

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Geologie
Aplikovaná geologie



Bc. Eliška Vošvrdová

**Komplexní geofyzikální průzkum pro archeologické účely v prostoru
Zámecké zahrady v Teplicích**

Vyhledávání historických antropogenních dutin geofyzikálními metodami

**Complex geophysical survey for archaeological purposes in the area
of the Chateau Garden in Teplice**

Historical anthropogenic cavities searching by use of geophysical methods

Diplomová práce

Vedoucí práce: PhDr. RNDr. Jiří Dohnal

Praha, 2021

Prohlášení

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, 12. 5. 2021

.....

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala PhDr. RNDr. Jiřímu Dohnalovi za odborné vedení diplomové práce, cenné rady, čas, trpělivost a za pomoc s přípravou terénních prací a zpracováním dat. RNDr. Jakubovi Štainbruchovi, Ph.D. a společnosti INSET s. r. o. děkuji za pomoc s realizací georadarového měření. Za neocenitelnou pomoc s terénními pracemi děkuji Mgr. Janovi Valentovi, Ph.D., dále také Mgr. Martinovi Alexovi, Mgr. Romanovi Beránkovi a Anně Mikulové. Velký dík patří RNDr. Janovi Mrlinovi, Ph.D. a Mgr. Romanovi Beránkovi za provedení a poskytnutí výsledků mikrogravimetrického měření. Poděkovat bych chtěla také PhDr. Lucii Kursové za spolupráci a poskytnutí informací o archeologické lokalitě.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá aplikací geofyzikálních metod v archeologii, konkrétně v první části přehledem metod používaných při lokalizaci a průzkumu historických antropogenních dutin pro archeologické účely, v druhé části jejich aplikací na konkrétní lokalitě.

Úvodní část práce shrnuje informace týkající se geofyzikální lokalizace historických antropogenních dutin, tedy podzemních objektů vytvořených lidskou činností. Jsou zde uvedeny jejich obecné a fyzikální vlastnosti, dále specifika spojená s jejich geofyzikálním vyhledáváním a zásady volby metody na základě parametrů daného objektu. Mezi popsané nejčastěji využívané metody při průzkumu antropogenních dutin jsou zde zařazeny gravimetrie, geoelektrické stejnosměrné odporové metody (symetrické odporové profilování a elektrická odporová tomografie), metody elektromagnetické (georadarová metoda a dipólové elektromagnetické profilování) a termometrie.

Stěžejní část diplomové práce je věnována komplexnímu geofyzikálnímu průzkumu archeologické lokality. Místem provedení průzkumných prací byla Zámecká zahrada v Teplicích v Čechách, pod níž se nachází historická sklepení. Pro geofyzikální průzkum byly vybrány metody georadar, mikrogravimetrie, elektrická odporová tomografie a dipólové elektromagnetické profilování. Metody byly voleny na základě obecných poznatků o lokalitě, charakteru podzemních objektů a s ohledem na provedený stavebně-historický průzkum. Závěrem diplomové práce jsou prezentovány zpracované výstupy měření pro každou z provedených metod a jejich interpretace.

Klíčová slova: *archeologie, užitá geofyzika, geofyzikální metody, nedestruktivní archeologie, archeogeofyzika, geofyzikální průzkum, podzemní dutiny*

Abstract

This diploma thesis deals with application of geophysical methods in archeology, in the first part by an overview of the methods used for localization and analysis of historical anthropogenic cavities for archeological purposes. In the second part of the thesis, the application of selected methods on a specific locality is described.

The initial part of the work summarizes information regarding the geophysical localization of historical anthropogenic cavities, thus underground objects, created by human activity. Their general and physical characteristics are introduced, as well as the specifics associated with their geophysical search, and the principles for choosing a method based on the parameters of the given object. The most frequently used methods in the survey of anthropogenic cavities include gravimetry, geoelectrical DC resistivity methods (symmetric resistivity profiling and electrical resistivity tomography), electromagnetic methods (ground penetrating radar and dipole electromagnetic profiling) and thermometry.

A fundamental part of the diploma thesis is devoted to a comprehensive geophysical examination of the archaeological site. The location of the exploration work was the Chateau Garden in Teplice (North Bohemia), below which there are historical cellars. Ground penetrating radar, microgravimetry, electrical resistivity tomography and dipole electromagnetic profiling were selected for the geophysical survey. The methods were chosen on the basis of the general knowledge of the locality, the character of the underground objects as well as the performed historical-construction analysis. At the end of the thesis the processed measurement outputs for each of the performed methods and their interpretation are presented.

Key words: archaeology, applied geophysics, geophysical methods, non-destructive archaeology, archaeogeophysics, geophysical survey, underground cavities

Obsah

1. ÚVOD	7
2. LOKALIZACE HISTORICKÝCH ANTROPOGENNÍCH DUTIN GEOFYZIKÁLNÍMI METODAMI	8
2.1 Typy vyhledávaných objektů	8
2.2 Fyzikální vlastnosti dutin a sledované fyzikální veličiny	9
2.4 Geofyzikální metody používané při vyhledávání historických dutin a jejich specifika	11
2.4.1 Gravimetrie	12
2.4.2 Geoelektrické odporové metody	14
2.4.3 Elektromagnetické metody	16
2.4.4 Termometrie	19
3. KOMPLEXNÍ GEOFYZIKÁLNÍ PRŮZKUM PRO ARCHEOLOGICKÉ ÚČELY V PROSTORU ZÁMECKÉ ZAHRADY V TEPLICÍCH	20
3.1 Základní informace o lokalitě zámek Teplice	20
3.1.1 Topografické vymezení	20
3.1.2 Geologické poměry.....	22
3.1.3 Historický vývoj areálu.....	24
3.2 Zámecká zahrada – historické sklepy	25
3.2.1 Umístění a současný stav sklepů	25
3.2.2 Dosavadní archeologické poznatky	25
3.2.3 Dosavadní geofyzikální prozkoumanost.....	27
3.3 Geofyzikální průzkum 2020-2021	28
3.3.1 Cíle průzkumu	28
3.3.2 Volba metod a ploch měření	28
3.3.3 Metodika měření.....	32
3.4.4 Metodika zpracování dat.....	34
3.4.5 Výsledky měření a interpretace.....	36
4. DISKUZE	54
5. ZÁVĚR	56
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
7. FOTOGRAFICKÁ PŘÍLOHA	61

1. ÚVOD

Diplomová práce je zaměřena na využití geofyzikálních metod v oblasti nedestruktivního průzkumu prováděného pro archeologické účely. Zabývá se detekcí a průzkumem historických antropogenních dutin, jako jsou například historická sklepení, krypty a podobně.

V úvodní části práce jsou formou stručného přehledu popsány typy vyhledávaných objektů, jejich fyzikální vlastnosti, sledované fyzikální veličiny a dále charakteristika vybraných geofyzikálních metod se souvisejícími specifiky. Mezi nejčastěji využívané metody při průzkumu lokalit s historickými dutinami patří gravimetrie, geoelektrické odporové metody (symetrické odporové profilování a elektrická odporová tomografie), elektromagnetické metody (georadar, dipólové elektromagnetické profilování) a termometrie.

Hlavní část práce je věnována komplexnímu geofyzikálnímu průzkumu archeologické lokality, která se nachází v Zámecké zahradě na území centra města Teplice. Výběr lokality vycházel ze spolupráce s PhDr. Lucií Kursovou, vedoucí oddělení archeologie Regionálního muzea v Teplicích. V prostoru Zámecké zahrady se nachází historická sklepení, jejichž nejstarší prostory byly datovány do středověku. Zámek i s přílehlou zahradou procházel velmi složitým stavebním vývojem a jejich podoba se v průběhu staletí razantně měnila.

Cílem komplexního geofyzikálního průzkumu plochy nad sklepy i mimo ně bylo rozšíření dosavadních poznatků o lokalitě, ověření možného pokračování podzemních prostor a upřesnění jejich rozsahu, detekce případných reliktních či destruktivních již zaniklých nadzemních budov a také porovnání efektivity jednotlivých použitých geofyzikálních metod při průzkumu podzemních historických dutin.

2. LOKALIZACE HISTORICKÝCH ANTROPOGENNÍCH DUTIN GEOFYZIKÁLNÍMI METODAMI

2.1 Typy vyhledávaných objektů

- **Profánní objekty**

Nejběžnějším typem historických dutin jsou profánní (světské) objekty. Mezi ty patří sklepy, lochy, podzemní chodby a případně s nimi související objekty sloužící jako zdroje vody, tj. cisterny a studny. Jako sklepení se dnes obecně označují prostory zčásti či zcela zahloubené pod úroveň okolního terénu. Jako lochy, podle slova přejatého z němčiny, které lze doslovně přeložit jako „díra“, jsou označovány zpravidla menší, ve většině případů středověké dutiny (zpravidla méně pravidelného tvaru), které byly vyhloubeny do skalního podloží či do pískovcových masivů.

Funkce sklepů a lochů byla především skladovací, sloužily pro uchovávání zásob a výjimečně také jako úkryt před hrozícím nebezpečím. Pokud bylo podzemních místností více, nezřídka byly propojovány podzemními chodbami. Historické sklepní prostory se nacházejí zejména u hradů, tvrzí, zámků či v areálech zaniklých vesnic, nejčastěji pod relikty obytných budov (Sokol a kol. 2017). Často velmi dobře zachovalé komplexy chodeb a místností v podzemí se nacházejí pod historickými jádry měst. V případě zaniklých nadzemních staveb upozorňují na přítomnost podzemních dutin zpravidla trychtýřovité propady (Kuna a kol. 2004).

- **Sakrální objekty**

K církevním účelům byly podzemní prostory využívány zejména jako hrobky určené k ukládání mrtvých a ve většině případů jsou takové prostory lokalizovány v interiérech sakrálních staveb – kostelů a klášterů. Krypty jsou obvykle jednoduché klenuté kaple, ve kterých byly často pohřbívány významnější osobnosti, například panovníci, církevní hodnostáři či světcí. Katakomby jsou prostory mající svůj původ ve starověkém Římě a jedná se o komplex podzemních prostor a chodeb určených k pohřbívání. Na rozdíl

od profánních staveb byly ty církevní zpravidla zdobnější či stavebně složitější, klenby v rozsáhlých prostorách byly často nesené sloupy.

▪ **Montánní objekty**

Historická důlní díla v podobě dutin mohou být přípovrchová či hlubinná. Přípovrchová těžba byla prováděna ve formě vertikálních, případně ukloněných šachet, na které navazovalo několik horizontálních štol (chodeb) nebo komor. Takové mělce uložené těžební prostory se na povrchu projevují odvaly, které jsou tvořeny nahromaděnou hlušinou a zpravidla různě rozsáhlými propady těžebních jam. V rámci hornických lokalit se vyskytují také pinky, což jsou prohlubně na povrchu vzniklé po vytěžení míst pod nimi. Složitější charakter mají objekty, kde byla prováděna těžba hlubinná, dosahující hloubek větších než desítky metrů. Jejich typickým představitelem je dědičná štola, která měla za úkol odvodnění dolu (Kuna a kol. 2004). Jako dutiny mohou být charakterizovány i hlouběji situované štoly, šachty, komíny a jednotlivé dobývky o různé velikosti.

2.2 Fyzikální vlastnosti dutin a sledované fyzikální veličiny

Hodnoty sledovaných fyzikálních veličin závisejí zejména na výplni dutiny a případně i na vlastnostech materiálu, který byl v rámci výstavby použit. Je důležité, aby byla výplň nebo stavební materiál dostatečně fyzikálně kontrastní oproti okolnímu horninovému prostředí. Prostor objektu může být kromě vyplnění vzduchem zčásti či zcela zaplaven vodou nebo zasypán sekundární výplní, kterou tvoří kvartérní sedimenty nebo hmota zříceného materiálu, například po kolapsu stropní části. U montánních objektů mohou tvořit výplň dutin také výztuže, v případě historických důlních děl zpravidla dřevěné. Relevantní fyzikální veličiny budou specifikovány v dalším textu.

▪ **Objemová hustota**

Objemová hustota σ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je základní petrofyzikální vlastností hornin. V případě vyhledávání podpovrchových prostor je charakteristická jejich hustotní diference oproti okolním hmotám. Mimo výplň dutiny závisí hodnota objemové hustoty horninového

prostředí na mnoha dalších aspektech, jako jsou například mineralogické složení, struktura a textura hornin, stupeň zvětrání a tektonického porušení, porozita či metamorfóza. Objemová hustota dutiny většinou nabývá hodnot nižších, než jakými se projevuje okolní horninové prostředí.

Veličinou související s hustotou prostředí je relativní tíhové zrychlení g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$], které se nad hustotně diferenčními strukturami liší od normální tíže, což způsobuje tíhové anomálie. Absenci hmoty a hustotní nehomogenity pod povrchem lze detekovat pomocí gravimetrických měření.

▪ Měrný elektrický odpor

Měrný elektrický odpor (rezistivita) ρ charakterizuje odporové a vodivostní vlastnosti látek. V terénu zjištěný (naměřený) odpor je ovlivněn tím, že prostředí pod povrchem země není zcela homogenní, a proto při geofyzikálním měření zavádíme parametr označovaný jako zdánlivý měrný odpor ρ_z [Ωm]. Mezi obecné faktory ovlivňující velikost odporu patří například mineralogické složení, porozita, struktura pórů, stupeň nasycení vodou, mineralizace pórové vody, struktura a textura horniny či teplota a tlak.

Rezistivita prostředí úzce souvisí s přítomností vody, proto v případě, kdy je prostor dutiny zaplněn vodou nebo vlhkou výplní, budou hodnoty měrného elektrického odporu vůči okolí výrazně sniženy. Pokud se jedná například o sklepení, materiály použité na stavbu vyzdívky se oproti okolí ve většině případů projeví vyššími měrnými odpory. Vyšší hodnoty odporů lze naměřit také u dutiny zaplněné pouze vzduchem či suchým sedimentem.

Převrácenou hodnotou rezistivity je měrná elektrická vodivost (konduktivita) γ [$\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$]. Čím je měrný elektrický odpor materiálu vyšší, tím menší je konduktivita. Výrazný vodivostní kontrast je přítomen u vzduchem vyplněných dutin.

▪ Permittivita

Obsahem vody jsou podmíněny také hodnoty relativní permittivity ϵ_r , dříve nazývané jako dielektrická konstanta. Tato bezrozměrná veličina vyjadřuje schopnost materiálu polarizovat se v elektrickém poli a jedná se o podíl permittivity absolutní a permittivity

vakua. Rozmezí hodnot relativní permitivity je od 1,0 (vzduch) do 81,0 (voda), pro horniny je nejčastěji v intervalu 6 až 12. Se vzrůstajícím obsahem vody se permitivita, na níž závisí rychlost průniku elektromagnetických vln prostředím, zvyšuje. U suché dutiny budou její hodnoty nižší než u jejího okolí a při vyplnění dutiny vodou naopak vyšší.

- **Teplota a teplotní gradient**

Přítomnost dutin může ovlivňovat lokální tepelné pole, protože zde dochází k rozdílné distribuci tepla. Změna teploty T [$^{\circ}\text{C}$] na jednotku délky je nazývána teplotní gradient G [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$]. Detekované teplotní nehomogenity jsou způsobeny časovými a prostorovými změnami teploty vzduchu, které jsou závislé na dané roční době, na proudění tepla z podloží a na termických parametrech prostředí.

- **Magnetická susceptibilita**

Magnetická susceptibilita κ [rel. jedn.] vyjadřuje schopnost látek magnetizovat se ve vnějším magnetickém poli, dle její hodnoty se materiály rozlišují na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické.

V případě detekce dutin lze měření magnetické susceptibility použít například doplňkově v případě předpokládaného zániku objektu žárem, kdy je přítomna tzv. termoremanentní magnetizace materiálu. Magnetický kontrast může vykazovat také kamenný stavební materiál obsahující feromagnetické minerály a pálené cihly.

2.4 Geofyzikální metody používané při vyhledávání historických dutin a jejich specifika

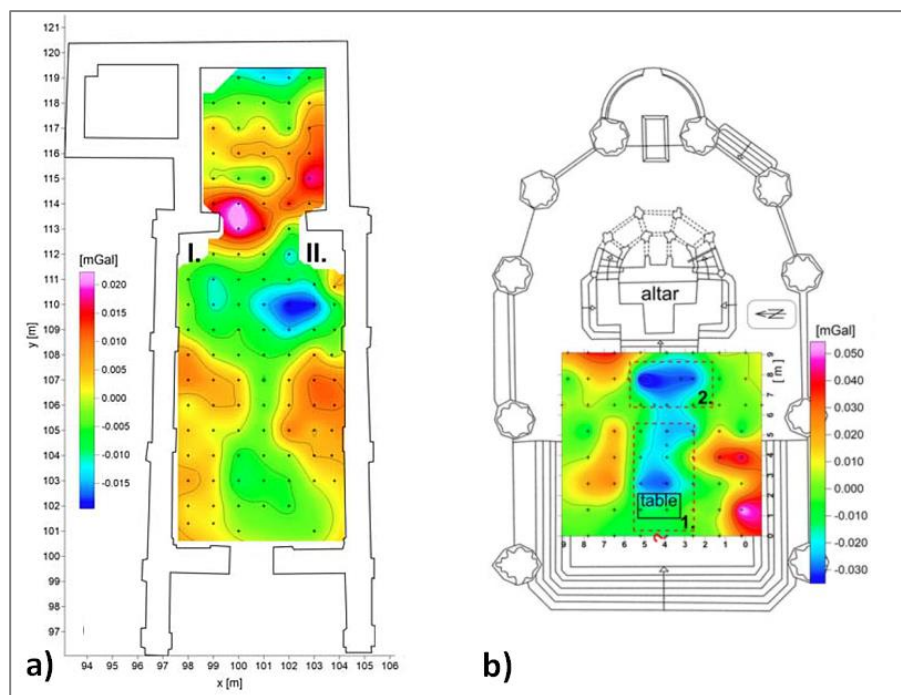
Kromě výplně či materiálu tvořícího podpovrchový objekt hrají při lokalizaci dutin významnou roli také další faktory, na jejichž základě je následně volena vhodná geofyzikální metoda pro daný průzkum. Mezi důležité parametry patří zejména očekávaná hloubka uložení, odhadovaná velikost a tvar objektu. S ohledem na jeho pravděpodobné rozměry musí být vybrána taková metoda, pomocí které lze

předpokládanou anomálii detekovat. U každé z metod je nutno zohlednit také citlivost konkrétního přístroje a přesnost měření. To se v závislosti na zvolené metodě provádí v krocích či kontinuálně. Dále je nutné uvážit případné problémy způsobené rušivými faktory, které by mohly negativně ovlivnit naměřená data. Mezi nejčastěji využívané metody pro účely přímé detekce dutých prostor pod povrchem patří gravimetrie, geoelektrické odporové metody, elektromagnetické metody a termometrie.

2.4.1 Gravimetrie

Pro úspěšné gravimetrické měření je třeba, aby byl přítomen hustotní kontrast, tedy dostatečná hustotní diference mezi okolním prostředím a vyhledávanou dutinou. Na zvolených bodech jsou v rámci profilů či plošně měřeny změny tíže vůči hodnotám naměřených na opěrných bodech. V případě archeologického průzkumu jde zpravidla o velmi přesné měření relativního zrychlení, takzvanou mikrogravimetrii. Sít' měření je zde hustší než při běžném gravimetrickém průzkumu a požadavky na přesnost jsou vyšší. Body jsou od sebe vzdáleny v řádu prvních metrů, případně desítek centimetrů. Rozlišení moderních přístrojů je $\pm 1 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), přesnost měření je v závislosti na konkrétním přístroji a podmínkách měření obvykle ± 3 až $5 \mu\text{Gal}$ (Pašteka et al. 2020).

