

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

Geologie

Geologie se zaměřením na vzdělávání



Žaneta Novotná

**Vyhledávání a průzkum historického zdiva geofyzikálními metodami**

**Detection and prospection of historical masonry using geophysical methods**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. PhDr. Jiří Dohnal

Praha, 2014

## **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, 20. 8. 2014

Podpis:

## **Poděkování:**

Děkuju, děkuju... ☺

RNDr. PhDr. Jiřímu Dohnalovi,  
RNDr. Zdeňku Jáněmu,  
doc. RNDr. Jaroslavovi Knězovi, CSc.,  
Bc. Kláře Štěpánkové,  
Bc. Ivě Vyhnánkové,  
rodině a všem přátelům

... kteří se nejen podíleli na vzniku bakalářské práce, ale i za podporu a pomoc při řešení problémů, které mě v období jejího psaní provázely.

## **Abstrakt:**

Práce je zacílena na využití geofyzikálních metod při lokalizaci a průzkumu historického zdiva. Rešerše a vlastní provedené měření ve vybrané lokalitě tvoří dvě vzájemně propojené části. V rešeršní části jsou uvedeny základní informace o typech a vlastnostech historického zdiva a následně strukturovaný přehled geofyzikálních metod, které umožňují na jedné straně lokalizaci „skrytého“ zdiva (archeologický průzkum) a na straně druhé nedestruktivní průzkum zdiva stávajících konstrukcí (stavebně historický průzkum).

Tématem praktické části je geofyzikální měření uskutečněné v prostoru předpokládaného výskytu reliktu jednoho z pilířů zaniklého Juditina mostu v ulici Na Kampě (p. č. 744/1). Lokalita byla zkoumána s využitím multielektrodové odporové metody a georadaru. Kapitola zahrnuje popis terénního měření, zpracování dat a interpretaci výsledků v kontextu s dalšími dostupnými informacemi (geologie, petrofyzika, historie, archeologie, stavební historie). Výsledky průzkumu nejsou jednoznačné, v očekávané „pozici“ pilíře bylo zjištěno odporové minimum provázené nevýraznými indikacemi podle georadaru.

Za hlavní přínos této práce považuji sestavení přehledu nedestruktivních metod (NDT – non destructive techniques) využívaných pro zkoumání zdiva.

## **Klíčová slova:**

Geofyzikální metody, historické zdivo, archeologie, stavebně historický průzkum, Juditin most

## **Summary:**

The work's main focus is the application of geophysical methods to localization and examination of historical masonry. Background research and measurement in the selected locality form two interrelated parts. The summary provides basic information about the types and characteristics of historical masonry and a structured overview of geophysical methods which allow the localization of the "hidden" masonry (archaeological survey) as well as non-destructive survey of existing masonry structures (architectural-historical survey).

The subject of the practical part is the geophysical measurement executed in the area of the presumptive presence of the relics of one of the former Judith Bridge pillars in Na Kampě street (744/1). The locality was explored by means of electrical resistivity tomography and the ground-penetrating radar. The chapter consists of the field measurement description, data processing and interpretation of the results in the context of other available information (geology, petrophysics, history, archaeology, architectural history). The results of the survey are not unequivocal; at the expected pillar "location" a resistivity minimum was detected, accompanied by multivalent indications, by GPR.

The main contribution of this work is the overview of non-destructive techniques (NDT) for examination of masonry.

## **Key words:**

Geophysical methods, historical masonry, archaeology, architectural history survey, Judith Bridge

## Obsah:

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2. HISTORICKÉ ZDIVO.....</b>	<b>9</b>
2.1 Základní typy .....	9
2.2 Fyzikální vlastnosti .....	11
<b>3. LOKALIZACE POHŘBENÉHO HISTORICKÉHO ZDIVA     GEOFYZIKÁLNÍMI METODAMI .....</b>	<b>14</b>
3.1 Geoelektrické metody .....	14
3.1.1 Odporové měření (Electrical resistivity survey) .....	14
3.1.2 Multielektrodová odporová metoda (Electrical resistivity tomography – ERT) .....	18
3.1.3 Konduktometrie (Conductivity survey) .....	21
3.1.4 Georadarová metoda (Ground penetrating radar - GPR) .....	23
3.2 Magnetometrie (Magnetometry) .....	28
3.3 Seismické metody (Seismic methods).....	32
3.4 Mikrogravimetrie (Micro gravity) .....	35
3.5 Termometrie a termografie (Thermal sensing and thermography).....	35
<b>4. NEDESTRUKTIVNÍ PRŮZKUM HISTORICKÉHO ZDIVA (NDT).....</b>	<b>37</b>
4.1 Akustická metoda – úder odraz (Impact – echo system).....	37
4.2 Akustická metoda a akustická tomografie (Pulse sonic testing/ sonic wave test and sonic tomography) .....	39
4.3 Metoda akustické emise (Acoustic emission).....	43
4.4 Ultrazvuková metoda – průchod a/nebo odraz (Ultrasonics).....	46
4.5 Mikroseismické profilování a tomografie (Micro-seismic profiles and tomographies).....	49
4.6 Elektrická odporová tomografie (Electrical resistivity tomography – ERT).....	54
4.7 Bezkontaktní měření vodivosti a odporu (Conductivity and resistivity measurement) .....	58
4.8 Georadar (Impulse radar / Ground penetrating radar – GPR).....	59
4.9 Termometrie a termografie (Thermometry and thermografy).....	64

4.10	Radiační metody (Penetrating radiation methods) .....	67
4.11	Kapametrie (Magnetic susceptibility measurement) .....	69
<b>5.</b>	<b>LOKALIZACE PILÍŘE JUDITINA MOSTU V PRAZE .....</b>	<b>70</b>
5.1	Juditin most .....	70
5.1.1	Pilíře .....	70
5.2	Geologie .....	72
5.3	Geofyzikální průzkum .....	75
5.3.1	Metody a metodika měření .....	75
5.3.2	Zpracování dat .....	76
5.3.3	Výsledky a interpretace měření.....	77
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>82</b>
<b>7.</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>83</b>
<b>8.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>85</b>

## 1. ÚVOD

Účelem této práce bylo vytvořit stručný přehled použití geofyzikálních metod pro lokalizaci a průzkum zděných konstrukcí.

První část je věnována výčtu základních typů historického zdiva se stručným popisem a fyzikálními vlastnostmi. Druhá část obsahuje údaje o geofyzikálních metodách, jež jsou vhodné pro lokalizaci pohřbeného zdiva. V jednotlivých podkapitolách je nastíněn princip, na kterém je daná metoda založena, u každé z nich jsou navíc uvedeny konkrétní příklady, kde byla aplikována. Na tuto část navazuje stejně strukturovaná kapitola o možnostech využití geofyzikálních metod při nedestruktivním průzkumu historického zdiva stávajících konstrukcí, opět doplněná o příklady praktického uplatnění.

V rámci praktické části byl uskutečněn průzkum zvolené archeologické lokality pomocí vybraných geoelektrických metod. Na základě doporučení PhDr. Jaroslava Podlisky, Ph.D. z NPÚ Praha se stal předmětem zájmu skrytý relikv pilíře již zaniklého Juditina mostu v Praze. Samotný geofyzikální průzkum byl prováděn na parcele číslo 744/1 v k. ú. Malá Strana [727091]. Zpracování dat a komplexní interpretace výsledků měření v závislosti na všech dalších dostupných informacích je uvedena v závěru práce.



## 2. HISTORICKÉ ZDIVO

### 2.1 Základní typy

Zdivo je obecně nejběžnější komponentou stavebních konstrukcí. Jedná se o kompaktní stavební strukturu, vytvořenou zpravidla spojením kusového staviva (kámen, cihla, dřevo,...) maltou nebo jiným pojivem do konstrukčního celku. Koncepce a způsob zpracování zdiva je často ovlivněn stavebním slohem. Nejdůležitějším faktorem by ale měla být účelnost a trvanlivost stavební konstrukce, ta je však determinována technologiemi dostupnými v době výstavby a vzdáleností zdrojové lokality stavebního materiálu.

Pro účely této práce považuji za historická zdiva ta, jež jsou vázána na staviva známá do konce raného novověku (tj. do konce 18. století).

Svoboda et al. (2013) dělí stavební materiály na přírodní a umělé. Mezi přírodní lze zařadit hmoty anorganické (hlína, horniny) a organické (dřevo, bambus). Umělé materiály pak představují pálené cihly, terakota, vápno, cement, sádra, sklo, kovy aj. K nejstarším stavebním materiálům obecně patří hlína a dřevo, využívané již v pravěku.

*Hliněné stavby* jsou objekty se stěnami z hlíny. Konstrukčně se může jednat o stavby s nabíjenou stěnou (vznik udusáním vlhké hliněné směsi do bednění), s nakládanou stěnou (hliněná směs se ukládá bez bednění nahazováním), se stěnou vytvořenou skládáním hliněných válků (smotky hliněné kaše se slámou) nebo se stěnou z nepálených cihel (tzv. vepřovic – vytvarovaných ze směsi hlíny, plev, slámy, vápna a písku, a poté vysušených). Hlína se uplatňuje ve stavebnictví i v současnosti. Je pro svou výbornou schopnost absorpce vzdušné vlhkosti využívána stále častěji (Škrabada 2010).

Nezřídka využívaným stavebním materiálem je i dřevo. Typickými představiteli *dřevěných staveb* jsou objekty s roubenými stěnami, kde jsou vodorovně kladené trámy spojeny v rozích různými typy tesařských vazeb (Škrabada 2010). Další typy objektů s převahou dřeva reprezentují konstrukce s vyplétanými nebo rámovými stěnami (Horká 2007). Výhodou dřeva jako staviva jsou jeho dobré tepelně-izolační vlastnosti, snadná opracovatelnost i dostupnost.

*Zděné stavby* zahrnují stavební objekty vytvořené technikou zdění z kusového staviva. Z hlediska použitého pojiva se rozlišuje zdění nasucho (bez malty), na hliněnou maltu a na vápennou maltu.

Podle použitého materiálu se historické zdivo nejčastěji dělí na kamenné, cihelné, smíšené a hrázděné. Dalšími kritérii jsou tvar použitého staviva a jeho skladba.

Typy *kamenného zdiva* rozlišujeme podle použitých kamenů a jejich skladby. Mezi nejarchaičtější stavby patří zdi, tvořené nasucho skládanými kameny menších rozměrů, současně slouží i jako mezní pásy. Pro kámen jako stavivo svědčila především jeho trvanlivost a zpravidla i relativní dostupnost. Přírodní kusový kámen pro stavební účely byl nejprve sbírán na polích, podobně byly využívány i valouny (z říčních nebo mořských sedimentů). Později byl těžen v lomech; vylámaný materiál se označuje jako lomový kámen. Ten představují neopracované nepravidelné kusy o různých velikostech. Vedle lomového se uplatňoval i kámen tesaný, opracovaný nejčastěji do tvaru kvádrů či kvádríků. Z hlediska horninových typů se v antickém Středomoří nejčastěji využíval vápenec, mramor a tuf, dále i pískovec, žula a porfyr. Výraznou převahu získává kamenné zdivo ve středověku, kdy se zpracovává především pískovec, opuka, mramor, žula, porfyr a syenit (Syrův et al. 1977).

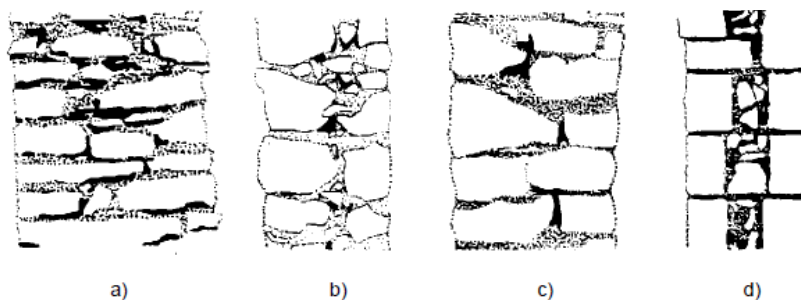
Nejběžnějším typem je tzv. *lomové zdivo* („opus incertum“), kde jsou neopracované lomové kameny uloženy v maltě, a to buď bez pravidelného uspořádání, nebo se zřetelnou horizontální vrstevnatostí. Na opačném pólu stojí *kvádrové* (kvádríkové) *zdivo*, typické pro románské stavitelství a charakteristické opracovanými kameny (nejčastěji opuka, pískovec a žula) uspořádanými do pravidelných řádek. Běžně používané bylo i *lité zdivo*, kdy oba líce zdi byly vyzděné z opracovaných kvádrů nebo částečně opracovaných kamenů a prostor mezi nimi byl vyplněn lomovým kamenivem zalitým vápennou maltou. Líce z kvádrů a jádro z lomového zdiva byly specifické pro zdivo „smíšené“ („opus mixtum“). Mezi méně běžné typy zdiva se řadí *zdivo klasové* („opus spicatum“) s lícem tvořeným řadami šikmo položených plochých kamenů či cihel; střídání sklonu v jednotlivých řadách pak připomíná uspořádání zrn v klasu. Odlišnou formu vykazovalo *zdivo kyklopské*, které sestávalo z velkých balvanů poskládaných k sobě s minimálními mezerami a bez použití malty.

