

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Aplikovaná geologie

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



Jana Vovsová

Geofyzikální průzkum v areálu středověké tvrze v Popovicích (okr. Benešov)

The geophysical survey in area of the mediaeval fortress in Popovice

(Benešov county)

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. PhDr. Jiří Dohnal

Praha, 2014

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 2. 5. 2014

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala PhDr. Jiřímu Dohnalovi za to, že se ujal vedení mé práce a podpořil ji svými cennými radami, které mi během jejího vypracování poskytl. Také za pomoc při uskutečňování terénních prací. Dále bych chtěla poděkovat Doc. RNDr. Jaroslavu Knězovi, CSc., RNDr. Zdeňkovi Jáněmu, Mgr. Petru Táboříkovi, PhD., Mgr. Jakubu Hronkovi, Mgr. Josefu Vlčkovi a Martě Vovsové za neocenitelnou pomoc při realizaci terénních prací. V neposlední řadě patří mé díky za informace o tvrzi z archeologického a stavebně historického pohledu Mgr. Vojtěchu Kašparovi a Ing. Michaelu Ryklovi.

Zvláštní poděkování patří majiteli objektu panu Jaroslavu Formánkovi za to, že nám umožnil realizovat několik etap terénního měření.

A dále všem, kteří mi byli při tvorbě této diplomové práce nápomocni a podporovali mne.

Abstrakt

Diplomovou práci na téma „Geofyzikální průzkum v areálu středověké tvrze v Popovicích“ tvoří dvě vzájemně provázané části. První, rešeršní část, shrnuje poznatky o možnostech uplatnění multielektrodové odporové metody v archeologii. Obsahem druhé části je vlastní geofyzikální průzkum areálu popovické tvrze. Po obecných informacích o lokalitě, zahrnujících geologické poměry, geofyzikální prozkoumanost, historii objektu, archeologické poznatky a přehled stavebního vývoje, jsou zde specifikovány metody, které byly pro měření zvoleny: symetrické odporové profilování, dipólové elektromagnetické profilování, multielektrodová odporová metoda a georadarová metoda. Následuje popis terénního měření a metodika zpracování naměřených hodnot. Na závěr jsou na základě zhotovených map a profilových řezů prezentovány výsledky měření a jejich interpretace.

Klíčová slova: geofyzikální průzkum, archeologie, tvrz Popovice (okr. Benešov)

Abstract

The Master's thesis "Geophysical survey in the area of the mediaeval fortress in Popovice" is divided into two parts. The first part is theoretical and summarizes the possibilities of using electrical resistivity tomography method (ERT) in archaeology. The second part deals with the actual geophysical prospecting in the area of the mediaeval fortress in Popovice (Benešov county). General information on the locality including geological setting, past geophysical exploration in the area, history of the object, archaeological findings and overview of construction development are addressed in this part, prior to the description of the field measurements. Methods used on the site are then specified: symmetrical resistivity profiling, dipole electromagnetic profiling, electrical resistivity tomography and ground penetrating radar. Subsequently, the process of field measuring in the area of the fortress is described and the data processing methods are discussed. The results of these measurements and their interpretation on the basis of compiled geophysical maps and sections are presented finally.

Key words: geophysical survey, archaeology, fortress in Popovice (Benešov county).

Obsah

1. Úvod	7
2. Užitá geofyzika a archeologie	8
2.1. Předpoklady a podmínky využití geofyziky v archeologii	8
2.2. Geofyzikální metody a typy archeologických objektů	9
2.3. Multielektrodová odporová metoda a možnosti jejího uplatnění v archeologii	10
2.3.1. Příklady použití multielektrodové metody v archeologii	11
2.3.2. Výběr konfigurace elektrod v závislosti na hledané struktuře	14
3. Tvrz v Popovicích	20
3.1. Geologické poměry území	21
3.2. Geofyzikální prozkoumanost oblasti	23
3.3. Tvrz Popovice – současný stav	24
3.4. Tvrz Popovice – historický přehled	25
3.5. Tvrz Popovice – dosavadní archeologické poznatky	26
3.6. Tvrz Popovice – přehled stavebního vývoje	28
4. Geofyzikální průzkum areálu tvrze v Popovicích	31
4.1. Předpokládané a hledané objekty a jejich fyzikální vlastnosti	31
4.2. Volba geofyzikálních metod	32
5. Metodika měření	35
5.1. Vytyčení měřičské sítě	36
5.2. Geofyzikální měření	36
6. Zpracování naměřených dat	38
7. Výsledky měření a jejich interpretace	41
7.1. Symetrické odporové profilování	43
7.2. Dipólové elektromagnetické profilování	49
7.3. Multielektrodová odporová metoda a georadar (profily M60, P60, P-osa)	52
7.4. Georadarová metoda - interiér jižního křídla	58
7.5. Multielektrodová odporová metoda - 3D verze - předbrání	60

7.6. Souhrn - strukturní schéma	63
8. Závěr	65
9. Seznam použité literatury	67

1. Úvod

Tématem diplomové práce je plošný geofyzikální průzkum areálu středověké tvrze v Popovicích, jižně od Benešova u Prahy. Cílem průzkumu, realizovaného za využití souboru geofyzikálních metod, bylo vyhledávání archeologických objektů souvisejících s nejstaršími stavebními etapami objektu tvrze a s historickým využitím jejího okolí.

Lokalita byla vybrána pro realizaci průzkumu ve spolupráci se zainteresovanými archeology, především Mgr. V. Kašparem, ředitelem pražské pobočky společnosti Archaia o.p.s. Z hlediska poznatků orientačního archeologického výzkumu, který zde již byl v minimálním rozsahu v minulých letech proveden, se lokalita zdála příhodná pro uskutečnění geofyzikálního průzkumu.

V průběhu existence tvrze je doloženo několik stavebních fází, proto lze předpokládat, že se jak v prostoru nádvoří objektu, tak v jeho bezprostředním okolí nacházejí relikty staveb či struktur, spojených se staršími vývojovými etapami tvrze, případně i s novodobými stavbami. Z obecného pohledu se může jednat o historická zdiva pohřbená pod vrstvou zeminy, destrukce kamenných objektů a zahloubené objekty, druhotně vyplněné sekundárním zásypem.

Na základě těchto předpokladů byly zvoleny jako základní prospekční metody symetrické odporové profilování (SOP) a multielektrodová odporová metoda ve variantě 2D (2D-ERT – electrical resistivity tomography). Jako doplňkové metody byly zvoleny metoda dipólového elektromagnetického profilování (DEMP), georadarová metoda (GPR – ground penetrating radar) a multielektrodové měření ve variantě 3D (3D-ERT).

Některé oblasti, kde se pravděpodobně nacházejí pohřbené objekty, bylo možné vytipovat podle výsledků provedených archeologických sond, další podle stavebně historických analogií. Hustota archeologické sondáže však byla velmi řídká, navíc se jednalo o sondy nesystematické, plošně omezené a nehluboké. Naproti tomu geofyzikální metody umožňují prozkoumat v poměrně krátkém čase plošně rozsáhlejší prostory. Mezi objekty předpokládané archeology i stavebními historiky zde patří např. vodní příkop (druhotně zasypaný), který se v současné morfologii terénu nijak

neprojevuje, i když je jasné, že u tvrze v minulosti existoval. Dalším z částečně problematických objektů je původní okružní hradební zeď. Podle jejích reliktních zdivů, jizev po zaniklém zdivu na věži tvrze a historických map lze usuzovat pouze na její přibližný průběh.

Některé ze zvolených metod byly částečně využity i pro průzkum v prostoru současných interiérů v jižním křídle tvrze. Jednalo se o symetrické odporové profilování (SOP) a georadar (GPR). Důvodem tohoto měření byla skutečnost, že v několika z provedených archeologických sond, které přiléhaly k tomuto křídlu (novověký lihovar) byly nalezeny pozůstatky zdiva, jehož další průběh pod současnou stavbou je nejasný. Podle historických údajů se na tvrzi nacházela rovněž kaple. Dnešní dispozice však nic takového nenaznačuje. I tato otázka se objevila v souvislosti s geofyzikálním průzkumem.

2. Užitá geofyzika a archeologie

2.1. Předpoklady a podmínky využití geofyziky v archeologii

„Princip geofyzikálních metod je obecně založen na sledování změn určitých fyzikálních veličin v prostoru. V případě archeologie se pozornost soustřeďuje většinou jen na sledování několika prvních metrů pod zemským povrchem, a to s cílem vyhledat pozůstatky někdejší antropogenní činnosti“ (Kuna et al. 2004). Pokud chceme provést podrobný průzkum lokálních přípovrchových změn, musíme znát a dodržovat podmínky, při kterých je možné úspěšně provádět geofyzikální měření pro archeologické potřeby. Tyto podmínky lze dělit na podmínky všeobecné a na podmínky specifické pro různé geofyzikální metody a pro určitá prostředí sledované lokality. Mezi základní a všeobecně definované podmínky úspěšného použití geofyzikálních metod můžeme řadit:

- a) Dostatečnou fyzikální odlišnost hledaných objektů od geologického prostředí.
- b) Postačující dochování objektů a vrstev pod povrchem.
- c) Dostatečné rozměry a množství archeologických objektů, jejich tvar a orientaci.

- d) Vhodný či alespoň přijatelný tvar terénu a jeho přiměřený vegetační pokryv.
- e) Nepřítomnost mladších objektů a situací, popřípadě jejich snadné odlišení od objektů, které jsou sledované.
- f) Znalost geologické stavby území.
- g) Nepřítomnost rušivých polí vyvolaných recentními objekty přítomnými pod zemí či nad zemí.

(Kuna et al. 2004)

2.2 Geofyzikální metody a typy archeologických objektů

Geofyzikální metody jsou využívány v archeologii od roku 1946. Nejčastěji používané jsou geoelektrické odporové metody, magnetometrie a GPR (Toushmalani 2010).

Geoelektrické metody (odporové metody, konduktometrie, georadar) – nejběžnějšími hledanými a zkoumanými objekty jsou:

- Objekty s kamennou konstrukcí (zdiva, kamenné mohyly, části valů)
- Některé zahloubené objekty (příkopy, jámy)
- Dutiny (sklepy, hrobky, štoly, šachty)

Projevy těchto objektů závisí na jejich konstrukci a odporovém kontrastu vůči okolním horninám či půdnímu profilu. Obecně však platí, že objekty s kamennou konstrukcí a dutiny se projevují zpravidla odpory vyššími a objekty zahloubené (se sekundární výplní) mají většinou odpory nižší (přednáška J. Dohnal).

Magnetometrické metody (magnetometrie, kapametrie) - nejčastější zájmové objekty:

- Zahloubené objekty (příkopy, jámy, sídelní objekty, hroby)
- Vypálené objekty (pece, haldy strusky, ohniště, vypálené objekty, propálené a požárové vrstvy, cihlová zdiva a další)

- Železné předměty

Tyto objekty se projevují odlišnou magnetickou susceptibilitou nebo remanentní magnetizací rozdílnou od okolních hornin. Obecně lze říci, že uvedené objekty charakterizuje zvýšená magnetická susceptibilita a kladné anomálie magnetického pole.

Další geofyzikální metody, které jsou pro potřeby archeologie rovněž používány, avšak v menším měřítku, jsou tyto:

Mikrogravimetrie – hledané a zkoumané objekty:

- Dutiny (hrobky, krypty, sklepy, chodby, montánní objekty)

Seismické metody (mělká refrakční seismika) – používá se pro zjišťování:

- Reliéfu skalního podloží (příkopy a objekty zasekané ve skále)
- Některých objektů s kamennou konstrukcí (zděné základy budov, dutiny)

2.3. Multielektrodová odporová metoda a možnosti jejího uplatnění v archeologii

Multielektrodová odporová metoda nebo také elektrická odporová tomografie (ERT) je používána především pro identifikaci a průzkum mělce uložených nehomogenit. Úspěch této metody je závislý především na rozdílu v odporových vlastnostech archeologických objektů a okolního prostředí. V současnosti je již ve velkém množství případů používána 3D-varianta ERT měření, většinou se však jedná pouze o soustavu paralelních 2D profilů. Při takovémto uspořádání však dochází k částečnému zkreslení výsledků v neměřených oblastech, tj. mezi liniemi profilů (Negri 2008).

Samotný průzkum multielektrodovou metodou nám v některých případech může přinést informace o hloubce a tvaru struktur antropogenního původu a může

pomoci při identifikaci jednotlivých objektů. Metoda se používá především pro detekci těchto struktur:

- Příkopy, jámy a zahloubené objekty
- Zdi, kamenné konstrukce a jejich destrukce
- Hloubka a reliéf skalního podloží
- Dutiny antropogenního původu
- Geologické struktury
- Přítomnost a hloubka hladiny podzemní vody

2.3.1. Příklady použití multielektrodové metody v archeologii

Multielektrodové odporové měření je pro účely archeologie hojně používané. Publikovány byly především výsledky průzkumů lokalit z období neolitu a starověku . V menší míře byly ve světě i v ČR prováděny i průzkumy zaměřené na lokality středověké.

Lokality:

El Pahñú, Mexiko

Archeologické naleziště nacházející se v centrálním Mexiku. Jedná se o systém stavebních komplexů prehispanického osídlení místní kulturou Las Mesas. Pro tuto kulturu je charakteristická výstavba center v blízkosti okraje náhorní plošiny, samotné stavby dosahují výšky i 200 m. Pomocí několika typů roztažení byl proměřen prostor u dvou objektů, a to Hlavní pyramidy (Main Pyramid) a nedaleké menší stavby (Tepcan). Měřeno bylo přístrojem SySCAL-Pro.

Výsledky multielektrodového měření byly korelovány s odporovými údaji získanými v několika oblastech, kde byl indikován konstrukční materiál používaný starověkými obyvateli. V prostoru Main Pyramid byly zjištěny oblasti s vysokými

odpory ($<3000 \Omega\text{m}$), které odpovídají materiálům požitým pro vyrovnání terénu a zásyp základů. Vymapovat oblasti, které byly původními obyvateli vyrovnány nebo případně navýšeny, se podařilo i v prostoru stavby Tepcan (Argote-Espino, Tejero-Andrade, Cifuentes-Nava, Iriarte, Farías, Chávez, López 2013).

Heliké, Řecko

Lokalita nacházející se na severu řeckého poloostrovu Peloponés poblíž města Diaktopon. Účelem průzkumu bylo vymapovat starou římskou silnici, jejíž fragmenty byly odkryty v oblasti Heliké v rámci předchozích vykopávek. Celý průzkum byl realizován na několika dílčích lokalitách. Na základě provedeného testovacího měření na známém úseku silnice bylo rozhodnuto použít konfiguraci dipól – dipól. Měřeno bylo s využitím 24 až 48 elektrod a s krokem měření 1 m. Z výsledků průzkumu vyplynulo, že metoda ERT je schopna identifikovat a mapovat pozůstatky římské silnice, jejíž hloubka byla ve sledované oblasti menší než 2 m pod povrchem (Tsonkas et al. 2009).