Výstupem gravimetrických měření jsou zpravidla 2D a 3D modely nebo mapy izolinií odpovídající naměřeným tíhovým a reziduálním Bouguerovým anomáliím. Příklady výsledků mikrogravimetrického měření provedeného nad historickými podzemními objekty jsou uvedeny na obrázku 1. Anomálie nad podpovrchovými dutinami se projevují jako tíhová minima (modrá), záporné anomálie značí deficit hmoty v daném prostředí.



Obr. 1: Příklady výstupů mikrogravimetrických měření: a) mapa Bouguerových anomálií, kostel sv. Mikuláše v Trnavě. b) mapa reziduálních anomálií, katedrála sv. Víta v Praze. Upraveno podle Pašteka et al. 2020.

Gravimetrie je při průzkumu dutin velmi spolehlivou a často využívanou metodou, její výhodou oproti ostatním metodám je prakticky neomezený hloubkový dosah. Vysokou hustotní diferencí intenzivně vykazují dutiny zaplněné vzduchem, vodou nebo troskami zkolabovaného materiálu.

Výsledky gravimetrických měření mohou být z několika důvodů nejednoznačné. Dutiny, lokalizované jako úzké a hluboko uložené mohou vykazovat stejnou odezvu jako širší a mělké objekty. Také nelze zcela jistě určit reálný charakter výplně. Nejednoznačnost lze redukovat zejména pomocí výsledků dalších geofyzikálních metod, případně zkušebními vrty, pokud je možný částečně destruktivní zásah. Velikost hluboko uložené prostory musí být dostatečná, aby byly změny tíže nad ní detekovatelné. Další problémy může způsobit zanedbání či nesprávné provedení opravy na topografii, přítomnost šumu způsobeného například blízkou aglomerací, infrastrukturními vibracemi či silným větrem. Při měření v interiérech staveb nelze zanedbat také korekci na gravitační účinky budov (v interiéru i exteriéru), které se při zavedení nedostatečné

opravy mohou projevit falešnými, obvykle zápornými anomáliemi (Pašteka et al. 2020). Kvalita výstupů mikrogravimetrických měření je výrazně závislá na přesném určení nadmořských výšek, které by měly být stanoveny s chybou maximálně v rámci prvních milimetrů. Obecným problémem může být také časová náročnost terénních prací. Z hlediska komplexních průzkumů je efektivní kombinovat gravimetrii s elektrickou odporovou tomografií a georadarovým měřením (Pašteka et al. 2019).

2.4.2 Geoelektrické odporové metody

▪ Symetrické odporové profilování (SOP)

Při odporovém profilování je podél zvoleného profilu pomocí skupiny elektrod a jejich vhodného uspořádání zjišťována hodnota zdánlivého měrného odporu ρ_z pro jeden hloubkový dosah (výjimečně pro dva).

Výstupem symetrického odporového profilování podél profilu je sekvence hodnot zdánlivého měrného odporu v podobě profilové křivky. Pro plošné zobrazení v případě většího množství profilů je třeba sestavit data z jednotlivých profilů do mřížky a výsledkem je mapa izolinií zdánlivého měrného odporu v ploše.

Symetrické odporové profilování je efektivní při mapování mělce uložených struktur v rámci menších ploch a poskytuje detailní data pro podrobnější průzkum lokality. Pro efektivní použití odporového měření je zapotřebí přítomnosti dostatečně kontrastního objektu, metodu je proto vhodné použít i za předpokladu s dutinou související existence kamenných struktur či konstrukcí. Značným omezením metody může být nedostatečný hloubkový dosah, který je závislý na rozměru uspořádání, respektive na vzdálenosti krajních proudových elektrod A a B.

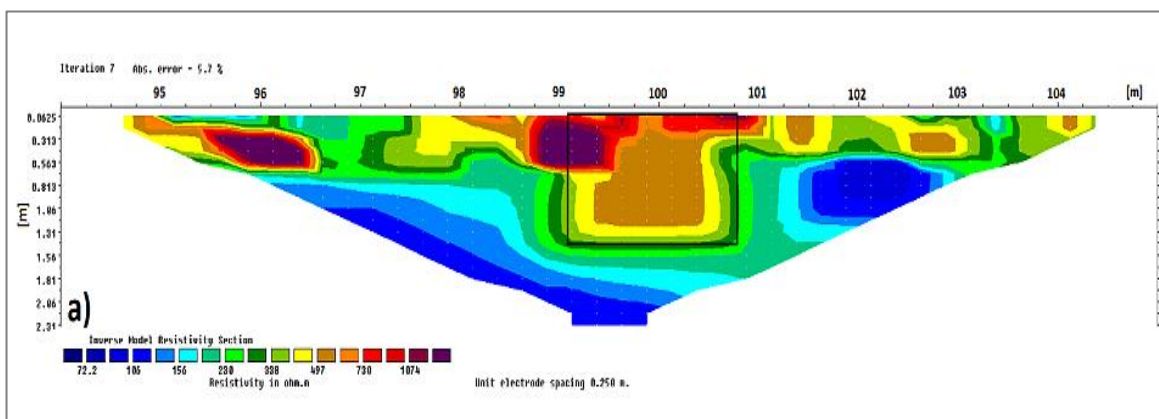
▪ Elektrická odporová tomografie (ERT)

Pomocí multielektrodové odporové metody ERT (z angl. *electrical resistivity tomography*) lze sledovat odpory ve více hloubkových úrovních. Profilově-sondážní měření se provádí pomocí automatické multikanálové aparatury, speciálního mnohožilného kabelu a odpovídajícího množství elektrod, které jsou v průběhu měření

přístrojem automaticky střídavě přepínány jako měřicí či proudové. Jednotlivé elektrody jsou od sebe při měření prováděném pro archeologické účely s ohledem na velikost hledaných objektů vzdálené zpravidla 0,5 m, při lokalizaci dutin o malých rozměrech například i 0,25 m. Pro efektivní geoelektrický průzkum by měly být materiály použité na stavbu daného objektu či jeho výplň svým měrným odporem dostatečně odlišné od okolního horninového prostředí.

Výsledky elektrické odporové tomografie jsou pro jednotlivé profily zobrazovány ve formě vertikálních odporových 2D řezů nebo v případě systému paralelních či křížících se profilů plošně v systému 3D výstupů (kombinace vertikálních a horizontálních řezů). Výhodou multielektrodové metody je zejména sledování změn odporu ve vertikálním i horizontálním směru. Pro vlastní měření není komplikací ani členitý terén ani příliš vodivé prostředí. Hloubkový dosah metody je závislý na maximální vzdálenosti proudových elektrod, jeho velikost je dána také zvoleným uspořádáním. Běžně užívanou konfigurací pro úspěšnou detekci dutin je Wenner – Schlumberger s efektivním hloubkovým dosahem $1/5 AB$. Výbornými výsledky při detekci dutin se osvědčilo také elektrodové uspořádání dipól-dipól (Martínez-López et al. 2013, Pašteka et al. 2019, Putiška 2012), jehož hloubkový dosah je přibližně $1/5$ vzdálenosti mezi středy obou dipólů. Uvedená konfigurace poskytuje nejdetailnější výsledky s vysokým rozlišením pro horizontální změny odporu. Současně je ale citlivá na vyšší přípovrchový odpor a také na přítomnost elektromagnetického šumu – vždy záleží na podmínkách konkrétní lokality.

Multielektrodová metoda je ve většině případů realizována v exteriéru, měření v interiéru je z hlediska zajištění kontaktu elektrod s povrchem komplikované. Na obrázku 2 je ilustrován výsledek měření v interiéru kostela, kde byla metoda realizována zcela neinvazivně. Pro zlepšení kontaktu a snížení přechodového odporu mezi použitými elektrodami a podlahou byl použit bentonit (Pašteka et al. 2019), což může být jedním z alternativních řešení v případě, že v daném místě nelze elektrody klasicky umístit přímo do „zemního“ prostředí.



Obr. 2: Příklad výstupu měření metodou ERT, kostel sv. Kateřiny v Banské Štiavnici.

Invertovaný odporový 2D řez (uspořádání dipól-dipól, rozestup elektrod 0,25 m, 7 iterací). Černým obdélníkem je ohraničen projev hlavní interpretované mělce uložené dutiny (pravděpodobně krypty), jejíž poloha byla téměř totožná i na výsledcích metody GPR. Mělké vysokoodporové anomálie v úseku metrů 98,8 - 99,4 m a 100,1 – 100,9 m byly interpretovány jako deformace v důsledku vyššího přechodového odporu skupiny elektrod.

Podle Pašteka et al. 2019.

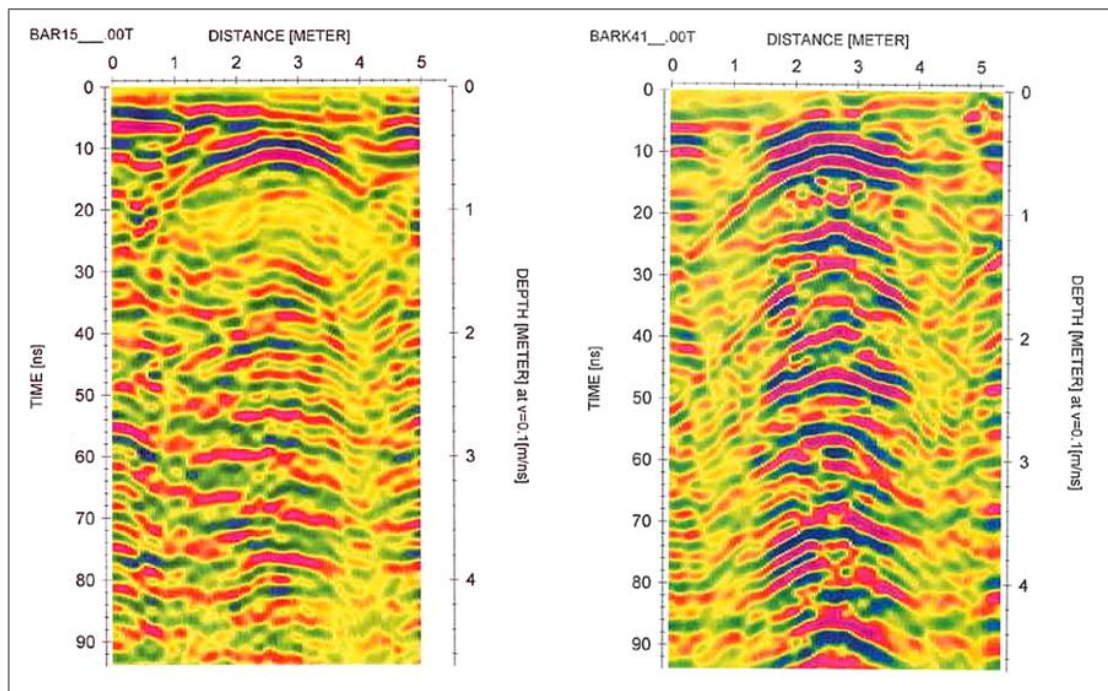
2.4.3 Elektromagnetické metody

- **Georadar (GPR)**

Obecným principem metody GPR (z angl. *ground penetrating radar*) je vysílání vysokofrekvenčních elektromagnetických vln o frekvencích v rozsahu desítek MHz až několik GHz pomocí vysílacího anténního systému umístěného těsně nad povrchem terénu do prostředí s rozdílnými odpory a permitivitami. Přijímací anténa následně registruje čas t [ns] a amplitudu příchodu pulzů odražených od jednotlivých rozhraní. Měření probíhá zpravidla kontinuálně, kdy je předem nastaven určitý krok měření a měřicí systém se pohybuje po profilech, které jsou od sebe vzdáleny zpravidla 1 až 2 m, při archeologických průzkumech i 0,5 m. Hloubkový dosah metody je kromě citlivosti

přístroje závislý také na velikosti použité frekvence, s jejímž růstem klesá; podobně se zmenšuje i s rostoucí vodivostí. V našich podmínkách, kde je měrný odpor prostředí nejčastěji řádu desítek až tisíců Ωm , je maximální dosah metody zpravidla několik prvních metrů.

Primárními výstupy zpracování jednotlivých naměřených stop jsou po převedení časové stupnice na hloubkovou 2D georadarové řezy (radargramy), které je možné zpracovat i do 3D podoby plošných anomálií. Příklad typických 2D radargramů je uveden na obrázku 3. Odrazy elektromagnetických vln od detekované dutiny se zde projeví jako série nahoru vyklenutých parabolických křivek, jejichž velikost a orientace je závislá na směru profilu a podobě hledané struktury.



Obr. 3: Příklad radargramů z měření nad hrobkami v interiéru kaple sv. Barbory na vrchu Modla (kontinuální měření se vzorkovacím intervalem 5 cm a anténou o frekvenci 250 MHz). Zděné hrobky pod povrchem se na profilech projeví typicky jako parabolické křivky umístěné nad sebou.

Podle Hašek et al. 2013.

Metoda GPR je při průzkumu pro archeologické účely velmi hojně využívanou a oblíbenou moderní metodou. Variabilita výstupů a možnosti zpracování dat jsou značnou výhodou. Efektivní je georadar především z hlediska rychlosti a mobility terénního měření. Moderní GPR přístroje jsou neustále zdokonalovány. Aktuálně nejmodernějším zařízením je speciální 3D georadarový systém MIRA (*Malå Imaging Radar Array*, švédský výrobce Malå GeoScience), který díky mnohakanálovému uspořádání umožňuje sbírat data plošně ve velmi husté síti bodů 8×8 cm. Použitá technologie měření a zpracování dat je schopna detekovat i zdánlivě nezřetelné projevy podzemních struktur, a proto je její využití pro archeologické účely extrémně efektivní. Aparatura také umožňuje proměření velmi rozsáhlých ploch v řádech hektarů denně (Viberg et al. 2020).

Georadarová měření je vhodné provádět v rámci komplexních průzkumů společně s další metodou či metodami, jelikož výsledky GPR průzkumu mohou být v mnoha případech problematické nebo i neúspěšné. Při měření v intravilánu jsou častým problémem moderní inženýrské sítě, kolektory, kanalizace a podobné recentní antropogenní struktury, které se při měření na jednotlivých stopách projeví obdobně jako hledané objekty. Blízké budovy, především jejich obvodové zdi apod., často vyvolávají difrakci elektromagnetických vln, která může způsobit vznik falešných anomálií. Výraznou komplikací pro georadarová měření může být přítomnost vody, na kterou je tato metoda velice citlivá. Vodní hladina či vodou nasycená přípovrchová vrstva prostředí vytváří odrazné rozhraní zeslabující signál a omezuje průnik vlny do hloubky. Optimální podmínky pro měření představuje nevodivé prostředí o vyšších odporech. Kvalita nasbíraných dat může být snížena i v důsledku kontinuálního měření, a to pokud jsou v rámci měřené plochy přítomny výraznější terénní nerovnosti a dochází tak k nerovnoměrnému kontaktu antény s povrchem, resp. k větším odchylkám fokusovaného paprsku od vertikály. Vhodný terén pro georadarová měření by tedy neměl vykazovat výraznější členitost. Kvalita zpracování naměřených dat a interpretace výsledků metody GPR jsou ve velké míře závislé také na zkušenostech a odbornosti osob, které provádějí měření a následné vyhodnocení dat.

▪ Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP, konduktometrie)

DEMP (z angl. *dipole electromagnetic profiling*) je stejně jako GPR aktivní metodou, jejímž obecným principem je vysílání a přijímání elektromagnetických pulzů o frekvencích v řádu kHz a bezkontaktní měření vodivosti podél profilu. Kromě vodivosti měří přístroj i synfázní složku sekundárního elektromagnetického pole. Přístroj je složen z několika cívek (budících a přijímacích), na jejichž vzájemné vzdálenosti a orientaci závisí odezva a hloubkový dosah. V případě častého uspořádání tvořeného jednou vysílací a třemi přijímacími cívkami je možné získat data ze tří hloubkových úrovní. Metoda je využívána pro mělčí průzkumy v rámci několika prvních metrů.

Výstupem měření jsou křivky či mapy izolinií hodnot zdánlivé měrné vodivosti γ_z či zdánlivého měrného odporu počítaného dle vztahu $\rho_z = 1/\gamma_z$. Zdánlivá vodivost odpovídá imaginární části měřeného signálu, reálná složka *inphase* koresponduje se zdánlivou magnetickou susceptibilitou prostředí κ [ppt].

Dipólové elektromagnetické profilování je vhodné například pro měření ploch se zpevněnými povrchy, jako je beton či asfalt. Nespornou výhodou metody je hloubkový dosah v několika úrovních. Terénní měření metodou DEMP je efektivní i z hlediska časové nenáročnosti.

Stejně jako u metody GPR může být měření v intravilánu komplikováno přítomností elektromagnetického šumu, který způsobují různé umělé zdroje. Metoda je současně velmi citlivá na recentní vodivé objekty.

2.4.4 Termometrie

Teplotní měření lze rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. V případě kontaktního měření je teplota detekována zavedením čidla na povrch či přímo do zájmového prostředí. Moderní bezkontaktní měření je pak založeno na principu snímání teploty v infračervené oblasti spektra elektromagnetického záření. Měřičská síť pro teplotní měření je obvykle $0,5 \times 0,5$ m nebo 1×1 m (Hašek a kol. 2013).

Měření teplotního pole se často uplatňuje zejména při průzkumu mělce uložených hrodek a krypt v interiérech historických sakrálních staveb. Výhodné je využití metody

v případě, kdy nelze úspěšně použít ostatní geofyzikální metody kvůli různým rušivým vlivům.

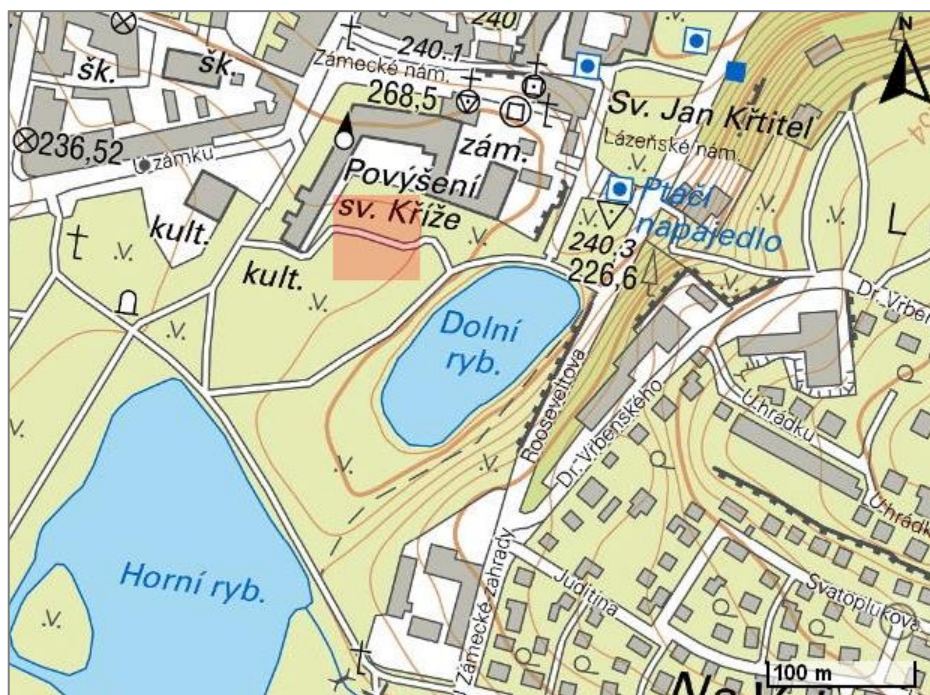
Při měření na povrchu terénu může být problémem kolísání tepelného pole interagujícího s atmosférou. Dochází zde k jeho variacím, které jsou způsobeny momentálním přísunem tepla ze slunečního svitu, ochlazováním větrem nebo v důsledku odpařování vody z povrchu terénu, denními a ročními periodickými změnami teploty, biosférickými poměry či změnami charakteru povrchu terénu. Tyto výkyvy mají zpravidla vyšší amplitudu než měřené anomálie. Časové variace je nutné při měření monitorovat a pro eliminaci jejich vlivu je vhodné provádět teplotní měření, pokud je to možné, například v jamkách nebo mělkých vrtech.