Relativně později je rozšířeno *cihelné zdivo*, využívající jako základní stavební prvek pálenou cihlu, která byla vyráběna vypalováním z cihlářské hlíny. I v případě cihelného zdiva existuje řada modifikací v jeho uspořádání.

Kombinace kamenného (zpravidla lomového) a cihelného zdiva tvoří *zdivo smíšené*. Cihly byly v tomto případě často používány na vnitřní líc jako dobrý podklad pod omítku. Neomítané zdivo se obecně označuje jako režné.

Specifickým druhem stavební konstrukce je *zdivo hrázděné*, u něhož je dřevěná nosná kostra z trámů vyplněna menšími trámky s hliněnou maltou,

cihelným nebo výjimečně i kamenným zdivem. Výplň je zpravidla omítnuta, trámy nikoliv.



**Obr. 1:** Klasifikace kamenných zdív podle vnitřní struktury: a) jedna vrstva, b) dvě vrstvy bez kontaktu, c) dvě vrstvy s kontaktem, d) tři vrstvy – podle Binda – Saisi 1994.

## 2.2 Fyzikální vlastnosti

Předpokladem úspěšné aplikace geofyzikálních metod při řešení archeologických úloh je dostatečná odlišnost fyzikálních vlastností hledaného objektu (v našem případě zdiva) od okolního prostředí (Kuna et al. 2004). Pozůstatky antropogenní činnosti se soustřeďují převážně do prvních metrů pod zemským povrchem – do kvartérních uloženin (Hašek, Měřínský 1991).

Vzhledem k nedostatku systematických literárních údajů bude tato kapitola pouze přehledová, zaměří se výhradně na fyzikální vlastnosti zdiva z kusového staviva. Zděné konstrukce se obecně vyznačují značnou variabilitou strukturních a tudíž i fyzikálně-mechanických vlastností, proto je nutné klást velký důraz na podrobný popis měření, zpracování dat i vlastní analýzu výsledků měření. Na výsledné hodnotě příslušného parametru se podílí nejen fyzikální charakteristika jednotlivých složek a jejich vzájemný poměr, ale současně i mnoho dalších faktorů. Mezi ně patří především strukturní proměnné. Existuje řada typů vazeb zdiva, skladeb zděných prvků, způsobů zpracování kusového staviva, apod. Mnohé význačné vlastnosti zdiva a jeho složek se mění i v průběhu času, v závislosti na agresivitě okolního prostředí (Witzany 2009). Fyzikální vlastnosti ovlivňuje také nehomogenita zdiva a jeho anizotropie, stupeň nasycení vodou a mineralizace impregnujících roztoků.

Zjišťování fyzikálních vlastností zdiva lze provádět buď přímo v terénu - v kontextu s měřením různými typy NDT, nebo v laboratoři, kde lze vytvářet a zkoumat umělé zděné struktury, případně provádět měření na menších vzorcích odebraných z reálných staveb. Formálně je možné fyzikální charakteristiky zdiva rozdělit na ty, jež závisejí více na jeho látkovém složení (např. magnetická

susceptibilita) nebo i na jeho strukturu a texturu (např. měrný elektrický odpor) (Doležal et al. 1975).

Následuje přehled údajů o základních fyzikálních vlastnostech zdiva.

- Měrný elektrický odpor

bývá ovlivněn vodivostí horninotvorných minerálů, pórovitostí, stupněm rozpukanosti, nasycením vodou apod. Převážná část kamenných zdív obsahuje horniny o vyšších měrných odporech (řádu  $10^2$  až  $10^4$  ohmm) a je uložena v nezpevněných zeminách (s odpory řádu  $10^0$  až  $10^2$  ohmm), ale např. pískovcové zdivo charakterizuje širší rozmezí měrných odporů  $10^1$  až  $10^4$  ohmm (Colla et al. 1997). Proto lze ve většině případů očekávat, že se zdi, jejich relikty či destrukce projeví odporovými maximy. Výjimkou mohou být např. zdiva z opuky, slínovců nebo jílovců (o odporech řádu  $10^1$  ohmm) založená v šterkopísčitých sedimentech nebo zdi z nepálených cihel. Mechanické porušení zdiva, zvýšená vlhkost a vyšší stupeň mineralizace vedou zpravidla k poklesu měrného odporu.

- Relativní permitivita

(dielektrická konstanta) se obecně mění od 1 (vzduch) do 80 (voda). Pro různé horninové typy pak nejčastěji dosahuje - v závislosti na obsahu vody - hodnot v intervalu 3 až 30. Pro beton se uvádí rozmezí 2,5 až 8,0 (průměrně 4,5), pro cihly 5,9. Rychlost šíření elektromagnetického vlnění ve zdivu je přibližně  $1,5 \times 10^8$  m/s (Davis – Annan 1989), v betonu 0,9 až  $1,2 \times 10^8$  m/s (Flint et al. 1999).

- Magnetická susceptibilita

Velikost magnetické susceptibility a přirozená remanentní magnetizace hornin závisí na obsahu feromagnetických minerálů. Obecně platí, že vyšší až vysoké hodnoty susceptibility vykazují zdi z pálených cihel a zdi z bazických vyvřelých či metamorfovaných hornin (s přibýváním bazicity roste zastoupení magnetických minerálů), nemusí to však být pravidlem. Půdy mohou být v některých případech i více magnetické než podloží či archeologický objekt.

- Rychlost šíření seismických a zvukových vln

Rychlost podélných seismických vln (P-vln) v horninách je ovlivněna mineralogickým a granulometrickým složením, strukturou, texturou, stupněm rozpukanosti a nasycenosti pórů vodou. Pro rychlost šíření P-vln zdivem platí analogické závislosti jako u měrných odporů. Zdiva a jejich relikty se obvykle projevují vyššími rychlostmi než přilehlé nezpevněné sedimenty. Mechanické

porušení zdiva vede k poklesu seismických rychlostí, podobně i zvětření kamenných součástí nebo malty.

Zajímavé výsledky přinesla studie kolektivu italských výzkumníků (Valluzzi et al. 2009), kteří na velkém vzorku historických staveb zkoumali hodnoty rychlosti šíření akustického vlnění ve zdivu. Z hlediska typologie staveb byly nejvyšší rychlosti zjištěny u věží (1612 m/s), střední u kostelů (1518 m/s) a nejnižší u paláců (1377 m/s) a městských hradeb (1354 m/s). Podle typu zdiva odpovídaly nejvyšší rychlosti kamenným zdem (1932 m/s), střední cihlovým zdem (1500 m/s) a nejnižší stavbám ze smíšeného zdiva (1239 m/s).

- o Objemová hmotnost

Pro gravimetrická měření je základním parametrem hustota hornin, ta je ovlivněna mineralogickým složením, strukturou, texturou, stupněm metamorfózy a porušením (Uhmann 1973). Ve stavebním inženýrství se při popisu stavebních materiálů uvádí buď objemová hmotnost (Bulk density) nebo hustota (Particle density). Objemová hmotnost je definována jako poměr hmotnosti tělesa k jeho celkovému objemu (včetně pórů, mezer a dutin). Hustota je definována jako podíl hmotnosti pevné složky tělesa k objemu pevné složky.

Objemová hmotnost suchých pálených cihel se pohybuje v rozmezí 1600 až 2200 kg/m<sup>3</sup>, hustota v rozmezí 2600 až 2700 kg/m<sup>3</sup>; zdivo z plných pálených cihel vykazuje objemovou hmotnost 1700 až 1800 kg/m<sup>3</sup> (Svoboda et al. 2013). Pro beton se uvádí objemová hmotnost 2300 až 2400 kg/m<sup>3</sup>

- o Tepelná vodivost a tepelná kapacita

Teplo se obecně může šířit vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo sáláním (radiací). V pevných látkách se teplo šíří vedením. U porézních stavebních materiálů se uplatňují i obě další složky. Velikost součinitele tepelné vodivosti materiálu závisí na vlhkosti, pórovitosti, struktuře a teplotě. Velikost měrné tepelné kapacity materiálů závisí především na vlhkosti a teplotě.

Součinitel tepelné vodivosti se pro pálené cihly pohybuje v rozmezí 0,65 – 0,8 W/m.K, pro zdivo z pálených cihel v rozmezí 0,73 – 0,77 W/m.K (Svoboda et al. 2013), pro beton s kameny kolem 1,7 W/m.K ([http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)). Měrná tepelná kapacita pálených cihel je v intervalu 900 – 1100 J/kg.K, zdiva z pálených cihel kolem 900 J/kg.K (Svoboda et al. 2013).

### 3. LOKALIZACE POHŘBENÉHO HISTORICKÉHO ZDIVA GEOFYZIKÁLNÍMI METODAMI

Častým cílem řady archeologických výzkumů, zvláště v archeologii středověku, jsou zděné objekty i reliktů historického zdiva v nejrůznějších kontextech.

Díky rozvoji geofyzikálních metod v posledních desetiletích získaly tyto metody velký význam i v archeologii při lokalizaci a průzkumu historického zdiva (z hlediska rychlosti, efektivnosti a ekonomičnosti). Často bývají využity ještě před zahájením vlastních archeologických výkopů. Princip geofyzikálních metod je obecně založen na sledování fyzikálních veličin v prostoru. Volbu konkrétních prospekčních metod je nutné provádět s přihlédnutím k očekávaným archeologickým situacím, ke geologické stavbě území a k recentním podmínkám lokality.

Podle Haška a Měřínského (1991) a řady zahraničních autorů (David et al. 2008, Ernenwein – Hargrave 2009, Sala et al. 2012) patří prioritou při vyhledávání pohřbeného zdiva geoelektrickým metodám (odporové profilování, multielektrodová odporová metoda, konduktometrie a georadarová metoda), výrazně menší význam sehraávají magnetometrie a mělká refrakční seismika, zcela ojediněle jsou využívány mikrogravimetrie a termometrie.

#### 3.1 Geoelektrické metody

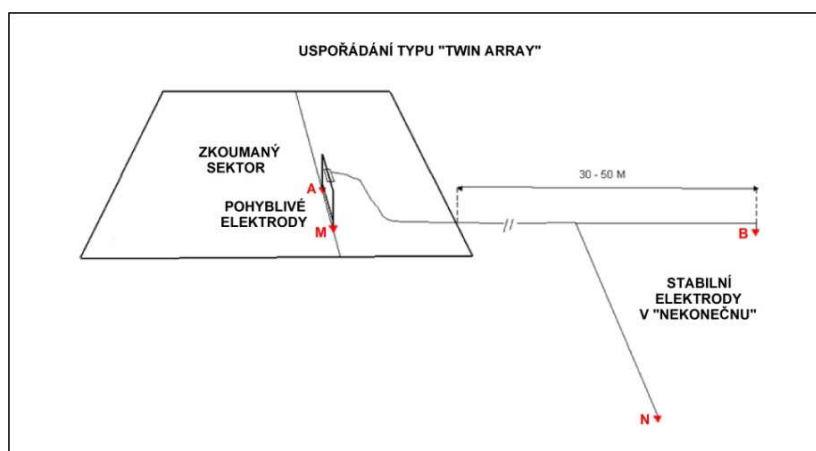
##### 3.1.1 Odporové měření (Electrical resistivity survey)

Základem pro odporové měření je skutečnost, že různé typy hornin, zemin a archeologických objektů vykazují výrazné rozdíly v měrných elektrických odporech. Jedná se o stejnosměrnou konduktivní metodu, jejíž princip vychází z Ohmova zákona. Typické uspořádání zahrnuje čtyři elektrody, dvě proudové (A, B) a dvě potenční (M, N), jejichž vzájemnou konfiguraci a vzdálenosti lze volit v závislosti na řešeném problému a podmínkách lokality. Měřené veličiny jsou proud  $I$  (mA) a napětí (potenciálový rozdíl)  $\Delta V$  (mV), výpočtem podle Ohmova zákona pak získáme zdánlivý měrný odpor  $\rho_z$  :

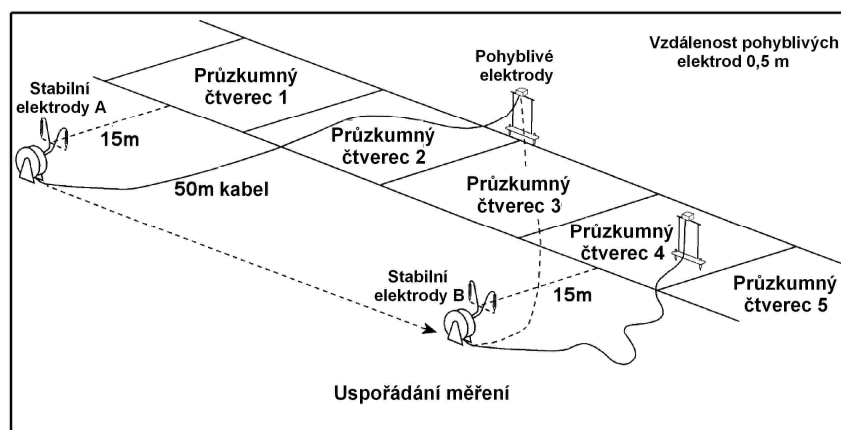
$$\rho_z = k \frac{\Delta V}{I} (\Omega\text{m}),$$

kde  $k$  je konstanta uspořádání, která závisí na vzájemných vzdálenostech elektrod (Mareš a kol. 1977).