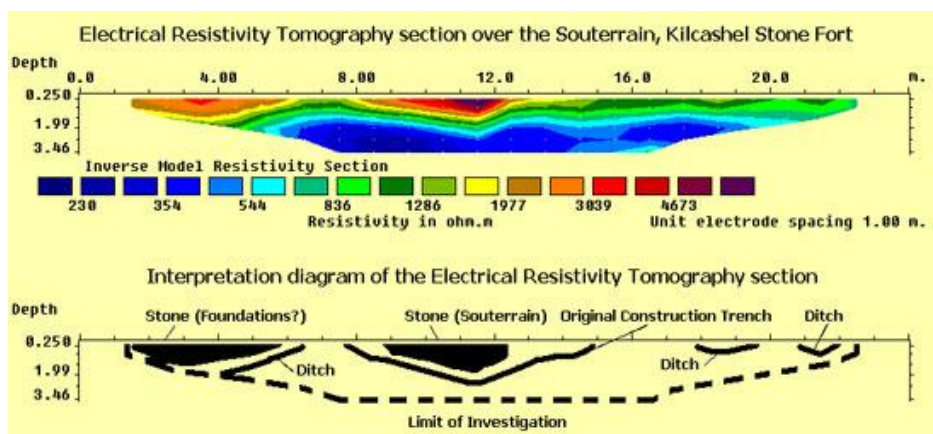
El Shakari, Káhira, Egypt

Palácová stavba El Shakari leží v oblasti s vysokým rizikem seismických pohybů. Geofyzikální průzkum byl zaměřený na upřesnění rizik a nebezpečí, které hrozí paláci El Shakari nejen z hlediska seismicity, ale rovněž v souvislosti s pronikáním slané vody do příbřežní oblasti delty řeky Nilu. Cílem měření metodou ERT bylo stanovení půdních vlastností prostředí, určení vlastností zvodně a dynamiky pohybu slané vody a upřesnění salinity vody v půdním prostředí. Pro měření multielektrodovou metodou bylo použito přístroje Sting R1, konfigurace dipól – dipól s 28 elektrodami a kroku měření 6,25 m. Naměřená data byla kalibrována pomocí údajů získaných z vrtů a na tomto základě následně interpretována.

Provedené měření umožnilo separovat odporově odlišné vrstvy a sledovat podpovrchové podmínky na základě změny elektrického odporu. Výsledky prokázaly, že půdní profil pod palácem El Shakari se skládá ze čtyř dílčích vrstev a také to, že je zde velmi vysoká hladina podzemní vody, která se nachází průměrně 0,5 až 1m pod povrchem (Hemeda 2013).

Kilcaschel, Irsko

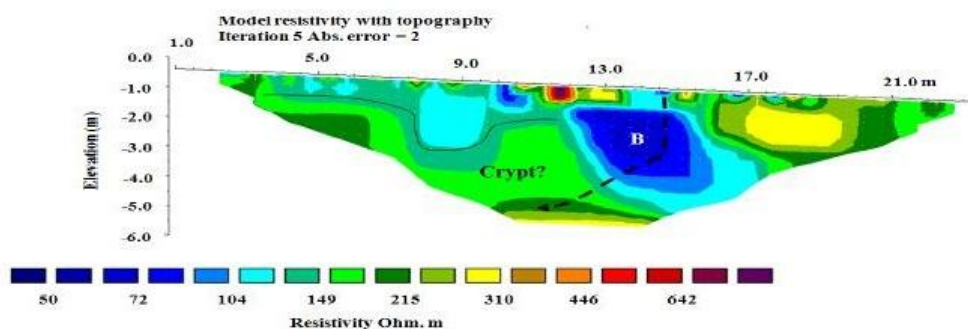
Středověké opevnění Kilcaschel je situováno jižně od vesnice Kilmovee v Irsku. Součástí realizovaného pětiletého multidisciplinárního projektu byl i komplexní průzkum opevnění, jehož cílem bylo objasnit otázky týkající se osídlení, vzniku a vývoje kruhové pevnosti. Nejvýznamnější skupinu objektů lokality tvoří tři dílčí kamenná opevnění na vrcholu pískovcového hřebenu. Dvě z nich byla v průběhu století zničena. Třetí, nejzachovalejší, je národní kulturní památkou, v průměru měří 30 m a je tvořeno 5 m silnou a 3 m vysokou zdí. V průběhu průzkumu byla uskutečněna tři ERT měření nad podzemním kamenným objektem (Souterrain) situovaným v centru tohoto opevnění. Stěny a strop kamenného prostoru jsou na výsledném odporovém řezu (obr. 1) patrné ve formě kompaktní zóny vysokého odporu. Původní stavební jáma se projevuje jako zóna se zvýšeným elektrickým odporem, jež obklopuje podzemní objekt. Další zóna vysokého odporu, která byla registrována na počátku profilu v blízkosti obvodové hradby, může souviset s jejími kamennými základy. Dvě mělké zóny zvýšených odporů naznačují přítomnost nehlubokých příkopů uvnitř opevnění (Bonsall 2010).



Obr. 1 – Odporový řez v linii profilu měřeného ERT nad kamenným objektem a interpretační řez (www.kilcaschel.com)

Occhiolá, Sicílie, Itálie

Městečko Occhiolá se nachází na jihovýchodě Sicílie, na území značně ohroženým zemětřeseními. V městečku je zachovalá zřícenina středověkého hradu. V jeho prostoru probíhal geoelektrický průzkum, který zahrnoval i multielektrodovou metodu. Pro měření ERT byla použita konfigurace dipól – dipól a přístroj A3000-E. Proměřeno bylo celkem deset profilů, šest o délce 30 m a čtyři o délce 23 m. Na jednom z výsledných odporových řezů (obr. 2) je patrné místo, interpretované autorem jako možný projev krypty (Leucci 2012).



Obr. 2 – Odporový řez v linii jednoho z kratších profilů, se zobrazením domnělé krypty (Leucci 2012)

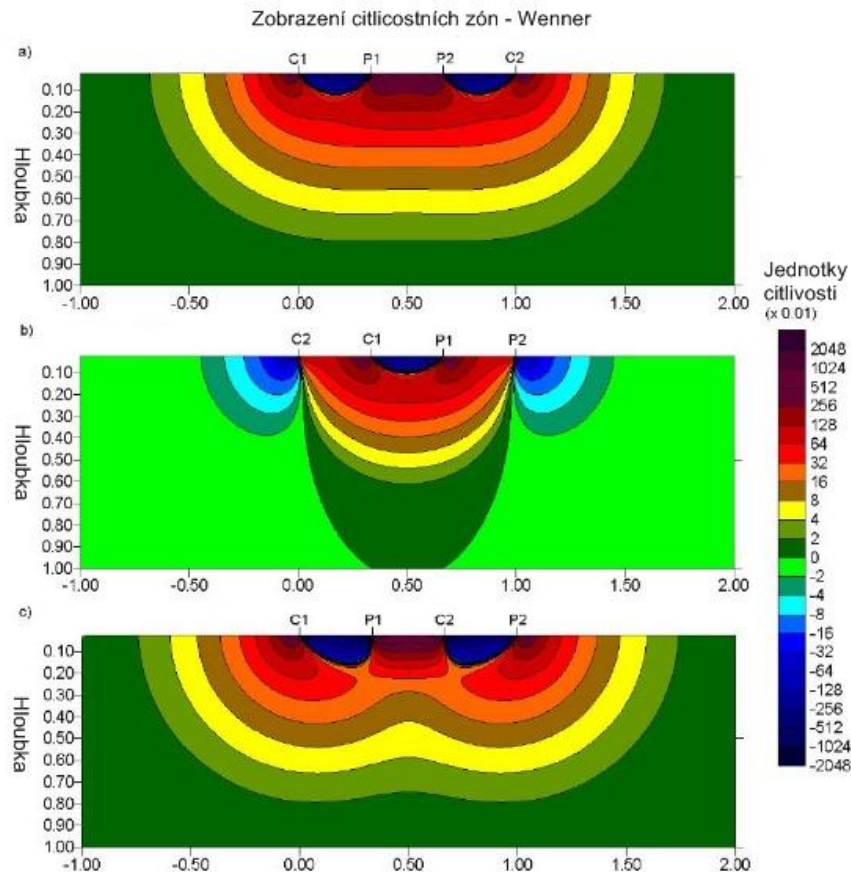
2.3.2 Výběr konfigurace elektrod v závislosti na hledané struktuře

Pro měření multielektrodovou odporovou metodou můžeme obecně volit z několika základních uspořádání elektrod. Každé z nich má své výhody, ale i nevýhody. Volba optimálního uspořádání závisí na typu hledaných struktur, na citlivosti přístroje a na hladině šumu. Mezi základní charakteristiky jednotlivých konfigurací patří hloubkový dosah, citlivost na vertikální a horizontální odporové změny, datové pokrytí a velikost signálu. Prvé dva parametry lze stanovit na základě

„citlivostní funkce“ (sensitivity function) pro model homogenního prostředí. Tato funkce vypovídá o tom, do jaké míry ovlivňuje odporová změna v určitém segmentu řezu měřený potenciál. Čím vyšší je hodnota citlivosti, tím více ovlivňuje příslušný segment měřenou hodnotu, tj. zdánlivý měrný odpor. V této kapitole budou uvedeny základní informace pro vybrané konfigurace elektrod (Loke 2004).

Wennerovo uspořádání reprezentuje osovou konfiguraci čtyř stejně vzdálených elektrod, přičemž 2 jsou proudové (A, B, resp. C1, C2) a 2 měřící (M, N, resp. P1, P2). Podle jejich postavení lze základní konfiguraci dělit na tři dílčí uspořádání, a to: *Wenner-alfa*, *Wenner-beta* a *Wenner-gama*.

Většina měření s *Wennerovým* uspořádáním elektrod je prováděna jako *Wenner-alfa*, což znamená symetrické uspořádání elektrod, tedy konfiguraci AMNB (angl. C1-P1-P2-C2). Na obrázku 3 jsou uvedeny řezy citlivosti do hloubky 1 m pro jednotlivá *Wennerova* uspořádání (délka uspořádání $L = 1$ m). Uspořádání *Wenner-alfa* (a) charakterizuje téměř horizontální průběh izolinií citlivosti (obr. 3, a). Díky tomu je toto roztažení relativně citlivé na odporové změny ve vertikálním směru pod středem roztažení (např. diferenciací horizontálně uložených struktur). Zároveň je však méně citlivé na horizontální odporové změny (např. lokalizace úzkých vertikálních struktur).



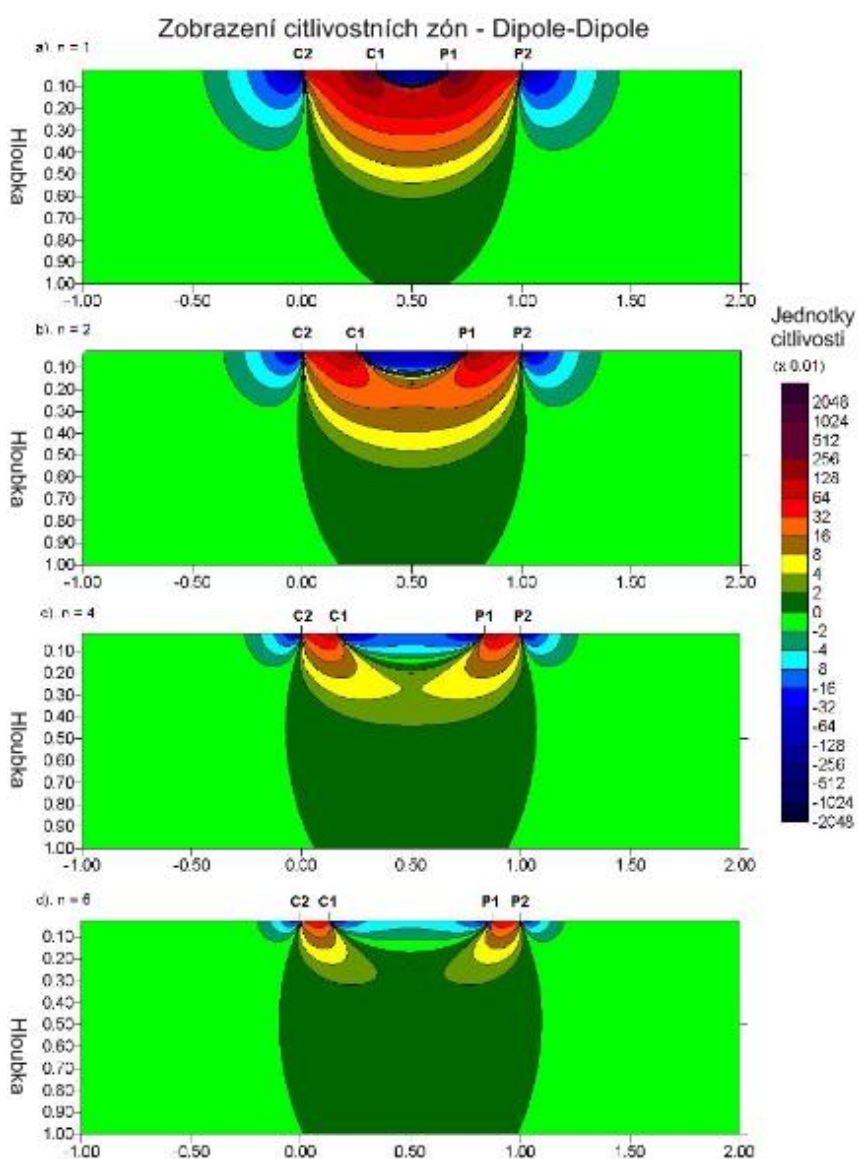
Obr. 3 – Zobrazení řezů citlivosti pro konfigurace: a) Wenner-alfa, b) Wenner-beta, c) Wenner-gamma (Loke 2004)

Druhým typem je uspořádání *Wenner-beta* (obr. 3, b). Jde o speciální případ, kdy se prakticky jedná o konfiguraci *dipól – dipól*, ale se stejnými vzdálenostmi mezi jednotlivými elektrodami (C2-C1-P1-P2). Toto uspořádání elektrod je diskutováno níže.

Posledním typem Wennera je konfigurace *Wenner-gama* (obr. 3, c). Jedná se o relativně málo používané rozložení elektrod, kdy se jednotlivé proudové a potenciálové elektrody střídají (C1-P1-C2-P2). Řez citlivosti má podobný charakter jako u rozložení *Wenner-alfa*. Dochází zde však k posunutí maximální hloubky citlivosti z centrální pozice pod obě vnější elektrody (C1, P2).

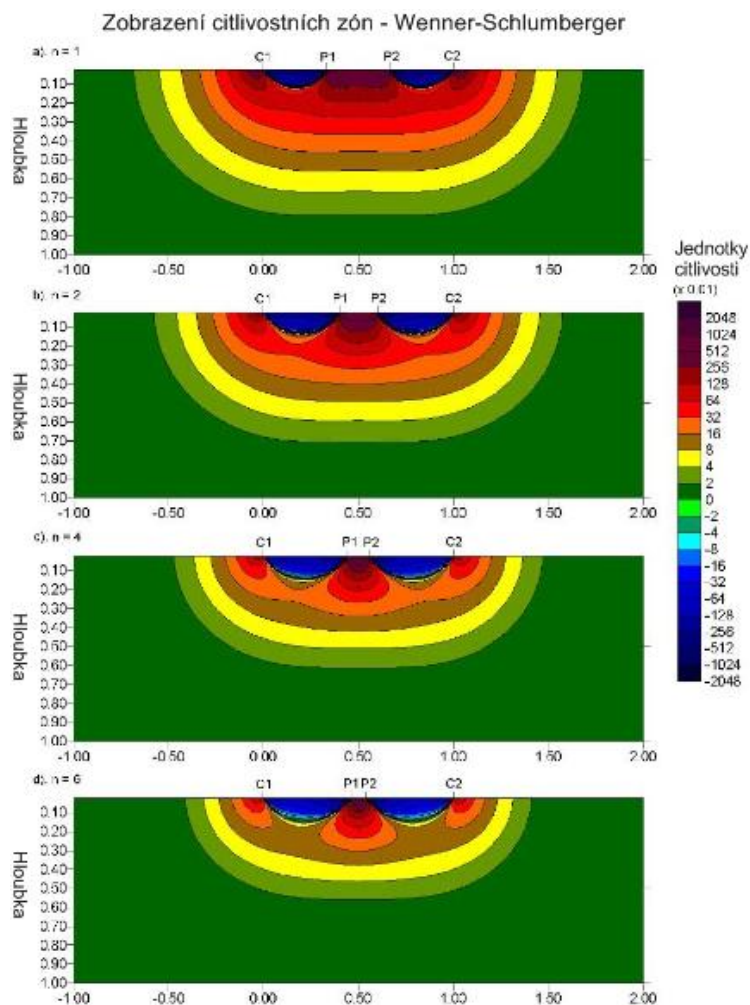
Konfigurace *dipól – dipól* je v praxi relativně často používané čtyřelektrodové uspořádání. V tomto případě jsou elektrody uspořádány vedle sebe v párech – existuje tedy dvojice proudových a dvojice potenciálových elektrod (C2-C1-P1-P2). Vzdalujeme-li dvojice od sebe, zvětšuje se i maximální hloubkový dosah uspořádání.