3. KOMPLEXNÍ GEOFYZIKÁLNÍ PRŮZKUM PRO ARCHEOLOGICKÉ ÚČELY V PROSTORU ZÁMECKÉ ZAHRADY V TEPLICÍCH

3.1 Základní informace o lokalitě zámek Teplice

3.1.1 Topografické vymezení

Archeologická lokalita se nachází v Ústeckém kraji v centru okresního a lázeňského města Teplice. Zámek stojí na Zámeckém náměstí, zahrada o rozloze přes 20 hektarů přiléhá k jeho budovám z jihu. Zámecká zahrada má podobu krajinářského parku anglického typu. Ten je v současné době v péči města Teplice a patří do městské památkové zóny vyhlášené roku 1992. Historické sklepení leží pod terénem v části zahrady mezi západním křídlem zámku a Dolním rybníkem. Nadmořská výška zájmového segmentu zahrady se pohybuje od 230 m n. m. na jihu do 233 m n. m. na severu.



Obr. 4: Topografická mapa s vyznačením zájmové plochy.

Dostupné z <http://ags.cuzk.cz/geoprohlizec>.



Obr. 5: Ortofoto, zámecké budovy v Teplicích a vyznačení zájmové plochy.

Dostupné z <http://mapy.cz>.



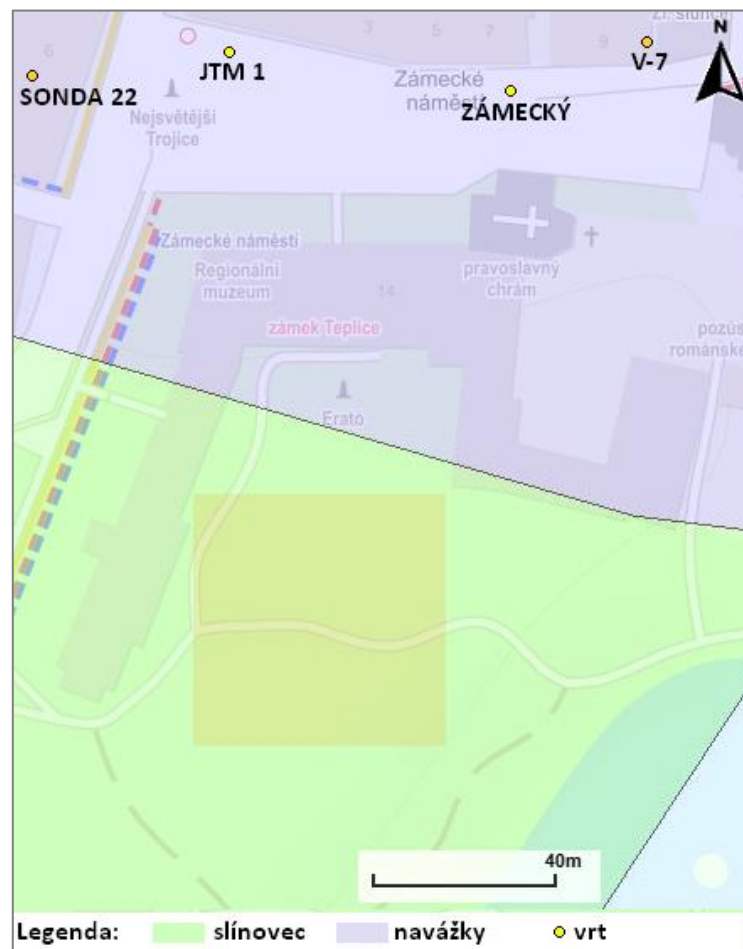
Obr. 6: Zámecká zahrada Teplice, celkový pohled na prostor měření.

3.1.2 Geologické poměry

Z hlediska regionálního geologického členění se lokalita nachází v oblasti české křídové pánve, která je nejmocnějším a nejsouvislejším platformním pokryvem Českého masivu. Česká křídová pánev vznikla během svrchnokřídové mořské transgrese. Mocnou výplň pánve dosahující hloubek v řádu stovek metrů tvoří klastické sedimentární horniny. V nejspodnějších vrstvách jsou to převážně brakické a jezerní sedimenty, ve svrchnějších převážně mořské (Petránek a kol. 2016).

Prostor západního křídla zámku a větší část parku vykazují minimální mocnost kvartérního pokryvu a jejich skalní podklad tvoří zpevněné marinní sedimenty vzniklé karbonátovou sedimentací. Jedná se o vápnité slínovce jizerského souvrství turonského stáří, které obsahují polohy a konkrce vápenců. Severní část zámeckého areálu s částí nádvoří je pokryta většími mocnostmi nezpevněných sedimentů, jedná se vesměs o antropogenní navážky proměnlivého minerálního složení a různé zrnitosti, související s městskou a zámeckou zástavbou. Půdní jednotky překrývající lokalitu jsou pelická pararendzina a antropozem.

Podle databáze vrtné prozkoumanosti se nejbližší geologické vrty nacházejí na Zámeckém náměstí ve vzdálenosti několika desítek metrů od zájmové plochy. Jedná se o hydrogeologické vrty V-7 o hloubce 40 metrů, kde byl první zastiženou podložní horninou slínovec v hloubce 1,5 m a Zámecký vrt o hloubce 387 m. Dále jsou v prostoru náměstí dokumentované dva inženýrskogeologické vrty, první s označením SONDA 22 o hloubce 5 m a slínovcem zastiženým v hloubce 1,8 m a druhý s názvem JTM-1 o hloubce 5 m a mocnosti navážek 1,0 m.



Obr. 7: Geologická mapa (měřítko 1:50 000) a vyznačení zájmové plochy.

Dostupné z <http://mapy.geology.cz/geo>.

3.1.3 Historický vývoj areálu

Dle písemné zmínky ve Vincentiově kronice byl kolem roku 1160 v prostoru dnešního města Teplice založen královnou Juditou Durynskou v blízkosti starší slovanské vesnice benediktínský klášter. Ve 13. století získala ves přilehlá ke klášteru statut města. Klášter, zahrnující vlastní budovy konventu i tehdy již goticky přestavěnou trojlodní románskou baziliku, zanikl ve dvacátých až třicátých letech 15. století, zřejmě v důsledku husitských válek. Zpustošené klášterní budovy se roku 1435 staly majetkem Jakoubka z Vřesovic, který je přestavěl na světské sídlo do podoby gotické tvrze. Později, v 16. století, zde vznikl renesanční zámek (Kocourková a Vilím 2009).

Zámecké budovy prošly velmi složitým stavebním vývojem a v průběhu staletí prodělaly mnohé úpravy a přestavby. Stejně tak tomu bylo i u přilehlé zahrady, která se měnila v závislosti na momentální podobě panského sídla. V období renesance byla v prostoru dnešního východního nádvoří založena okrasná zahrada. V 17. století jeziťňována existence Dolního rybníka. Během barokní fáze v 18. století vznikla na jižní straně zámku zahrada francouzská, která byla obehňána zdí. Vystavěno bylo i několik skleníků v blízkosti východního křídla zámku, oranžerie, grotty, *ferme orneé* (okrasný statek), bažantnice či zahradní dům.

Na konci 18. století proběhla společně s klasicistní přestavbou zámku výrazná změna podoby zahrady. Francouzská zahrada se postupně proměnila na přírodně krajinářský park v anglickém stylu, byly zde vysazeny nové druhy dřevin a správní i hospodářské budovy patřící k zámku byly strženy. Následně procházela zahrada až do 20. století pouze drobnými změnami a úpravami. Od otevření veřejnosti v 2. polovině 19. století pak sloužila zejména lázeňským hostům. V 70. letech 20. století proběhla výstavba nové čtyřproudé silnice, kvůli které část zahrady zcela zanikla (Kocourková a Vilím 2009). V této době byla v prostoru zahrady vytvořena asfaltová cestní síť.

3.2 Zámecká zahrada – historické sklepy

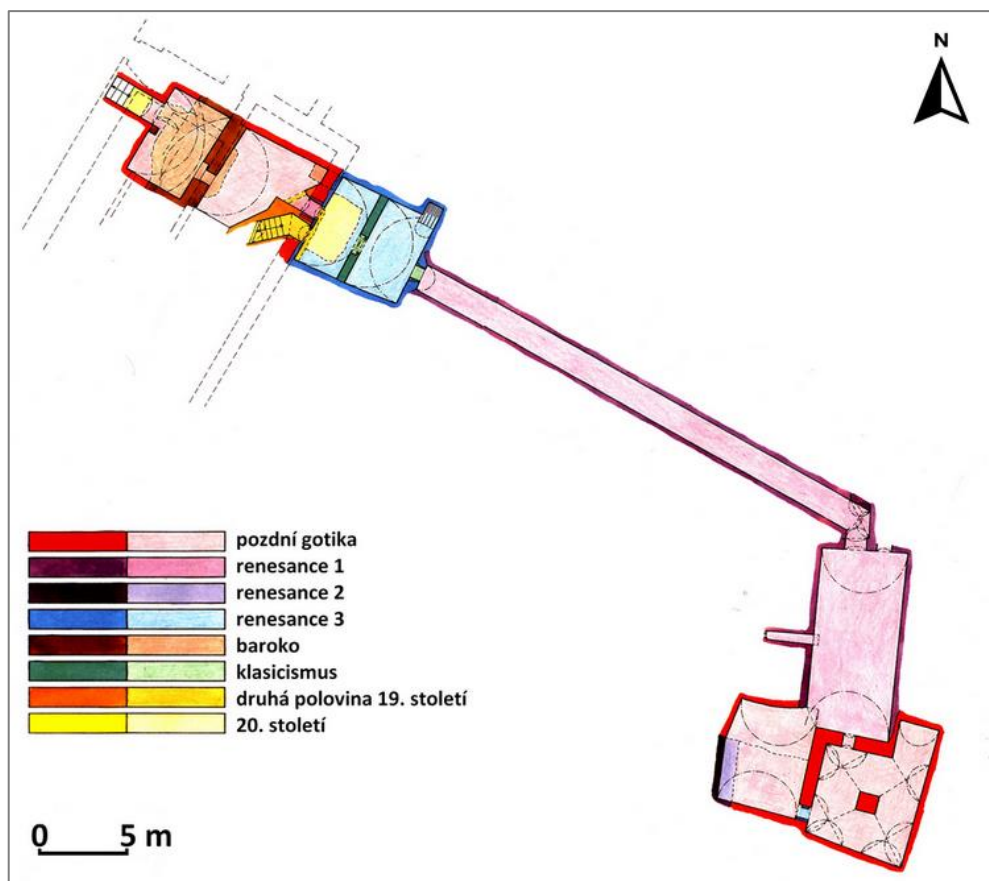
3.2.1 Umístění a současný stav sklepů

Historické podzemní prostory se nacházejí ve vzdálenosti cca 60 m jižně od obvodové zdi severního křídla zámku. Do sklepení je možné vstoupit chodbou z přízemí v západním zámeckém křídle, v místech bývalé konírny. První část podzemních prostor zahrnuje čtyři za sebou řazené sklepy, z nich dva pod západním křídlem a další dva již pod zahradou. Z nich vybíhá východním směrem úzká přístupová chodba o délce zhruba 30 m, vedoucí k druhému bloku sklepů, který tvoří tři prostory situované pod zahradou. Z první obdélníkové místnosti o rozměrech cca 5 × 12 m vedou vchody do dvou dalších přibližně čtvercových místností o rozměrech zhruba 4–5 × 4–5 m a 6 × 4–6 m. V minulosti došlo nad sklepy v důsledku zřícení stropní klenby k několika terénním propadům. Viditelné propady jsou na povrchu zabezpečeny. Zjištěná mocnost zeminy nad klenbami byla přibližně 40 cm. Prostory sklepení jsou volně vyplněny vzduchem, dno je pokryto vlhkou zeminou a zbytky vyplavených pojiv (Špička 2002).

3.2.2 Dosavadní archeologické poznatky

Stavebně-historický průzkum sklepů byl proveden v prosinci roku 2002, a to archeologem a stavebním historikem doc. PhDr. Františkem Gabrielem, Ph.D. Bylo zjištěno, že sklepení je z větší části zděné lomovým kamenem, hlavními zastoupenými stavebními materiály jsou bazalt, opuka a cihly (Gabriel 2002).

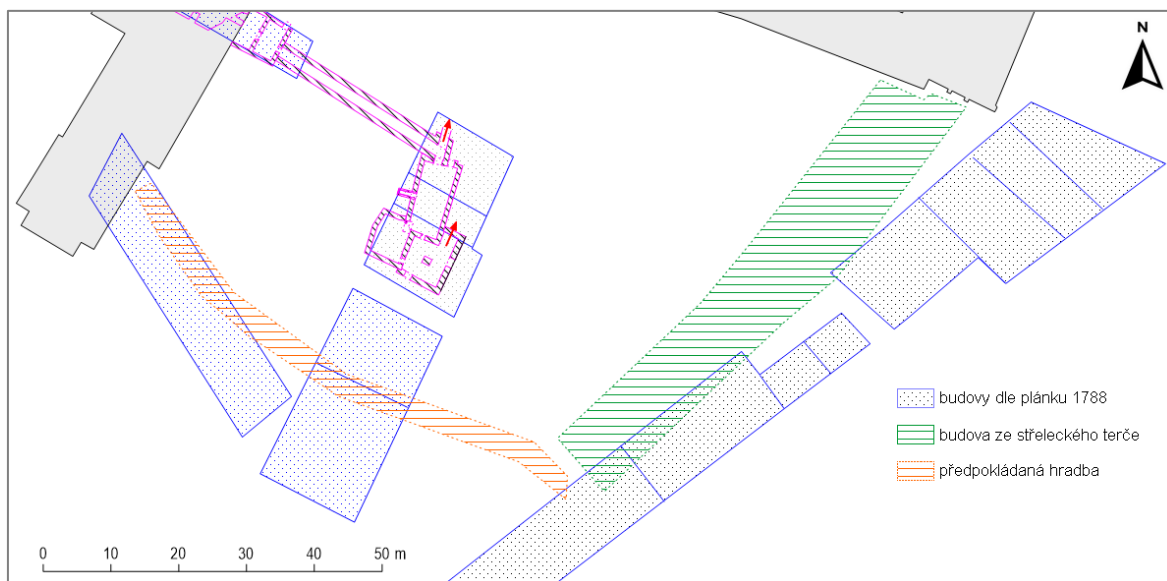
Na základě analýzy zdív a použitých stavebních technik byl vznik dvou klenutých místností v jižní části sklepení datován do období vrcholného středověku (pozdní gotika), zbylé prostory včetně přístupové chodby ze zámku vznikly později v období renesance (Gabriel 2002). V jedné ze dvou nejstarších místností je středový pilíř a několikadílná křížová klenba. Pozdně gotické zdívo se nachází také v západním křídle zámku ve sklepních prostorách před vstupem do podzemní chodby. Datace jednotlivých sklepních prostor je ilustrována na obrázku 8.



Obr. 8: Datace jednotlivých prostor dle stavebně-historického průřezu.

Upraveno podle Gabriel 2002.

Na základě přítomnosti větracích šachet se předpokládá, že podzemní prostory souvisejí s dnes již zcela zaniklou zástavbou nad terénem. Vzhledem ke složitému stavebnímu vývoji a bohaté historii lokality nelze přesně určit, k jaké stavbě sklepení náleželo, ani kdy došlo k jejímu zániku. Není vyloučena souvislost s původní středověkou tvrzí, zmiňovanou poprvé roku 1478. V okolí sklepů je pravděpodobná přítomnost kamenných destruktí zaniklých staveb časově náležejících do dlouhého intervalu od dob existence tvrze až po novověk, kdy zde stála hospodářská stavení, která tvořila uzavřený celek s dvorem uprostřed. Mezi ně patří např. budova vyobrazená na sřeleckém terči z roku 1799 (Kursová 2021, osobní sdělení). Dle mapy Zámecké zahrady z roku 1788 (uvedené např. v Zykmond a kol. 2012) stála přímo nad sklepením budova, jejíž části jsou v legendě popisovány jako vozovna, lisovna vína a obydlí penzijního písaře. Správnost a přesnost tohoto plánu nelze potvrdit. Předpokládané objekty archeologického významu jsou ilustrovány na obrázku 9.



Obr. 9: Plánek s předpokládanými objekty v blízkosti známých prostor sklepení vycházející z dostupných historických podkladů. Červenými šipkami jsou naznačena místa, ve kterých jsou uvažována pokračování známých sklepních prostor.

3.2.3 Dosavadní geofyzikální prozkoumanost

Na zájmové lokalitě bylo v roce 2014 provedeno geofyzikální měření RNDr. Romanem Křivánkem, Ph.D. z Archeologického ústavu AV ČR v Praze. Pro průzkum byly zvoleny dvě geoelektrické metody, a to symetrické odporové profilování a georadar. Odporové profilování bylo realizováno se symetrickým Wennerovým uspořádáním s konfigurací elektrod A 0,5 M 0,5 N 0,5 B a proměřena byla plocha o rozměrech přibližně 70 × 45 m (s vynechanými segmenty v místech cest a křovinatých úseků), která byla centrovaná nad sklepními místnostmi a přístupovou chodbou. Východně od sklepení byly detekovány vysokoodporové anomálie interpretované jako možné kamenné destrukce zaniklých budov. Radarové profily byly situovány především v blízkosti viditelných terénních propadů (Křivánek 2015a, 2015b).

3.3 Geofyzikální průzkum 2020-2021

3.3.1 Cíle průzkumu

Základním cílem komplexního průzkumu bylo rozšíření dosavadních poznatků o archeologické lokalitě reprezentované sklepními prostory pod Zámeckou zahradou v Teplicích. Hlavním účelem bylo ověřit možná pokračování sklepních prostor, která se mohou nacházet za neprostupnými závaly či zdmi a detekovat případné relikty zaniklých staveb nad terénem v blízkosti sklepení. Dále šlo o vzájemné porovnání efektivity a výsledků jednotlivých geofyzikálních metod z hlediska jejich využití při detekci historických dutin pro archeologické účely.