Z velkého množství možných konfigurací bylo dříve v archeologických aplikacích nejvíce využíváno uspořádání Wennerovo (symetrické, stejné vzdálenosti mezi sousedními elektrodami) a Schlumbergerovo (symetrické, vzdálenost mezi elektrodami M a N menší než třetina vzdálenosti mezi A a B). V posledních letech se z mnoha důvodů preferuje uspořádání typu „twin array“, tj. pól – pól (dvojice elektrod A a M), a to buď v klasické variantě se dvěma zhruba na sebe kolmými „nekonečny“ (elektrody B a N, viz **obr. 2**), nebo ve verzi označované jako „twin electrode array“ či „double dipole array“, pro kterou je typické pouze jedno „nekonečno“, tvořené „dipólem“ BN (**obr. 3**). V obou případech musí být stabilní elektrody uzemněny mimo měřený prostor, a to ve vzdálenosti minimálně 30x větší než je rozstup pohyblivých elektrod.

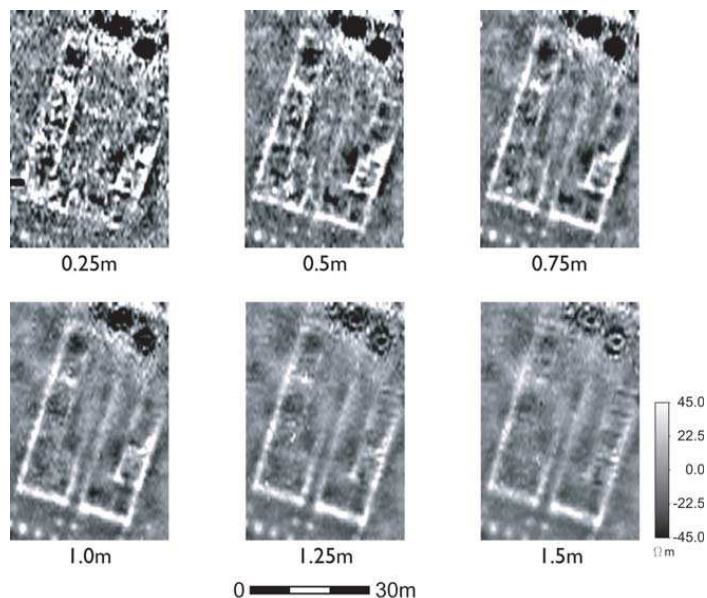


**Obr. 2:** Schéma uspořádání typu „twin array“ (pro dvě nekonečna) – upraveno podle <http://www.radar-solutions.com/html/methods/Resistivity.html>.



**Obr. 3:** Uspořádání měření typu „twin array“ (pro jedno nekonečno), čtverce 1 a 2 měřeny pro uzemnění A, čtverce 3 a 4 pro uzemnění B – podle Cambridge Archaeology Field Group 2012.

K výhodám uspořádání typu „twin array“ patří: dokonalé zachycení mělkých struktur, snadná aplikace a rychlá instalace i měření. Oproti klasickým symetrickým konfiguracím se pouze minimálně projevuje závislost tvaru anomálie na orientaci uspořádání. Prostorové rozlišení je v relaci se vzdáleností pohyblivého páru elektrod A a M, hloubkový dosah je přibližně jedenapůl- až dvoj-násobkem rozestupu mezi elektrodami A a M (**obr. 4**). Při archeologické prospekci je obvyklá vzdálenost měřících elektrod 0,5 m (hloubkový dosah 0,75 až 1,0 m) a meziprofilový interval i krok měření 0,5 nebo 1,0 m (**obr. 5**).



**Obr. 4:** Výsledky odporového měření pro různé rozestupy elektrod („twin array“) na lokalitě Wroxeter (římská stavba): malé rozestupy detekují mělké struktury (základy příček), větší rozestupy hlouběji založené struktury (základy obvodových zdí) – podle David et al. 2008.



**Obr. 5:** Odporové měření: přístroj typu TR/CIA – podle Cambridge Archaeology Field Group 2012.

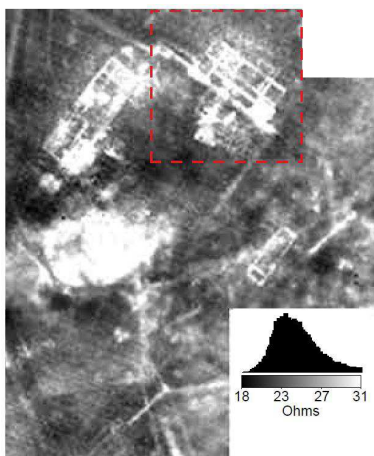


Geoelektrické odporové měření umožňuje spolehlivou lokalizaci zděných objektů a objektů s kamennou konstrukcí; ve velké míře se proto uplatňuje při archeologickém výzkumu v areálech měst, sídlišť, hradů, zámků, tvrzí i fortifikačních a sakrálních objektů. V některých případech může plošné odporové měření poskytnout detailní půdorysné plány základů zděných staveb a různých kamenných objektů. Vzhledem k časté volbě menšího hloubkového dosahu bývají měřené odpory zpravidla minimálně ovlivněny geologickou stavbou skalního podloží. Nevýhodou těchto měření je naopak výrazná závislost odporů na změnách půdní vlhkosti. Za středních vlhkostních podmínek se pohřbené kamenné i cihlové zdi a jejich destrukce projevují proti okolnímu prostředí zpravidla jako odporová maxima. Extrémní vlhkosti zemního prostředí, a to v obou směrech, obvykle vedou ke zmenšení odporového kontrastu, případně mohou podmínit až vymizení anomálních projevů (Cambridge Archaeology Field Group 2012, Ernenwein – Hargrave 2009).

Výsledky odporového měření mohou být zobrazeny ve formě profilových křivek, v případě plošných průzkumů jsou nejčastějšími výstupy mapy izolinií nebo mapy ve stupnici šedi, případně jiná 2D či 3D zobrazení.

- Příklady použití:
  - Římské osídlení v lokalitě Dunkirt Barn (Velká Británie Hampshire) (Cambridge Archaeology Field Group 2012).

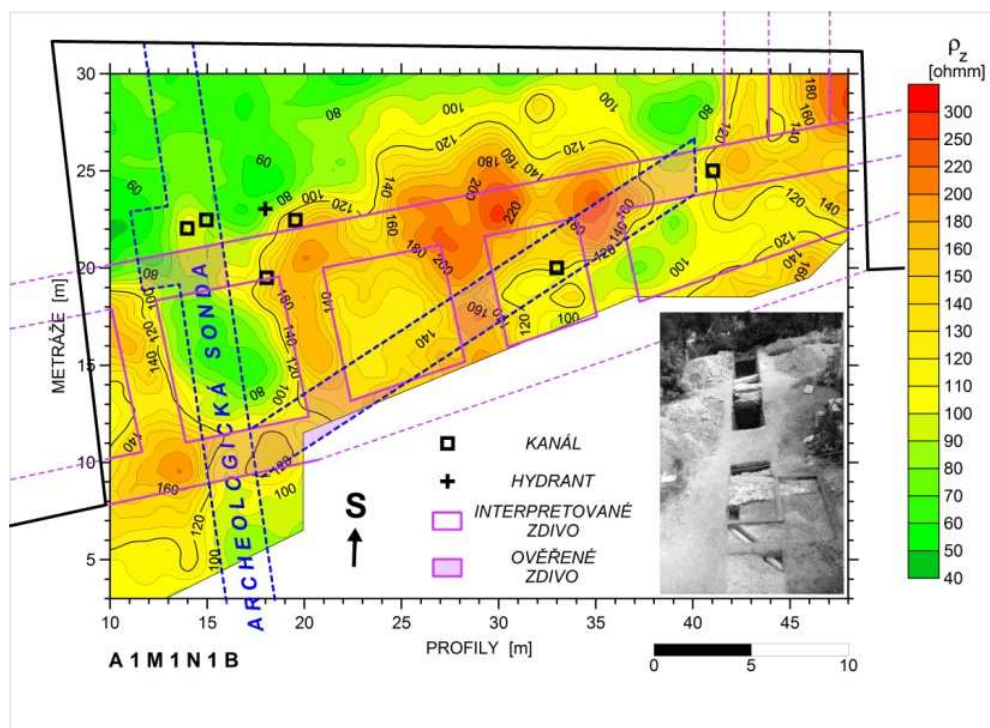
Areál zaniklé římské vily a několika dalších objektů ve čtvrti Dunkirt Barn byl proměřen odporovou metodou v uspořádání „twin array“. Ve výsledné mapě se zvýšenými odpory projevilo nejen základové zdivo staveb, ale i příčné zdi, vymezující jejich vnitřní uspořádání.



**Obr. 6:** Římské stavby na lokalitě Dunkirt Barn: „grayscale“ mapa zdánlivých měrných odporů – podle Cambridge Archaeology Field Group 2012.

- Hrad Nižbor u Berouna (Dohnal et al. 2004)

Gotický hrad založený ve 2. polovině 13. století, roku 1425 dobyt husity a poté opakovaně přestavován. Na přelomu 20. a 21. století byl v jeho areálu proveden komplexní geofyzikální průzkum. V prostoru druhého hradního nádvoří odhalilo plošné odporové měření (uspořádání A1M1N1B) pohřbená zdiva zaniklého jižního paláce, která se projevila pravidelnými anomáliemi vyšších odporů.



**Obr. 7:** Hrad Nižbor – druhé nádvoří: mapa izolinií zdánlivých měrných odporů, na fotografii pohled na archeologickou sondu od severu: patrné jsou odkryté základy zdi paláce – upraveno podle Dohnal et al. 2004.

### 3.1.2 Multielektrodová odporová metoda (Electrical Resistivity Tomography – ERT)

Multielektrodová varianta odporové metody je moderní, sondážně-profilová metodika, která je využívána zejména pro detailní mělký průzkum. Umožňuje zachytit odporové změny a anomálie v horizontálním i vertikálním směru. Před měřením jsou podél profilu rozmístěny s pravidelnými rozestupy stabilní elektrody, jejichž počet závisí na délce zvoleného úseku a kroku mezi elektrodami, a celé uspořádání je propojeno speciálními kabely. Postupné zapojování různě vzdálených elektrod jako proudové a potenční dvojice umožňuje podrobné sledování odporových poměrů v jednotlivých hloubkách podél profilu.

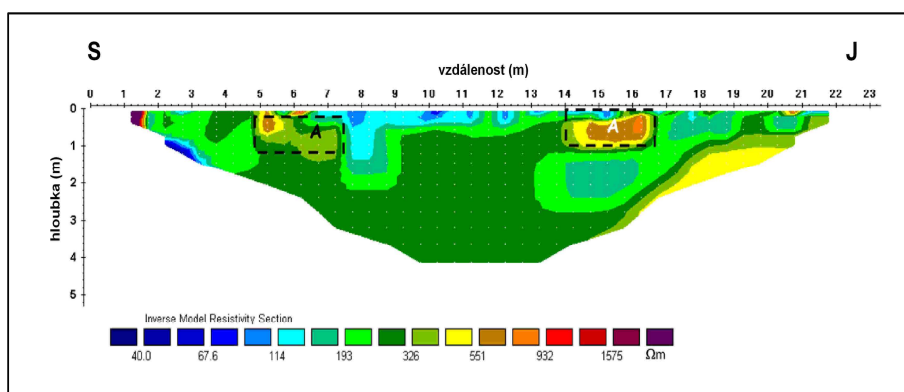
Vlastní měření je zpravidla řízeno mikroprocesorem, součástí systému jsou i přepínače umožňující zapojování příslušných kombinací elektrod.