Řezy citlivosti pro konfiguraci *dipól – dipól* jsou vykresleny na obr. 4, přičemž pod písmeny a) až d) jsou jednotlivé řezy pro vzdalující se dipóly (zvětšuje se vzdálenost n mezi dipóly). Maximální citlivosti jsou obecně pod oběma dipóly. Pokud je n větší než 2, snižuje se horizontální citlivost a zvýrazňuje se vertikální citlivost. To znamená, že konfigurace je citlivější na horizontální změny odporu, ale relativně necitlivá k vertikálním změnám odporu. Toto uspořádání se proto využívá především pro vyhledávání úzkých subvertikálních odporových nehomogenit a dutin, zatímco hůře diferencuje subhorizontální struktury. Hlavní nevýhodou konfigurace *dipól - dipól* je výrazný pokles velikosti signálu (měřeného napětí) pro větší n .



Obr. 4 – Zobrazení řezů citlivosti pro konfiguraci dipól – dipól: a) $n=1$, b) $n=2$, c) $n=4$, d) $n=6$ (Loke 2004)

Konfigurace elektrod *Wenner – Schlumberger* je kombinací dvou dílčích uspořádání, a to Wennerova a Schlumbergerova. Konfigurace Wenner je popsána výše. Schlumbergerovo uspořádání je stejně jako Wennerovo symetrické (C1-P1-P2-C2), ale charakterizuje je skutečnost, že vzdálenost mezi proudovými elektrodami C1 a C2 je (výrazně) větší než trojnásobek vzdálenosti měřících elektrod P1 a P2. Jedná se o velmi často využívané uspořádání. Pokud zkombinujeme obě uvedené konfigurace, dostaneme řezy citlivosti, jejichž charakter závisí na parametru n , který je definován jako poměr vzdáleností C1P1 a P1P2 (obr. 5). Z obrázku je vidět, že pro $n=1$ (Wenner) mají izolinie citlivosti převážně horizontální průběh a vysoké hodnoty citlivosti jsou soustředěny nejen mezi elektrodami P1 a P2 ve středu roztažení, ale i pod elektrodami C1 a C2. Pro $n=6$ (Schlumberger) tvoří maximum citlivosti lalok mezi elektrodami P1 a P2, který je minimy oddělen od vyšších citlivostí v blízkosti elektrod C1 a C2. Z toho vyplývá, že toto uspořádání elektrod je relativně citlivé jak pro horizontální struktury (nízká „ n “), tak pro struktury vertikální (vysoká „ n “). Proto se uspořádání *Wenner – Schlumberger* často používá jako kompromis mezi konfiguracemi *Wenner* a *dipól – dipól*, a to zvláště při průzkumu lokalit s více komplikovanými strukturálními poměry.



Obr. 5 – Zobrazení řezů citlivosti pro konfiguraci Wenner – Schlumberger: a) $n=1$, b) $n=2$, c) $n=4$, d) $n=6$ (Loke 2004)

Jednotlivá uspořádání elektrod se liší i maximálním hloubkovým dosahem. Jako parametr se často uvádí (Loke 2004) hodnota z_e , označovaná jako střední hloubka průzkumu a odpovídající hodnotě mediánu na křivce závislosti citlivosti na hloubce. Relativní hodnoty tohoto parametru (normováno délkou uspořádání L) pro základní konfigurace elektrod jsou následující:

Wenner-alfa	0.173	Dipól – dipól (osové, $n=1$)	0.139
Wenner-beta	0.139	Dipól – dipól (osové, $n=3$)	0.192
Wenner-gama	0.198	Dipól – dipól (osové, $n=6$)	0.216
Wenner – Schlum. ($n=1$)	0.173	Dipól – dipól (ekvat., $n=1$)	0.319
Wenner – Schlum. ($n=3$)	0.189	Dipól – dipól (ekvat., $n=2$)	0.362
Wenner – Schlum. ($n=6$)	0.191	Dipól – dipól (ekvat., $n=4$)	0.377

Z uvedených hodnot je zřejmé, že pomineme-li provozně nepraktické *dipólové ekvatoriální uspořádání* a *dipólové osové uspořádání* s větší vzdáleností dipólů, pak relativně „příznivý“ hloubkový dosah odpovídá konfiguraci *Wenner – Schlumberger*.

3. Tvrz v Popovicích

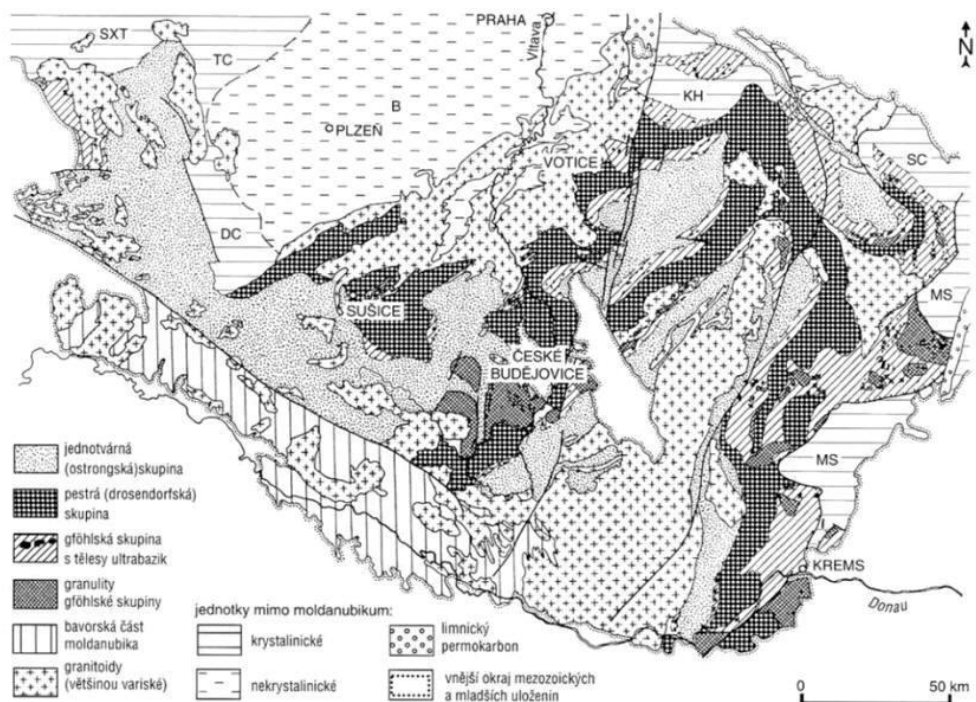
Obec Popovice se nachází ve Středočeském kraji (dříve okres Benešov). Je situována 11 km jihovýchodně od města Benešov, mezi městy Votice a Vlašim. Západně od ní probíhá hlavní silniční tah mezi Prahou a Tábořem, známý pod názvem E55. Vlastní lokalita, tj. tvrz, je situována na břehu Popovického rybníka - jižně od centra obce, v blízkosti návsi a obecního úřadu (obr. 6). GPS souřadnice objektu tvrze jsou $49^{\circ}41'42.044''\text{N}$, $14^{\circ}45'6.195''\text{E}$, nadmořská výška terénu je cca 455 m.



Obr. 6 – Ortofotomapa – umístění stavby tvrze v centru obce Popovice u Benešova - v těsné blízkosti návsi a kostela (www.mapy.cz)

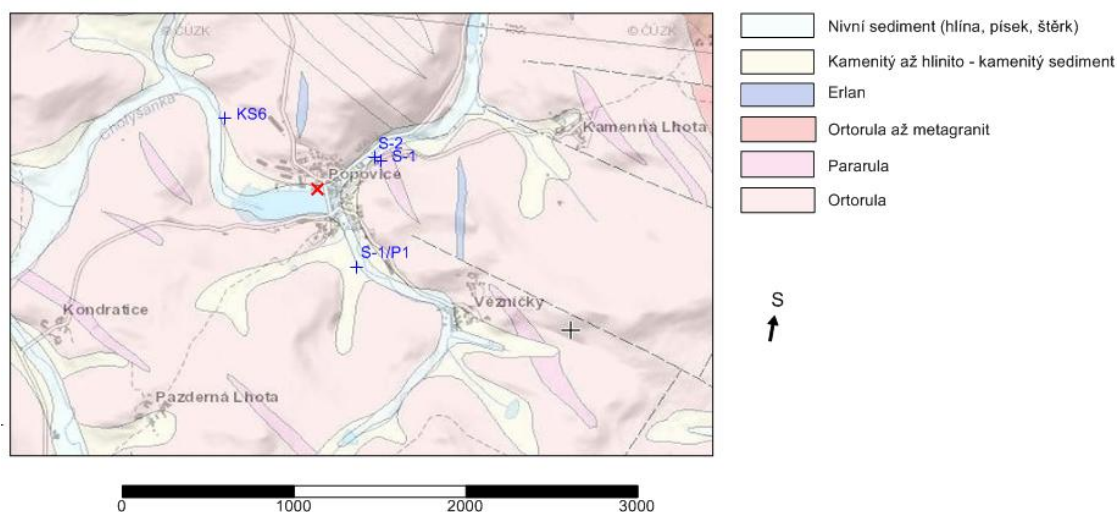
3.1. Geologické poměry území

Oblast v širším okolí Popovic náleží z geologického hlediska k českému moldanubiku (obr. 7), jehož stáří se pohybuje v rozmezí 2,1 mld až 370 Ma let. Z hornin jsou zde zastoupeny především metamorfity s vysokým stupněm metamorfózy, které jsou prostoupeny plutonickými horninami. Ty již nebyly metamorfovány, neboť vznikaly až během variské orogeneze. U většiny metamorfitů se předpokládá středně až spodně proterozoické stáří. V moldanubické jednotce se rozlišují dvě dílčí jednotky, které se označují jako jednotvárná a svrchní (neboli pestrá). Horninové složení jednotvárné jednotky je značně monotónní, převažují zde především biotitické pararuly, zatímco pestrá jednotku charakterizují kromě pararul četné vložky krystalických vápenců, amfibolitů, kvarcitů a grafitických hornin (Petránek 1993).



Obr. 7 – Zjednodušená geologická mapa moldanubické oblasti (Chlupáč 2002)

Skalní podklad obce Popovice tvoří leukokratické migmatity (obr. 8) paleozoického až proterozoického stáří. V okolí obce se v migmatitech nacházejí polohy erlanu, amfibolitu a ortoruly téhož stáří a také drobné intruze variského granitu, žádná z těchto pestrých vložek však nezasahuje do prostoru proměřované lokality. Východně od obce bylo vymapováno několik paralelních zlomových struktur směru ZSZ-VJV a výraznější zlomové pásmo směru JJZ-SSV. Nezpevněný kvartérní pokryv tvoří z větší části kamenité až hlinito-kamenité sedimenty deluviálního charakteru. V těsné blízkosti potoků a rybníční nádrže se nachází nezpevněný fluvialní nivní sediment, který je tvořený hlínou, pískem a štěrkem (mapy.geology.cz 2013).



Obr. 8 – Geologická mapa obce Popovice a jejího okolí - červený křížek znázorňuje polohu tvrze, modré křížky umístění vrtů (http://mapy.geology.cz/geocr_50/)

Na katastrálním území obce Popovice se podle databáze Geofondu (<http://mapy.geology.cz>) nacházejí čtyři vrty (obr. 8). Dva z nich jsou klasifikovány jako studny a dva jako svislé vrty pro inženýrsko-geologické účely. Ani jeden z těchto vrtů však nedosahuje hloubky 10 m, nejhlubší je vrt s označením KS6. Jedná se o studnu hlubokou 7,5 m, která se nachází přibližně 640 m severozápadně od tvrze. Studna je hloubená a zasahuje až do skalního podloží, které reprezentuje rula postupicko-podolského komplexu. Kvartérní sedimenty dosahují mocnosti 5,0 m a tvoří je přípovrchová hnědá silně humózní hlína, která postupně přechází přes písčité

jíl k hrubému štěrku s balvanitou sutí a písčitojílovitým pojivem. Druhý nejhlubší je svislý vrt S-1, vyhloubený pro inženýrsko-geologické účely. Nalézá se přibližně 350 m severovýchodně od tvrze. Počva vrtu je v hloubce 6,8 m a zasahuje do podložní rozpukané ortoruly, nezpevněné kvartérní sedimenty zde dosahují mocnosti 6,0 m. V těsné blízkosti vrtu S-1 se nachází další svislý vrt označený jako S-2 a sahající do hloubky 4,5 m. I tento vrt zastihl v podloží silně rozpukanou a zvětralou ortorulu. Téměř celou délku vrtu však představují kvartérní sedimenty o mocnosti 3,0 m. Posledním objektem je studna označená jako S-1/P1 a nacházející se 500 m jihovýchodním směrem od tvrze. Skalní podklad studny hluboké 5,0 m tvoří kompozitní křemenná rula. I u tohoto objektu dosahují kvartérní sedimenty malé mocnosti, a to 3,5 m. Jejich sled začíná tmavohnědou ornici, na ni navazuje písčitojílovitá zemina obsahující drobný štěrk, poté následuje silně zvodnělý písek a pod ním se nachází hrubě písčité zemina. Mezi kvartérními uloženinami a matečnou horninou se nalézá ještě vrstva navětralé podložní ruly.

3.2. Geofyzikální prozkoumanost oblasti

V oblasti bylo v minulosti provedeno několik geofyzikálních měření, všechna však měla velkoplošný charakter. Nejstarší byl aerogeofyzikální průzkum, jehož výstupem byla Letecká magnetická a radiometrická mapa ČSR 1 : 200 000 (Hrách, Jelen, Mašín, Matolín a Zemánek 1959). Následoval plošný gravimetrický průzkum, jehož výsledky jsou uvedeny ve zprávě Gravimetrické mapování 1959 (Olejník 1960). Dále se území dotýkají dvě práce, a to Zpráva o leteckém geofyzikálním měření v roce 1961, III. Pelhřimovsko (Řeháčková, Šalanský, Zemánek 1962) a Základní geofyzikální výzkum, letecké geofyzikální mapování, XII. Střední Čechy (Manová, Šalanský 1972). Nejmladším materiálem je práce s názvem Strukturní schéma Českého masivu na základě geofyzikálních indikací, etapa 1983 (Blížkovský, Novotný, Pokorný, Rejl a Šalanský 1984). Vzhledem k tomu, že se ve všech jmenovaných případech jedná o velkoplošné průzkumy s výstupy velkých měřítek, tak žádná z uvedených zpráv není využitelná pro moji diplomovou práci.

Ve větší vzdálenosti od území obce Popovice se nacházejí 3 liniové profily, z nichž dva byly proměřeny hlubinným seismickým sondováním (Beránek, Červený, Dudek, Holub a Suk 1970) a jeden pomocí gravimetrie (Obr, Sedlák, Šrámek 1996). Je zřejmé, že žádné z těchto profilových měření nepřineslo informace využitelné při interpretaci průzkumu v prostoru tvrze.

3.3. Tvrz Popovice – současný stav

Vodní tvrz v Popovicích je architektonicky zajímavým objektem. Velikostí se řadí na přechod mezi tvrzi a hradem, proto bývá někdy označována i jako „hrádek“ nebo „zámek“. Dnešní objekt tvrze je čtyřkřídlou jednopatrovou stavbou na půdorysu tvaru hranatého písmene C s okosenou severozápadní částí a o rozměrech přibližně 30 x 37 m. Jižní stranou přiléhá tvrz k Popovickému (Mlýnskému) rybníku, v jejím severním předpolí jsou novější stavby, které bývaly součástí hospodářského dvora (viz obr. 6). Vnitřní rozměry nádvoří utvářeného do tvaru písmene L jsou 9 (18) x 16 m.

