pravdepodobnosťou dve krypty spomínané v historických archívoch. Výsledky z georadaru a mikrogravimetrie naznačujú, že tieto dva objekty môžu byť čiastočne vyplnené. Na základe výsledkov prezentovaného geofyzikálneho prieskumu boli vydané odporúčania na archeologický prieskum.

Záver

Táto prípadová štúdia ukazuje výhody kombinovania geofyzikálnych metód založených na vyšetrovaní rôznych fyzikálnych parametroch. Kombinácia mikrogravimetrického a georadarového prieskumu bola potvrdená ako veľmi efektívny a nedeštruktívny nástroj pre archeologický prieskum. Získané geofyzikálne výsledky môžu byť integrované do virtuálnych databáz, kde sú vzácne národné pamiatky dokumentované pre budúce generácie. Ukázali sme, že digitálne modely historických stavieb je možné priamo využiť na výpočet ich gravitačných účinkov v mikrogravimetrii. Nový spôsob spracovania mikrogravimetrických meraní je navrhnutý najmä pre archeologické aplikácie.

Literatúra

1. Fraštia M. 2005. Possibilities of using inexpensive digital cameras in applications of close-range photogrammetry. *Slovak Journal of Civil Engineering* **8**(2): 20–28.
2. Götze HJ, Lahmeyer B. 1988. Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetic. *Geophysics* **53**(8): 1096–1108.
3. Herceg P. 2009. Experiences with the restoration of St. Catherine's monastery ruins. 15 years of St. Catherine's monastery preservation project near Dechtice village. Association of the Christian Youth Communities: Spišská Nová Ves. (In Slovak.)
4. Panisova J, Pašteka R, Papčo J, Fraštia M. 2012. The calculation of building corrections in microgravity surveys using close range photogrammetry. *Near Surface Geophysics* **10**(5): 391–399. DOI: 10.3997/1873-0604.2012034.
5. Pohánka V. 2003. The harmonic inversion method: calculation of the multi-domain density. *Contrib. Geophys. Geod.* **33**(4): 247–266.
6. Urminský J. 2002. Continuation of the investigation of St. Catherine's monastery near the Dechtice village. *Archaeological explorations and finds in Slovakia in 2001*: 215–216. (In Slovak.)



Obr. 2: **a)** Mapa reziduálnych Bouguerových anomálií v mGal. **b)** Horizontálny časový georadarový rez pre 20–40 ns (približná hĺbka 0.9–1.8 m) zobrazený spolu s kontúrami reziduálnych Bouguerových anomálií. **c)** Interpretácia mikrogravimetrických výsledkov použitím metód harmonickej inverzie a Eulerovej dekonvolúcie pre hĺbku 1.8 m. **d)** Hustotné rozdelenia v dvoch vertikálnych rezoch pre profily A a B. **e)** Vertikálny georadarový časový rez (Profil A) bežiaci v JZ-SV smere.