Pro svoji časovou náročnost je multielektroková metoda využívána především pro ověřování vybraných indikací zachycených předcházejícím plošným odporovým měřením. V závislosti na měřítku průzkumu a předpokládané hloubce hledaných struktur je vzdálenost mezi elektrodami volena nejčastěji 0,5 m nebo 1,0 m (David et al. 2008, Sala et al. 2012).

Naměřená data jsou zpracovávána nejčastěji pomocí 2D-inverze (Loke – Barker 1995), jejímž výstupem jsou vertikální odporové řezy. Postupné nebo simultánní proměření sestavy paralelních profilů, které vykrývají pravouhlou plochu, umožňuje použití 3D-inverze s následnou konstrukcí horizontálních odporových řezů pro různé hloubkové úrovně.

- Příklady použití:
  - „Hrad“ Occhiola (Itálie – Sicílie) (Leucci et al. 2007b) – srovnej *Seismické metody*.

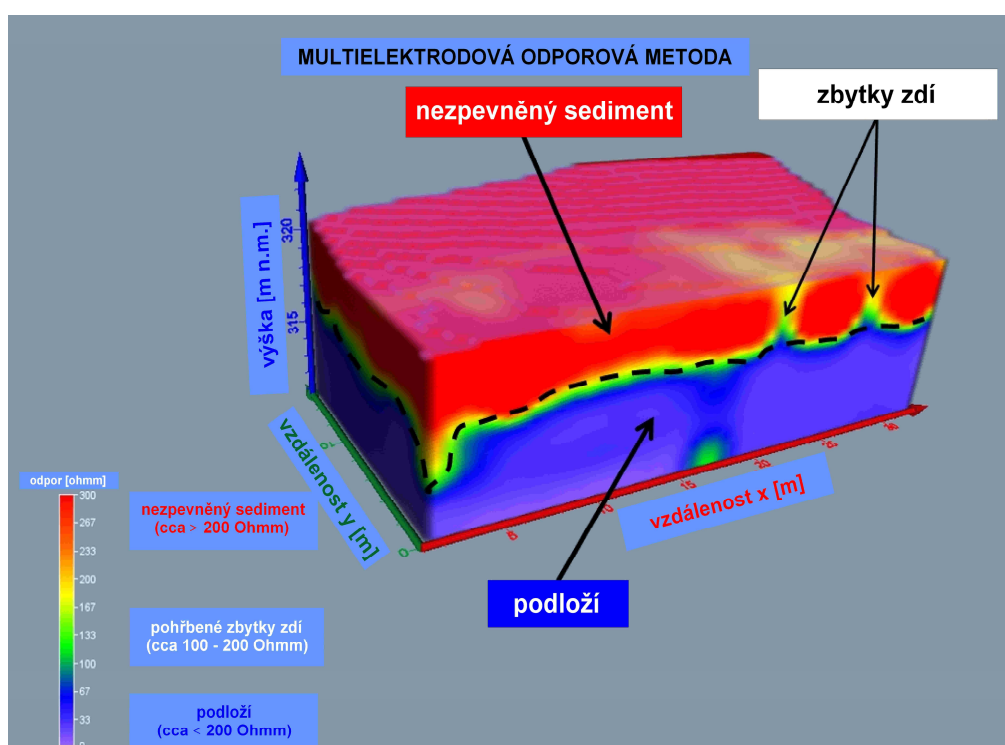
Zříceniny Occhiola jsou ve skutečnosti zaniklou středověkou vesnicí, která byla srovnána se zemí v průběhu série silných zemětřesení koncem 17. století. V roce 2004 byl v jejím areálu realizován geofyzikální měření, jehož účelem byla lokalizace archeologických struktur, především zdí a zahloubených objektů. Průzkum zahrnoval elektrickou odporovou tomografii a mělkou refrakční seismiku. Data z multielektrového měření (uspořádání dipól-dipól) byla zpracována pomocí 2D-inverze za využití modelu „robust“. Výsledný odporový řez v linii jednoho z proměřených profilů (**obr. 8**) detailně ilustruje odporové poměry do hloubky kolem 3 m. Dvě anomální struktury zvýšených odporů s hodnotami v rozmezí 400 až 700  $\Omega\text{m}$  byly interpretovány jako projev pohřbených relikvií zdí (označené A).



**Obr. 8:** Hrad Occhiola: multielektrové měření – odporový řez, struktury označené A = interpretované zdivo – podle Leucci et al. 2007b.

- Lokalita Tel Azekah (Izrael) (Hecht 2010).

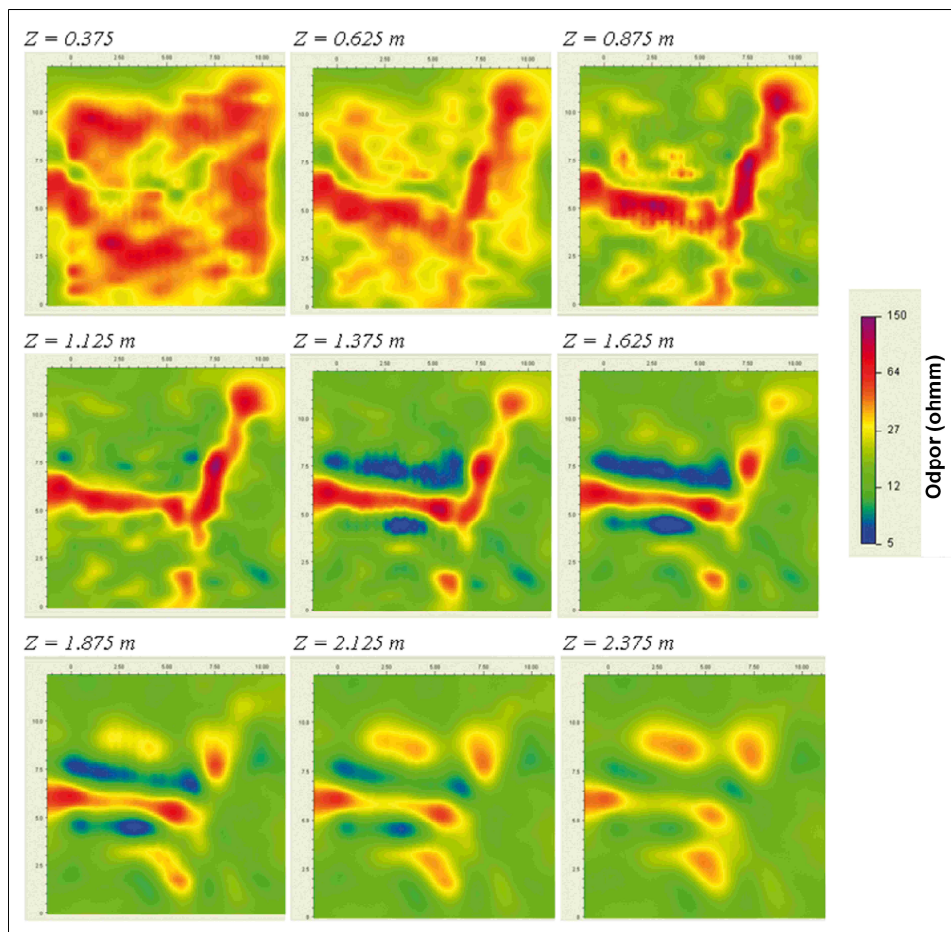
Sídliště Tel Azekah bylo v době od 10. do 6. století př. Kr. důležitým hospodářským centrem země. V kontextu s komplexním archeologickým průzkumem lokality bylo v roce 2009 provedeno i geofyzikální měření metodou ERT, jehož úkolem bylo nalezení pohřbených archeologických struktur. V proměřeném prostoru bylo zjištěno vodivé podloží (odpory menší než 100  $\Omega\text{m}$ ) a nevodivý povrch (odpory větší než 200  $\Omega\text{m}$ ). Díky tomuto rozložení se relikty pohřbených zdí ve formě vertikálních anomálií projeví atypicky, totiž relativními odporovými minimy (odpory v rozmezí 100 až 200  $\Omega\text{m}$ ).



**Obr. 9:** Sídliště Tel Azekah: 3D-multielektrodevé měření – blokdiagram, – podle Hecht 2010.

- Archeologická lokalita Andilly (Francie) (Papadopoulos et al. 2009).

Na lokalitě bylo realizováno testovací měření několika speciálními konfiguracemi metody ERT (rozstup elektrod 0,5 m), a to v prostoru nad stykem dvou vertikálních zděných struktur. Z inverzního modelu byly konstruovány horizontální odporové řezy. Obě struktury se projeví výraznými maximy v intervalu hloubek 0,625 až 1,625 m.



**Obr. 10:** Lokalita Andilly: 3D-multielektrobové měření – horizontální řezy, patrné projevy dvou zdí – podle Papadopoulos et al. 2009.

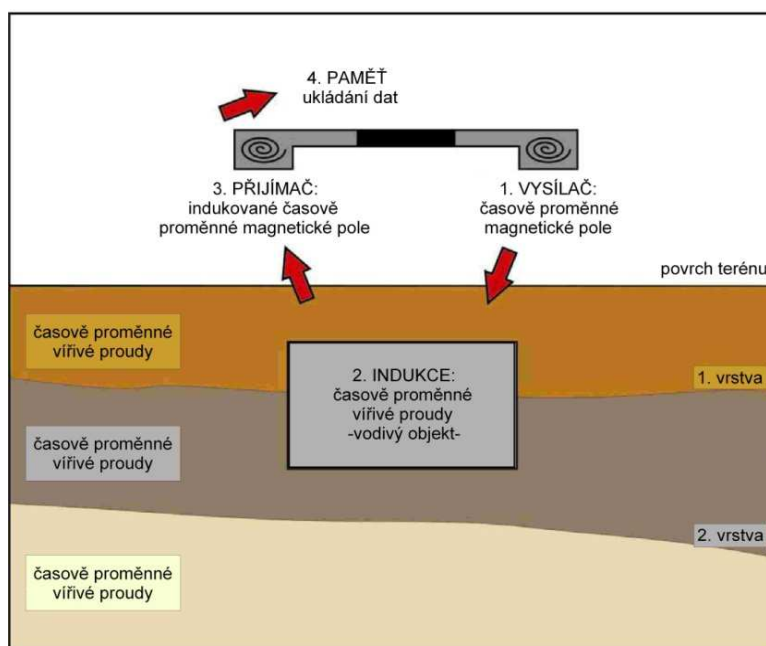
### 3.1.3 Konduktometrie (Conductivity survey)

Konduktometrie (dipólové elektromagnetické profilování DEMF, dipólové induktivní profilování DIP, resp. electromagnetic induction method) umožňuje přímé stanovení zdánlivé měrné vodivosti prostředí, a to na principu elektromagnetické indukce, proto nevyžaduje vodivý kontakt se zemí. Při měření je vysílačem (ve formě dipólu) generováno primární elektromagnetické pole, které úměrně vodivosti prostředí indukuje v zemi vířivé proudy. Přijímač (druhý dipól) pak přijímá a měří velikost vybuzeného sekundárního magnetického pole, přičemž imaginární část signálu (out-of-phase) je úměrná zdánlivé vodivosti prostředí a reálná složka (inphase) magnetické susceptibilitě (**obr. 11**). Pro vodivost je používána jednotka mS/m, pro složku inphase jednotka ppt (parts per thousand). Konduktometry používané v archeologii jsou zpravidla tvořeny jedním nebo více páry dipólů zabudovaných v pevné konstrukci (**obr. 12**), nebo mohou sestávat z nezávislého vysílacího a přijímacího dipólu, které jsou propojeny kabelem. Terénní měření je rychlé a na rozdíl od klasické odporové

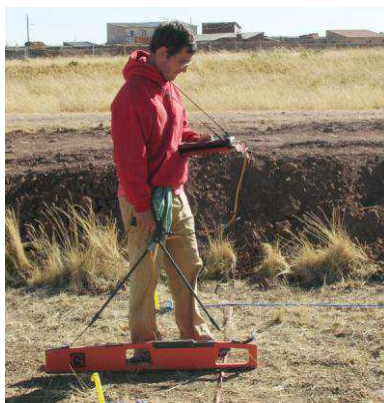
metody použitelné i v místech se zpevněným nebo nevodivým povrchem, jako je beton, asfalt, led, suchý písek, apod. Nevýhodou je velká citlivost na podzemní i nadzemní kovové předměty recentního původu a na elektromagnetické rušení (Ernenwein – Hargrave 2009).