3.3.2 Volba metod a ploch měření

S ohledem na výše zmíněné obecné poznatky o lokalitě a charakter sklepení vycházející ze stavebně-historického průzkumu byly pro měření nad dutinami vybrány metody georadar, multielektrodové odporové měření, dipólové elektromagnetické profilování a mikrogravimetrie. Metody GPR a DEMP byly realizovány plošně, metody ERT a gravimetrie profilově.

- **Georadar**

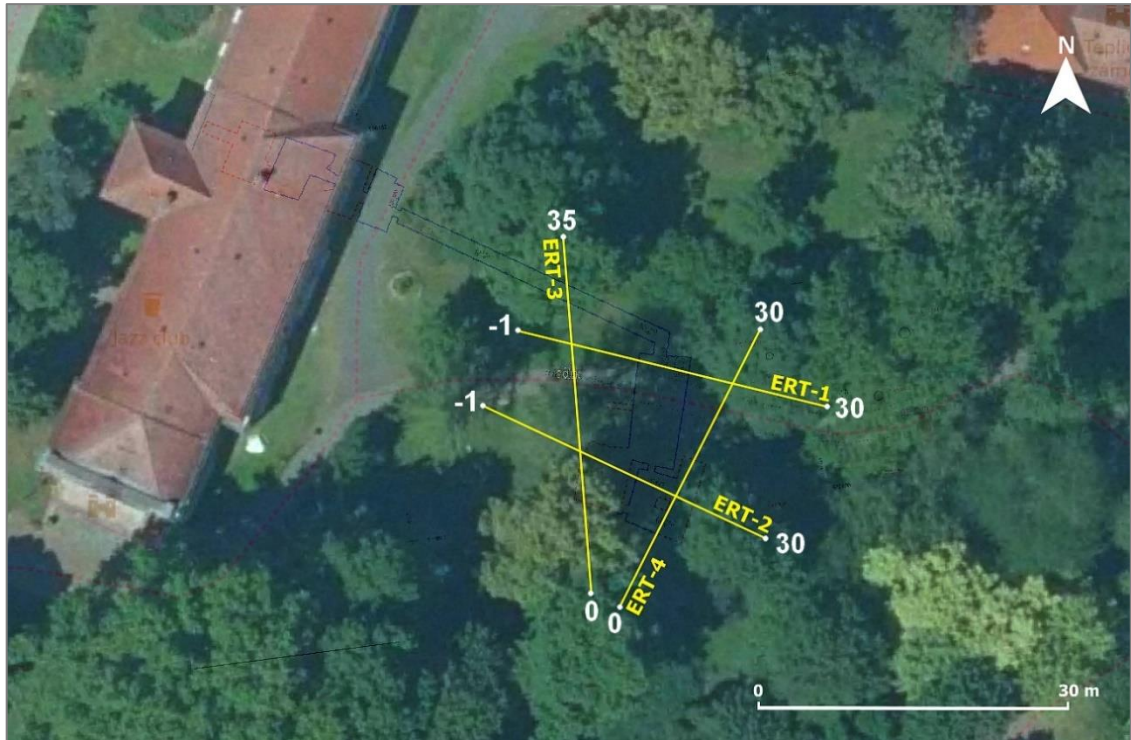
Pro měření metodou GPR byly plochy zvoleny a vytyčeny s ohledem na parkovou úpravu, která byla pro realizaci plošného měření přímo nad sklepením komplikací. Tři vytyčené plochy (obr. 10) měly tvar obdélníků o rozměrech 4 × 10 m (plocha GPR P1), 8 × 21 m (plocha GPR P2) a 11 × 30 m (plocha GPR P3). Pravé úhly byly určeny pomocí nivelačního přístroje, rohové body všech měřených ploch byly profesionálně zaměřeny geodetem.



Obr. 10: Plochy měřené metodou GPR.

- **Elektrická odporová tomografie**

Profily pro multielektrodové odporové měření byly situovány s ohledem na výstup geodetického zaměření sklepů tak, aby přetínaly známé podzemní prostory s výrazným přesahem nad archeologicky exponované partie v jejich okolí (obr. 11). Profily ERT-1 a ERT-2 byly orientovány ve směru přibližně západ – východ, profily ERT-3 a ERT-4 ve směru přibližně jih – sever. Začáteční a koncové body profilů byly vytyčeny pomocí pásem v rámci přesně zaměřené plochy pro metodu DEMP. Délka jednotlivých profilů se pohybovala od 30 do 35 m.



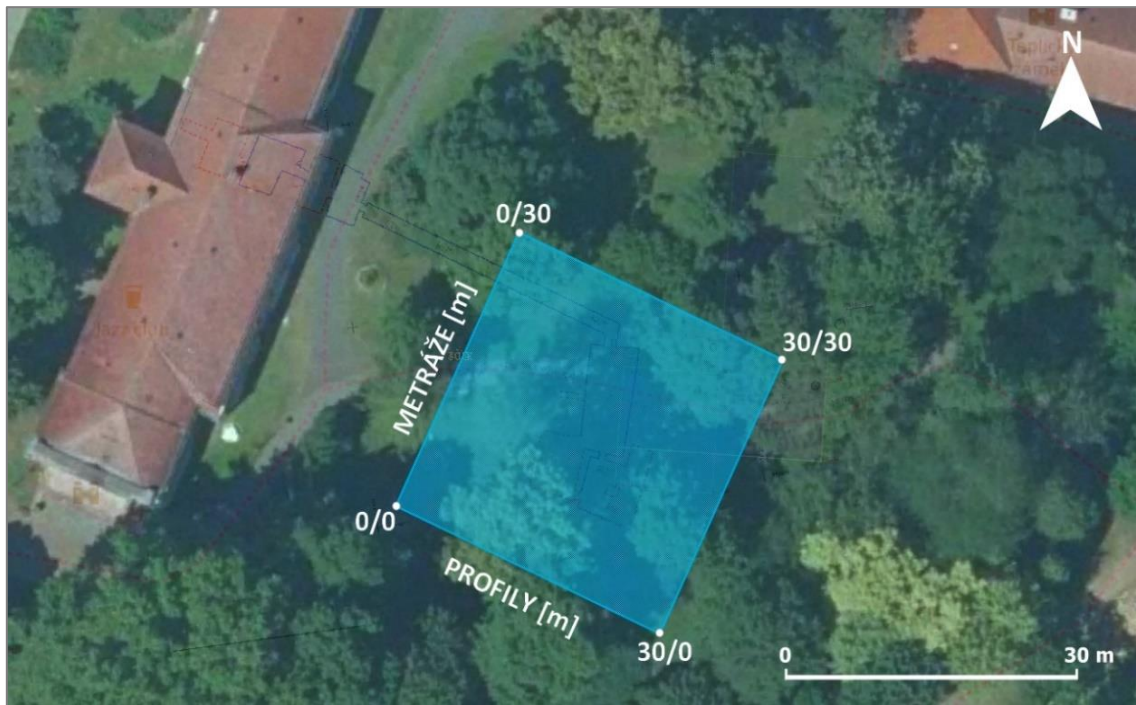
Obr. 11: Profily pro multielektrodové odporové měření s označením metráží začátečních a koncových bodů profilů.

- **Dipólové elektromagnetické profilování**

Plocha pro metodu DEMP byla volena tak, aby jádro sklepení leželo v jejím středu. Rohové body byly předem naplánovány pomocí mapovacího softwaru a na místě vytyčeny pomocí GPS, jejich souřadnice jsou uvedeny v tabulce 1. Proměřená plocha měla tvar čtverce o rozměrech 30 × 30 m (obr. 12).

Tab. 1: Souřadnice rohových bodů plochy pro DEMP v systému JTSK.

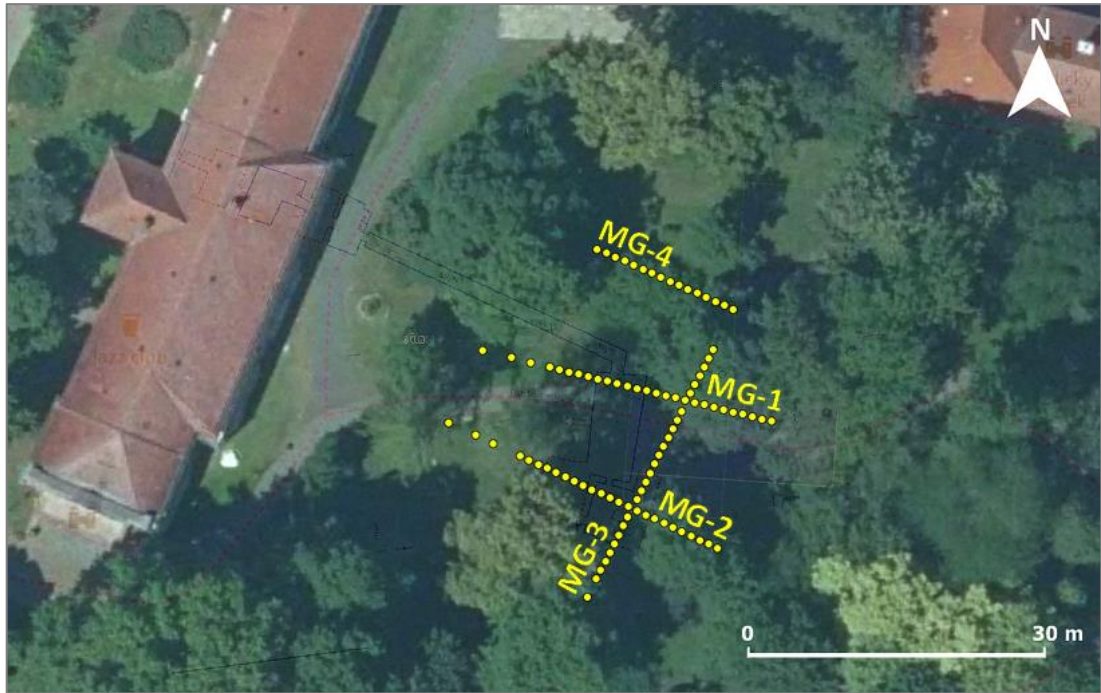
Označení bodu	X [m]	Y [m]
0/0	-776218	-976599
30/0	-776192	-976615
30/30	-776176	-976589
0/30	-776202	-976573



Obr. 12: Plocha pro dipólové elektromagnetické profilování.

- **Mikrogravimetrie**

Gravimetrické měření bylo provedeno v liniích 4 profilů, které byly vytyčeny s ohledem na výsledky měření metody ERT a místa případného pokračování známých sklepních prostor. Tři měřené profily byly totožné s profily navrženými pro měření metodou ERT, profil MG-4, probíhající ve směru ZSZ – VJV, byl situován tak, aby přetnul potenciální komunikační chodbu, která by mohla vycházet z východního konce známé chodby (zazdívka) směrem k zámeckým budovám (obr. 9 a 13).



Obr. 13: Body pro mikrogravimetrické měření.

3.3.3 Metodika měření

Geofyzikální průzkum proběhl v několika etapách. Nejprve byl realizován georadarový průzkum, v druhé fázi proběhlo měření metodami ERT a DEMP. Jako poslední bylo provedeno mikrogravimetrické měření.

- **Georadar**

Měření georadarem bylo realizováno 9. listopadu 2020 s RNDr. Jakubem Štainbruchem, Ph.D. ze společnosti INSET s. r. o. Jednalo se o období s převažujícím oblačným počasím a bez výraznějších srážek. Průzkum byl proveden pomocí aparatury švédské výroby Malå Ground Explorer HDR (MALÅ) zapůjčené firmou INSET s. r. o. Pro účel měření byl vybrán stíněný anténní systém o vysílací frekvenci 160 MHz. Sběr dat probíhal se vzorkovacím intervalem 1 cm, kontinuálně v síti rovnoběžných profilů, které od sebe byly vzdáleny 0,5 m. Plochy P1 a P2 byly měřeny ve směru východ – západ, plocha P3 ve směru jih – sever.

▪ Elektrická odporová tomografie

Multielektrodové odporové měření bylo, společně s dipólovým elektromagnetickým profilováním, provedeno za supervize Mgr. Jana Valenty, Ph.D. dne 7. dubna 2021. I v tomto případě se jednalo o období bez vydatnějších srážek s proměnlivou oblačností. K průzkumu byla využita aparatura ARES II (GF Instruments s. r. o. Brno), rozestup mezi elektrodami byl zvolen 0,5 m. Všechny profily byly měřeny v konfiguraci Wenner-Schlumberger, jejíž efektivní hloubkový dosah je $1/5 AB$.

▪ Dipólové elektromagnetické profilování

Měření metodou DEMP proběhlo 7. dubna 2021 po měření metodou ERT. Použitá aparatura byla CMD MiniExplorer (GF Instruments s. r. o. Brno). Tento přístroj umožňuje měření ve třech hloubkových úrovních, vzhledem ke vzdálenosti cívek jsou odpovídající efektivní hloubkové dosahy: 0,5 m, 1,0 m a 1,8 m. Použitý CMD konduktometr měří zdánlivou vodivost prostředí γ_z [$\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$], která je úměrná imaginární části signálu a složku *inphase* odpovídající magnetické susceptibilitě κ [ppt]. Celkem bylo změřeno 782 bodů v síti 1×1 m.

▪ Mikrogravimetrie

Gravimetrické měření bylo provedeno RNDr. Janem Mrlinou, Ph.D. a Mgr. Romanem Beránkem z Geofyzikálního ústavu AV ČR ve dnech 13. – 14. dubna 2021. K měření byly použity dva gravimetry, CG-6 (Scintrex Ltd.) s odečítací přesností $0,1 \mu\text{Gal}$ a gravimetr LaCoste & Romberg Model D s odečítací přesností $1 \mu\text{Gal}$. Měřeno bylo na čtyřech profilech, základní vzdálenost mezi body byla 1 m a maximální vzdálenost při koncích některých profilů 3 m.

3.4.4 Metodika zpracování dat

- **Georadar**

Naměřená data byla zpracována pomocí programu Reflexw (Sandmeier 2019). Nejprve byl vybrán záznam z reprezentativního profilu pro nastavení vhodného postupu zpracování, stanovený postup byl následně aplikován na všechna naměřená data každého z jednotlivých profilů. Prvním krokem byla aplikace funkce *dewow*, která odstranila několik prvních výrazných odrazů od povrchu způsobených přechodem vln do podloží. Poté byla pomocí funkce *move start time* provedena korekce na nulový čas, která odstranila nežádoucí vrstvu signálu. Zesílení pomocí násobení datových bodů dané funkce v určeném pořadí *gain function* bylo nastaveno manuálně od prvního nasazení. Statickou korekcí byly řezy oříznuty od přebytečného šumu způsobeného narůstající hloubkou a zeslabením signálu. Pro lepší zobrazení horizontálního rozhraní byl použit 2D filtr *running average*.

3D zobrazení anomálií bylo vygenerováno načtením všech zprocesovaných 2D radargramů pro každou dílčí plochu. Po načtení byl proveden odečet pozadí *background removal*. Tato funkce vypočte průměrnou stopu nad zadanou částí radargramu a jejím odečtením od ostatních stop dojde k odstranění trendu. Pro lepší čitelnost bylo plošné 3D zobrazení vyhlazeno zvýšením *smoothing* faktoru.

- **Multielektrodová odporová metoda (ERT)**

Naměřená data byla zpracována pomocí programu Res2DInv (Geotomo Software, Loke 1995). Základním principem programu je inverze dat s využitím metody nejmenších čtverců. U profilů ERT-1 a ERT-2 byla posunuta pozice první elektrody na metrůž -1 m, a to z důvodu přesahu zaměřených bodů před začátky profilů. Vzhledem k zanedbatelné výškové členitosti terénu nebyla aplikována topografická korekce. Výstupem zpracování jsou odporové řezy pro jednotlivé profily. Pro grafické výstupy byla zvolena 3. iterace. Chyba RMS (*root mean square error*) se pohybovala v rozmezí 2,8 až 5,6 % (viz tabulka 2).

Tab. 2: Délky ERT profilů a chyby RMS.

profil	délka profilu [m]	chyba RMS [%]
ERT-1	31	2,8
ERT-2	31	5,6
ERT-3	35	3,2
ERT-4	30	4,9

▪ Dipólové elektromagnetické profilování

Z naměřených dat zdánlivých vodivostí, která se automaticky ukládají do interní paměti přístroje, byly vypočítány zdánlivé měrné elektrické odpory. Pro vypočtené odpory i složku *inphase* byly pomocí programu Surfer 13 (Golden Software, 2016) vytvořeny gridy a data byla vykreslena do map izolinií pro jednotlivé hloubkové dosahy. Výstupem metody DEMP je šest map izolinií.

▪ Mikrogravimetrie

Pro vytvoření grafických výstupů byla použita data naměřená gravimetrem LaCoste & Romberg z důvodu vysoké chybovosti dat z CG-6. Naměřená data byla zpracována v programu DRIFT (Mrlina 2008). Nejprve byla provedena oprava na výšku stativu a časové variace včetně slapů. Časové změny byly v průběhu měření sledovány opakovaným měřením základního bodu a řadových bodů. Dále byly provedeny opravy na zeměpisnou šířku, relativní výškový rozdíl bodů a Bouguerovu desku. Vzhledem k zanedbatelné výškové členitosti terénu nebyla zavedena topokorekce. Výsledkem zpracování byly hodnoty Bouguerových anomálií. Data byla interpolována pomocí metody *kriging* a následně byla vykreslena tíhová mapa Bouguerových anomálií.

Zjištěného trendu v mapě Bouguerových anomálií bylo využito při separaci reziduálních anomálií. Regionální pole bylo aproximováno nakloněnou rovinou, která byla pomocí metody nejmenších čtverců proložena body ležícími mimo oblasti záporných anomálií. Po odečtení regionálního pole byla vytvořena tíhová mapa reziduálních anomálií. Naměřená data byla zpracována RNDr. Janem Mrlinou, Ph.D. a Mgr. Romanem Beránkem z Geofyzikálního ústavu AV ČR.

3.4.5 Výsledky měření a interpretace

▪ Georadar

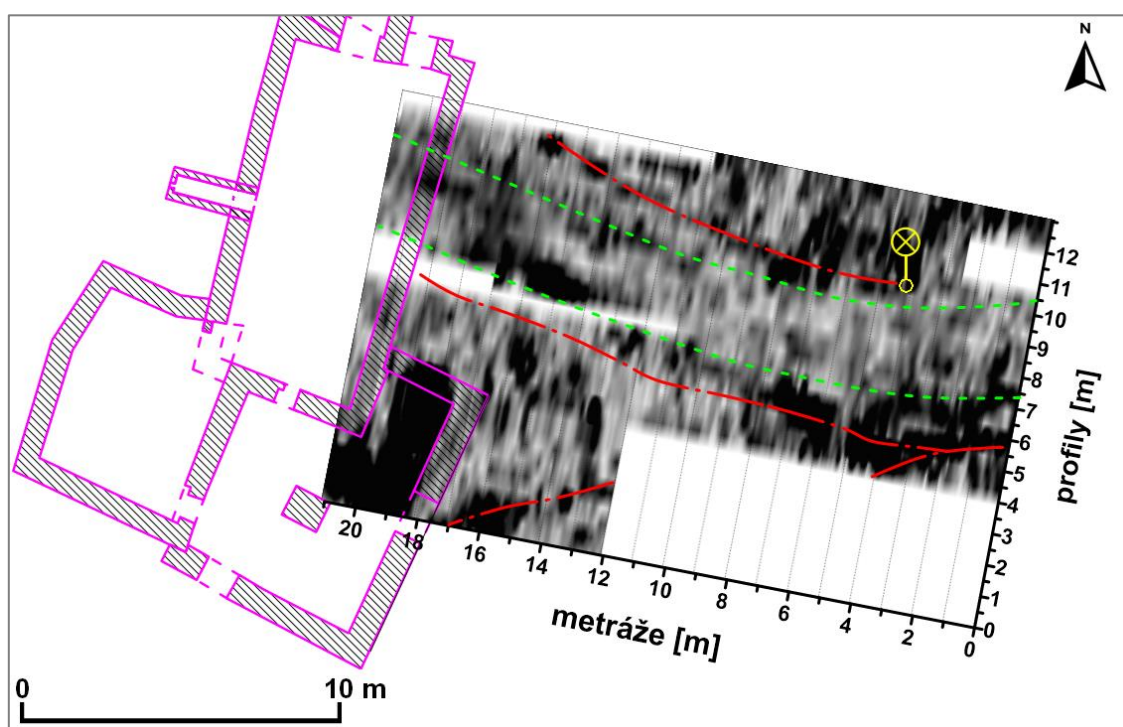
Výsledky jsou ilustrovány ve formě plošného 3D zobrazení naměřených anomálií. Pro ilustraci a následnou interpretaci byly vybrány horizontální řezy z těch hloubek, ve kterých byly detekované struktury nejlépe viditelné. Žlutým symbolem je označena poloha lampy veřejného osvětlení, zelenou přerušovanou čarou okraje asfaltové komunikace a červenými čerchovanými čarami průběh detekovaných inženýrských sítí.