Východní křídlo tvoří nejstarší středověká gotická věž. Navazující zdivo severního palácového křídla pochází z období pozdní gotiky až renesance. Spojovací trakt severního a západního křídla obsahuje bránu s průjezdem a gotickým portálem. Západní část má renesanční vnější obvodové zdivo, ale ostatní je převážně barokní. Na vnější straně jsou zde patrné oblouky, odlehčující původně obvodovou zeď nad později zasypaným vodním příkopem. Jižní křídlo bylo přistavěno až v 2. polovině 19. století v souvislosti s využitím objektu tvrze jako lihovaru. Na jihovýchodě uzavírá prostor tvrze relikv hradební zdi.

Současná etapa vývoje objektu začala po roce 1989, kdy byla tvrz restituována, potomkům původních majitelů však byla navracena v havarijním stavu. V polovině 90. let 20. století započaly na objektu záchranné práce, zahrnující především nové zastřešení a statické zajištění objektu. Celá stavba byla roku 1996 zařazena do Programu záchrany architektonického dědictví ČR. V roce 2000 byla zahájena stavební etapa označovaná jako „celková obnova tvrze“. Začátkem nového století byly obnoveny krovy a střechy. Pro další fáze rekonstrukce byla naplánována řada stavebních prací, jako např. dokončení oprav západního paláce, oprava a zajištění severního paláce a jižního křídla, oprava zbytků hradební zdi, náhrada chybějících

oken a další. Opravy exteriérů, ale i interiérů stále probíhají a v závislosti na finančním zajištění jsou naplánovány i do budoucnosti (Kebort 2002).

3.4. Tvrz Popovice – historický přehled

První písemná zmínka o Popovicích pochází z predikátu Havla z Popovic z roku 1295, z textu však jasně neplyne, jestli se jedná právě o Popovice u Benešova. Nejstarším prokázaným držitelem obce i „hradu“ byl Ondřej, který žil v letech 1354-1375. Po něm následovala až do dob husitských válek řada majitelů, z nichž mezi významnější patřil král Václav IV., Reuvald z Ústupenic, Zbraslavský klášter a Václav ze Všeradic. Z tohoto období, přesněji z roku 1406, také pochází zmínka, že na tvrzi byly slouženy mše, což svědčí o existenci kaple. Roku 1420 byl „hrádek Popovice“ dobyt husity pod vedením hejtmána Mikuláše z Husi. K roku 1450 se uvádí Oldřich z Popovic a brzy poté se zde usadili Popovští z Božejovic, v jejichž držení zůstaly Popovice nejméně do roku 1549. Někdy v této době proběhla i renesanční přestavba tvrze. Roku 1574 se ve zmínkách o tvrzi uvádí i městečko a samotná tvrz je od tohoto data až do roku 1630 ve vlastnictví příslušníků rodu z Říčán. Dnešní podobu získala tvrz přestavbou na barokní zámek v letech 1729-1737, kdy byl objekt v držení Řádu křížovníků s červenou hvězdou. Ve stejné době byly vystavěny i barokní budovy přilehlého hospodářského dvora. V roce 1797 byly Popovice připojeny k panství Jemniště (Kebort 2002).

Na počátku 19. století se začalo měnit využití tvrze, z panského sídla se stal hospodářský objekt. Roku 1829 však byla budova tvrze neobydlená a zchátralá. Z tohoto stavu ji zachránil textilní magnát J. S. Wahle, který si tvrz pronajal. Později ji jako součást panství Jemniště zakoupil hrabě Zdeněk ze Šternberka. V roce 1878 byly některé prostory objektu (západní křídlo) adaptovány pro nově zřízený provoz lihovaru.

Se vznikem samostatného Československa byla tvrz zahrnuta do první pozemkové reformy a dále se využívala jak k bydlení, tak jako provozovna lihovaru. V roce 1927 si tvrz pronajal Josef Řezníček a roku 1929 ji koupil jeho syn Josef

Řezníček ml., jenž byl majitelem až do roku 1948, kdy byla tvrz znárodněna. Později se do budovy nastěhovalo zemědělské družstvo. Díky tomu podlely cenné prostory interiérů a jejich výbava devastaci, neboť pro potřeby skladů nebylo luxusu potřeba.

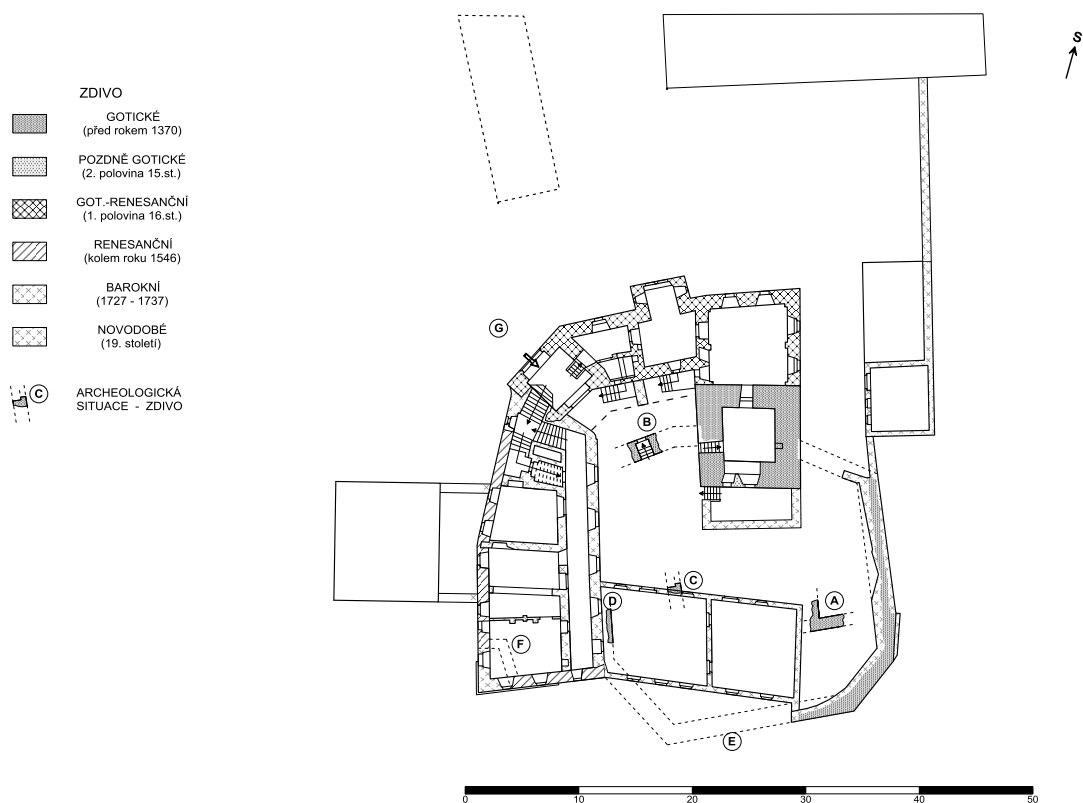
Během totalitní doby nejdříve objekt chátral, i v tomto čase však existovaly plány na jeho jiné využití. Roku 1971 zde měl být zřízen depozitář Okresního muzea v Benešově. V roce 1975 byla převedena správa objektu na Muzeum okresu Benešov. Téhož roku byla vypracována diplomová práce zaměřená na případnou rekonstrukci tvrze. Další architektonická studie byla vytvořena roku 1987 pro přestavbu objektu na rekreační a vzdělávací středisko. Ani na tento projekt však nebyly poskytnuty dotace. Po pádu režimu v roce 1989 byla tvrz v restitučním řízení navrácena dětem původního majitele pana Josefa Řezníčka (Kebort 2002).

3.5. Tvrz Popovice – dosavadní archeologické poznatky

Od roku 1999 bylo v areálu objektu tvrze provedeno, vesměs pod vedením archeologa Mgr. V. Kašpara ze společnosti Archaia o.p.s., několik archeologických sond.

První archeologická sondáž se realizovala roku 1999 v souvislosti s výstavbou čističky odpadních vod. Výkop byl situován mezi jižním křídlem a polygonální hradbou (obr. 9, pozice A) a zachytil korunu dvou středověkých zdí ve tvaru písmene L. Lze předpokládat, že se jedná o relikv původní zástavby jihovýchodního segmentu jádra gotické tvrze.

Dalším archeologicky zdokumentovaným nálezem (P. Vařeka) je pozůstatek pozdně gotického portálu, který byl odkryt v prostoru nádvoří naproti dnešnímu průjezdu a je orientován směrem k severozápadu (obr. 9, pozice B). Tento portálek byl dodatečně přetnut hradbou a nejspíše vedl na schodiště do polosuterénu přiléhajícího k hradbě zevnitř.



Obr. 9 – Půdorys tvrze v Popovicích se znázorněním jednotlivých stavebních fází (upraveno podle Rykl 2010) a středověkého zdiva z archeologických sond (Kašpar 2005)

Další archeologická sonda byla provedena při severní stěně jižního křídla, které bylo vystavěno okolo roku 1900. I zde byly nalezeny zbytky staršího zdiva (obr. 9, pozice C) pocházejícího patrně ze stavební fáze I nebo II, ale prokazatelně využitého i později (viz kapitola 3.6), kdy byly použity velké cihly, maltové směsi a kletované omítky stejně jako při stavbě renesančního západního křídla. Mohlo se jednat o zaniklou jv. část tohoto křídla nebo o jeho východní rizalit. Další zdivo zaniklé partie renesančního křídla, které patrně využilo základy starší obvodové hradby, bylo odkryto sondáží v západní části interiéru jižního křídla (obr. 9, pozice D). Pod podlahou současného západního křídla byly při rekonstrukci nalezeny zbytky jižního rizalitu (obr. 9, pozice F). Jeho umístění odpovídají i stopy na vnější fasádě, které jsou patrně dodnes.

Pro vymezení areálu nejstarší fáze tvrze je klíčový průběh původní obvodové hradby mocné téměř 2 m. Její část se zachovala jihovýchodně od věže. Nejedná se

ovšem o původní hradební zeď v plném rozsahu, ale o její opravované pozůstatky. Severní průběh obvodové hradby dokládají jizvy po jejím odbourání, které jsou patrné na východní a západní straně zdi věže. Jižní pokračování hradební zdi bylo zrekonstruováno podle mapy Stablního katastru (obr. 9, pozice E).

Před vstupní branou vně tvrze byly v rámci mělkých výkopů zjištěny dva historické mostní oblouky (obr. 9, pozice G), situace však nebyla detailně zdokumentována. Kamenný oblouk vzdálenější od brány pochází nejspíše z období výstavby tvrze a původně nesl pevnou mostovku umožňující přístup k padacímu mostu. Oblouk blíže ke vstupní bráně (obr. 10) je také zděný z kamene a vystavěn byl zřejmě na místě původního padacího mostu v pozdějším období. Až do té doby byl padací most jedinou možností jak tvrz uzavřít, o čemž svědčí závěsy brány, které byly vlámány až po zániku jeho funkce.



Obr. 10 – Výkop na pozici G odkrývající mostní oblouky (Rykl 2010)

3.6. Tvrz Popovice – přehled stavebního vývoje

V dlouhé historii tvrze, od okamžiku založení až dodnes, se její stavební podoba měnila, někdy v důsledku válečných událostí, jindy i v dobách míru.

Z pohledu stavební historie byly pro středověký vývoj objektu vyčleněny tři základní stavební fáze s řadou mikrofází (Rykl 2010). V této kapitole bude postupně charakterizována každá z nich.

Fáze I (tzv. předhusitská – 3. čtvrtina 14. století)

Patrně po polovině 14. století byla vystavěna věž obdélníkového půdorysu. Ta byla zasazena do *polygonální hradební zdi* o šířce 190 cm a výšce přesahující 7 m. Z této zdi se do dnešních dní kromě jizev na věži zachoval jen fragment na jihovýchodě. Věž měla za úkol chránit vstup do tvrze, který vedl ze severozápadu, tedy někde poblíž dnešního vstupu. Samotná věž se členila na několik pater. Nejspodněji se nacházel polosuterén přístupný z nádvoří skrze šíji, nad ním bylo zvýšené přízemí a první patro. Vstup do přízemí vedl od jihu, do patra z hradebního ochozu od západu. Předpokládá se, že věž nemohla být v první fázi jedinou stavbou v prostoru tvrze. V místech nádvoří se musela nacházet i *obytná budova* (palác). Její poloha se předpokládá v jižní části ohrazeného areálu, která byla až do konce 19. století „nezastavěná“. Není však jasné, zda obytná stavba stála samostatně, nebo zda byla připojena k věži. V druhém případě by její součástí mohla být vstupní šíje do polosuterénu a potažmo i do přízemí věže. S hypotetickými obytnými budovami této fáze mohou souviset relikty zdiva nalezené v pozici A a případně i C.

V roce 1998 byly v mladším zásypu nalezeny dva fragmenty žeber o „hruškovcovém“ profilu. Ve stávajícím objektu tvrze ani v prostoru presbyteria blízkého kostela sv. Jakuba však nikde žádná žebrová klenba neschází, ani zde nejsou známky případné opravy stávajících kleneb. Profilace nalezených žeber přitom naznačuje, že mohou pocházet ještě z předhusitského období. Hypoteticky tak lze tyto architektonické články spojovat s neznámým objektem *kaple*, jejíž přítomnost naznačuje zápis z roku 1406.

Fáze II (pohusitská oprava a následující rozšíření – 2. polovina 15. století)

V době husitských válek byla tvrz zpustošena, což kromě písemných údajů dokazuje i nález stop požáru pod omítkou věže a přítomnost popelovité vrstvy (spáleniště) v jedné z archeologických sond (pozice C). Proto bylo nutné v druhé polovině 15. století objekt tvrze opravit. V rámci těchto stavebních prací byly zásadně upraveny interiéry a vstupní části věže a na hradbě byl zbudován krytý ochoz. V této

době mohla věž částečně plnit i obytnou funkci, nicméně je průkazné, že sama o sobě nemohla pro obytné účely postačovat.

Jako obytné stavby mohly sloužit buď zachované objekty z *fáze I* nebo vznikla zástavba nová. Podle Rykla (2010) byl jako hlavní obytný prostor využíván po opravě objekt na jihu (pozice C) a snad i objekt na JV (pozice A). Z nálezu šíje s gotickým portálkem proti dnešnímu průjezdu (pozice B) vyplývá existence zaniklého polosuterénu, těsně přiléhajícího zevnitř k hradbě. Účel této stavby, která vznikla patrně na přelomu 15. a 16. Století, není zcela jasný, ale mohlo se jednat např. o vstup do sklepa (pro zásobování zaniklé budovy) přímo z vnější strany hradby.

Fáze III (1. polovina 16. století a dále)

Od konce 15. do poloviny 16. století prošla tvrz řadou stavebních úprav, rozšiřování a přestaveb, které byly zcela dokončeny až v závěru 16. století. Jednalo se o několik stavebních fází a mikrofází, které na sebe navazovaly. Nově vzniklé budovy byly stavěny v severní a západní části areálu původního jádra.

Jako první vzniklo *severní křídlo*, které svým půdorysem zvenčí a s odstupem kopírovalo původní hradbu. Prostory křídla jsou podsklepené a předpokládá se, že sklepy byly založeny do původního příkopu. Severní segment staré hradby západně od věže byl zkrácen a ponechán jako tzv. opěrák. Východně od věže zůstala hradba zachována. Její celkové odstranění proběhlo až v baroku, což dokazují jizvy v omítce věže. Na nádvoří se vstupovalo skrz průjezd umístěný v západní části nového severního křídla. Portál průjezdu byl původně osazen padacím mostem, vrata byla vsazena až později - v rámci barokní přestavby. Příkop situovaný před průjezdem překonával *most*, který měl jedno pole klenuté a druhé přilehlé k portálu padací. Později byl segment s padacím mostem nahrazen druhým zaklenutým polem. Dnes jsou příkop i zbytky mostu zasypány. Obytná část severního křídla je situována severovýchodně od průjezdu a v přízemí ji tvoří tři prostory (sín, světnice s později přistavěným rizalitem a sál).