V rámci archeologické prospekce je konduktometrie s úspěchem používána i pro vyhledávání pohřbeného zdiva a obecně objektů s kamennou konstrukcí.

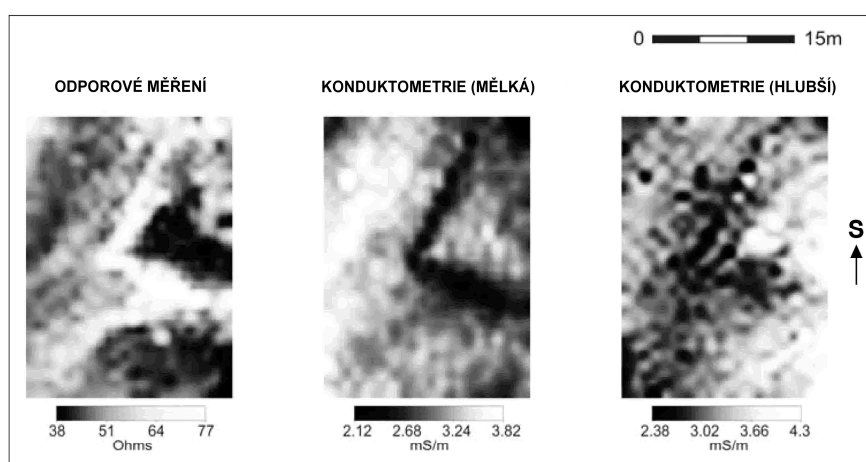
Hloubkový dosah metody závisí na použité frekvenci; pro nižší frekvence je větší, pro vyšší frekvence menší (skin-efekt). Pro rozlišovací schopnost je však závislost opačná; měřením na vyšších frekvencích lze zachytit menší objekty. Dalším faktorem je výška přístroje nad zemí, pro dosažení „maximálního“ hloubkového dosahu je optimální měřit se systémem umístěným přímo na povrchu terénu. Hloubkový dosah měření zásadně ovlivňuje i orientace cívek, zatímco pro vertikální dipóly je přibližně 1,5 násobkem jejich vzdálenosti, pro horizontální dipóly je zhruba v relaci s jejich vzdáleností (viz **obr. 13**). Pro základní průzkum se vzdálenost mezi profily i krok měření volí obvykle 1,0 m, pro detailní průzkum se měří nejčastěji v síti 1,0 x 0,5 m nebo 0,5 x 0,5 m (David et al. 2008).



**Obr. 11:** Princip konduktometrie: funkční schéma – upraveno podle Sala et al. 2012.



**Obr. 12:** Konduktometr typu Geonics EM38 – podle Ernenwein – Hargrave 2009.



**Obr. 13:** Porovnání odezvy pohřbené římské zdi v různých metodách: a) odporové měření („twin array“, vzdálenost elektrod 0,5 m, zdivo – vysoké odpory – „bílé“), b) konduktometrie (Geonics EM38, horizontální dipóly, zdivo – nízké vodivosti – tmavé), c) konduktometrie (Geonics EM38, vertikální dipóly, zdivo – nízké vodivosti – tmavé) – podle David et al. 2008.

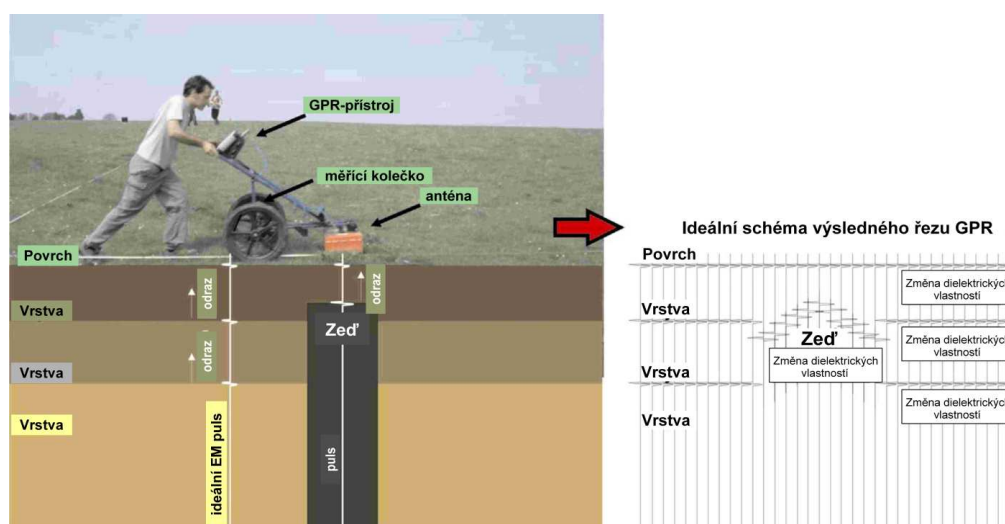
### 3.1.4 Georadarová metoda (Ground penetrating radar - GPR)

Princip měření georadarem spočívá ve využití vysokofrekvenčních elektromagnetických pulsů, které systém vysílá pomocí antény do země a po odrazu části jejich energie od různých nehomogenit či rozhraní je registruje a ukládá do paměti. Příjem signálu probíhá kontinuálně a do paměti se pro každou pozici zaznamenává časová sekvence amplitudových hodnot. Přístroj zahrnuje vysílací a přijímací anténu, napájecí zdroj, řídicí a registrační jednotku (**obr. 14**). Antény jsou obvykle umístěny co nejbližší k zemi - často ve vozíku nebo plastovém boxu. Při použití v archeologii se zpravidla volí (je-li to možné) co nejmenší vzdálenost mezi anténami.



**Obr. 14:** Georadarový systém namontovaný na speciálním čtyřkolovém vozíku – podle Cambridge Archaeology Field Group 2012.

Základním fyzikálním parametrem, který v jistém smyslu umožňuje využití georadarové metody, je relativní permitivita prostředí (dielektrická konstanta), neboť rychlost šíření vlnění je nepřímo úměrná právě relativní permitivitě. Ta je úzce svázána s vlhkostí prostředí. Reflexy pak vznikají na rozhraních, kde dochází ke změně relativní permitivity, a tedy i rychlosti vlnění. Intenzita reflexů je úměrná kontrastu v permitivitě. Klíčovým údajem při zpracování záznamů je čas příchodu odraženého signálu (v ns). Současně s časem se registruje i amplituda odražené vlny, která odpovídá intenzitě odražené energie (v dB). Známe-li rychlost šíření elektromagnetického pulzu v zemi (řádově kolem  $108 \text{ m}/\mu\text{s}$ ), lze následně vypočítat dráhu, kterou vlnění prošlo od vysílače k rozhraní a zpět k přijímači, a tedy i hloubku rozhraní (**obr. 15**).



**Obr. 15:** GPR schéma měření a zobrazení dat, vlevo idealizovaný geologický řez s pohřbenou zdí, vpravo ideální georadarový řez, kde na vertikálních liniích je záznam pulsů a horizontální osa reprezentuje pohyb systému podél profilu – podle Sala et al. 2012.



Vyhodnocení a interpretaci georadarových záznamů často komplikuje přítomnost násobných odrazů, odchýlení odražených paprsků od vertikály i samotný úhlový rozptyl vysílané energie (do formy kuželu). Hloubkový dosah měření a prostorové rozlišení závisí na řadě faktorů, významná je především frekvence použité antény (**viz tabulka 1**) a vodivost zemního prostředí, která je dána typem hornin a jejich vlhkostí. Zatímco signál 50 MHz antény může proniknout až do hloubky deseti i více metrů (ale s minimálním rozlišením), signál antény o frekvenci 500 MHz někdy dosáhne pouze do hloubky 1 m (ale rozliší i malé detaily). Pro archeologické účely se nejčastěji využívají antény o frekvencích 100 MHz až 1 GHz; hloubkový dosah se standardně pohybuje v řádu metrů (David et al. 2008, Ernenwein – Hargrave 2009).

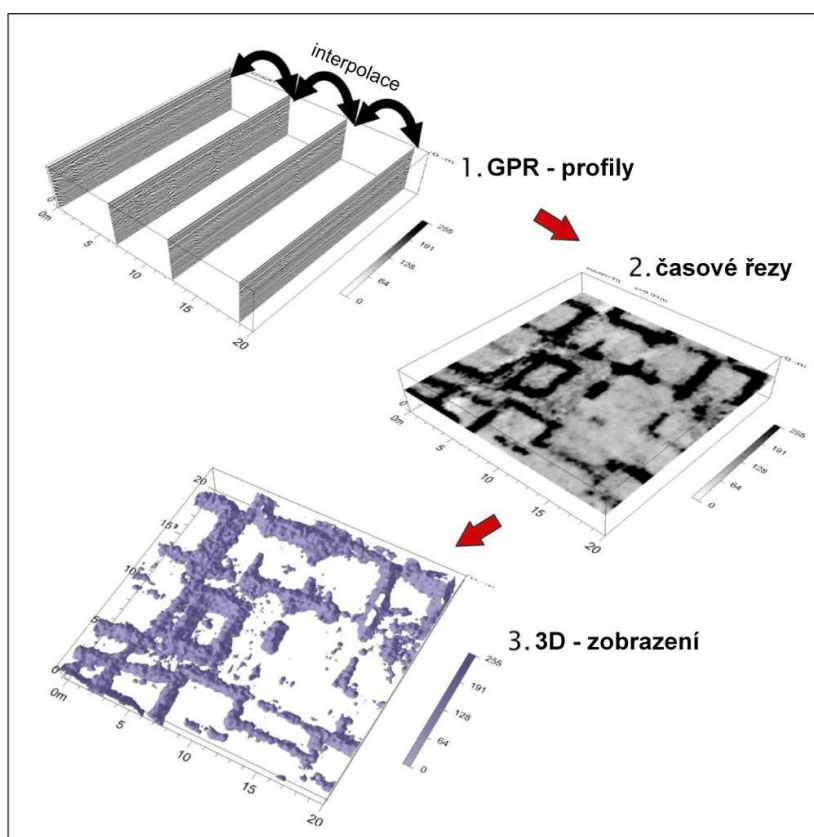
CENTRÁLNÍ FREKVENCE	HLOUBKOVÝ DOSAH PRO TYPICKĚ PŮDY	VLNOVÁ DÉLKA $\lambda$ V PŮDĚ, KDE $\epsilon_r = 15$	HORIZONTÁLNÍ ROZLIŠENÍ – ŠÍŘKA FRESNELOVY ZÓNY V MAXIMÁLNÍ HLOUBCE	VERTIKÁLNÍ ROZLIŠENÍ $\lambda/4$
MHz	m	m	m	m
1000	~ 1,0	0,08	0,2	0,02
500	~ 2,0	0,16	0,4	0,04
200	~ 3,0	0,39	0,8	0,10
100	~ 5,0	0,77	1,4	0,19
50	~ 7,0	1,55	2,4	0,39

**Tabulka 1:** Přibližné hodnoty hloubkového dosahu a rozlišení pro vybrané centrální frekvence. Hodnoty jsou pouze orientační a mohou být zpřesněny, pokud jsou k dispozici podrobnější odhady příslušných parametrů – podle David et al. 2008.

Významný pokles hloubky dosahu signálu je vyvolán i nárůstem vlhkosti prostředí a přítomností jílových minerálů. Tato skutečnost limituje použití metody v případech, kdy je zemní prostředí tvořeno vlhkým jílem nebo nasyceno silně mineralizovanými roztoky. Meziprofilový interval detailních georadarových měření při archeologických výzkumech je zpravidla 0,5 m (ale i 0,25 m nebo 1,0 m), hustota vzorkování podél profilu závisí na nastavení parametrů přístroje a rychlosti pohybu antény (obvykle 20 až 100 záznamových stop na metr) (Cambridge Archaeology Field Group 2012, Ernenwein – Hargrave 2009).