Na obrázcích 14 až 16 jsou horizontální řezy pro plochy P1 a P2 z hloubek 0,86 m, 2,3 m a 2,9 m. Na prvním z těchto řezů (obr. 14) je v jihozápadním rohu velmi dobře patrná severní část jv. sklepní prostory, která se na příslušných úsecích měřených profilů projevila až do hloubky přibližně 3 m. Uvažované pokračování zúžené části jihovýchodní sklepní místnosti (za zadržkou) směřující k severu se v metodě GPR projevilo pouze náznakem pro hloubky 2,3 a 2,9 m. Další výrazné anomálie, zachycené při okrajích asfaltové komunikace, jsou způsobeny přítomností umělých recentních objektů, jako je těleso veřejného osvětlení, odpadkové koše, lavičky atp.

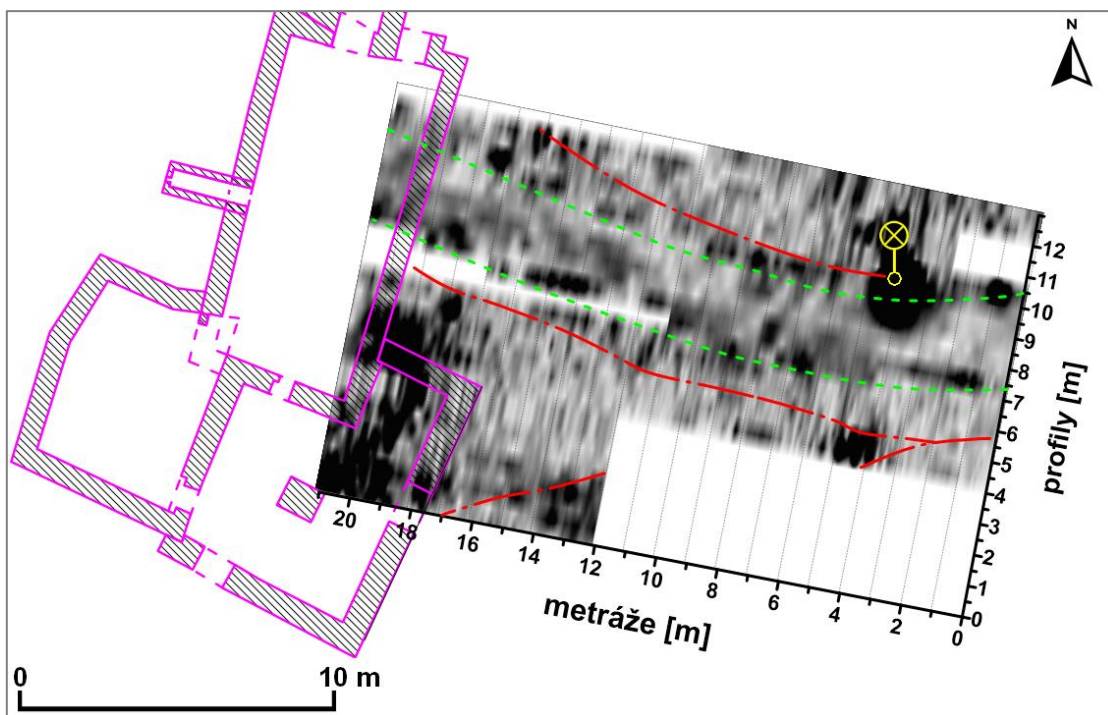
Pro plochu P3 byly vybrány horizontální řezy z hloubek 1,2 m, 3,0 m a 3,5 m, které jsou na obrázcích 17 až 19. První nejmělkčí řez ilustruje průběh inženýrských sítí, které se projeví jako liniové struktury probíhající napříč plochou. Výrazné anomálie v blízkosti asfaltové cesty jsou způsobeny přítomností lampy veřejného osvětlení a s ní související elektrickou rozvodnou sítí. Existenci dokumentovaných kabelů indikují i dvě severněji situované linie. V hloubkové úrovni 3,5 m byla mezi metrážemi 10 až 21 zachycena výrazná kruhová struktura o průměru přibližně 11 m (G na obrázku 19) a severně od ní část podobné kruhové struktury (H). V centrální části struktury G byly zjištěny reflexy naznačující přítomnost skupiny menších objektů metrových rozměrů. Analogicky i v centru struktury H se projeví (v hloubce 3,0 m) indikace naznačující v tomto případě přítomnost ortogonální struktury o rozměrech přibližně $6 \times 4(?)$ m; menší kruhová struktura o průměru zhruba 6 m byla zachycena i v hloubkové úrovni 3,0 m, a to mezi metrážemi 12 až 18. Její pozice koinciduje s vnitřními „objekty“ struktury G v hloubce 3,5 m. Struktura G svými parametry odpovídá půdorysu bergfritu (kamenná, obvykle okrouhlá hradní věž), jehož existence je v prostoru areálu uvažována, ale vzhledem k přítomnosti přiléhající kruhové struktury H není tato interpretace

pravděpodobná. Dále přichází v úvahu souvislost interpretovaných struktur s minerálními prameny, které zde byly využívány již od nejstaršího osídlení. Hypoteticky by se mohlo jednat o projev větších vodních nádrží, překrytých v průběhu mladších terénních úprav. Město jako celek je z hlediska vývoje spjatého s lázeňstvím atypickou archeologickou lokalitou, a proto lze předpokládat i přítomnost neobvyklých objektů (Kursová 2021, osobní sdělení).

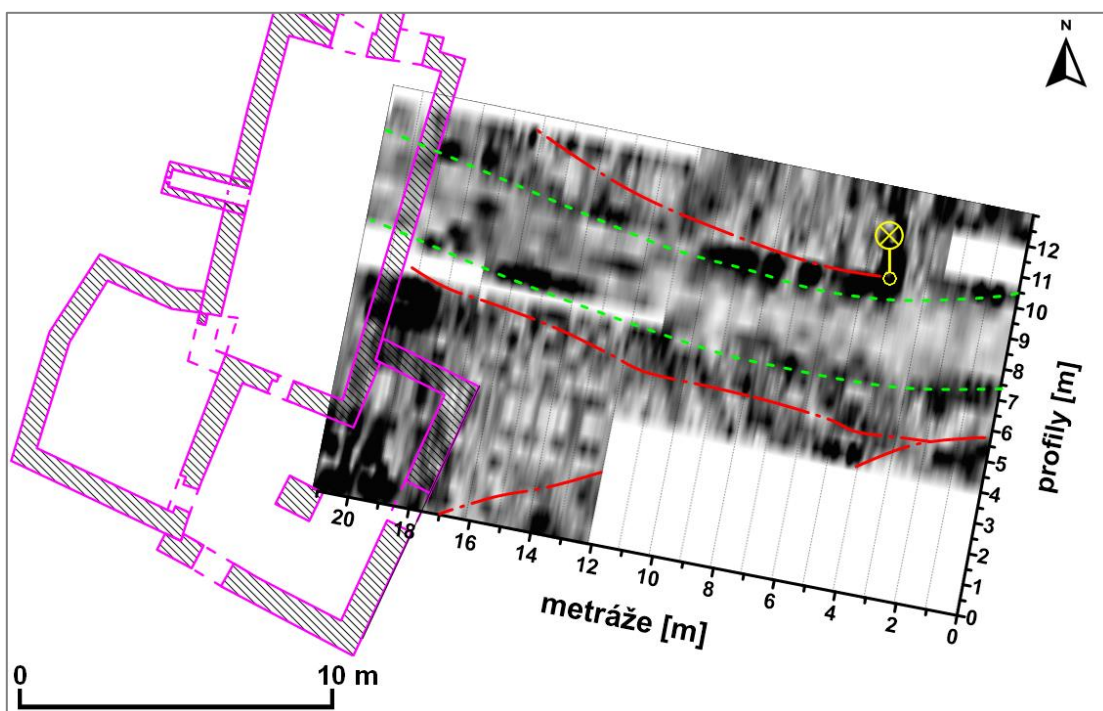
Georadarovým měřením nebylo detekováno žádné pokračování sklepních místností směrem k SV. V prostoru měřených ploch P1 a P2 ani P3 nebylo možné interpretovat ani případné kamenné reliktů nebo destrukce zaniklých budov, a to z důvodu značného elektromagnetického šumu, podmíněného přítomností řady recentních umělých objektů.



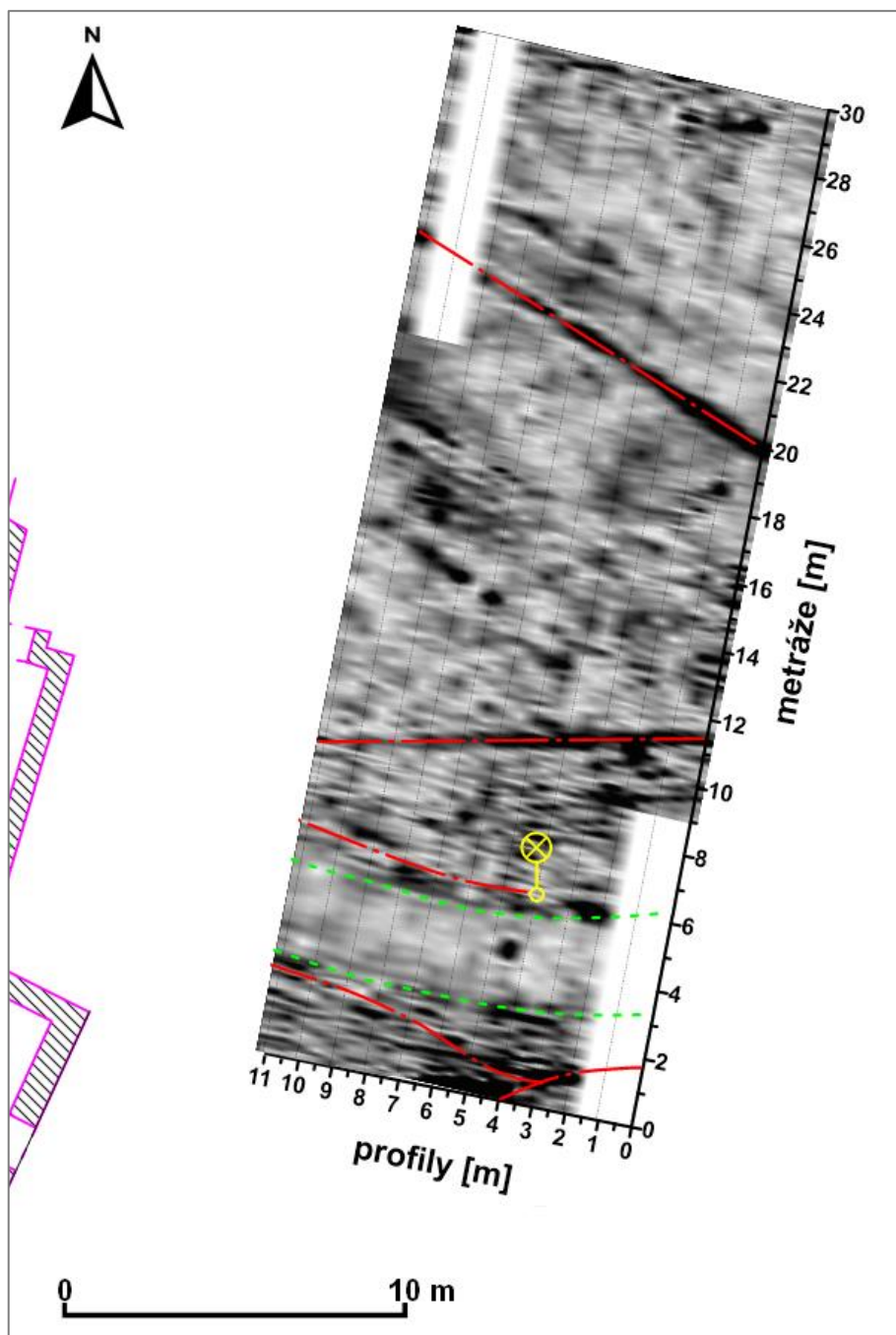
Obr. 14: Horizontální řez pro hloubku 0,86 m, plochy P1 a P2.



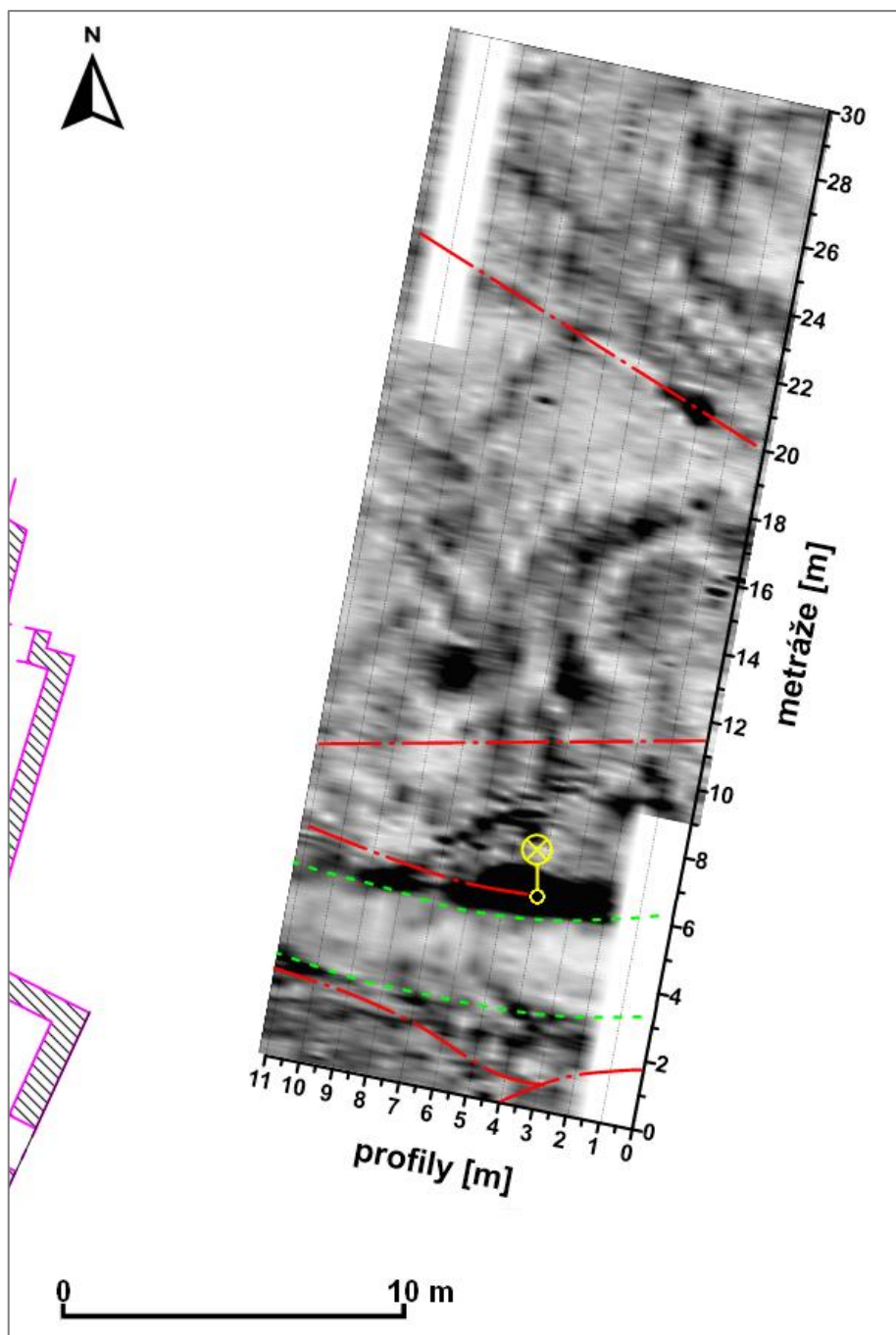
Obr. 15: Horizontální řez pro hloubku 2,3 m, plochy P1 a P2.



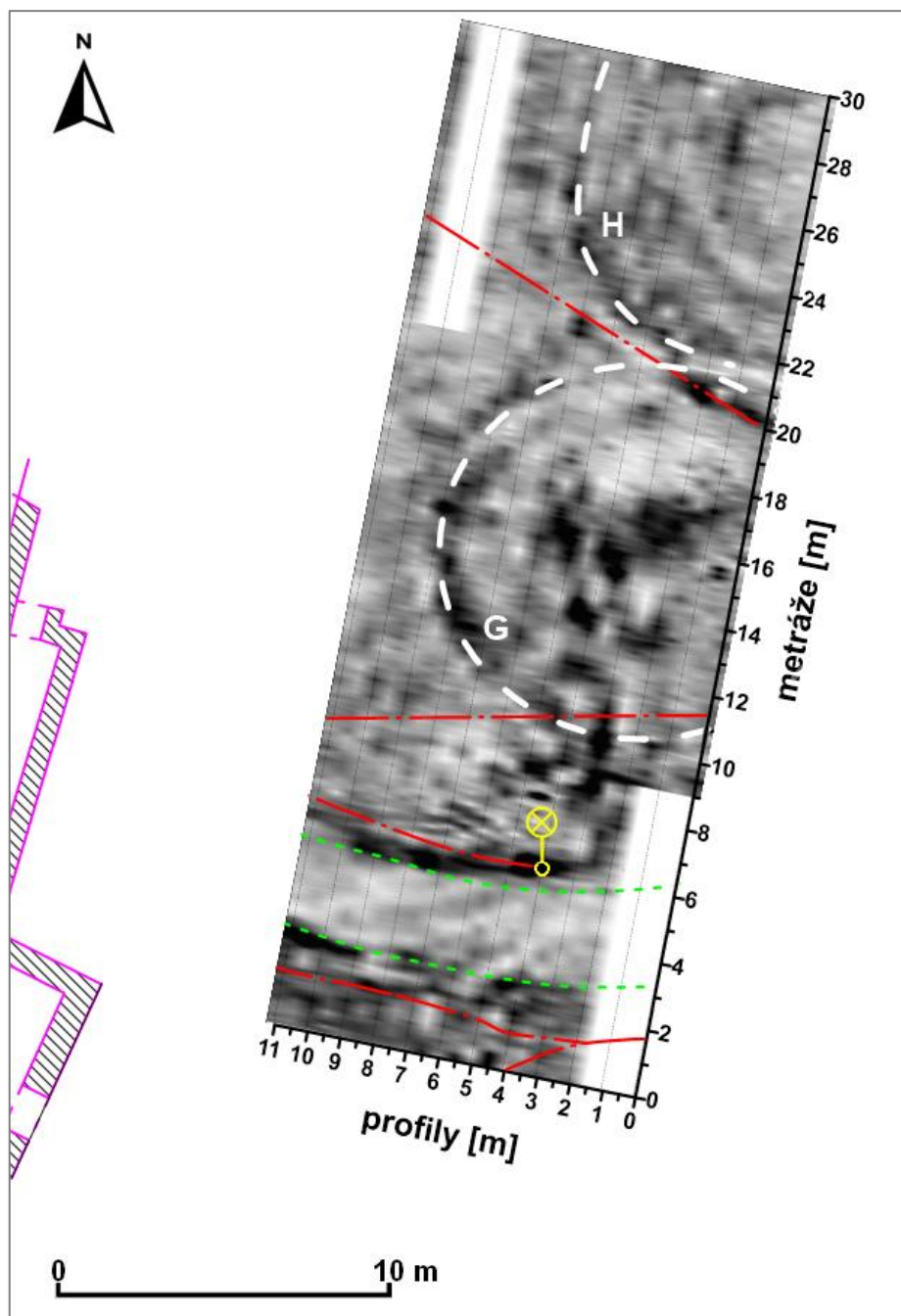
Obr. 16: Horizontální řez pro hloubku 2,9 m, plochy P1 a P2.



