# Kombinované geodetické a geofyzikálne modelovanie sakrálnej budovy

Jaroslava Pánisová<sup>1</sup>, Vladimír Pohánka<sup>1</sup>, Igor Murín<sup>2</sup>, Roman Pašteka<sup>2</sup>, Jana Haličková<sup>3</sup>, Peter Brunčák<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied (e-mail: geofjapa@savba.sk)

<sup>2</sup> Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky, Univerzita Komenského
<sup>3</sup> Oddelenie digitalizácie a grafickej dokumentácie, Pamiatkový úrad Slovenskej Republiky

#### Abstrakt

Implementácia geofyzikálnych metód pri monitorovaní kultúrneho dedičstva ponúka hodnotný, nedeštruktívny náhľad do vnútornej štruktúry. Ukázali sme, že 2D geofyzikálne obrazy alebo kvantitatívne interpretácie vo forme 3D modelov je možné jednoducho pripojiť do virtuálnych databáz objektov dokumentovaného kultúrneho dedičstva, prispievajúc tým k pochopeniu ich historického vývoja aj verejnosťou a laikmi. Takýto multidisciplinárny prístup k opisovaniu súčasnosti a minulosti našich historických pamiatok významne prispieva k ich dokumentácii pre budúce generácie.

# Úvod

Dokumentovanie historickej stavby pomocou najmodernejších meračských technológií prináša ľahšiu vizualizáciu vo forme 3D modelu, umožňujúc tým lepšie pochopenie jej historickej konštrukcie verejnosťou. Aplikovali sme tento prístup na Kostole sv. Juraja, jedným z najvýznamnejsích historických pamiatok na JZ Slovensku, ktorý dominuje siluete mesta Svätý Jur (**Obr. 1**). Kostol bol postavený v prvej polovici trinásteho storočia a v nasledujúcich storočiach prešiel mnohými významnými premenami [5]. Historické záznamy uvádzajú stredoveké krypty a samostatné hroby vo vnútri kostola [1].

### Geodetický prieskum

Geodetický prieskum umožnil zaznamenať súčasný stav kostola. Jeho exteriér bol zameraný pomocou totálnej stanice (Trimble VX, stanovená priestorová presnosť bodov 4 mm). Na čo najlepšie zreprodukovanie geometrie a členitosti celého exteriéru budovy bolo na fasádach a streche odmeraných zhruba 3000 bodov.



Obr. 1: (a) Polohová mapa (b) Kostola sv. Juraja vo Svätom Jure.



Obr. 2: (a) Mračno bodov interiéru kostola; (b) Zjednodušený model kostola bez strechy.

Interiér tejto historickej budovy má dosť komplexný tvar, pozostávajúc z niekoľkých miestností, empory a krížovej rebrovej klenby. Na virtuálnu rekonštrukciu týchto interiérových subštruktúr kostola sa vykonalo 3D laserové skenovanie použitím laserového skenera Riegl VZ-400. Získané detailné mračno bodov (**Obr. 2a**) bolo spracované, zredukované do 3D vektorového modelu a spojené s modelom exteriéru cez okná a dvere. Zjednodušená verzia modelu bez strechy, vytvorená ako jeden uzavretý mnohosten a popísaná nepravidelnou trojuholníkovou sieťou (TIN, viac ako 10 000 trojuholníkov), bola použitá aj pri spracovaní mikrogravimetrických údajov ([2]; **Obr. 2b**).

### Geofyzikálny prieskum

Mikrogravimetria a GPR (georadar) boli vybrané ako najefektívnejšie geofyzikálne nástroje na mapovanie plytkého podložia v interiéri budov. V komplexnom charaktere anomálneho tiažového poľa je indikovaných viacero oblastí úbytku hmôt pod povrchom (modrá, fialová až purpurová farba izočiar na (**Obr. 3a**)). Hlavné záujmové záporné tiažové anomálie v hlavnej lodi (štruktúry A-D), ktoré boli taktiež potvrdené georadarovými meraniami, sú interpretované ako stredoveké krypty. Ďalším, veľmi dôležitým výstupom geofyzikálneho výskumu je objav základov západného múru najstaršej románskej stavby (pozri lineárnu štruktúru E nachádzajúcu sa okolo 52 m v y-smere na (**Obr. 3 a 4**)). Štruktúru C, ktorá vyzerá byť prepojená s prázdnou dutinou B a vyplnenou dutinou D, je možné interpretovať ako úzku kryptu alebo chodbu (**Obr. 3a a 4**). Nakoniec, štruktúra F môže indikovať prítomnosť vyplnenej dutiny alebo hrobu.

Na odhad hlbky a geometrie anomálnych zdrojov boli použité metódy harmonickej inverzie [4], 3D hustotné modelovanie a 3D Eulerova dekonvolúcia (ED; [3]). Objemový hustotný model získaný pomocou harmonickej inverzie zobrazuje prázdne dutiny čiernou a základy s vyššou hustotou bledožltou (**Obr. 3b-d**). Biele čiary reprezentujú možné hranice štyroch stredovekých krýpt z 3D hustotného modelovania. Päť polygonálnych hranolov (dva z nich s oblúkovitým prierezom a jeden pravouhlý hranol) s rôznymi hustotnými kontrastami boli použité na modelovanie krýpt. Štruktúrny index v 3D Eulerovej dekonvolúcii bol nastavený na jednotku, predpokladajúc telesá v tvare horizontálneho valca. Na nájdenie hĺbkového odhadu ku anomálnym zdrojom sme použili interný program Regder vyvíjaný na Univerzite Komenského v Bratislave. Vybrané ED zhluky riešení zobrazené vyplnenými žltými krúžkami sa nachádzajú v hĺbke 0.3-1.9 m pod povrchom (**Obr. 3b-d**).