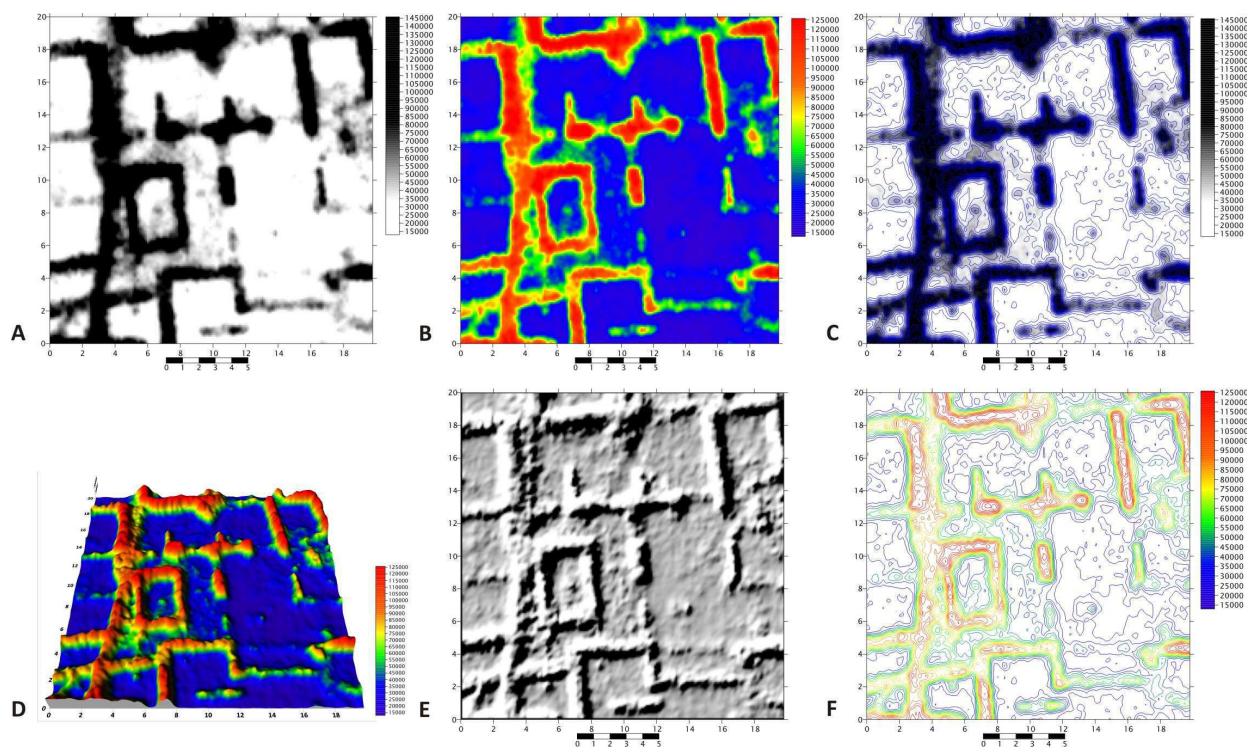
Georadarová metoda umožňuje vyhledávání a rozlišení pohřbených zděných a kamenných objektů, mezi které patří pozůstatky staveb, základové zdi a kamenné destrukce.

Základním výstupem zpracování profilových dat je georadarový řez (radarogram), který graficky zobrazuje hloubkové rozložení reflexů podél proměřené linie formou 2D-zobrazení. Vertikální osa je primárně označena v nanosekundách; pokud lze stanovit nebo odhadnout rychlost šíření vlnění, je transformována do hloubkového měřítka (v metrech). V případě detailních plošných měření, která zahrnují více blízkých paralelních profilů, lze naměřená data zpracovat do různých variant 3D-výstupů, mezi něž patří série vertikálních nebo horizontálních řezů (pro různé hloubkové úrovně) či spojitá 3D-zobrazení (**obr. 16 a 17**). Mezi výhody metody GPR, ovšem za splnění určitých podmínek, patří vysoké rozlišení, značný hloubkový dosah a možnost získat informace o absolutních hloubkách zjištěných nehomogenit (Ernenwein – Hargrave 2009).



**Obr. 16:** Schéma jednotlivých kroků při zpracování georadarových dat od 2D do 3D-zobrazení (římské město Empúries – Španělsko) – podle Sala et al. 2012.

1. jednotlivé georadarové řezy jsou sloučeny pomocí interpolace do jednoho 3D bloku,
2. spojená 3D informace je reprezentována sekvencí horizontálních (časových) řezů,
3. kompletní 3D informace může být zobrazena ve formě spojitého izo-rozhraní, které tvoří neprůhlednou hranici zjištěných anomálií (zde 70 % amplitudy).



**Obr. 17:** GPR – ukázky různých grafických vizualizací téhož časového řezu (lokality: římské město Empúries – Španělsko) – podle Sala et al. 2012.

A – obrázek ve stupních šedi,

B – barevný obrázek,

C – stupně šedi s superponovanými izoliniami,

D – pseudo 3D reliéfní obrázek,

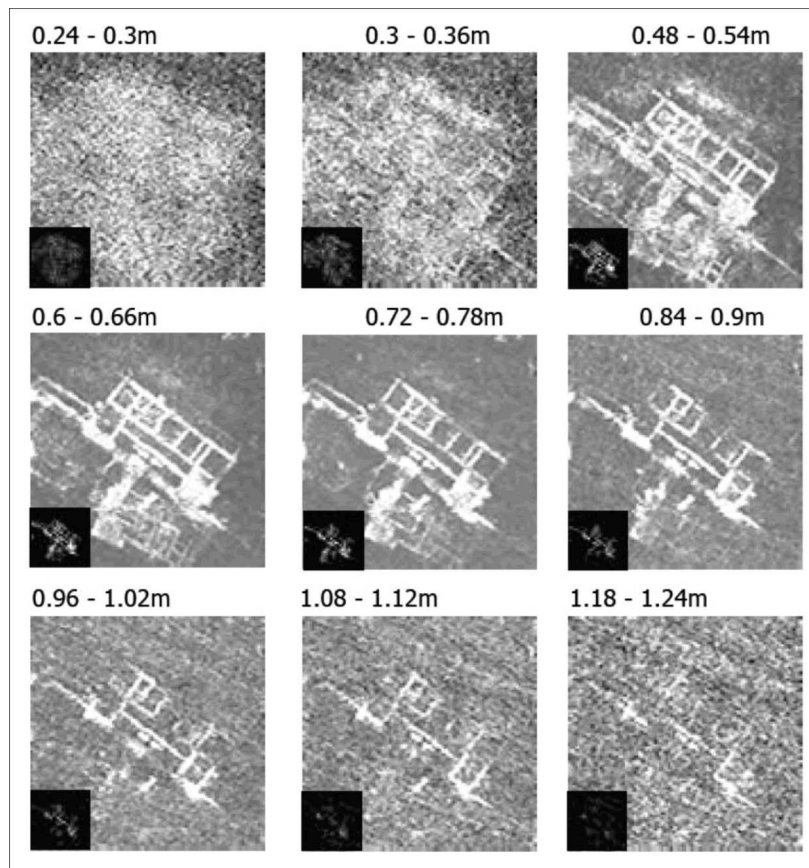
E – stínovaný reliéfní obrázek,

F – barevné izolinie.

- Příklad použití:

- Římské osídlení v lokalitě Dunkirt Barn (Velká Británie – Hampshire) (Cambridge Archaeology Field Group 2012) – srovnej *Odporové měření*.

Prostor zaniklé římské vily v lokalitě Dunkirt Barn byl detailně proměřen metodou GPR za pomoci antény o frekvenci 450 MHz. Výsledkem zpracování je série horizontálních řezů, které zachycují zachované stavební komponenty v různých hloubkových úrovních. Plošné reflexy do hloubek 0,3 – 0,4 m představují orbou rozvolněné a rozvlečené zdivo, v rozmezí hloubek 0,5 až 1,1 m je průběh reliktních zdí dokonale čitelný a poskytuje detailní představu o půdorysu celé stavby.



**Obr. 18:** Římská vila na lokalitě Dunkirt Barn: horizontální georadarové řezy pro různé hloubkové úrovně – podle Cambridge Archaeology Field Group 2012

### 3.2 Magnetometrie (Magnetometry)

Magnetometrie umožňuje zjišťovat anomálie v geomagnetickém poli, které jsou vyvolány přítomností objektů s vyšší magnetickou susceptibilitou; z fyzikálního hlediska je měřenou veličinou magnetická indukce, resp. vertikální gradient magnetické indukce (**obr. 19**).

Metoda se uplatňuje při lokalizaci zdiva z vypálených cihel nebo kamenného zdiva, které obsahuje horniny s vyšším podílem feromagnetických minerálů. Jedná se zvláště o bazické horniny, např. bazalt nebo gabro (termoremanentní magnetizace, vyšší magnetická susceptibilita). Nepřímo lze pomocí magnetometrie vyhledávat i zděné stavby, které zanikly v důsledku požáru (termoremanentní magnetizace, přítomnost vypálených poloh). V některých případech podmiňují kamenné zdi naopak vznik záporných magnetických anomálií; dochází k tomu tehdy, když okolní zemina či půda je magnetičtější než samotný stavební kámen. Podobným způsobem se mohou projevit i „negativy“ po vybraném zdivu, vyplněné druhotně nemagnetickým

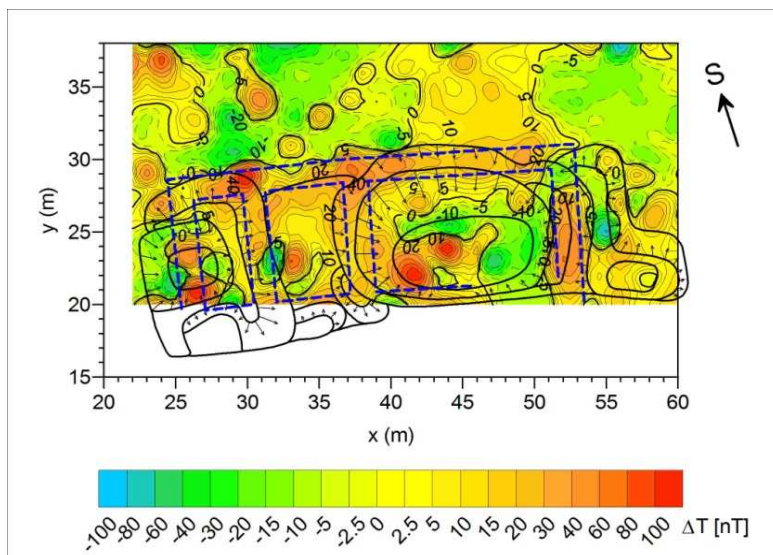
sedimentem. Reálný „hloubkový“ dosah magnetického měření pro běžné archeologické objekty se uvádí v rozmezí 2 až 3 metry. Minimální doporučená hustota vzorkování pro magnetometrii je 1,0 x 0,25 m (Ernenwein – Hargrave 2009).



**Obr. 19:** Sestava deseti gradientometrů vytvořená společností Eastern Atlas pro velkoplošné průzkumy – podle Sala et al. 2012.

- Příklady použití:
  - Předhradí hradu Libštejn na Plzeňsku (Hronek – Dohnal 2010).

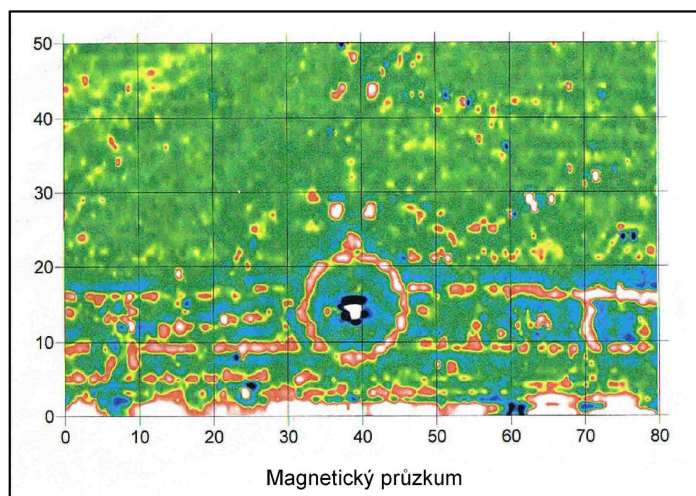
Na předhradí Libštejna je v 16. století doložena řada hospodářských provozů, mezi jinými i pivovar. Magnetické měření, provedené v rámci komplexního geofyzikálního průzkumu lokality v roce 2008, zachytilo v místech předpokládaného pivovaru systém lineárních kladných anomálií  $\Delta T$  (**obr. 20**). Ortogonální tvar indikací a přítomnost cihel na povrchu terénu svědčí o tom, že příčinou anomálií je zakryté cihlové zdivo zaniklých objektů pivovaru.



**Obr. 20:** Hrad Libštejn – prostor zaniklého pivovaru na předhradí: mapa izolinií  $\Delta T$ , černě: reliéfní stopy, modře: interpretované zdi – upraveno podle Hronek – Dohnal 2010.