Západní křídlo vzniklo buď současně, nebo v těsné časové návaznosti na výstavbu křídla severního. Jeho původní podoba se i přes razantní barokní přestavbu částečně zachovala dodnes. Vzhledem k bažinatému terénu v blízkosti rybníka byla jeho západní obvodová zeď vynesena na arkádách, které byly založeny do starého

příkopu či parkánu. Prostory „paláce“ tvořilo zvýšené přízemí, pod kterým mohly být umístěny mělké sklepy. Vnější obrys křídla byl na západě zvýrazněn dvěma rizality, které jsou patrné dodnes. Směrem k rybníku vystupoval z fasády ještě jižní rizalit. Archeologicky bylo potvrzeno prolomené jz. nároží (pozice F). Východní, nádvorní, zeď západního křídla nebyla dosud zjištěna, pravděpodobná je souvislost s archeologicky zachycenými zdívy v pozicích D a C, která naznačují i možnou existenci jv. rizalitu. Funkce západního křídla není doposud jasná, mohlo se jednat o další členěnou bytovou jednotku nebo o reprezentativní prostory sálového charakteru.

4. Geofyzikální průzkum areálu tvrze v Popovicích

4.1. Předpokládané a hledané objekty a jejich fyzikální vlastnosti

V prostoru tvrze v Popovicích lze předpokládat několik druhů zájmových archeologických objektů. V první řadě jsou to pohřbená zdiva a jejich relikty. Je zřejmé, že v různých stavebních fázích mohly být použity různé stavební materiály, nejprve kameny, později i cihly. Oba tyto materiály se nicméně projevují v odporových metodách zvýšenými hodnotami odporů (Hašek, Měřínský 1991). Pokud by byla pro vyhledávání zdív použita magnetometrická metoda, závisel by výsledek především na remanentní magnetizaci použitého materiálu (cihly mají obecně vyšší) a na rozdílu jeho susceptibility od susceptibility okolních zemin a hornin.

Dalším cílovým objektem byly zahloubené objekty, především zaniklý vodní příkop se sekundární výplní. Vzhledem k vyšší mocnosti kvartérních sedimentů, která je známa z nedalekých vrtů, můžeme předpokládat, že vodní příkop byl zahloubený v nezpevněných uloženinách a nikoliv zasekaný do pevné podložní horniny. Podle typu výplně by se proto v odporových metodách mohl projevit jak zvýšenými odpory (výplň s převahou hrubé frakce), tak odpory sníženými (převaha jemné frakce) (Hašek, Měřínský 1991). Při použití magnetometrické metody by závisel výsledek především

na magnetické susceptibilitě použitého výplňového materiálu a na diferenci susceptibilit výplně a okolních zemin či hornin.

Měrné odpory relevantních zemin a hornin jsou v následující tabulce

Hornina	Měrný odpor ρ [Ωm]
Hlíny	10^{-1} až 10^2
Jíly	10 až 10^2
Písky	10^2 až 10^4
Pískovce	10^2 až 10^4
Ruly	10^2 až 10^4
Ortoruly	10^4 až 10^6
Pararuly	10 až 10^5

Tabulka č. 1 – Měrné odpory vybraných sedimentárních a magmatických hornin (Mareš et al. 1990)

4.2. Volba geofyzikálních metod

Pro průzkum byly zvoleny geofyzikální metody tak, aby splňovaly požadavky účelu zpracovávané diplomové práce. V první řadě se jednalo o lokalizaci dosud neznámých archeologicky významných objektů v celém zájmovém prostoru, kromě toho však i o ověření a prohloubení dosavadních archeologických a stavebně-historických poznatků. K vymezení průběhu zaniklého hradního příkopu a dále zjištění pohřbeného zdiva, kamenných destrukcí a zahloubených objektů byla plošně použita geoelektrická metoda symetrické odporové profilování (SOP). Tato metoda je optimální především pro plošně rozsáhlé průzkumy, kdy je cílem zjistit přítomnost odporových nehomogenit relativně malých rozměrů, což případ tvrze v Popovicích dostatečně splňuje. Další geoelektrickou metodou, která byla použita plošně, bylo dipólové elektromagnetické profilování (DEMP). I v tomto případě se jednalo především o lokalizaci archeologických objektů (ve větší hloubce), avšak díky měření složky „inphase“ umožňuje tato metoda i vyhledávání objektů s vyšší magnetickou susceptibilitou než vykazuje okolní prostředí.

K těmto plošně použitým metodám byly pro detailizaci vybrány dvě metody profilového charakteru. Jednalo se o multielektrodové odporové měření (ERT) a

georadarovou metodu (GPR), přičemž obě metody se také řadí mezi geoelektrické metody. Multielektrodové odporové měření umožňuje vykreslit v linii profilu hloubkový odporový řez. Na základě tohoto řezu lze interpretovat archeologické a jiné odporově kontrastní objekty, ale současně, pokud se měřením dostaneme do patřičné hloubky, lze identifikovat i hranici podložní horniny (je-li odporově odlišná od svého nadloží). Další z použitých metod bylo georadarové měření. Jedná se o metodu, která pracuje na principu odrazu vyslaných elektromagnetických vln od různých rozhraní a jejich následném příjmu. Ze získaného souboru dat lze dostat podobné informace, jako by byla použita mělká seismika. Hloubkový dosah je však závislý na parametrech prostředí a frekvenci použité antény. Metodou GPR je tedy možné detekovat některé relativně mělce pohřbené objekty, avšak hranici pevného skalního podloží pouze v některých případech. Poslední použitou metodou bylo opět multielektrodové měření, tentokrát však ve variantě 3D-aplikace. Znamená to, že při samotném měření nejsou elektrody umístěny v jedné profilové linii, ale v pravidelné síti paralelních profilů vytvářejících čtvercovou nebo obdélníkovou plochu. Takovýto postup měření umožňuje po zpracování dat vykreslení jak vertikálních, tak i horizontálních odporových řezů.

Z dalších metod použitelných pro průzkum byla zvažována magnetometrie a mělká refrakční seismika. Magnetometrie obecně vypomáhá při lokalizaci objektů s odlišnou magnetickou susceptibilitou. Vzhledem k tomu, že v objektu tvrze probíhaly a stále probíhají stavební práce, a také k tomu, že v nedávné minulosti sloužily prostory přilehlé k objektu jako šrotiště, nachází se v jeho areálu veliké množství železných předmětů. Pokud se zaměříme pouze na zkoumaný prostor, nalezneme při zdi jižního křídla uvnitř dvora lešenářské trubky, ve zdivu věže jsou vetknuty železné výztuhy, kůlna na SV skrývá železné brány, při severním okraji areálu jsou pozůstatky po šrotišti a jižně od vstupní brány je plocha zpevněná železobetonovými panely. Pokud vezmeme v potaz, že jakýkoliv větší železný předmět ovlivňuje měřené magnetické pole až do vzdálenosti kolem 5 m, je téměř jisté, že případné magnetické měření by bylo, až na několik okrajových míst, negativně ovlivněno uvedenými rušivými železnými předměty v areálu tvrze. A z tohoto důvodu nebyla magnetometrie provedena.

Při vyhledávání příkopu by teoreticky bylo možno využít i mělkou refrakční seismiku, dno příkopu (případně i jeho boky) by však muselo tvořit rozhraní s dostatečným rozdílem v rychlostech podélných seismických vln. Podle údajů z nedalekých vrtů o hloubce skalního podloží, která se pohybuje od 3 do 6 m (viz kapitola 3.1), a nepřítomnosti jakéhokoliv skalního výchozu lze usuzovat, že příkop u tvrze byl vyhloubený pouze v nezápevněné zemině a patrně nezasahoval do skalního podloží. Zohledníme-li rovněž velice omezené prostorové možnosti uvnitř areálu, kde by použití přístřelů bylo značně problematické, bylo nakonec nasazení seismické metody pro vyhledání příkopu zamítnuto.

Základní principy použitých geoelektrických metod budou uvedeny v následujících odstavcích.

- **Symetrické odporové profilování**

Symetrické odporové profilování (SOP) umožňuje měřit změny měrného odporu podél profilu. K měření se používá čtveřice uspořádaných elektrod (symetricky dvě proudové a dvě měřicí), které se pohybují po profilu současně, přitom je zachována jejich konstantní vzdálenost. Při Wennerově uspořádání je vzdálenost všech sousedních elektrod konstantní a uspořádání je symetrické (Mareš et al. 1990). Registruje se napětí ΔU mezi měřicími elektrodami M a N, současně i proud I mezi proudovými elektrodami A a B. Z těchto hodnot se počítá zdánlivý měrný odpor. Hloubkový dosah je přibližně třetina vzdálenosti AB.

- **Dipólové elektromagnetické profilování**

Metoda využívá dvou souosých cívek (vysílací a měřicí) o různé vzdálenosti, které jsou umístěny v kompaktním tubusu. Jejich vzdálenost určuje přibližně hloubkový dosah měření; s klesající vzdáleností mezi cívkami klesá hloubkový dosah. Měřicí cívka registruje sekundární magnetické pole vyvolané v zemi indukcí primárního pole z vysílací cívky. Měřené parametry jsou vodivost prostředí a složka označovaná jako inphase, která je zhruba úměrná magnetické susceptibilitě. Aparatura je obsluhována jedním operátorem (Kro 1990).

- **Multielektrodová odporová metoda**

Tato metoda vychází z odporového profilování, tedy z měření zdánlivého měrného odporu podél profilu. Odpor horninového prostředí je obecně závislý na řadě parametrů. Jsou to: minerální složení hornin, struktura a textura, porozita, obsah vody v pórech a její salinita a další. Klasické odporové profilování používá k měření čtyř elektrod, oproti tomu multielektrodová metoda používá desítky až první stovky elektrod, což umožňuje získat informace o rozložení odporů jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru (více viz kapitola 2.3.). Elektrody jsou uspořádány buď do jedné linie - profilu, nebo do pravidelné ortogonální sítě nad zkoumaným objektem.

- **Georadar**

Základním principem metody je vysílání krátkých elektromagnetických pulsů o vysoké frekvenci (zpravidla 25 – 1000 MHz) do země a následná registrace energie odražené od různých nehomogenit. Po vyslání signálu je jeho část pohlcena vzduchem, další část absorbují jednotlivé vrstvy a nehomogenity a odražený signál se vrací zpět k přijímači. Mezi vysílaným a přijímaným signálem nastává časová prodleva v řádu několika nanosekund. Rychlost průniku elektromagnetických vln prostředím přitom závisí na více faktorech, především však na relativní permitivitě ϵ_r a elektrické vodivosti σ .

5. Metodika měření

Terénní geofyzikální měření bylo provedeno ve třech etapách. První se realizovala od 20. do 23. srpna 2012 za poměrně stabilního počasí. První tři dny bylo jasno až mírně oblačno a bezvětří, ranní teplota se pohybovala kolem 14°C, odpolední kolem 25°C. Poslední den se však lišil, ráno bylo 12°C a částečně zataženo, v odpoledních hodinách se teplota pohybovala okolo 23°C a střídaly se drobné přeháňky s mírně oblačnou oblohou. Druhá etapa průzkumu proběhla 19. října 2012. Tento den panovala po celý den mírná oblačnost, v poledne bylo 20°C, také vál slabý vítr. Třetí etapa průzkumu (ERT-3D) byla plánována na 10. října 2013, problémy s

přístrojovým SW však provedení měření znemožnily. Druhý, tentokrát úspěšný, pokus proběhl 8. dubna 2014. Tento den bylo oblačno s občasnými přeháňkami a čerstvým větrem. Ranní teplota byla 12°C, odpolední dosáhla 15°C.

5.1. Vytyčení měřičské sítě

Geodetické práce spočívající ve vytyčení základní měřičské sítě byly poněkud komplikovány tím, že plošný průzkum měl pokrýt areál zahrnující několik nesouviselých ploch (obr. 11). Jako optimální byla zvolena jednotná ortogonální síť (s výjimkou měření podél břehu rybníka a v interiéru jižního křídla), což následně zjednodušilo i zpracování dat. Profily byly orientovány ve směru cca J – S (azimut $A=345^\circ$) s číslováním rostoucím od západu k východu (P10 až P85), metráže stoupají od jihu k severu (15 až 71). Vlastní měření pak probíhalo na dílčích plochách, které spojovalo několik hlavních profilů. Tyto hlavní profily (P30, P60, P80, M30, M60) byly vytyčeny jako první. Detailně proměřeno bylo nádvoří a pruh terénu okolo tvrze kopírující její půdorys. Na západě, severozápadě a severu měření zasáhlo do vzdálenosti 15 až 20 m od tvrze, na východě bylo měřeno dle možností terénu, neboť se zde nacházejí bývalé hospodářské stavby a relikty hradební zdi. Za těmito objekty dále k východu byl proměřen ještě zatravněný pruh přiléhající k silnici (o rozměrech 7 až 17 m x 45 m). Měření na jižní straně limitoval rybník, který přiléhá ke tvrzi. Proto zde byly vytyčeny pouze dva paralelní profily.

5.2. Geofyzikální měření

- **Symetrické odporové profilování**

Po vytyčení profilové sítě bylo jako základní provedeno měření metodou symetrického odporového profilování (SOP), všechny plochy byly proměřeny v síti 1 x 1 m. Pro sběr dat byl použit přístroj Geoter-1 a Wennerovo uspořádání elektrod A 1 M 1 N 1 B, kterému odpovídá hloubkový dosah přibližně 1 m. Naměřené hodnoty napětí a proudu byly zapisovány ručně a následně digitalizovány. Odporové profilování s identickým uspořádáním elektrod bylo použito také v interiéru jižního křídla (plocha cca 17 x 6 m). V tomto objektu nebyly doposud dokončené podlahy a pro dostatečný kontakt elektrod přiložených k zemi (cihly či porušený beton) bylo

zapotřebí podlahy v interiéru ještě pokropit vodou. Profily v interiéru tvořily vlastní síť, která byla následně transponována do sítě základní. Pro ověření stability odporových podmínek v čase byl každý den před a po měření proveden ještě kontrolní záměr na profilu P27 v úseku metrů 53,5 až 64,5.

- **Dipólové elektromagnetické profilování**

Měření dipólovou elektromagnetickou metodou (DEMP) probíhalo zároveň s měřením symetrického odporového profilování (SOP). Byla použita aparatura typu CM-031 se vzdáleností cívek 3,7 m a jejich vertikální orientací, což odpovídá hloubkovému dosahu přibližně 4 až 5 m. Vzhledem k délce konduktometru (4 m) „zasáhlo“ měření více profilů najednou, proto bylo měřeno pouze na každém druhém (sudém) profilu. Na začátku a na konci měření se provedly kontrolní záměry na „příčném“ profilu M48 v úseku 10 až 36.

Další dvě metody byly zvoleny jako doplňkové a jejich výběr, ale i umístění měřících profilů, vycházely z předběžných výsledků plošného měření metodou symetrického odporového profilování (SOP).

- **Multielektrodová odporová metoda – 2D-verze**

Pro metodu multielektrodového měření (ERT) byly zvoleny tři profily. Dva z nich, P60 a M60, byly hlavními profily základní sítě, třetí – P-osa byl umístěn tak, aby procházel osou vstupní brány a vykryl jak prostor „mostu“, tak část nádvoří. Pro měření bylo použito aparatury ARES-200E, k dispozici bylo 12 kabelových sekcí, přičemž na každé sekci je připojeno 8 elektrod. Všechny profily byly proměřeny konfigurací Wenner – Schlumberger s hloubkovým dosahem zhruba AB/6. Podél profilu P60 byly elektrody od sebe vzdálené 0,5 m a umístěny v úseku metrů 17 až 64,5, profil M60 byl s krokem elektrod 1,0 m proměřen v úseku 25 až 68,5. Na profilu osou brány (P-osa) byly elektrody rozmístěny s krokem 0,5 m, proměřen byl v délce 43,5 m (metrů 0 až 43,5).