Obr. 17: Horizontální řez pro hloubku 1,2 m, plocha P3.



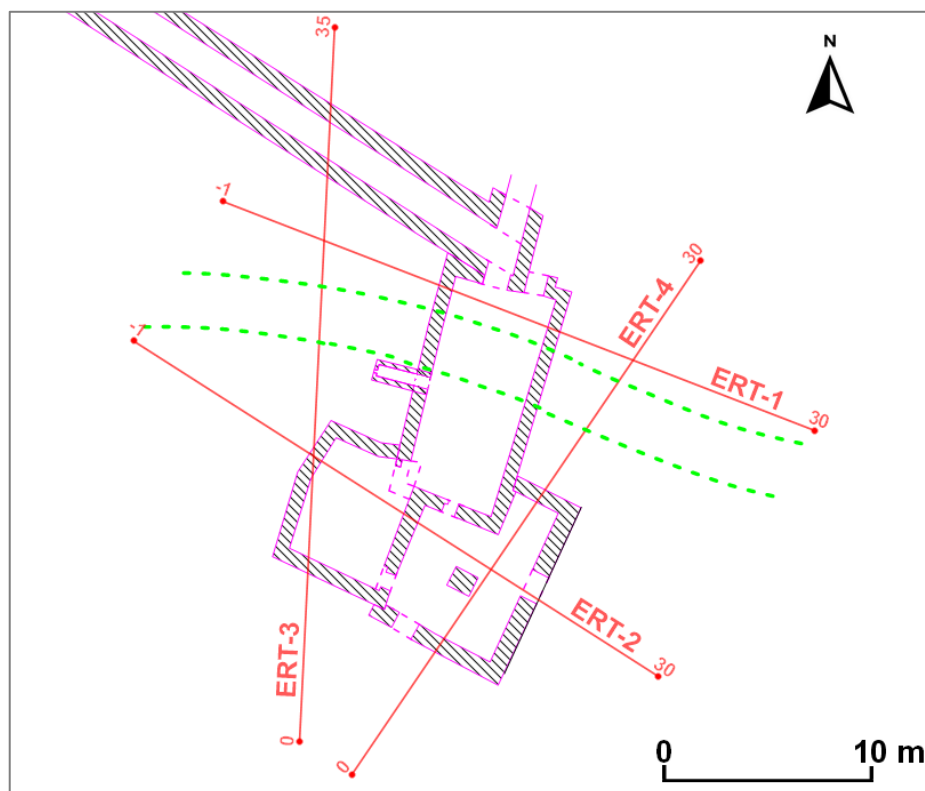
Obr. 18: Horizontální řez pro hloubku 3,0 m, plocha P3.



Obr. 19: Horizontální řez pro hloubku 3,5 m, plocha P3.

▪ Multielektrodová odporová metoda ERT

Na obrázku 21 jsou zobrazeny grafické výstupy měření metodou ERT ve formě invertovaných odporových 2D řezů pro každý z měřených profilů. Pozice profilů nad známými prostory sklepení je ilustrována na obrázku 20.



Obr. 20: Pozice ERT profilů nad sklepením. Zelenou přerušovanou čarou je naznačen průběh asfaltové cesty.

Interpretované hodnoty odporů se pohybují v rozmezí od 10 Ωm do více než 3000 Ωm . Kvartérní pokryv vykazuje odpory 100 až 250 Ωm a jeho mocnost se mění od 0,5 do 1,5 m. Horninám, tvořícím skalní podloží lokality, vápnitým slínovcům, odpovídají hodnoty odporů 10 až 100 Ωm . Nejvyšší odpory, a to od 400 Ωm výše, charakterizují sklepní prostory, tj. dutiny vyplněné vzduchem. Místa, kde profily přetínaly asfaltovou komunikaci, jsou na obr. 21 označena písmenem D.

Nejvýraznější vysokoodporové anomálie (na obr. 21 označeny pro všechny profily písmenem A) koincidují s přítomností sklepů. Na profilu ERT-1 se projevila

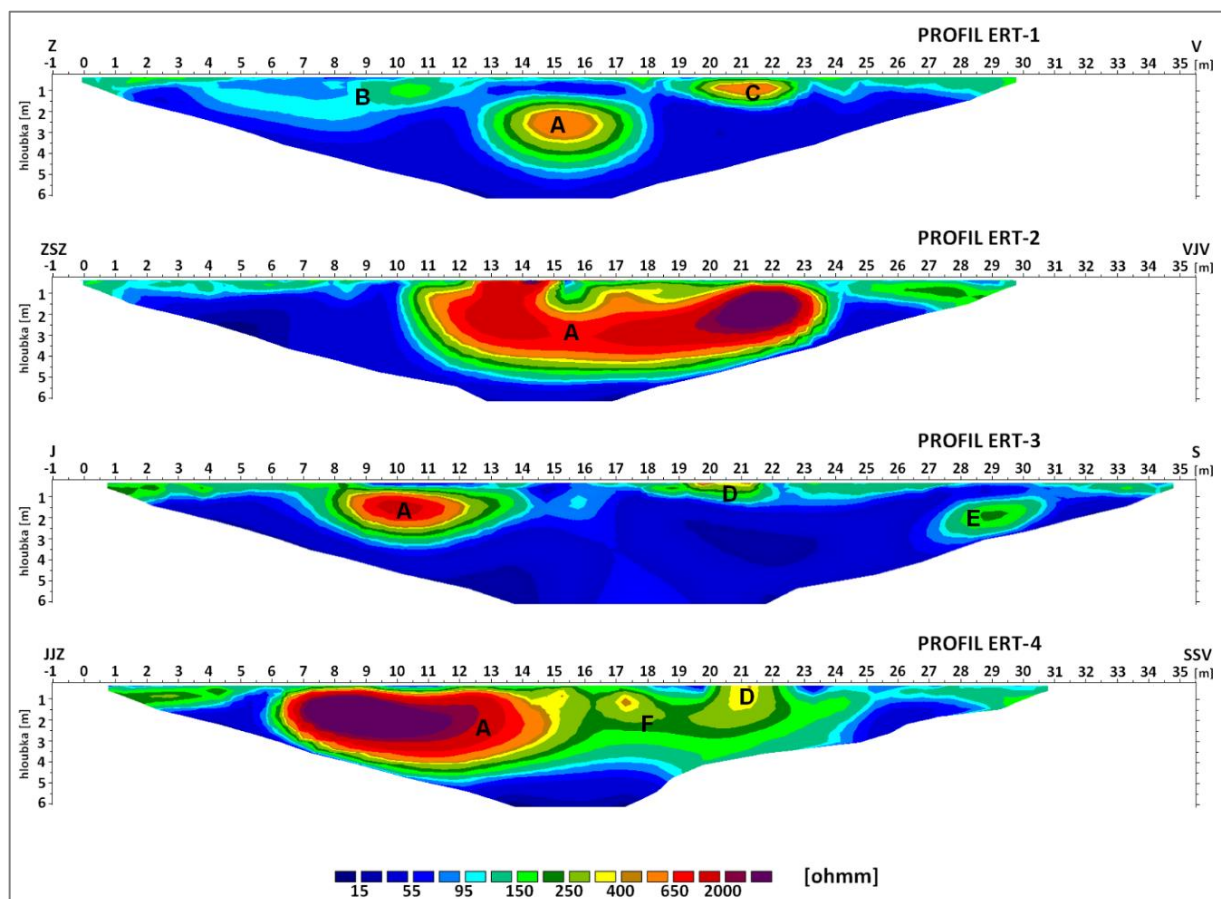
severní sklepní místnost odpory 200 až 600 Ωm , zjištěnými v úseku metrů 13 až 17,5 v hloubce 1 až 4 m. Příčina nevýrazně zvýšených odporů v úseku 9 až 11,5 m (indikace B) není známa. Mělké odporové maximum v úseku metrů 20 až 22,5 (indikace C) leží severně od zadržky v severním rohu jihovýchodního sklepa.

Výrazná odporová anomálie (odpory 400 až 3000 Ωm) zachycená na profilu ERT-2 mezi metrů 11 až 23,5 v hloubce 0 až 4,5 m charakterizuje dvě nejstarší sklepní místnosti, které se nacházejí velmi mělce pod povrchem. Přítomnost dělicí zdi v úseku 15 až 16 m se projevila lokálním poklesem odporů, zatímco prostor s propadem klenby v úseku 13 až 14 m charakterizují vysoké odpory vystupující až na povrch terénu.

Profilem ERT-3 byla zastižena v hloubce 1 m rohová část jihozápadní místnosti na metrů 8 až 13, nejvyšší naměřené odpory zde odpovídají hodnotám 500 až 1000 Ωm . Zvýšené odpory v okolí metrů 20/21 (indikace D) leží v místech asfaltové komunikace. Anomálie s hodnotami odporů 100 až 250 Ωm na metrů 28 až 30 (indikace E) odpovídá poloze přístupové podzemní chodby v hloubce 1 až 2,5 m pod povrchem terénu.

Profilem ERT-4, orientovaným kolmo k profilu ERT-2, byla zastižena jihovýchodní sklepní místnost na metrů 6,5 až 15, naměřené odpory zde dosahují hodnot od 400 Ωm do více než 3000 Ωm . Relativně výrazná anomálie o odporech 250 až 500 Ωm mezi metrů 16,5 až 18,5 (indikace F) je situována v prostoru za zadržkou v severní části jv. sklepní místnosti. Až k povrchu terénu sahající vysoké odpory v úseku 20 až 22 (indikace D) jsou situovány v místě, kde profil přetínal asfaltovou komunikaci.

Multielektrodová odporová metoda nezachytila žádné předpokládané pokračování sklepních prostor. Z odporových řezů lze určit hloubku stropů a částečně i podlah jednotlivých místností. Výška stropů dvou nejstarších místností je v některých místech pouze 0,5 m či méně. Anomálie zvýšených odporů detekované v blízkém okolí sklepů vesměs pozičně odpovídají známým umělým objektům (rozvodné sítě a asfaltová cesta). U indikací C na profilu ERT-1 a F na profilu ERT-4 nelze vyloučit souvislost s hypotetickým zadržným (a patrně i zasypaným) prostorem za zadržkou v severní části jihovýchodního sklepa.



Obr. 21: Odporové řezy pro profily ERT-1, ERT-2, ERT-3 a ERT-4.

▪ Dipólové elektromagnetické profilování

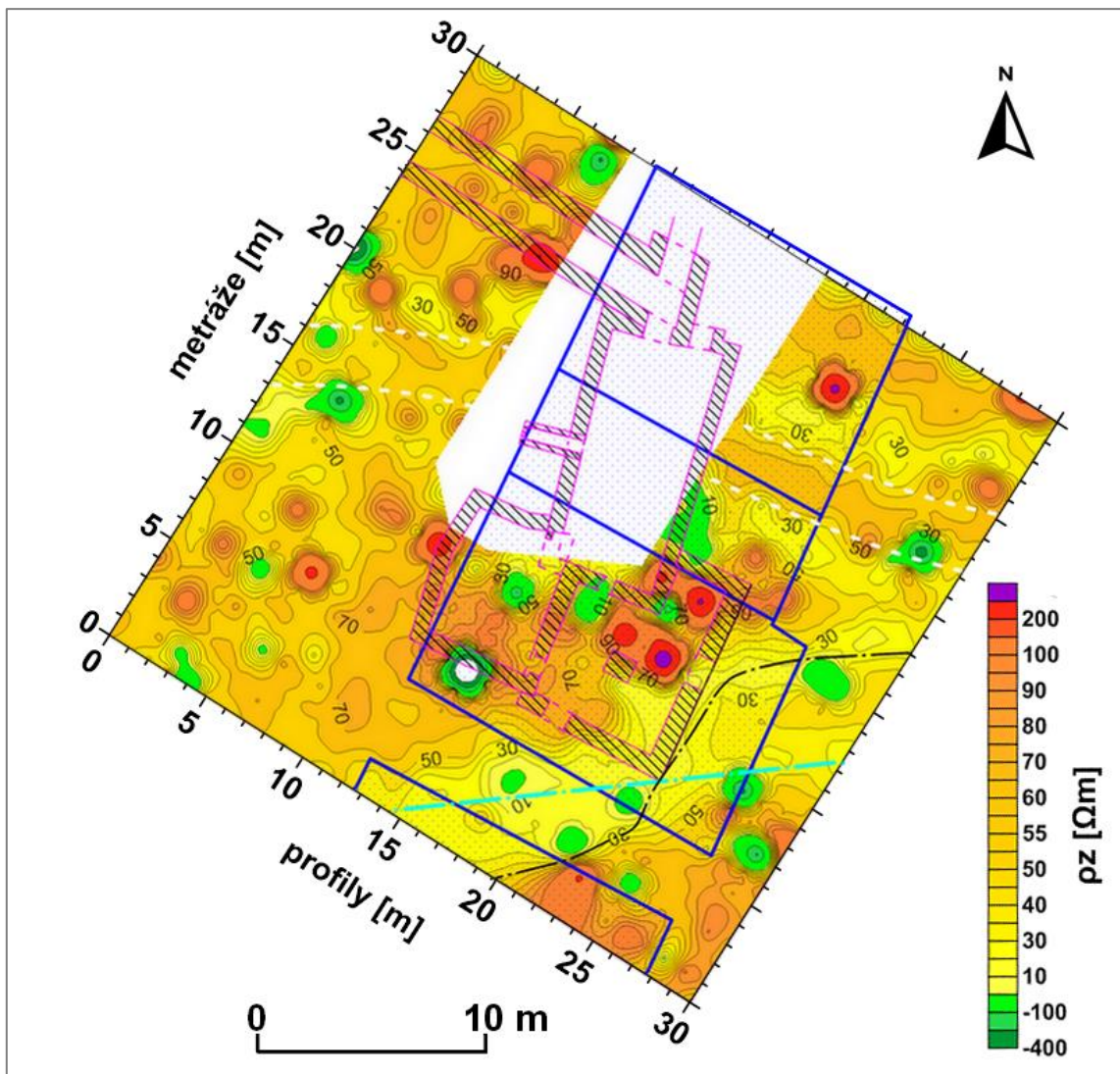
Výsledky metody DEMP jsou zobrazeny na mapách izolinií, na obrázcích 22 až 24 pro zdánlivý měrný odpor ρ_z a na obrázcích 25 až 27 pro složku *inphase*. Na všech mapách je vyznačena poloha známých sklepení a modrou čarou i půdorys dnes zaniklých budov dle plánu z roku 1788. Černou čerchovanou čarou je vyznačen průběh elektrického kabelu a světle modrou čerchovanou čarou vodovod podle plánu inženýrských sítí. Asfaltová komunikace, protínající měřenou plochu ve směru SSZ – JJV a vyznačená na obrázcích bílou přerušovanou čarou, je po obou stranách lemována výkopy s uloženými elektrickými kabely (pro veřejné osvětlení).

Charakteristické střední hodnoty měrných odporů pro jednotlivé hloubkové dosahy jsou: 54 Ωm pro hloubku 0,5 m, 48 Ωm pro hloubku 1,0 m a 44 Ωm pro hloubku 1,8 m. Pokles odporů do hloubky může být podmíněn rostoucí vlhkostí prostředí. Znamé

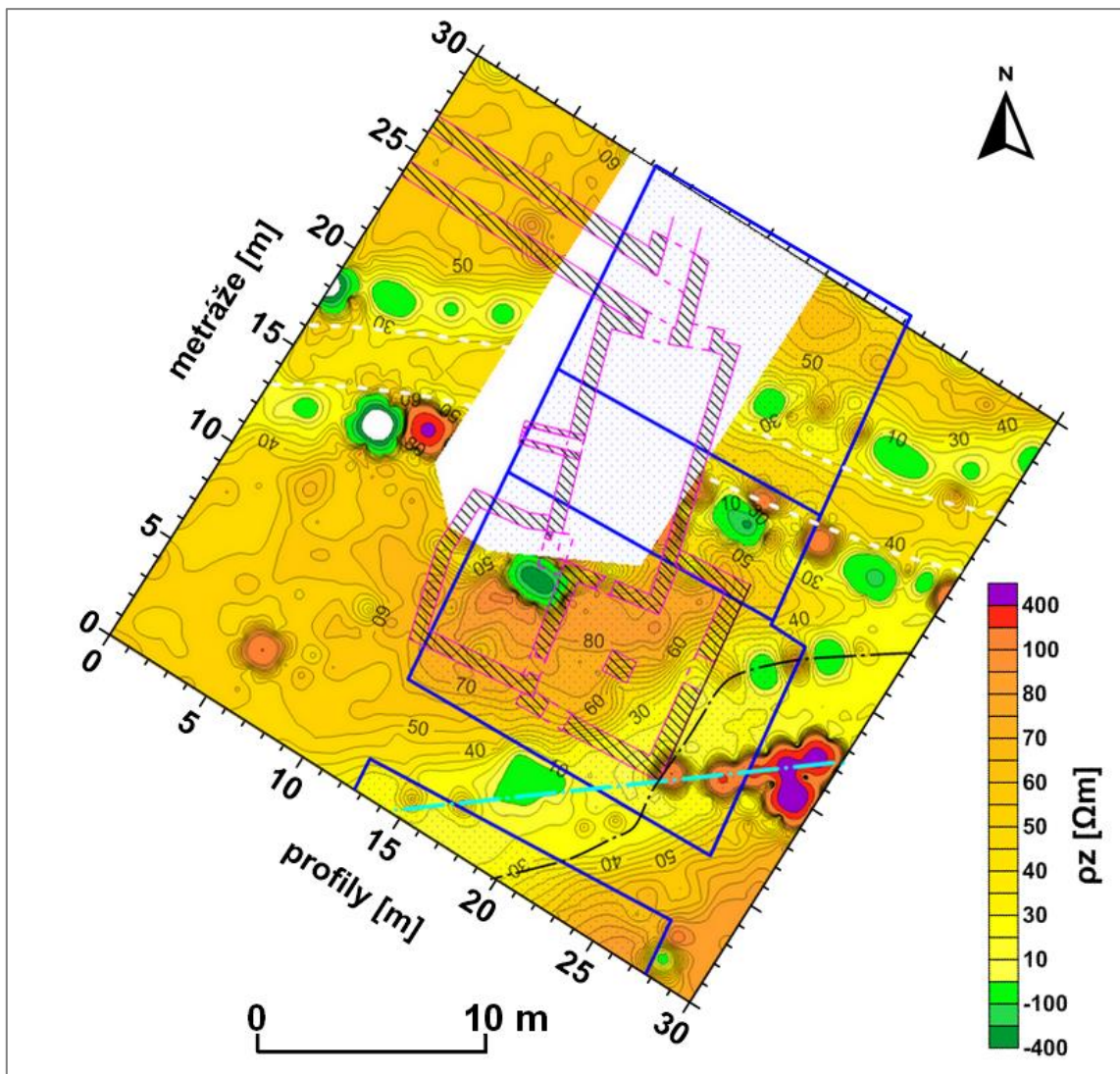
sklepní prostory se projevily měrnými odpory o hodnotách 70 až 100 Ωm ; v prostoru největšího propadu až 200 Ωm (pro nejmělkčí hloubkový dosah). Zvýšené hodnoty odporů byly zjištěny také v blízkosti přístupové chodby (80 až 100 Ωm) a v jižním rohu proměřené plochy – v prostoru zaniklé historické stavby stodoly podle plánu z roku 1788 (50 až 90 Ωm). Jako výrazná odporová maxima a minima se projevily umělé objekty v okolí sklepů, jako jsou inženýrské sítě, šachty s poklopy, krytí propadů atp.