- o Zahrada Wimpole Hall (Velká Británie) (Cambridge Archaeology Field Group 2012).

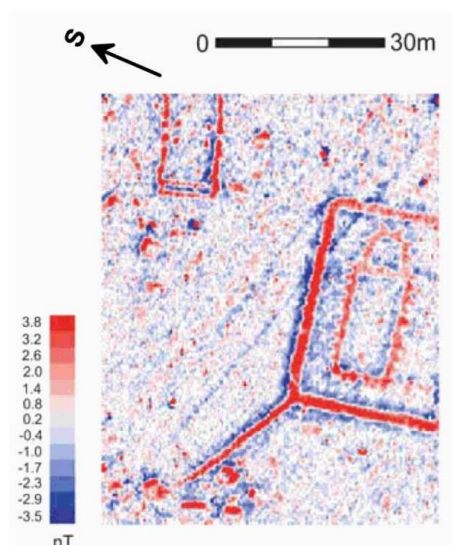
V komplexu zahrad Wimpole Hall existovalo v 18. století mnoho prvků zahradní architektury. Provedený magnetometrický průzkum lokalizoval řadu geometricky pravidelných kladných magnetických anomálií (**obr. 21**), které byly interpretovány a později i ověřeny jako projevy reliktní cihlové zdiva. Zachycená kruhová anomálie reprezentuje účinek zbytků cihlové zídky kolem fontány, zatímco paralelní lineární struktury představují projevy soustavy cihlových kanálků a drenáží.



**Obr. 21:** Wimpole Hall – zahrada: magnetogram – podle Cambridge Archaeology Field Group 2012.

- Neznámá lokalita (David et al. 2008).

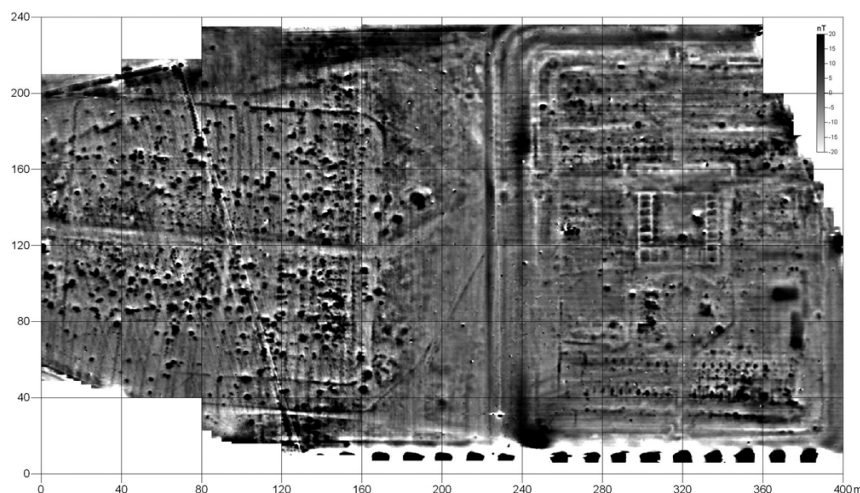
Magnetometrický průzkum zachytil základy zaniklé dřevěné stavby a přilehlý obvodový příkop.



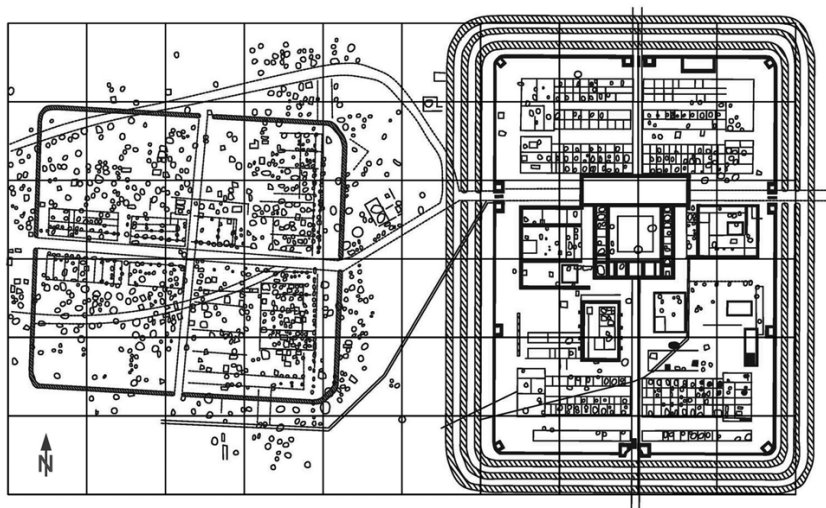
**Obr. 22:** Zaniklá dřevěná stavba: magnetometrie, patrné základy stavby a obvodový příkop – podle David et al. 2008.

- Římská pevnost v lokalitě Theilenhofen (jižní Německo) (Fassbinder 2009).

Grafickým výstupem detailního magnetického měření, které vykrylo plochu 400 x 240 m, je magnetogram (**obr. 23**) a z něj odvozená archeologická mapa (**obr. 24**). V západní části lokality starší pevnost tvořená původně dřevěnými objekty kasáren (později přestavěné), ve východní části novější pevnost vybudovaná na kamenných základech.



**Obr. 23:** Theilenhofen – zaniklá římská pevnost: magnetogram – podle Fassbinder 2009.



**Obr. 24:** Theilenhofen – zaniklá římská pevnost: odvozená archeologická mapa – podle Fassbinder 2009.

### 3.3 Seismické metody (Seismic methods)

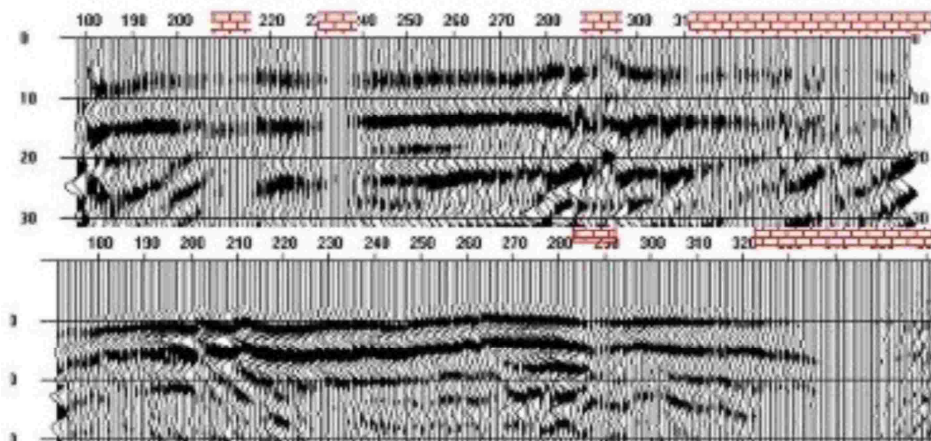
Princip seismického průzkumu spočívá v registraci a analýze časoprostorového průběhu uměle vyvolaných elastických vln; základním fyzikálním parametrem je rychlost šíření podélných seismických vln (P-vln). Podle typu analyzovaného vlnění se v rámci seismických měření využívá jednak metoda odražených vln (refrakční seismika), jednak metoda lomených vln (reflexní seismika). V kontextu archeologické prospekce je běžnější mělká refrakční seismika; nejčastějším úkolem bývá stanovení hloubky a reliéfu (skalního) podloží. Potenciál seismických metod vychází ze skutečnosti, že rychlost elastického vlnění ve zdivu je obecně vyšší než v okolním geologickém prostředí, tvořeném zpravidla nezpevněnými uloženinami. Obecně se rychlost seismických vln pohybuje od cca 200 m/s, v půdách do 7000 m/s v pevných neporušených horninách, ve zdivu je nejčastěji v rozmezí od 1000 do 2000 m/s (David et al. 2008). Výstupem zpracování dat v refrakční seismice jsou nejčastěji hloubkové a rychlostní řezy. Data reflexní seismiky, která je zpravidla měřena technikou společného reflexního bodu (SRB), jsou standardně zpracovávána do podoby časových řezů, nejnověji i do formy 3D-vizualizací.

- Příklady použití:
  - Římské zdivo (Francie)

([http://iemn.univ-lille1.fr/base-web/recherches/instru\\_ang.htm](http://iemn.univ-lille1.fr/base-web/recherches/instru_ang.htm)).



Profil o délce 19 m byl proměřen reflexní seismikou, a to jednak s využitím klasického úderového zdroje vlnění (**obr. 25**, dole), jednak s využitím vibrátoru (**obr. 25**, nahore). Pohřbené římské zdivo (symbol „cihly“) se projevilo ztrátou nebo porušením reflexů od opěrných horizontů.

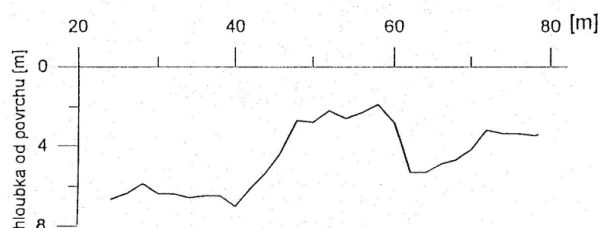


**Obr. 25:** Lokalizace římského zdiva: reflexní seismika – časové řezy (nahore: zdroj vlnění = vibrátor, dole: zdroj vlnění úderový), symbol „cihly“ = detekované podzemní zdivo – podle

[http://iemn.univ-lille1.fr/base-web/recherches/instru\\_ang.htm](http://iemn.univ-lille1.fr/base-web/recherches/instru_ang.htm).

- o Zámek v Moravské Třebové (Dohnal et al. 1997).

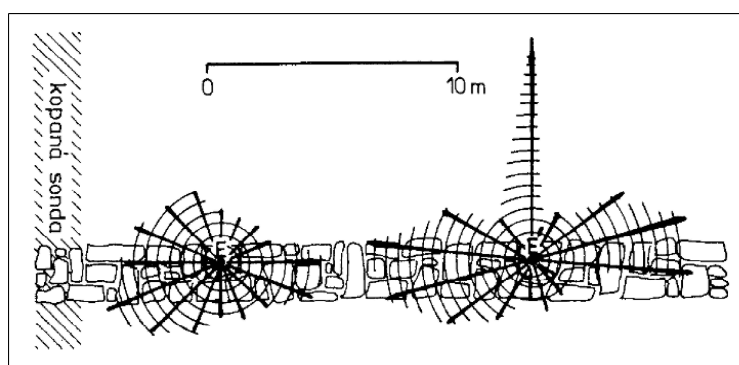
Předchůdcem zámku v Moravské Třebové byl středověký hrad, založený v průběhu 14. století. Část jeho stavebních pozůstatků se nachází pod dnešním zámeckým nádvořím. V rámci komplexního geofyzikálního průzkumu lokality v roce 1997 byla využita i mělká refrakční seismika. Hloubkový řez v linii profilu 44 dokládá projev kamenné klenby středověkých sklepů (**obr. 26**). Hloubka skalního podkladu kolísá od 4 do 7 metrů, „elevace“ podloží zachycená v úseku metrů 47 až 60 je projevem zdiva klenby sklepů, jež se nachází v hloubce kolem 2 metrů.



**Obr. 26:** Zámek Moravská Třebová: mělká refrakční seismika - hloubkový řez v linii profilu 44 – podle Dohnal et al. 1997.

- Římský kapitol v Avenches (Švýcarsko) (Mareš et al. 1996).