- **Georadar**

Poslední aplikovanou metodou byl georadar (GPR). Pro průzkum byla použita aparatura firmy MALÁ se dvěma výměnnými anténami o frekvencích 250 MHz a 500 MHz. Metoda má hloubkový dosah závislý na frekvenci použité antény, obecně platí, že čím vyšší frekvence, tím menší hloubkový dosah. Pro anténu 250 MHz je

maximální hloubkový dosah cca 10 m a pro anténu 500 MHz přibližně 5 m. Pomocí georadaru byly proměřeny stejné profily jako v případě multielektrodové metody, tedy profily P60, M60 a P-osa. Na všech profilech byly přitom použity obě antény. Georadar byl využit i k proměření šesti profilů v interiéru jižního křídla, kde byla v první etapě použita pouze metoda SOP. V tomto prostoru byly pomocí georadaru proměřeny dva dlouhé (podélné) a čtyři krátké (příčné) profily, pozičně identické s profily proměřenými odporovým profilováním. Využita byla pouze anténa s frekvencí 250 MHz.

- **Multielektrodové měření – 3D verze**

Jako poslední bylo provedeno 3D měření na mikroploše před branou. Velikost obdélníkové plochy byla 11,5 x 5,6 m s delší osou v linii profilu P-osa. Měřilo se opět pomocí přístroje ARES-200E. Krok mezi podélnými profily byl zvolen 0,8 m a vzdálenost elektrod na těchto profilech byla 0,5 m. Bylo použito celkem 24 kabelových sekcí, což je 192 elektrod. Pro měření byla zvolena konfigurace Wenner – Schlumberger.

6. Zpracování naměřených dat

- **Symetrické odporové profilování**

Téměř všechny použité aparatury disponují interní pamětí, která umožňuje zaznamenání měřených hodnot v digitální podobě a jejich následné převedení do uživatelského PC. Toto neplatí pro přístroj na měření SOP Geoter-1. Při tomto měření bylo nutné zapisovat hodnoty naměřeného napětí a proudu do zápisníku a později je digitalizovat (v programu Golden Software Surfer 10). Poté bylo nutné vypočítat z naměřených dat hodnoty ρ_z , a to pomocí vzorce:

$$\rho_z = k \frac{\Delta U}{I}, \quad k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)},$$

kdy ρ_z je zdánlivý měrný odpor (ohmm), k je konstanta uspořádání, ΔU je rozdíl potenciálů mezi elektrodami M a N (mV), I je hodnota proudu v proudovém okruhu (mA) a AM, AN, BM, BN jsou vzdálenosti mezi příslušnými elektrodami (m).

Z vypočteného souboru dat ρ_z byl pomocí programu Surfer 10 vytvořen gridový soubor .grid (sít' 0,25 x 0,25 m) a z něho následně vykreslena mapa izolinií zdánlivých měrných odporů (Karous 1989).

Metodou SOP bylo změřeno celkem 1822 bodů. Z tohoto počtu bylo opakovaně proměřeno 40 bodů na kontrolním profilu a 14 bodů v průběhu měření. Variační šíře hodnot ρ_z zahrnuje interval 39 až 906 Ωm . Střední kvadratická chyba byla počítána podle vzorce (přednáška doc. RNDr. J. Ježek, CSc.):

$$\delta = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{D_{i,1} - D_{i,2}}{\frac{D_{i,1} + D_{i,2}}{2}} \right]^2} * 100 [\%]$$

přičemž n je počet opakovaných měření a $D_{i,1}, D_{i,2}$ jsou párové měřené hodnoty. Střední kvadratická chyba měření byla: $\pm 2,6 \%$.

• Dipólové elektromagnetické profilování

I data získaná metodou DEMP byla zpracována pomocí programu Surfer 10. Nejprve byla provedena oprava naměřených hodnot ρ_z na nestabilitu přístroje. Poté byla podobně jako u SOP opravená data transformována z tabelární podoby do gridového souboru s koncovkou .grid a následně jsem vykreslila mapu izolinií ρ_z . Analogicky, s vynecháním kroku s opravou, byla vytvořena i mapa izolinií pro složku „inphase“.

Metodou dipólového profilování bylo proměřeno 803 bodů. Rozpětí hodnot zdánlivých měrných odporů bylo 12 až 1450 Ωm ; pomineme-li extrémní hodnoty vyvolané recentními kovovými objekty, pak se odpory pohybovaly v rozmezí 15 až 70 Ωm .

- **.Multielektrodová odporová metoda**

Zpracování dat multielektrodové metody pro 2D-měření probíhalo v programu RES2DINV. Ze všeho nejdříve bylo nutné graficky zkontrolovat, zda v naměřených hodnotách zdánlivých měrných odporů není některá zjevně chybná. Po interpolaci korigovaného datového souboru byl vykreslen pseudořez naměřených zdánlivých měrných odporů. Poté byl pomocí 2D-inverze naměřených dat vypočten odporový model, který je graficky znázorněn v odporovém řezu. Celý tento výpočetní proces zahrnuje obecně několik iterací, zpravidla 3 až 5. Na základě odporového řezu je zpětně vypočítán a vykreslen pseudořez kalkulovaných zdánlivých odporů. S každou iterací je kalkulována i RMS (root mean square) chyba; pokud je její hodnota i po několika iteracích moc vysoká, lze eliminovat ty naměřené hodnoty, které jsou diferenčně příliš odlišné a poté provést inverzi znovu. Grafickým výstupem inverze je odporový řez v linii proměřeného profilu.

Obdobný postup byl použit při zpracování 3D dat. Odporový model byl však vytvořen pomocí 3D inverze (program RES3DINV).

- **Georadar**

Georadarová data jsem zpracovala v programu Reflexw. Vzhledem k tomu, že vstupní údaje z georadaru mají obdobný formát jako seismická data, je i jejich zpracování podobné. Prvním krokem po zobrazení příslušného záznamu je proces, který se nazývá „Dewow“. Jde o filtrační metodu umožňující odstranit ze signálu nízkoenergetický šum způsobený vlastní oscilací antény, výsledkem je projasnění signálu. Poté je potřeba eliminovat projev vrstvy mezi anténou a terénem, která je opticky bez signálu. Je nutné nalézt 1. nasazení stopy na amplitudové křivce, což se provádí pomocí ukazatele „Wiggle window“. Následně se pomocí procesu statické korekce a jeho kroku „Move starttime“ odstraní vrstva nežádoucího signálu. Jako další krok následuje zesílení signálu pomocí funkce „Gain“. Další krok je označen „Background removal“ a jedná se o odstranění „pozařového“ signálu. To spočívá ve výpočtu průměrné stopy a jejím následném odečtení od každé stopy na profilu. Následně se profil upraví pomocí frekvenční filtrace, kdy je vybrána frekvenční oblast, která nás zajímá, a současně odstraněn nežádoucí šum. Posledním krokem je tzv. zprůměrování, což vede k „vyčištění“ signálu na celém profilu. Takto zpracované řezy jsou v závěru ještě upraveny transformací vertikální časové osy (ns) na osu hloubek

(m) a slouží jako podklad k vlastní interpretaci. Pro převod na hloubky byla zvolena aproximovaná rychlost šíření signálu 0,1 m/ns.

7. Výsledky měření a jejich interpretace

Výstupy průzkumu jsou vzhledem k nárokům na čitelnost zobrazeny v přílohách formátu A3. Výsledky plošných měření (symetrické odporové profilování, dipólové elektromagnetické profilování) dokumentují mapy izolinií zkoumaných parametrů v měřítku 1 : 250, a to v superpozici se stavebně-historickým plánem přízemí tvrze a dalšími graficky zobrazenými informacemi (obr. 11). Profilová měření (multielektrodová metoda a georadar) ilustrují jednotlivé profilové řezy, v případě metody ERT řezy odporové, v případě georadaru řezy se zakreslením zpracovaných záznamů. Výstupy multielektrodového měření v 3D-variantě jsou zobrazeny ve formě vertikálních a horizontálních odporových řezů.

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 11 – Situace geofyzikálního průzkumu

7.1. Symetrické odporové profilování

Výsledná mapa izolinií zdánlivých měrných odporů ρ_z podle symetrického odporového profilování je na obrázku 12. V proměřeném prostoru je patrných několik výrazných nízkoodporových anomálií. Jedná se především o plošně rozsáhlou oblast mezi přístavbou vně západního křídla tvrze a břehem rybníka, tedy mezi metrážemi M17 a M30 na profilech P11 až P34. Rozmezí naměřeného odporu je zde 40 – 80 Ωm . V tomto případě jde nejspíše o indikaci přítomnosti podzemní vody, která se v těchto místech zřejmě nachází v malé hloubce pod terénem. Lze tak usuzovat z výšky hladiny rybníka a topografie terénu, neboť příbřežní oblast v tomto úseku stoupá k severu pod minimálním sklonem a teprve v místě přístavby se sklon terénu zvyšuje. Další výraznější anomálie s nízkým odporem o hodnotách 70 – 120 Ωm se nacházejí ve východním předpolí tvrze, v jižní části travnatého pásu u silnice. Jedná se o dvě téměř izometrické indikace mezi profily 75 až 80 a metrážemi 27 až 40, jejichž poloha odpovídá pozici dvou vzrostlých smrků. Vzhledem k charakteru kořenového balu smrků, který má tvar mělce uloženého disku, lze předpokládat, že se jedná o projev těchto kořenových balů spojených s vyšším obsahem akumulované vody. Dvě plošně rozsáhlejší, ale nedoměřená, minima odporů (70 až 110 Ωm) byla zjištěna i při sv. okraji uvedeného travnatého pásu, v úseku metráží 55 až 70 mezi profily 79 a 83. Příčina těchto anomálií není jasná, může se jednat o projev vodivějších navážek. Okolo budovy tvrze je na SZ a S patrný méně výrazný pruh snížených odporů (90 – 150 Ωm) obloukovitého tvaru, přerušovaný v předpolí brány a mezi profily 40 až 45. Je velmi pravděpodobné, že se jedná o projev vodivější mělké výplně zaniklého příkopu. Vnější hrana příkopu by v tomto případě probíhala asi 8 m od současného obvodového zdiva tvrze. Vzhledem k rozmístění mladších staveb (přístavba vně západního křídla a drobné objekty severovýchodně od věže) nebylo možné z těchto míst získat potřebná data, a tím verifikovat západní ani východní pokračování příkopu směrem k jihu. Lze však předpokládat, že na západě pokračoval příkop přímo ke břehu rybníka. Alespoň v tom případě, že v místě dnešní přístavby nestála původně jiná starší budova. Pokud

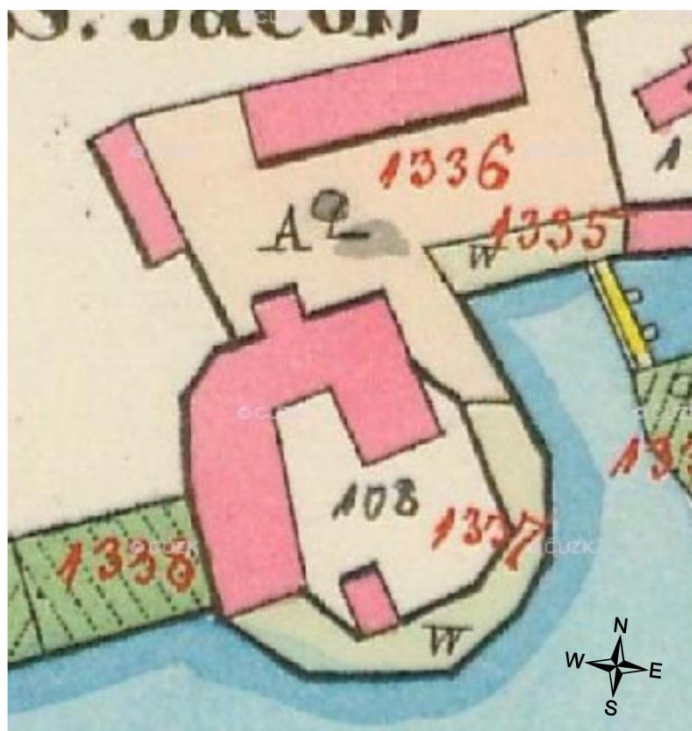
A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 12 – Symetrické odporové profilování – mapa izolinií zdánlivého měrného odporu ρ_z (A1M1N1B)

stála, pak by příkop obtékal i tuto budovu a poté se teprve stácel na jih k rybníku. Východní větev příkopu je pak problematická i tím, že ještě v mapě Stablního katastru z roku 1841 (obr. 13) sahá na této straně výběžek rybníka až na úroveň metráže 52, a příkop tak mohl v prostoru východně od věže komunikovat přímo s rybníkem.



Obr. 13 – Výřez mapy Stablního katastru z roku 1841 (<http://archivnimapy.cuzk.cz>)

Pro lokalizaci archeologických objektů na zkoumané lokalitě jsou mnohem důležitější anomálie zvýšených a vysokých odporů, tj. odporová maxima. V celém měřeném prostoru se však kromě archeologicky významných indikací vyskytuje i několik odporových anomálií prokazatelně způsobených recentními antropogenními objekty. Z nich nejvýraznější je anomálie s hodnotami blízcími se 600 Ω m, která se nachází na břehu rybníka - mezi profily 27 až 31 a metrážemi 19 až 22. Jejím zdrojem je jednoznačně na povrch vystupující železobetonová jímka.

Další anomálie vysokých odporů dosahujících 250 až 400 Ω m, se nacházejí v blízkosti novověkého objektu stodoly na západě. Kromě několika odporových maxim zachycených v úzkém proměřeném pásu podél obvodové zdi západního křídla (metráž 25 až 37, profily 30 a 31) se jedná o „zónu“ vysokých odporů směru cca SSZ-

JJV, která předstupuje před současnou hranu stodoly na západě až o 4 m (metráž 30 až 39 mezi profily 15 až 17). Vzájemná souvislost obou těchto indikací v prostoru zřícené stodoly není jasná, mohou však být projevem destrukcí blíže nespecifikovaného kamenného objektu (předchůdce stodoly), který je však nejspíše mladší než původní středověká zástavba. Nicméně na mapě Stabilního katastru z roku 1841 není na tomto místě žádný objekt zakreslen.

Postoupíme-li dále severním směrem, nalezneme mezi profily 26 až 37 a metrážemi 46 až 61 trojici výrazných přibližně obdélných odporových maxim s hodnotami v rozmezí 220 až 400 Ω m. Všechna tato maxima leží v pokračování osy vstupní brány, tj. ve směru SZ-JV. Jedná se o prostor zavezeného příkopu před branou, kde se nacházejí výkopem (viz obr. 9, pozice G) částečně ověřené relikty mostu. Obě jižnější maxima této komplexní anomálie pozičně odpovídají mostním obloukům. Vyšší odpory v jejich prostoru (než v místě pilíře) jsou zřejmě podmíněny skutečností, že jejich sekundární „výplň“ nedosahuje celé výšky zaklenutí, takže pod klenbami jsou vzduchové „polštáře“, což naznačuje i situace na obr. 8. Je tedy zřejmé, že relativní odporové minimum s hodnotami 200 až 260 Ω m, které se nachází mezi těmito maximy (oblouky) musí indikovat mostní pilíř. Jeho odstup od brány přitom odpovídá výšce vpadliny určené pro padací most na portálu brány, což jsou 3 m. Konfigurace uvedených anomálií naznačuje, že šíře příkopu v těchto místech dosahovala 8 m a šířka mostovky byla 3,0 až 3,5 m. V ose „mostu“ směrem k SZ, tj. vně příkopu, se nachází další členitější odporové maximum, jehož hodnoty se pohybují mezi 220 až 400 Ω m a jehož pokračování nebylo doměřeno. Mohlo by se jednat o projev základů či destrukcí dosud neznámé předsazené vnější brány nebo jiného stavebního objektu sloužícího ke kontrole vstupu na most.

Při severním okraji proměřené plochy, mezi profily 35 až 40 a metrážemi 63 až 67, se nachází další odporové maximum s hodnotami 220 až 260 Ω m. Anomálie pokračuje úzkým výběžkem zvýšených odporů směrem k JJV až na úroveň metráže 57. Tyto odporové indikace by mohly souviset s relikty budovy, která je v těchto místech znázorněna na mapě Stabilního katastru z roku 1841. Protážení anomálie k JJV by pak mohlo indikovat destrukci zdi, která je zakreslena na téže mapě a spojuje uvedenou budovu s objektem tvrze. Druhé, silně hypotetické vysvětlení těchto

anomálií by mohlo vycházet z jejich spojitosti s průběhem nejstaršího, dosud neznámého vstupního koridoru do tvrze.