Pro složku *inphase* a jednotlivé hloubkové dosahy jsou charakteristické následující střední hodnoty: 1,45 ppt pro hloubku 0,5 m, 2,11 ppt pro hloubku 1,0 m a 3,22 ppt pro hloubku 1,8 m. Trendový nárůst hodnot ve vertikálním směru může souviset s vymytím magnetičtějších částic půdy z povrchové vrstvy do větší hloubky. Výrazné lokální indikace složky *inphase* dokládají přítomnost objektů se zvýšenou magnetickou susceptibilitou, ve většině případů se jedná o recentní železné předměty v malé hloubce. Nejvýrazněji se projevil poklop šachty na profilu P18 mezi metrážemi 2 až 4. Ostatní bodová maxima složky *inphase* souvisejí se známými umělými objekty, zejména v oblasti průběhu elektrických kabelů a vodovodu. Zvýšenými hodnotami susceptibility se projevila také asphaltová komunikace (čedičové kamenivo jako plnivo v asfaltu?).

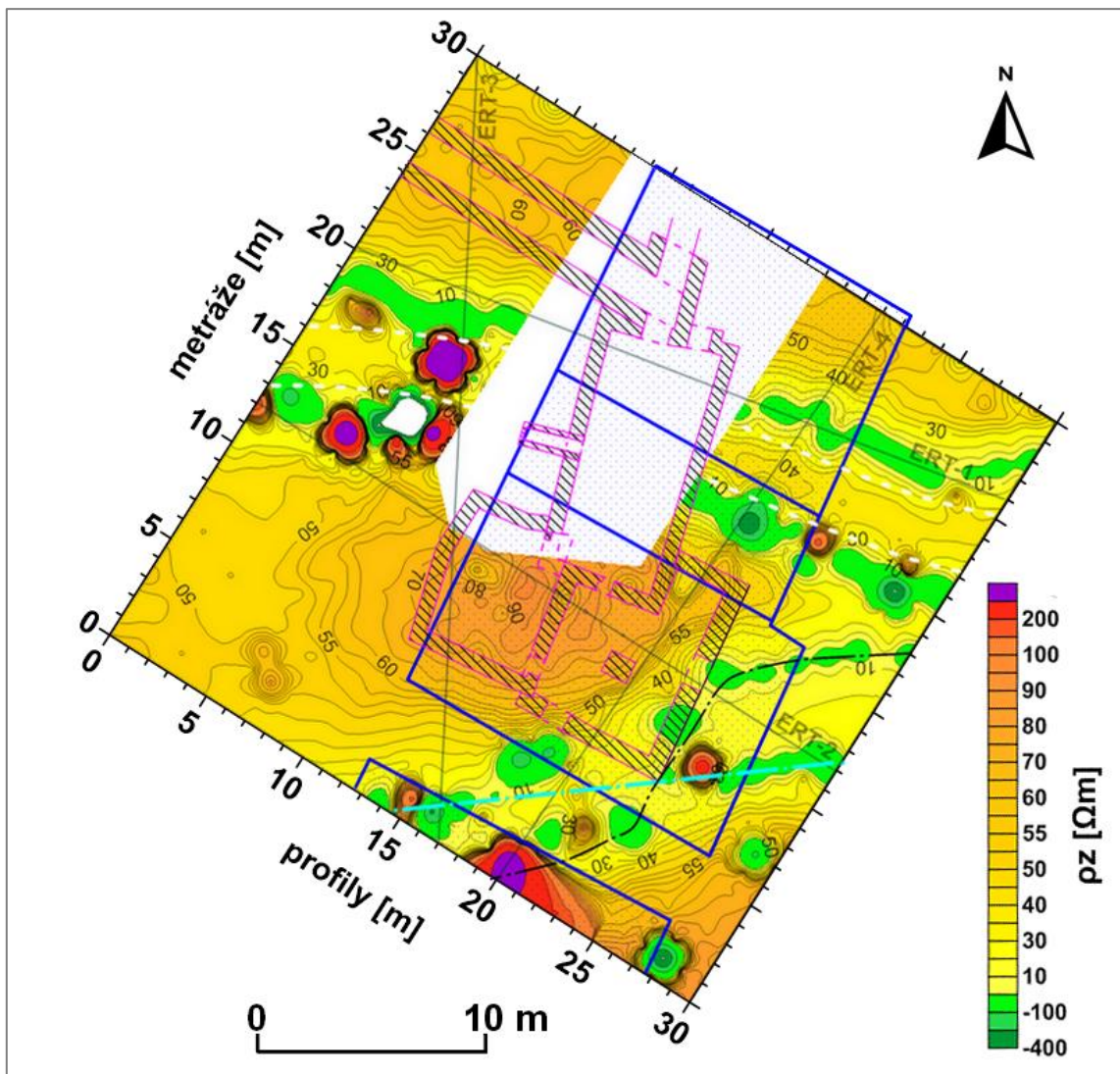
Plošný rozsah vysokých hodnot měrných odporů nad sklepením odpovídá, alespoň na jihu (kde bylo metodou měřeno) známému vymezení půdorysu podzemních prostor. Zvýšené hodnoty odporů v jižním rohu měřené plochy, které byly detekovány ve všech hloubkových úrovních, mohou signalizovat přítomnost kamenných destruktí zaniklých nadzemních staveb. V těchto místech nebyly detekovány žádné výrazné bodové indikace pro složku *inphase* (kromě drobné indikace v metráži 1 na profilu 28), lze tedy předpokládat, že pod touto částí plochy nejsou recentní objekty způsobující vznik falešných anomálií, jako je tomu ve větší části celé proměřené plochy.



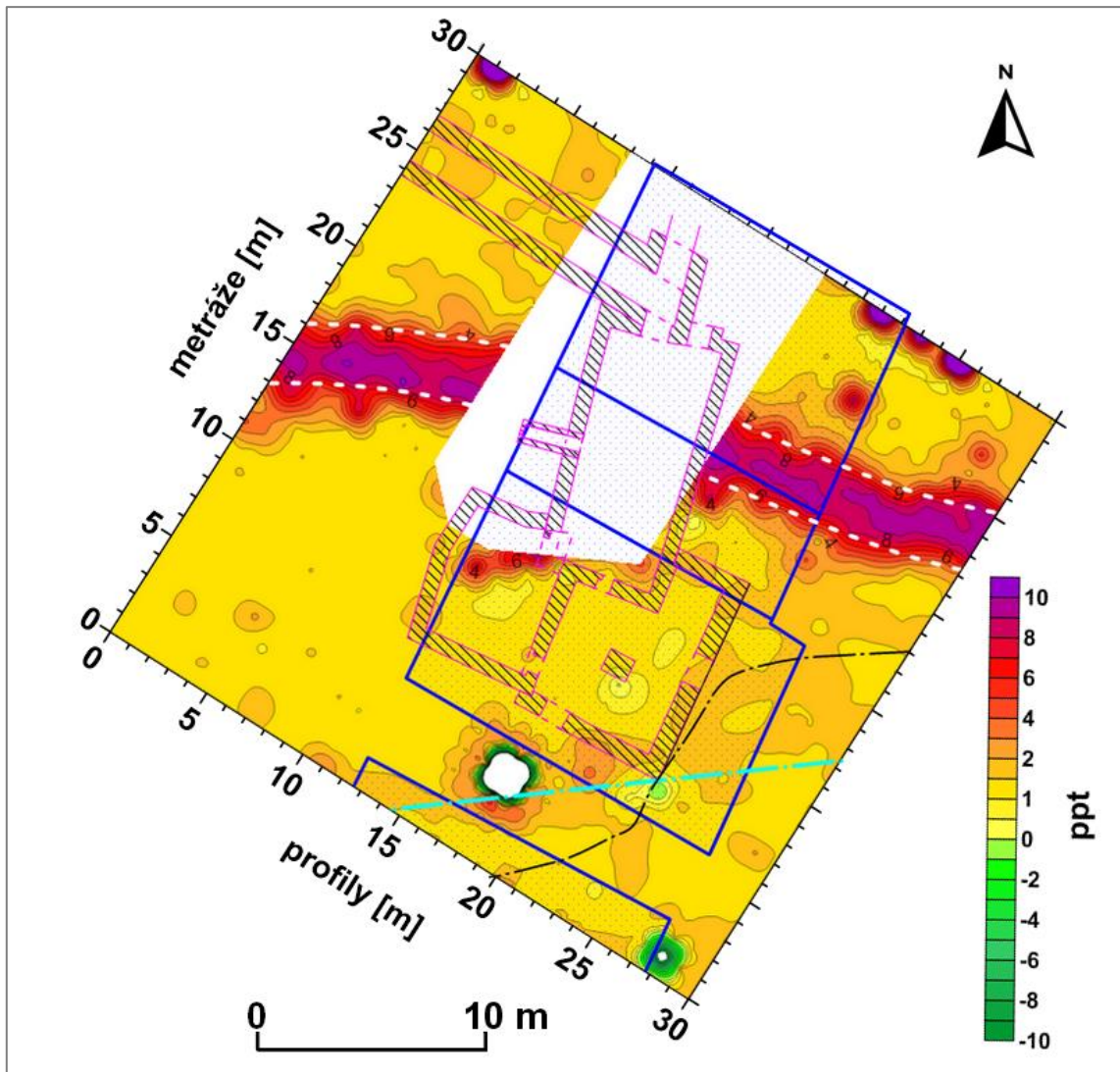
Obr. 22: DEMP – mapa izoliní zdánlivých měrných odporů pro hloubku 0,5 m.



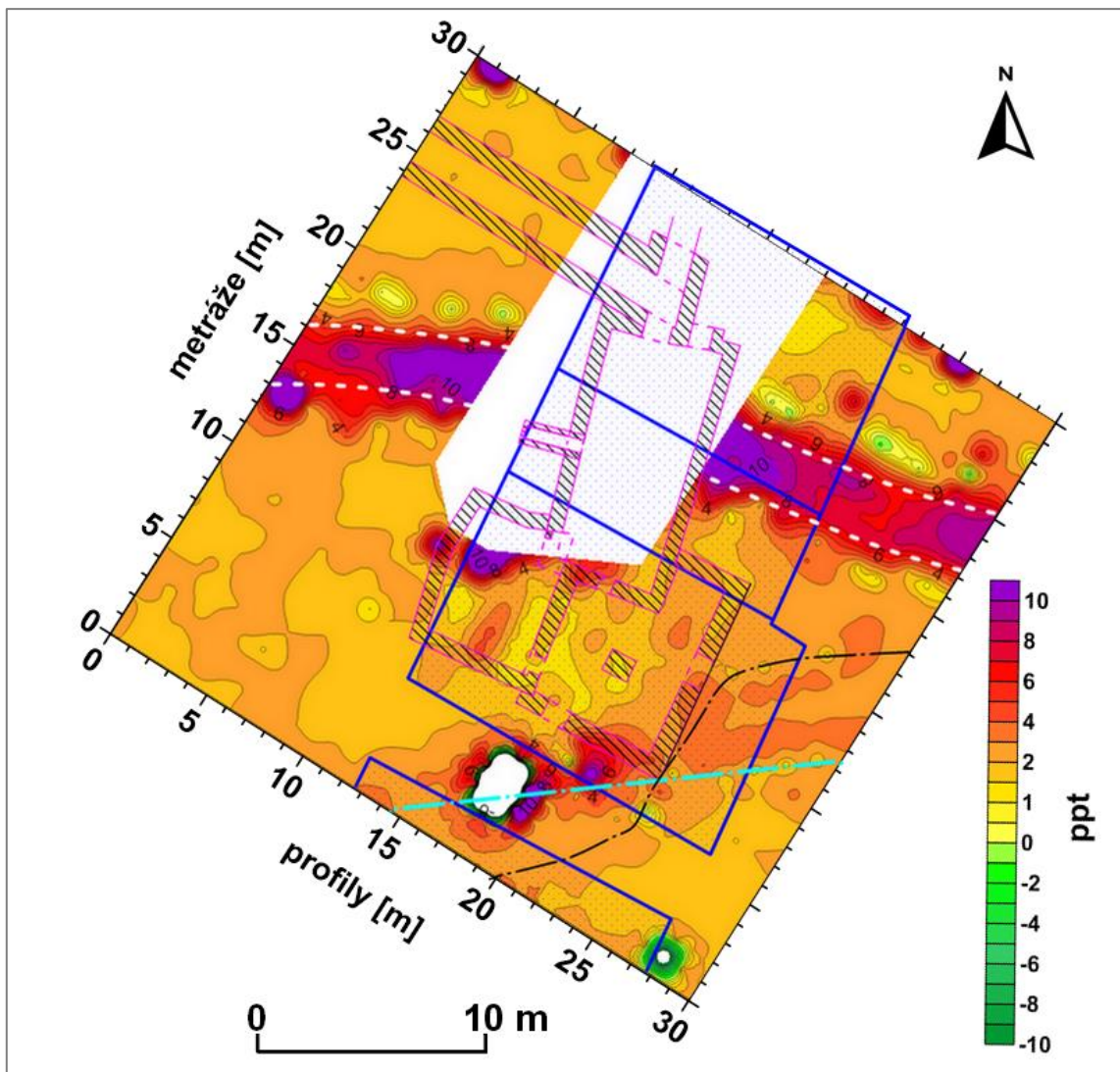
Obr. 23: DEMP – mapa izoliní zdánlivých měrných odporů pro hloubku 1,0 m.



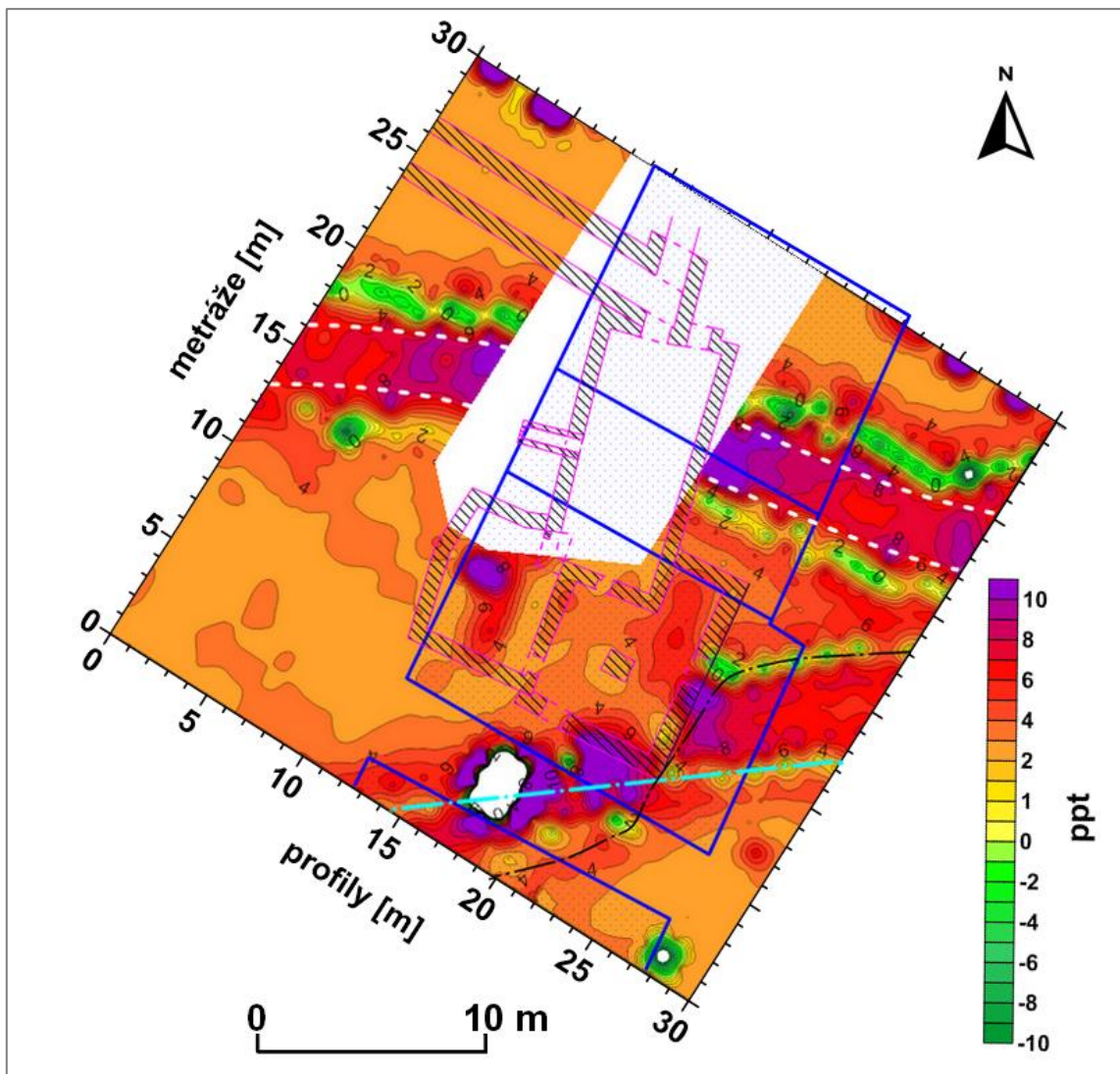
Obr. 24: DEMP – mapa izolinií zdánlivých měrných odporů pro hloubku 1,8 m s vyznačením profilů ERT-1 až ERT-4.



Obr. 25: DEM – mapa izolinií složky *inphase* pro hloubku 0,5 m.