Obr. 3: (a) Horizontálny GPR časový rez pre hĺbku približne 0.6 m prekrytý s izočiarami reziduálnych Bouguerových anomálií; (b-d) Riešenie harmonickej inverzie: (b) horizontálny hustotný rez (hĺbka 1.5 m); (c) vertikálny hustotný rez pozdĺž profilu 1 s prislúchajúcim výstupom z 3D modelovania; d) objemový hustotný model. Zmapované podpovrchové štruktúry sú označené ako A-F. 5



Obr. 4: Vybrané vertikálne GPR časovo-hĺbkové rezy v profiloch 2-1 s označenými GPR anomáliami spolu s izoplošným GPR objemovým modelom (v strede).

#### Interpretácia

**Obrázok 3a** umožňuje kvalitatívne porovnanie oboch geofyzikálnych metód. Očividne existuje celkom vysoká korelácia medzi dvoma zobrazenými súbormi dát v prípade štruktúr A-D súvisiacich s predpokladanými stredovekými kryptami. Naproti tomu je maximum kladnej tiažovej anomálie, ktorá zospodu ohraničuje zápornú anomálnu zónu, trocha posunuté voči pozícii lineárnej GPR anomálie E týkajúcej sa základov múru. Nevieme teraz jednoznačne interpretovať túto nezrovnalosť.

Objekty A, B, C a E, ukázané na **Obr. 3b**, sú v korelácii so štruktúrami vyznačenými na GPR horizontálnom hĺbkovom reze (**Obr. 3a**). **Obrázok 3c** ukazuje primeranú zhodu medzi vypočítaným (modelovým) a nameraným tiažovým poľom. Priemerné hĺbky (približne 0.4-1.7 m) zhlukov riešení z ED, nachádzajúce sa medzi 47 a 52 m v x-ovom smere, korešpondujú s odhadnutými hĺbkami štruktúr A a C z harmonickej inverzie.

Zhlukovanie 3D ED riešení skôr pozdĺž hrán modelovaných krýpt ako v ich stredoch je možné vysvetliť blízkosťou anomálnych zdrojov vo vrchnej časti hlavnej lode. Vypočítaný tvar telies z harmonickej inverzie neznázorňuje presne očakávanú geometriu krýpt odvodenú z GPR údajov. Príčinou takého veľkého rozdielu medzi predpokladaným a vypočítaným tvarom objavených krýpt je to, že merané tiažové údaje sú stále riedké: 0.5 m krok verzus 2 m šírka krypty A, dokonca 1 m šírka úzkej chodby C.

V tejto prípadovej štúdii sú porovnané elektromagnetické vlastnosti pôdy s hustotnými zmenami v hĺbke niekoľkých metrov pod podlahou v interiéri Kostola sv. Juraja vo Svätom Jure. Štyri stredoveké krypty zmieňované v historických archívoch boli úspešne zamerané v hlavnej lodi pomocou metód mikrogravimetrie (**Obr. 3**) a georadaru (**Obr. 4**). Objav základov západnej steny pôvodnej románskej stavby približne v jednej tretine hlavnej lode, orientovanej kolmo na hlavný vchod, je najvýznamnejším výsledkom geofyzikálneho výskumu. Overenie týchto štruktúr pomocou archaeologického výskumu ešte nebolo vykonané. (3D model kostola a podpovrchových štruktúr)

# 3D model

Z jednotlivých získaných geofyzikálnych údajov sme odvodili 3D polygonálne modely, ktoré sú porovnané vo vyššie zobrazenom interaktívnom 3D modeli, aby sme dosiahli realistickejší obraz podpovrchových štruktúr, a tým vniesli viac dôvery v interpretáciu. Priestorové modely objavených podzemných kultúrnych štruktúr sú teraz pridané do vizualizácie viditeľných častí kostola (pozri interaktívny 3D model). Výsledky georadarového modelovania, ktoré boli interpretované z izoplošného modelu a vertikálnych GPR rezov, sú znázornené zelenomodrou farbou. Krypty získané pomocou 3D hustotného modelovania sú vyfarbené nažlto. Detailný pohľad na spojené modely ukazuje celkom vysokú koreláciu modelovaných podzemných objektov, až na vrchnú časť ľavej krypty A, potvrdzujúc spoľahlivosť našej interpretácie. Len archaeologický výskum môže potvrdiť relevantnosť hypotetických vstupných schodov do krýpt z 3D hustotného modelovania.

## Referencie

1. Luz R. 2012. Burials inf the Church of St. George in the town Svätý Jur. Student Scientific Conference, Faculty of Philosophy, Comenius University, Bratislava. (in Slovak)

2. Panisova J. Pašteka R. Papčo J. Frašia M. 2012. The calculation of building corrections in microgravity surveys using close-range photogrammetry. Near Surface Geophysics 10:391-399.

3. Pašteka R., Richter P., Karcol R., Brazda K., Hajach M. 2009. Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods. Geophysical Prospecting 57:507-516.

4. Pohánka V. 2003. The harmonic inversion method: calculation of the multi-domain density. Contrib. Geophys. Geod. 33:247-266.

5. Sabadošová E. 2012. Church of St George: architectural-historical and art historical research of the walls in the interior of the nave and aisle in the context of overall church history. Yearbook of historical research, report year 2010, The Monuments Board of the Slovak Republic, Bratislava. (in Slovak)