V severním rohu základního proměřeného prostoru se nachází výrazná plošně rozsáhlá anomálie vysokých odporů s hodnotami 250 až 850 Ωm (profily 52 až 68, metráže 60 až 67). Podle morfologie terénu a ohledání místa je zřejmé, že se jedná z větší části o projev plošné kamenité navážky, která zde byla deponována. Odlišnou příčinu však lze přičíst drobnějšímu odporovému maximu, které bylo zachyceno mezi profily 63 až 67 v úseku metrží 57 až 59 a s touto navázkou zřejmě nesouvisí. Jeho hodnoty se pohybují v rozmezí 220 až 340 Ωm a nelze vyloučit, že se jedná o projev kamenného objektu spojeného s vnější hranou příkopu.

Několik anomálií zvýšených a vysokých zdánlivých měrných odporů bylo naměřeno i ve východním předpolí areálu tvrze. Protáhlé odporové maximum zachycené na profilech 74 až 80 mezi metržemi 53 až 56 (s hodnotami od 200 do 350 Ωm) může indikovat původní kameny zpevněný břeh rybníka, který dle mapy Stabilního katastru z roku 1841 sahal až do těchto míst. Nebo by mohlo jít o projev kamenitého zásypu nad opěrnou zídkou terasy, která zde vnikla po redukci plochy rybníku poté, co byl jeho výběžek k severu zavezen. Dvě výrazná odporová maxima s hodnotami v rozmezí 250 až 600 Ωm se nacházejí mezi profily 68 až 72, a to jednak v úseku 38 až 40, jednak v úseku 30 až 36. Zatímco severnější indikace je patrně podmíněna přítomností kamenitého materiálu z destrukce zdiva, u jižnější indikace nelze vyloučit, že by se eventuálně mohlo jednat o projev reliktu zdiva (nároží starší hradební zdi, která byla později napříměna a přeložena k západu), případně o projev pozůstatku neznámého objektu přilehlého k polygonální hradební zdi zvenčí.

Rozsáhlejší členitá anomálie vysokých odporů, jejíž hodnoty přesahují 500 Ωm , byla zachycena na břehu rybníka u jižního křídla - mezi profily 43 až 58. Z větší části jde nejspíše o projev pozůstatků základového zdiva obvodové hradby či její destrukce. V teoretické rovině by se však mohlo jednat i o projev destrukcí patrně obytné budovy, která zde mohla stát v gotické fázi. Příčinou drobného protáhlého maxima mezi profily 43 až 45 je s největší pravděpodobností přítomnost konstrukce odvodňovacího kanálu.

Z odporového obrazu na vnitřním nádvoří výrazně vystupuje pruh drobných maxim (a jednoho minima) o hodnotách od 250 do 500 Ωm ; podle morfologických náznaků a kontextu se jedná o účinek odvodňovacího kanálu směru S-J. Anomálie zvýšených odporů (až 350 Ωm) zachycená mezi profily 43 až 47 a metrážemi 33 až 39 je téměř obdélného tvaru a její rozměry (4 x 6 m) i pozice naznačují, že její příčinou je pravděpodobně zděný suterénní prostor, který byl druhotně vyplněn kamenitým materiálem. Tento sklepní prostor byl dříve přístupný přes schodiště zachycené starším archeologickým výzkumem (viz obr. 9, pozice B).

V jz. rohu nádvoří se na profilech 42 až 45 v úseku metráží 29 až 32 nalézají výrazná nedoměřená anomálie zvýšených odporů s hodnotami 300 až 450 Ωm . Pokračování této anomálie bylo zachyceno měřením v interiéru jižního křídla, a to v úseku metráží 23 až 26. V kontextu s archeologickými poznatky (obr. 9, pozice C) je pravděpodobné, že obě tato plošná odporová maxima odpovídají pozůstatkům zdiva či destrukcí zaniklého jihovýchodního rizalitu vysazeného do prostoru nádvoří z původního západního křídla. Drobné protáhlé odporové maximum (300 Ωm) mezi profily 41 a 42 v úseku 20 až 22 může indikovat pokračování původní hradební zdi k severu. Ve východní části interiéru jižního křídla se v rozmezí profilů 51 až 57 projevil komplex anomálií zvýšených až vysokých odporů (220 až 550 Ωm) s ortogonální vnitřní strukturou. Je pravděpodobné, že tyto indikace jsou projevem stavebních pozůstatků původního gotického jižního křídla a zároveň se nabízí souvislost s relikty zdí dokumentovaných v archeologické sondě na pozici A (obr. 9) i se zvýšenými odpory podél profilu P60 jižně od této archeologické sondy.

Méně výrazná anomálie zvýšených odporů byla zjištěna v blízkosti věže, mezi profily 59 až 62 v úseku metráží 33 až 38. Anomálie dosahuje hodnot 260 Ωm a její příčinou by mohl být reliktní zaniklé zdi vybíhající z hradební zdi k jihu, případně i geometrický efekt vyvolaný přilehlým zahlobeným „dvorkem“ jižně od věže. Za indicii pozůstatků zaniklé obvodové hradby lze považovat protáhlou anomálii zvýšených odporů, která je situovaná severně od předešlé, mezi metrážemi 38 až 40 v rozmezí profilů 60 až 64. Drobnější anomálii zvýšených odporů vymezují profily 60 až 62 v úseku metráží 48 až 50. Tato indikace dosahuje hodnot 240 Ωm a s největší pravděpodobností se jedná o projev jámy, která je spojená průkopem se sklepem v nárožním traktu severního křídla. Jáma je na povrchu zakryta plechem.

7.2. Dipólové elektromagnetické profilování

Výstupem měření metodou dipólového elektromagnetického profilování byla jednak mapa izolinií zdánlivých měrných odporů (obr. 14) a jednak mapa izolinií složky „inphase“, která však vzhledem k minimálnímu informačnímu přínosu není součástí této práce. Hloubkový dosah je v případě metody DEMP větší než u metody SOP a činí zhruba 4 až 5 m.

Z odporové mapy je patrné, že v jihozápadní části proměřené plochy (až do míst bývalého mostu) se generelně nacházejí nižší hodnoty odporů než v severní a východní části plochy. To by mohlo být způsobeno primárně rozdílným charakterem nezpevněného pokryvu, odlišným materiálem zásypu příkopu, případně i změnami v mocnostech sedimentárního pokryvu obecně a v prostoru příkopu zvlášť. Vyloučit nelze ani to, že báze západní části příkopu může být nasycená vodou infiltrovanou z rybníka.

Většina lokálních odporových anomálií je vyvolána recentními železnými předměty (traverzy, trubky, šrot, panely...) uloženými na povrchu terénu. Jejich popis je uveden v mapě, a proto nebudou komentovány. Zřejmě novodobého původu je i výrazná lineární anomálie (maximum lemované minimy), která probíhá od jz. nároží západního křídla směrem k ZSZ a za objektem stodoly pokračuje mimo proměřenou plochu. S největší pravděpodobností se jedná o projev trativodu, který ústí do jímky na břehu rybníka. Určitý archeologický význam lze přičíst několika odporovým maximům, která se nacházejí mezi profily 26 až 37 v úseku metrů 57 až 65 v sz. rohu lokality. Jejich zdrojem by mohly být hlouběji uložené relikty destrukcí kamenných staveb, částečně patrně novodobých, vně příkopu.

Zajímavá odporová anomálie metody DEMP byla zachycena na vnitřním nádvoří - mezi profily 43 až 48 a metrů 34 až 39. Tato anomálie se nachází na stejném místě jako odporové maximum metody SOP. Proto volím stejné vysvětlení, a to, že se patrně jedná o efekt kamenitého zásypu hlouběji založeného zaniklého sklepního prostoru. Izometrická anomálie zvýšených odporů mezi věží a jižním křídlem (mezi profily 51 až 53) je pravděpodobně projevem nějakého nespecifického objektu recentního původu.

Složka „inphase“ indikovala železné magnetické předměty na základě jejich zvýšené susceptibility. V převážné většině se jednalo o projevy stejných recentních objektů, které se projevily odporovými anomáliemi a jejichž popis se nachází v mapě.

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 14 – Dipólové elektromagnetické profilování – mapa izolinií zdánlivého měrného odporu ρ_z

7.3. Multielektrodová odporová metoda a georadar (profily M60, P60, P-osa)

- **Profil M60**

Profil M60 směru Z-V je situován severně od objektu tvrze a probíhá pravděpodobně při vnější severní hraně zaniklého příkopu. Odporový řez (obr. 15) podle multielektrodové odporové metody zachycuje výrazné subhorizontální odporové rozhraní, které zřejmě odpovídá hranici mezi vodivými nezpevněnými sedimenty a nevodivým skalním podložím. Hloubku skalního podkladu lze v tomto případě odhadnout na 3 až 5 m. Zachycené mělká odporová maxima pak velmi dobře odpovídají výsledkům odporového měření metodou SOP. V úseku „profilových metráží“ 25 až 30 se projeví předpokládané relikty stavby v předmostí, mezi metrážemi 34 až 40 by se mohly nacházet destrukce budovy znázorněné na katastrální mapě z roku 1841, resp. zdi směřující k jihu, a na konci profilu mezi metrážemi 62 až 67 se projevil účinek kamenitého materiálu navážky.

Výsledky měření metodou GPR jsou velice podobné výsledkům odporového měření. V úseku 26 až 28 (250 MHz) se nachází výrazné odrazy, které mohou souviset s předpokládaným objektem v předmostí. Podobný charakter vykazují i mělké reflexy na „metráži“ 32. Odrazy na „metráži“ 36 (250 MHz) lze spojovat s relikty objektu, který je zobrazen na mapě Stablního katastru (viz obr. 13). Výrazné reflexy (250 MHz) se projeví v úsecích 55 až 57 a 59 až 61, jejich příčinou může být recentní přípovrchová akumulace kamenitého materiálu. Méně výrazná skupina reflexů (250 i 500 MHz) byla zachycena v úseku 64 až 66, hypoteticky nelze vyloučit jejich souvislost s odporovým maximem podle metody SOP, interpretovaným jako kamenný objekt spojený s hranou příkopu. V úseku „profilových metráží“ 25 až 45 jsou výrazné odrazy přibližující se lineárně k povrchu. Může se jednat o vzdušné reflexy, které jsou způsobeny přibližováním antény k severnímu výběžku tvrze.

A3
PRO TISK
Soubor 2

Obrázek 15 – Profil M60: hloubkové řezy podle multielektrodové metody a georadaru

- **Profil P60**

Profil P60 (obr. 16) směru J-S je situován ve východní části areálu tvrze a zhruba v úseku metrů 53 až 61 by měl přetínat zaniklý příkop. I v tomto případě lze na základě odporového řezu aproximovat průběh rozhraní mezi pokryvem a skalním podložím s tím, že hloubka skály se podél tohoto profilu pohybuje kolem 5 m.

K většímu zahloubení dochází v prostoru předpokládaného příkopu – od metrů 51 výše, příčina „elevace“ podloží v blízkosti metrů 43,5 není jasná. Zvýšené odpory od počátku profilu do metrů 28 indikují relikty starší jižní stavby, které v okolí metrů 20 sahají do hloubky až 2 m. Mělce zachycené zvýšené odpory v úseku metrů 32 až 38 naznačují relikty zdiva přiléhajícího ke hradbě. Odporové maximum mezi metrů 38 až 40 je založené hlouběji a jednoznačně svědčí pro přítomnost základů původní hradební zdi. Mísovité odporové maximum pod tenkým přípovrchovým minimem mezi metrů 46 až 50 náleží existenci dutiny překryté plechem. V metrů 52 až 55 je patrná drobná anomálie, jejíž zdroj není známý. Od metrů 60 výše se vysokými odpory projevuje kamenitý materiál recentní navážky.

Výsledky měření metodou GPR jsou méně kontrastní. Silné reflexy v úseku metrů 32 až 36 (250 MHz) jsou patrně projevem odrazů od obvodového zdiva přilehlého zahloubeného „dvorku“. V úseku 39 až 40 se projeví na obou frekvencích pohřbené základy tělesa hradební zdi. V úseku metrů 45 až 49 jsou patrné odrazy, jejichž zdrojem je dno výkopu zakrytého plechem. Poslední výrazné reflexy se nacházejí v úseku 53 až 56, kde byly zachyceny i zvýšené odpory - příčina této anomálie je neznámá.

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 16 – Profil P60: hloubkové řezy podle multielektrodové metody a georadaru

- **Profil P-osa**

Profil P-osa (obr. 17) je orientován ve směru SZ-JV. Začíná na předmostí, odkud probíhá v linii interpretovaného mostu, dále osou brány a napříč nádvořím tvrze. Ve střední a jv. části odporového řezu podle multielektrodového měření lze hloubku skalního podloží, tj. rozhraní mezi vodivým pokryvem a nevodivým skalním podkladem, očekávat v hloubce 3 až 5 m. Výrazná deprese v průběhu tohoto rozhraní se zahluobením kolem 6 m se projevila v sz. části profilu (do metráže 16) a je zřejmou indikací zaniklého příkopu. Přípovrchové odporové maximum zachycené od počátku profilu do metráže 5 je nejspíše způsobeno účinky reliktní budovy v předpolí mostu. Dvě výrazná odporová maxima v rozmezí metráží 9 až 16 jsou projevem mostních oblouků a předpokládaných vzduchových kapes pod jejich klenbami. Anomálně vysoké odpory v úseku metráží 17 až 25 korelují s polohou průjezdu, hlubší založení maxima v metráži 18 může být podmíněno obezděním vnitřní hrany příkopu přilehlé k bráně. Vysoké odpory pod další částí průjezdu mohou být projevem masivní podezdívky, zasypané dutiny nebo extrémně suchého materiálu. Drobnější mělké odporové maximum v úseku 28 až 31 je zřejmě vyvoláno relikty zdiva a zásypem zaniklého sklepa. Kanálek situovaný v metráži 33 se projevil jako subtilní odporové minimum lemované z obou stran úzkými maximy.

Georadarové měření ukázalo výraznější reflexy v úsecích metráží 9-10 a 15-16 (250 i 500 MHz), které pozičně odpovídají okrajům interpretovaných kleneb mostních oblouků. Další jasně ohraničené odrazy jsou patrné v úseku metráží 28 až 33. V tomto případě se zřejmě jedná o projev zasypaného sklepa a odvodňovacího kanálku. Komplex reflexů na jv. konci profilu (250 MHz), od metráže 35 výše, lze přičíst existenci zapuštěného „dvorku“ jižně od věže.

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 17 – Profil osa: hloubkové řezy podle multielektrodové metody a georadaru

7.4. Georadarová metoda – interiér jižního křídla

Na metrážovém profilu 25 se těsně za „metráží“ 44 nachází úzké reflexy (obr. 18), které by mohly být způsobeny odrazem od odvodňovacího kanálku. Výrazná skupina reflexů byla zachycena v úseku 45 až 48, tyto odrazy by mohly souviset se zdivem hypotetického rizalitu (odporové maximum v metodě SOP) nebo by se mohlo jednat o projev objektu spojeného se zdivem zachyceným v sondě C (viz obr. 9). Další výrazný pruh reflexů je patrný v úseku 53 až 54. V tomto případě by možnou příčinou mohly být relikty zdiva původní jižní zástavby. Jasně patrné odrazy jsou i na „metráži“ 57, jejich zdrojem může hypoteticky být pokračování zdiva z prostoru sondy A (obr. 9).