Obr. 26: DEMF – mapa izolinií složky *inphase* pro hloubku 1,0 m.

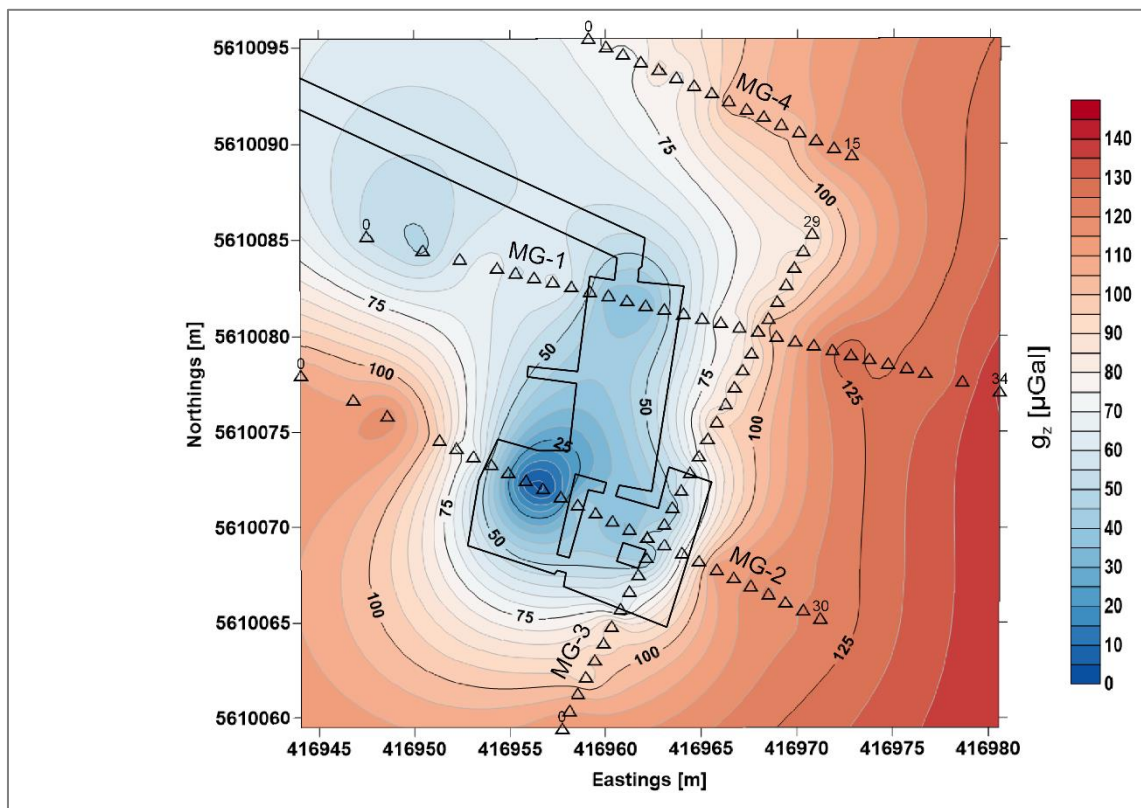


Obr. 27: DEMF – mapa izolinií složky *inphase* pro hloubku 1,8 m.

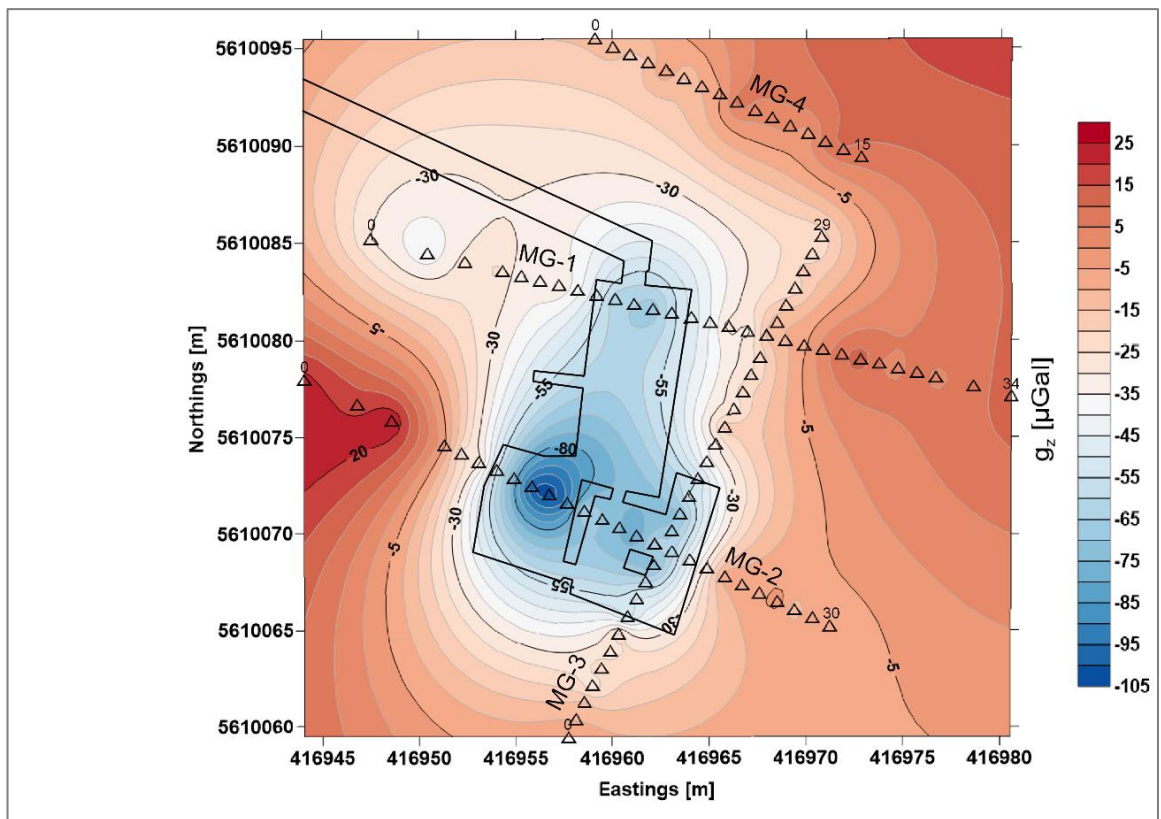
▪ Mikrogravimetrie

Grafickými výstupy mikrogravimetrického měření jsou tíhové mapy na obrázcích 28 a 29. Generelní trend tíhového pole v proměřeném prostoru vykazuje pravděpodobně růst ve směru přibližně západ – východ. Na mapě Bouguerových anomálií (obr. 28) je vidět výrazný gravitační účinek sklepů, které se zde projevují jako plošná záporná anomálie tvaru písmene „L“ s hodnotami v rozmezí 0 až 75 μGal . Komplex sklepů generelně konturuje izolinie 50 μGal . Na mapě reziduálních anomálií (obr. 29) se přítomnost dutých prostor projevuje plošným minimem se zápornými hodnotami v intervalu -40 až -105 μGal . Konturující izolinie odpovídá přibližně hodnotě -50 μGal .

Výraznější záporná anomálie na začátku profilu MG-1 o amplitudě přibližně 15 μGal je sice situována pouze 5 m jižně od osy přístupové chodby, ale souvislost s touto chodbou je problematická. Otázkou je i příčina obecně nižších hodnot tíhového pole (obr. 28) v širším okolí přístupové chodby (v severozápadním kvadrantu plochy). Vyloučit nelze přepracování přípoверхových partií zemního prostředí v rámci úprav prostoru zahrady, případně i v souvislosti s budováním chodby, spojené s poklesem hustoty.



Obr. 28: Mapa Bouguerových anomálií (Mrlina a Beránek 2021).



Obr. 29: Mapa reziduálních anomálií (Mrlina a Beránek 2021).

4. DISKUZE

Účelem úvodní, rešeršní části této diplomové práce bylo shrnutí obecné problematiky týkající se vlastností (zejména fyzikálních) antropogenních historických dutin a vytvoření přehledu geofyzikálních metod užívaných nejčastěji při jejich detekci. Užitá geofyzika je aktuálně v rámci archeologie asi nejvyužívanější metodou nedestruktivního průzkumu, a proto je odborná literatura věnující se dané problematice značně rozsáhlá. Zejména cizojazyčné články se v současné době intenzivně věnují moderním metodám, jako je například georadar či multielektrodová odporová metoda a je tedy možné čerpat různé metodické poznatky z geofyzikálních průzkumů a výzkumů realizovaných v konkrétním archeologickém kontextu na lokalitách s objekty podobného charakteru.

Hlavním cílem diplomové práce bylo provedení komplexního geofyzikálního průzkumu v prostoru nad historickým sklepením za účelem jednak ověření možného pokračování podzemních prostor a jednak prospekce jejich blízkého okolí. Na vybrané archeologické lokalitě Zámecká zahrada v Teplicích byl dosud proveden pouze jeden geofyzikální průzkum menšího rozsahu (Křivánek 2015a, 2015b). Geofyzikální měření pro archeologické účely realizované v městském intravilánu může být obecně velmi problematické, zejména při aplikaci geoelektrických (elektromagnetických) metod. Inženýrské sítě (elektrické rozvodné sítě, kanalizace, vodovody atp.) i další umělé objekty, jako jsou různé šachty, cestní síť či novodobá zástavba mohou způsobit vznik extrémně výrazných anomálií, které překrývají projev „hledaných“ objektů a velmi ztěžují interpretaci. Proto je nutné pracovat s veškerými dostupnými podklady včetně map inženýrských sítí a v průběhu terénních prací si pečlivě zaznamenávat polohu všech viditelných recentních objektů či zásahů. V případě Zámecké zahrady v Teplicích byly komplikace tohoto charakteru značné, stejně tak byla problémem přítomnost rozsáhlejších křovinatých úseků znemožňující provedení plošných měření přímo nad některými částmi sklepení.

Komplex vybraných metod se pro detekci dutin potvrdil jako vhodný. Výbornými výsledky se osvědčila zejména multielektrodová odporová metoda ERT, a to přesto, že na měřených profilech nebylo zastiženo žádné potenciální pokračování sklepních prostor. Také ostatními realizovanými metodami nebylo pokračování sklepení z předpokládaných míst s identifikovanými zadržkami nebo závaly uvnitř prostor

potvrzeno. Skvělé výsledky při detekci dutin mělo mikrogravimetrické měření; v souvislosti s možným pokračováním průzkumu připadá v úvahu ověření negativní tíhové anomálie v blízkosti dlouhé komunikační chodby. V tomto případě by bylo vhodné pro měření vytyčit další profil procházející centrem této indikace kolmo k přístupové chodbě. Elektromagnetické metody (GPR a DEMP) byly silně rušeny recentními vodivými objekty, ale i přesto se podařilo na ploše mimo sklepní prostory detekovat anomálie, které mohou značit přítomnost objektů archeologického významu a jejichž existence může souviset se zaniklou historickou zástavbou. Vzhledem k nejednoznačnosti interpretace by zde bylo vhodné provést ověření dalším geofyzikálním průzkumem. Na ploše P3, v jejímž prostoru proběhlo pouze měření georadarem, by bylo vhodné realizovat měření např. metodou ERT či DEMP. Pro další průzkum lze uvažovat i o rozšíření hlavní měřené plochy (pro DEMP a ERT) jižním směrem tak, aby byl zastížen průběh předpokládané hradby, jelikož v zájmu archeologického průzkumu je i zjištění původního ohraničení (opevnění) areálu. Další potencionálně zajímavou plochou je prostor jihovýchodně od proměřené lokality, kde byly starším geofyzikálním průzkumem zachyceny výrazné mělké odporové anomálie antropogenního původu (Křivánek 2015a, 2015b).

5. ZÁVĚR

Užitá geofyzika, jako neustále rozvíjený a moderní aplikovaný vědní obor, je schopna přinášet, je-li pro archeologické účely optimálně využívána, stále nové poznatky. Při detekci historických antropogenních dutin jsou její výsledky velmi přínosné. Geofyzikální měření je však obecně v mnoha případech limitováno. Objekty archeologického významu se zejména při měření v městském intravilánu nemusí vždy svými fyzikálními vlastnostmi dostatečně lišit od okolního prostředí a často je zde nelze s jistotou odlišit ani od recentních umělých objektů a terénních zásahů. Interpretace výsledků tak není v mnoha případech jednoznačná, a proto je vhodné interpretované struktury ověřit dalším měřením, případně i destruktivním zásahem pomocí archeologické sondy, pokud je to v daném místě proveditelné.

Geofyzikální průzkum nad sklepením v Zámecké zahradě v Teplicích přinesl nové poznatky o archeologické lokalitě. V prostoru severovýchodně od komplexu sklepení byly metodou GPR zachyceny výrazné kruhové struktury, jejichž původ je problematické určit, ale nabízí se například jejich souvislost s historickými lázeňskými objekty. Uvažované pokračování sklepních prostor k SV bylo georadarem zachyceno pouze náznakem. V odpovídajícím místě (za severním výběžkem jv. sklepa) byla i metodou ERT zjištěna anomálie, která může souviset s předpokládaným, pravděpodobně zasypaným, prostorem za zadržkou. Multielektrodovou odporovou metodou, metodou DEMP i mikrogravimetrií bylo potvrzeno vymezení půdorysu známých sklepních prostor. Pomocí metody ERT byly upřesněny hloubky stropů a podlah jednotlivých sklepních místností. Na základě výsledků měření metodou DEMP lze uvažovat o přítomnosti kamenných destrukcí v jižní části měřené plochy. Mikrogravimetrickým měřením byla zachycena rozsahem nevelká negativní tíhová anomálie jižně od přístupové chodby, jejíž příčina není známa. Jasnější závěry by vzhledem k nejednoznačnosti interpretace přinesl podrobnější průzkum zaměřený na uvedená konkrétní místa.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- GABRIEL, F. (2002). Teplice: zámecké sklepy pod parkem, signatura 647. Národní památkový ústav, ÚOP Ústí nad Labem.
- HAŠEK, V., MOŘKOVSKÝ, T., ŠINDELÁŘ, J. a TOMEŠEK, J. (2013). A Non-Destructive Survey of Tombs in the Chapel of St. Barbara on Modla Hill (cadastral district of Buchlovice). *Anthropologia Integra*, 4(1), 13-20. Masarykova univerzita, Brno.
- HAŠEK, V., ŠINDELÁŘ, J., UNGER, J. (2013). Nedestruktivní archeologie při výzkumu hrobek v Čechách. *Anthropologia Integra*, 4(2), 15-28. Masarykova univerzita, Brno.
- KOCOURKOVÁ, K., VILÍM, K. (2009). Teplice (Zmizelé Čechy). Paseka, Praha.
- KUNA, M. (2004). Nedestruktivní archeologie. Academia, Praha.
- KŘIVÁNEK, R. (2015a). Geofyzikální měření ARÚ Praha na archeologických lokalitách v roce 2014. Zprávy ČAS Supplément 97 – Archeologické výzkumy v Čechách 2014, sborník referátů z informačního kolokvia, 20-23.
- KŘIVÁNEK, R. (2015b). Shrnutí výsledků geofyzikálních průzkumů archeologických lokalit v Ústeckém kraji v rámci projektu Regionální spolupráce AV ČR – rok 2014. Zprávy ČAS Supplément 97 – Archeologické výzkumy v Čechách 2014, sborník referátů z informačního kolokvia, 23-24.
- MARTÍNEZ-LÓPEZ, J., REY, J., DUENAS, J., HIDALGO, C., & BENAVENTE, J. (2013). Electrical Tomography Applied to the Detection of Subsurface Cavities. *Journal of Cave and Karst Studies*, 75, 28-37.

- MRLINA, J. (2008). Special processing technique for high accuracy gravity data of gravity networks and microgravity. *Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*. St.Petersburg, 222-225.
- PAŠTEKA, R, PÁNISOVÁ, J, ZAHOREC, P, et al. (2020). Microgravity method in archaeological prospection: methodical comments on selected case studies from crypt and tomb detection. *Archaeological Prospection* 27, 415-431.
- PAŠTEKA, R., KUŠNIRÁK, D., WILKEN, D., PUTIŠKA, R., PAPČO, J., GODOVÁ, D., ZVARA, I., NOGOVÁ, E., & ONDRÁŠOVÁ, L. (2019). Effective combination of microgravimetry and geoelectrical methods in the detection of subsurface cavities in archaeological prospection – selected case-studies from Slovakia. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 49(4), 479-496.
- PETRÁNEK, J., BŘEZINA, J., BŘÍZOVÁ, E., CHÁB J., LOUN, J. a ZELENKA P. (2016). *Encyklopedie geologie*. Praha: Česká geologická služba.
- PUTIŠKA, R., NIKOLAJ, M., DOSTÁL, I., a KUŠNIRÁK, D. (2012). Determination of cavities using electrical resistivity tomography. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(2), 201-211
- SOKOL, P., HAVLICE, J., KNECHTOVÁ, A., a kol. (2017). *Metodika terénní prostorové identifikace, dokumentace a popisu nemovitých archeologických památek*. Odborné a metodické publikace. Národní památkový ústav, Praha.
- ŠPIČKA D. (2002). *Zpráva o vizuálním průzkumu sklepení v areálu zámecké zahrady v Teplicích, na parcele č. 2369/1*. Regionální muzeum Teplice.
- VIBERG, A., GUSTAFSSON, C., ANDRÉN, A. (2020). Multi-Channel Ground-Penetrating Radar Array Surveys of the Iron Age and Medieval Ringfort Bårby on the Island of Öland, Sweden. *Remote Sens.* 12, 227.

- ZYKMUND, J., KURANDA, P., NEUVIRT, R., ŠPAČEK, P. (2012). Teplice. Teplitz-Schönau – No 1. Europrinty, Břeclav.

Osobní sdělení:

- KURSOVÁ, L. Osobní sdělení. Regionální muzeum v Teplicích, Teplice. [9. 11. 2020, 12. 5. 2021]

Mapové materiály:

- ČGS (2019): Vrtná prozkoumanost, Geologická mapa 1:50 000. In: Geovědní mapy, 1:50 000 [online]. Česká geologická služba, Praha. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geo/> [cit. 5. 5. 2021].
- ČÚZK (2016): Základní mapa ČR 1:10 000 (ZM 10). In: Mapový podklad 1:10 000 [online]. Český úřad zeměměřický a katastrální, Praha. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec> [cit. 5. 5. 2021].
- MAPY.CZ (2018): Letecká mapa ČR. In: Letecký mapový podklad [online]. Mapový portál www.mapy.cz. Dostupné z: <https://mapy.cz/letecka-2018> [cit. 5. 5. 2021].

Použité programy:

- Microsoft Office World 2019
- Microsoft Office Excel 2019
- PhotoFiltre 7 (Antonio Da Cruz 2012)
- QGIS 3.18.2 (QGIS Development Team 2021)
- Res2DInv (Geotomo Software, Loke 1995)
- Reflexw (Sandmeier 2019)
- Surfer® 13 (Golden Software 2016)

7. FOTOGRAFICKÁ PŘÍLOHA



Foto 1: Celkový pohled k SV na plochy pro měření metodou GPR.



Foto 2: Celkový pohled k JZ na plochu pro měření metodami DEMP a ERT.



Foto 3: Aparatura pro metodu ERT, ARES II (GF Instruments s. r. o. Brno).



Foto 4: Georadar Malå Ground Explorer HDR (MALÅ).



Foto 5: Gravimetr Scintrex CG-6.