Metrážový profil 21 vykazuje v úseku 42 až 44 podobný shluk reflexů jako profil 25 v úseku 45 až 48. Je však velmi nepravděpodobné, že by tyto dvě indikace měly vzájemnou souvislost. Zde se patrně jedná o projev mladší kamenné zdi a pod ní uložených destrukcí mohutnějšího zdiva, zachyceného sondou D (obr. 9). Výrazný pás odrazů se projevil i v „metráži“ 49,5, v tomto případě se však nejspíše jedná o násobné odrazy od vyzdřeného „prahu“ na povrchu terénu. Stejně jako na „profilu“ 25 se i na „profilu“ 21 nachází pruh reflexů na metráži 54, tentokrát o něco méně výrazný. I tentokrát by mohlo jít o odrazy od reliktního zdiva původní zástavby jižní části nádvoří. Přitom je zajímavé, že v metráži 54 obou zmíněných profilů se současně mění i charakter radarového záznamu, směrem k východu je prostředí s vyšším útlumem signálu – snad neporušené jemnozrné vodivé sedimenty

Dva paralelní profily 45,5 a 46,5 lze vzhledem k jejich malé vzdálenosti a podobným výsledkům interpretovat společně. Na obou profilech se nachází velmi výrazná zóna reflexů v úseku metráží 24 až 26. Mohlo by se jednat buď o projev zdiva (nebo jeho reliktního) spojeného se zaniklým rizalitem nebo by mohlo jít o objekt související se zdivem zachyceným v sondě C (obr. 9).

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 18 – Jižní křídlo: hloubkové řezy podle georadaru

Souhrnně lze interpretovat i poslední dva změřené profily označené jako 55,5 a 56,5. Zde je patrný pruh výrazných odrazů na metrů 22,5. V tomto případě je pravděpodobné, že se jedná o násobné reflexy podmíněné přítomností nízké zídky na povrchu terénu. Zdroj reflexů v úseku metrů 24 až 26 je nejasný, vyloučit však nelze přítomnost reliktních konstrukcí původní zástavby jižního sektoru tvrže.

7.5. Multielektrodová odporová metoda – 3D verze - předbrání

Pro 3D měření metodou ERT byl vybrán prostor nad zaniklým mostem, jehož dva mostní oblouky byly částečně odhaleny lokálními výkopy a jehož umístění potvrdily i výsledky metody SOP. Výstupem 3D-měření jsou dvě série odporových řezů, a to jednak horizontálních (obr. 19), a jednak vertikálních (obr. 20).

Oba grafické výstupy vykazují shodný rozsah hodnot měrných odporů v rozmezí od 51 do 1341 Ω m. Maximální hloubka v sérii horizontálních řezů je 3,43 m. Vertikální řezy dosahují své maximální hloubky na hodnotě 3,10 m. Ani jeden z řezů nezastihl dno příkopu, neboť maximální hloubkový dosah byl determinován limity v prostorovém rozmístění elektrod (brána, panely, hromada písku...). Na všech řezech je jasně patrný projev obou mostních oblouků, charakterizovaný vysokými hodnotami měrného odporu. Odporová maxima v místech mostních oblouků dosahují nejvyšších hodnot v hloubce kolem jednoho metru a kromě vlastního zdiva lze za jejich zdroj považovat především vzduchové „kapsy“ pod oblouky (mezi zásypem a vrcholem klenby). Stejně jako u metody SOP lze i zde odhadnout šířku mostovky na 3,5 m.

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 19 – Předbrání: 3D Multi - horizontální řezy

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 20 – Předbraní: 3D Multi - vertikální řezy

7.6. Souhrn – strukturní schéma

Veškeré interpretované „plošné objekty“ i „zdiva“, a to jak podle metody SOP, tak podle doplňkových metod, jsou přehledně zakresleny na obr. 21 a označeny číselným kódem. Jedním z klíčových objektů průzkumu byl „hradní“ příkop (označení 0). Ten pravděpodobně vybíhal z rybníka při jz. nároží tvrze, těsně ji obepínal ze západu a severu, aby se na severovýchodě patrně opět spojil s dnes zaniklým výběžkem rybníka. Průměrná šířka příkopu v poslední stavební fázi se pohybovala kolem 8 metrů, hloubka dosahovala asi 6 až 6,5 m pod současným terénem. Dalším cílem průzkumu byly případné relikty starší zástavby. Interpretované objekty byly formálně rozděleny na objekty větších plošných rozměrů (destrukce zděných staveb) a na menší, převážně liniové objekty (dílčí zdiva). Plošně rozsáhlejších objektů bylo „vymapováno“ celkem pět. První se nachází vně příkopu západně od objektu tvrze (označení 1) a je částečně překrytý stavbou mladší stodoly. Další objekt (označení 3) je situován v prostoru předmostí, kde mohla být umístěna předsazená brána nebo jiná stavba sloužící ke kontrole vstupu do tvrze. Další objekty plošného rozsahu byly zachyceny v prostoru nádvoří. Uprostřed nádvoří (označení 9) se s velkou pravděpodobností jedná o zaniklé sklepení zasypané kamenitou sutí. V jihozápadním rohu nádvoří a částečně i uvnitř současného jižního křídla se nachází objekt (označení 10) interpretovaný jako zaniklý jv. rizalit původního západního křídla. Komplexní indikace větších plošných rozměrů byly zachyceny ve východní části interiéru jižního křídla (označení 11), souhrnně je lze interpretovat jako projev reliktní původní středověké zástavby jižního sektoru nádvoří. Další struktury, které byly vyčleněny a interpretovány, reprezentují nejspíše dílčí zdiva, jejich relikty, nebo destrukce. V prostoru před vstupní branou to je dvojice pilířů zaniklého mostu (označení 2). Jejich poloha byla částečně známa již dříve, a to díky nedokumentovaným výkopům provedeným v minulosti. Vně příkopu severně od brány se nacházejí další struktury (označení 4 a 5), které byly interpretovány jako relikty zdiva zaniklé starší hospodářské budovy a zdi spojující tuto budovu s tvrzí. Obě tyto stavby jsou zobrazeny na mapě Stabilního katastru z roku 1841. Další interpretované anomálie (označení 8 a 13, případně i 7) reprezentují s největší pravděpodobností přítomnost reliktní nejstarší hradební zdi. Ve schématu zbývají ještě dvě interpretované indikace.

A3

PRO TISK

Soubor 2

Obrázek 21 – Strukturní schéma-interpretované anomální objekty

Struktura s označením 6 leží při vnější hraně příkopu na SV a její účel je nejasný. Indikace s označením 12 představuje pravděpodobně projev příčné zdi, která se kdysi podílela na členění jižní části nádvoří

8. Závěr

Geofyzikální průzkum v areálu popovické tvrze umožnil lokalizovat řadu archeologicky významných objektů. Jedním z položených otazníků bylo umístění příkopu. Jeho pozice byla interpretována především metodou SOP, nicméně dílčí informace poskytly i výstupy multielektrodového odporového měření. Dále byl na základě výstupů všech metod stanoven větší počet pohřbených zděných objektů nebo jejich reliktnů. Pokud srovnáme polohu zdí zachycených archeologickými sondami a některých interpretovaných objektů v jejich blízkosti, dojdeme k závěru, že spolu tyto objekty souvisí. Například výkopy v prostoru před bránou (pozice G) odkryly část oblouků zaniklého mostu a v předpokládaných místech těchto oblouků byla zachycena výrazná odporová maxima. Dalším příkladem může být prostor sondy B, která odkryla schodiště sestupující do neznámého podzemního prostoru. V těsné blízkosti této sondy byl pak geofyzikálním měřením zachycen anomální objekt pravidelného tvaru, který by mohl být s velkou pravděpodobností zasypaným sklepním prostorem.

Porovnáme-li výstupy multielektrodové odporové metody a georadarového měření na stejných profilech, zjistíme, že výsledky georadaru jsou méně jednoznačné a více závislé na samotném zpracování naměřených dat. Nelze však říci, že se výsledky obou metod neshodují. Ovšem díky multielektrodovému odporovému měření je možné lépe sledovat průběh a tvar odporových nehomogenit; také je zde menší nebezpečí ovlivnění výstupů mělkými povrchovými objekty. Oproti tomu výsledky georadarové metody mohou být výrazně ovlivněny odrazy pocházejícími od objektů na povrchu.

Výsledky 3D-multielektrodového odporového měření přinesly zpřesňující informace jak k metodě SOP, tak pro 2D-ERT měření v oblasti předbrání. Samotný objekt mostu, zvláště pak projev obou mostních oblouků, je zde velmi dobře patrný ve všech řezech (horizontálních i vertikálních). Bohužel se nepodařilo, díky omezenému prostoru pro umístění elektrod, zastihnout dno příkopu.

Pro případné potvrzení interpretovaných struktur by bylo nutné provést rozsáhlejší archeologický průzkum. Z hlediska geofyziky byla prozkoumána téměř veškerá dostupná plocha. Přesto by bylo možné prozkoumat ještě západní a severozápadní předpolí tvrze, zahrnující část zahrady. Primárně by šlo o doměření prostoru s částečně zachyceným objektem v předmostí a také o lokalizaci případných zaniklých hospodářských budov západně od tvrze. Po odstranění veškerých přemístitelných železných předmětů z areálu by bylo možné v některých segmentech zájmové plochy uvažovat i o provedení doplňujícího magnetického měření.

9. Seznam literatury:

Argote-Espino, D., Tejero-Aandrade, A., Cifuentes-Nava, G., Iriarte, L., Farías, R., Chávez, E., et López, F. (2013): *3D electrical prospection in the archaeological site of El Pahñú, Hidalgo State, Central Mexico.* Journal of Archaeological Science, vol. 40, issue 2, 1213–1223. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.is.cuni.cz/science/article/pii/S0305440312003858>.

Beránek, B., Červený, V., Dudek, A., Holub, K., Suk, M. (1970): *Zpráva o dokončení první etapy výzkumu zemské kůry seismickými metodami v rámci státního úkolu č. T-0-20-14*, MS, průběžná zpráva, Praha, Geofond.

Blížkovský, M., Novotný, A., Pokorný, L., Rejl, L., Šalanský K. (1983): *Strukturní schéma Českého masivu na základě geofyzikálních indikací*, MS, soubor map, Praha, Geofond.

Bonsall, J. (2010): *Kilcashel: The home of Kircashel landscape project.* Kilcashel [online]. 2010 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: www.kilcashel.com.

Dohnal, J. (2010): Geofyzikální metody v životním prostředí, informace z přednášky, PřF UK, Praha, UHIGUG.

Fischer, T. (2012): Geoelektrický průzkum, informace z přednášky, PřF UK, Praha, UHIGUG.

Hašek, V., Měřínský, Z. (1991): *Geofyzikální metody v archeologii na Moravě.* Muzejní a vlastivědná společnost, Brno.

Hemeda, S. (2013): *Electrical Resistance Tomography (ERT). Subsurface Imaging for Non-destructive Testing and Survey in Historical Buildings Preservation.* Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 7, issue 1, 344-357.

Hrách, S., Jelen, M., Mašín, J., Matolín, M., Zemánek, V. (1959): *Letecká magnetická a radiometrická mapa ČSSR 1:200 000*, MS, závěrečná zpráva, Praha, Geofond.

Ježek, J. (2010): Zpracování dat v geologii, informace z přednášky, PřF UK, Praha, ÚAMVT.

Karous, M. (1989): *Geoelektrické metody průzkumu.* SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, 423 s.

Kašpar, V. (2005): *Nálezová zpráva o provedení záchranného archeologického výzkumu: provedeného na parcele čp. 1 tvrze v Popovicích v katastrálním území Popovice (okr. Benešov).* MS, Archaia Praha.

Kuna, M., Beneš, M., Dreslerová, D., Gojda, M., Hrubý, P., Křivánek, R., Majer, A., Prach, K., Tomášek, M. (dále přispěli **Dobeš, M., Kolbinger, D., Květina, P., Laušman, J., Matoušek, V.**) (2004): *Nedestruktivní archeologie: Teorie, metody a cíle*. Academia, Praha, 555 str., ISBN 80-200-1216-8.

Leucci, G. et Greco, F. (2012): *3D ERT Survey to Reconstruct Archaeological Features in the Subsoil of the "Spirito Santo" Church Ruins at the Site of Occhiola (Sicily, Italy)*. *Archaeology*, vol. 1, issue 1, 1-6.

Manová, M., Šalanský, K. (1972): *Základní výzkum. Letecké geofyzikální mapování XII. Střední Čechy*, MS, závěrečná zpráva, Praha, Geofond.

Mareš, S., Gruntorád, J., Hrách, S., Karous, M., Marek, F., Matolín, M., Skopec, J., Válek, R. (1990): *Úvod do užití geofyziky*. 2. přeprac. vyd., SNTL, Praha, 677 str., ISBN 80-03-00427-6.

Negri, S., Leucci, G. et Mazzone, F. (2008): *High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface*. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 65, issue 3-4, 111-120. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2008.06.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092698510800075X>.

Obr, J., Sedlák, J., Šrámek, J. (1996): *Melechovský masív, vizualizace tíhových dat a kvantitativní tíhový řez*, MS, Praha, Geofond.

Olejník, S. (1960): *Gravimetrické mapování 1959*, MS, závěrečná zpráva, Praha, Geofond.

Petránek, J. (1993): *Encyklopedie geologie*. Jih, České Budějovice, 246 str., ISBN 80-900351-2-4.

Rykl, M. (2010): *Skladba obytné části středověké tvrze v Čechách. Díl II. Katalog k disertační práci*, MS, doktorská disertační práce (vedoucí práce Jiří Škabrada). Praha, 563 s. České vysoké učení technické v Praze: Fakulta architektury, Ústav památkové péče.

Řeháčková, M., Šalanský, K., Zemánek, V. (1963): *Zpráva o leteckém geofyzikálním měření v roce 1961 III. Část – Pelhřimovsko*, závěrečná zpráva, Praha, Geofond.

Toushmalani, R. (2010): *Application and Limitation of Geophysical Techniques in Archaeology*. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 4, issue 12, 6440-6449.

Tsonkas, G. N., Tsourlos, P. I., Stampolidis, A. D., Katsonopoulou, D. et Soter, S.(2009): *Tracing a major Roman road in the area of ancient Helike by resistivity tomography*. *Archaeological Prospection*, vol. 16, issue 4, 251-266. DOI: 10.1002/arp.355. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/arp.355>.

Webové zdroje:

Geologická mapa: 1:50 000 (2013). ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA. In: *Česká geologická služba* [online]. vyd. [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_50/.

Gruntorád, J., Karous, M., Kro, H. (2010): Planeta. In: *Možnosti použití geofyzikálních metod* [online]. Praha: MŽP [cit. 2011-08-08]. ISSN 1210-412. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/0C86A39AD30FD992C1256FAF004A153D/\\$file/planeta0199.pdf](http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/0C86A39AD30FD992C1256FAF004A153D/$file/planeta0199.pdf).

Kebort, M. (2002): *Vodní tvrz v Popovicích, aneb rekonstrukční snahy restituentů I.* In: *Stavební fórum* [online]. 2002 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://www.stavebni-forum.cz/cs/article/2805/vodni-tvrz-v-popovicich-aneb-rekonstrukcni-snahy-restituentu-i/>.

Kebort, M. (2002): *Vodní tvrz v Popovicích, aneb rekonstrukční snahy restituentů II.* In: *Stavební fórum* [online]. 2002 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://www.stavebni-forum.cz/data/cms/2807/pdf/1-vodni-tvrz-v-popovicich-aneb-rekonstrukcni-snahy-restituentu-ii.pdf>.

Kebort, M. (2002): *Vodní tvrz v Popovicích, aneb rekonstrukční snahy restituentů III.* In: *Stavební fórum* [online]. 2002 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://www.stavebni-forum.cz/cs/article/2806/vodni-tvrz-v-popovicich-aneb-rekonstrukcni-snahy-restituentu-iii/>.

Loke, M. H. (2004): *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, 1–161, Geotomo Softwares, Penang, Malaysia. Dostupné z: www.geotomosoft.com.

Mapy (2011). Seznam.cz, a.s. *Seznam.cz* [online]. vyd. [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz/>.

Ústřední archiv zeměměřičství a katastru (2011). *Archivní mapy* [online]. [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://archivnimapy.cuzk.cz>.