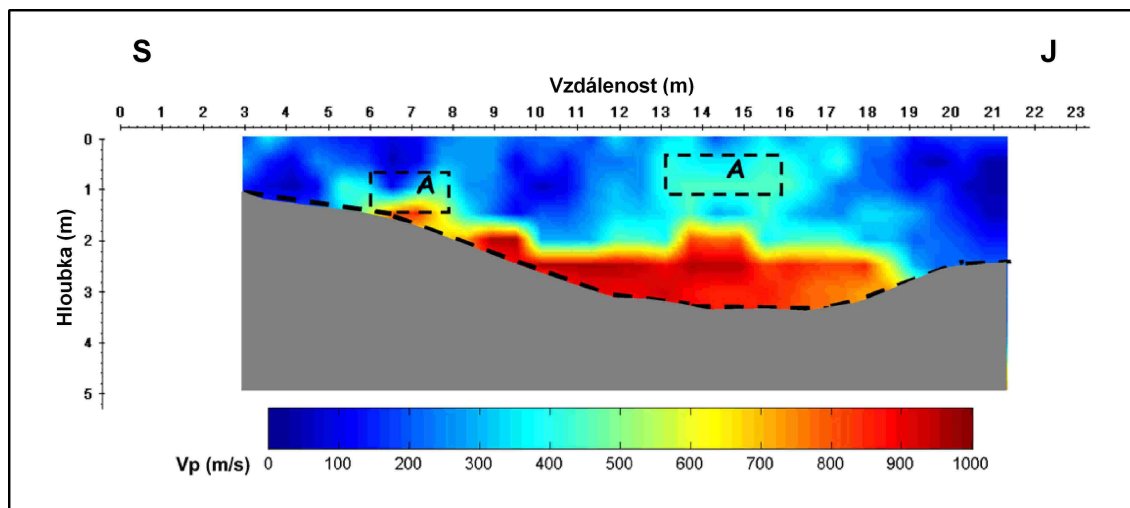
Při archeologickém výzkumu reliktní římské správní budovy v Avenches (římské Aventicum) se uplatnilo i seismické refrakční měření (**obr. 27**). Pro stanovení možného pokračování zdi zachycené výkopem byla zvolena varianta „kruhové sondy“, kdy byla zdánlivá rychlost seismického vlnění zjišťována v liniích radiálních profilů vycházejících z jednotlivých bodů úderu E (geofon ve vzdálenosti 5 m). Mocnost nezpevněného pokryvu byla 1 m, rychlost podélné vlny v pokryvu 450 m/s, ve zdivu 1500 m/s. Přítomnost zdiva v linii příslušného profilu se projevila zřetelným zvýšením rychlosti, současně byl zachycen i projev další zdi (**obr. 27, vpravo**), orientované kolmo k základni.



**Obr. 27:** Avenches: mělká refrakční seismika - kruhová sonda: grafy zdánlivých rychlostí na radiálních profilech s počátkem v bodech úderu E – podle Mareš et al. 1996.

- „Hrad“ Occhiola (Itálie – Sicílie) (Leucci et al. 2007b).

Charakteristika lokality viz kapitola 3.1.2. Provedený geofyzikální průzkum zahrnoval elektrickou odporovou tomografii a mělkou refrakční seismiku. Seismické měření bylo zpracováno metodou refrakční tomografie, která zohledňuje i rychlostní gradienty a laterální změny rychlostí. Výsledný řez v linii jednoho z proměřených profilů (**obr. 28**) detailně ilustruje rychlostní změny v pokryvu, kde svrchní nízkorychlostní vrstva (sahající do hloubky cca 2 m) reprezentuje zvětralý rozvolněný materiál, spodní poloha o relativně vyšších rychlostech pak mírně zpevněné vápnité písky. Dvě anomální struktury zvýšených rychlostí ve svrchní vrstvě (označené A) byly interpretovány jako projev pohřbených reliktních zdí.



**Obr. 28:** Hrad Occhiola: 2D seismická refrakční tomografie - rychlostní model (šedá plocha = skalní podklad, struktury označené A = interpretované zdivo) – podle Leucci et al. 2007b.

### 3.4 Mikrogravimetrie (Micro gravity)

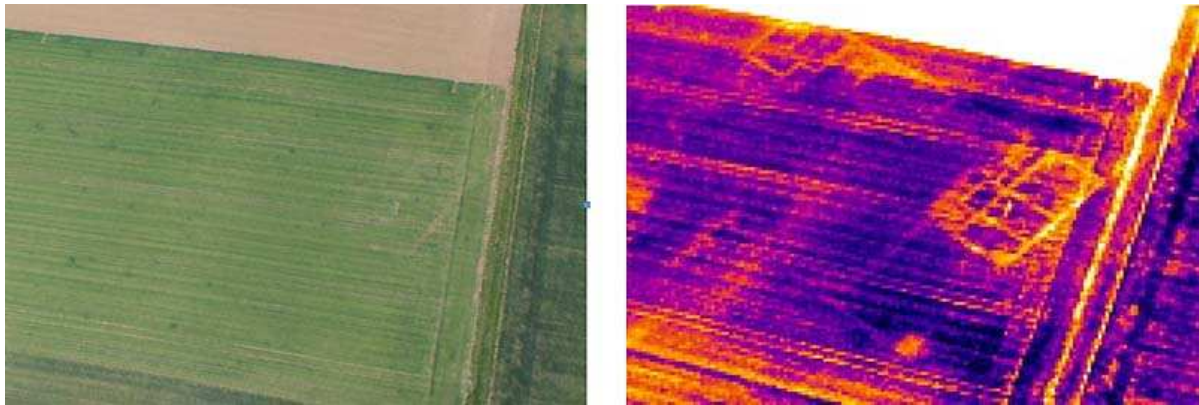
Gravimetrie umožňuje lokalizovat podzemní hustotní nehomogenity, měřeným parametrem jsou relativní hodnoty tíhového zrychlení. V případě aplikací v archeologii se jedná nejčastěji o vyhledávání různých typů podzemních prostor (původně dutých), které mohou být aktuálně vyplněny i vodou nebo nezpevněným sedimentem (zpravidla antropogenního původu). Pokud se jedná o zděné objekty (sklepy, krypty, hrobky, atd.), vede úspěšný mikrogravimetrický průzkum nepřímo i k vyhledání obvodového zdiva příslušného objektu. Přímé vyhledávání pohřbeného zdiva pomocí mikrogravimetrie není vzhledem k malým hustotním rozdílům zdiva proti okolním horninám a ekonomické náročnosti metody prakticky používáno.

### 3.5 Termometrie a termografie (Thermal sensing and thermography)

Termometrie je založena na měření teploty na povrchu terénu, a to kontaktním nebo bezkontaktním (infratermometrie) způsobem. Teplotními anomáliemi se mohou projevit ty podzemní nehomogenity, které se od okolního zemního prostředí liší svojí tepelnou vodivostí nebo tepelnou kapacitou. V této souvislosti lze termometrii, podobně jako mikrogravimetrii, použít především pro vyhledávání podzemních dutin, nepřímo tedy i příslušného zdiva. V případě mělce uložených zdí či reliktvů zdiva je možná i přímá detekce, hloubkový dosah se pohybuje kolem 30 až 50 cm

([http://sydney.edu.au/arts/archaeology/apg/methods\\_instruments/thermal.shtml](http://sydney.edu.au/arts/archaeology/apg/methods_instruments/thermal.shtml))  
. Uvedená možnost bývá nejčastěji aplikována v letecké variantě infratermometrického průzkumu (termografie). Během snímání se nejčastěji využívá elektromagnetické záření v blízké infračervené zóně (vlnové délky přibližně 3-15  $\mu\text{m}$ ). Příslušné infračervené záření je detekováno elektronicky a následně zobrazeno v oblasti viditelných vlnových délek.

- Příklad použití:
  - Římská Villa Rustica v Německu  
(<http://www.armadale.org.uk/phototech03.htm>).



**Obr. 29:** Německo – římská vila, vlevo: snímek ve viditelném spektru, vpravo: snímek v infračervené oblasti – podle

<http://www.armadale.org.uk/phototech03.htm>.

## 4. NEDESTRUKTIVNÍ PRŮZKUM HISTORICKÉHO ZDIVA (NDT)

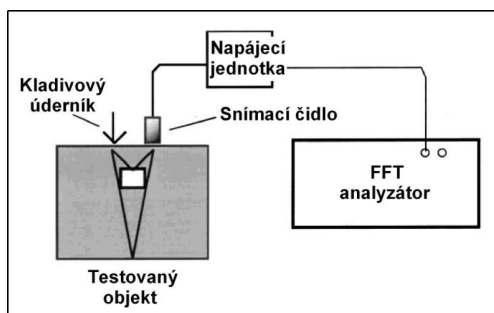
### 4.1 Akustická metoda – úder odraz (Impact – echo system)

Testovací metoda „úder – odraz“ využívá pro diagnostiku mechanicky vyvolaný akustický impuls, který se šíří zdívkou. Vzbuzené vlnění zahrnuje podélné, příčné a povrchové vlny, z nichž podélné a příčné zdívkou prostupují a jsou v něm zčásti odraženy na vnitřních nehomogenitách. K nejvýraznějším odrazům přitom dochází tehdy, je-li druhé prostředí tvořeno vzduchem. Násobnými odrazy vlnění mezi nehomogenitami uvnitř zkoumaného prostředí a jeho vnějším povrchem vzniká nízkofrekvenční akustické vlnění, které se následně registruje a analyzuje. Metoda je využívána zejména v případech, kdy je přístupný pouze jeden líc testovaného zdiva. Používá se nejen ke stanovení mocnosti zdiva a jeho dílčích vrstev, ale i k detekci různých typů nehomogenit, jako např. mezer mezi vrstvami zdiva, dutin, prasklin, trhlin, porušených oblastí apod. (On-site investigation 2005, Livingston 2001, Maierhofer – Ziebolz – Köpp 2003, Milovanovič b.d.).

Vlastní měření (viz **obr. 30, 31**) probíhá tak, že úderem malého kladívka na povrch zdiva generují primární vlnění a odražená energie je registrována pomocí akcelerometru umístěného v malé vzdálenosti od místa úderu.



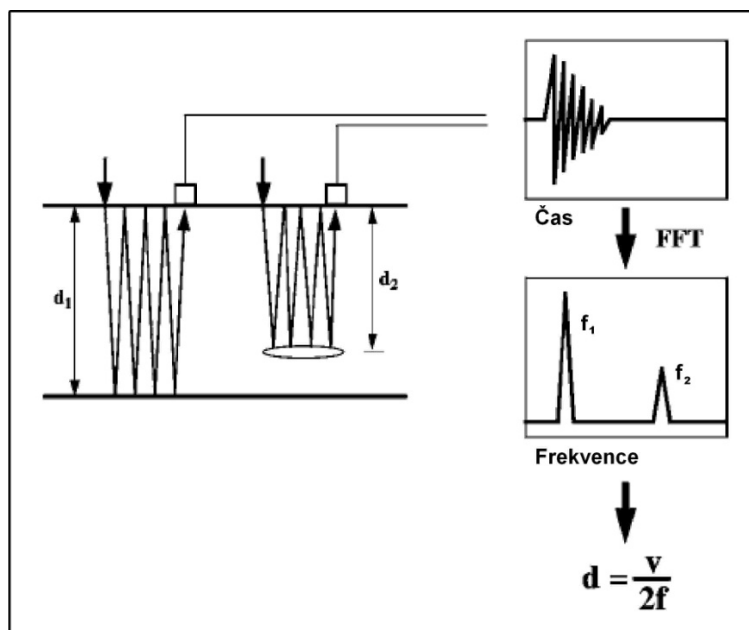
**Obr. 30:** Měření akustickou metodou „úder – odraz“ – podle On-site investigation 2005.



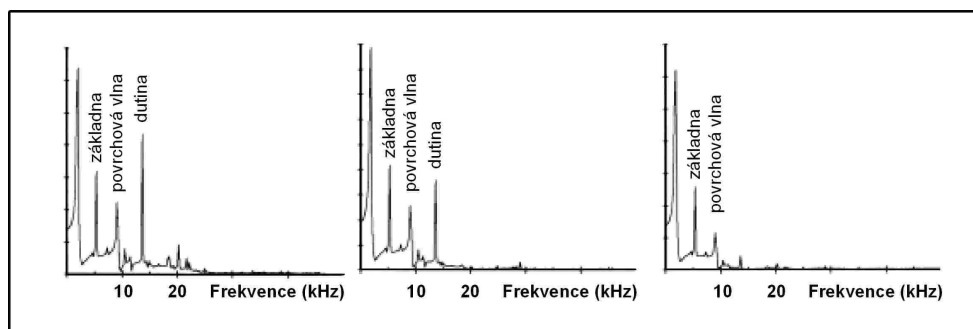
**Obr. 31:** Schéma konfigurace měření v metodě „úder-odraz“ – podle McCann – Forde 2001.

Měří se bod po bodu. Vzhledem k tomu, že odražené signály jsou snadněji identifikovatelné ve frekvenční doméně, je signál přijatý v časové doméně převeden do analyzátoru, který pomocí fourierova algoritmu, zpravidla rychlé Fourierovy transformace (FFT), provede jeho analýzu ve frekvenční doméně.

Interpretačním výstupem pro danou konfiguraci kladivo/akcelerometr jsou nejčastěji záznamy frekvenčních spekter (**obr. 32**). Reflexy nebo echa od jednotlivých rozhraní jsou indikovány výraznými maximy, která charakterizují příslušné rezonanční frekvence (**obr. 33**). Při znalosti rychlosti šíření podélné vlny ve zkoumaném materiálu lze pak tyto frekvence transformovat na hloubky dílčích odrazných rozhraní (McCann – Forde 2001).



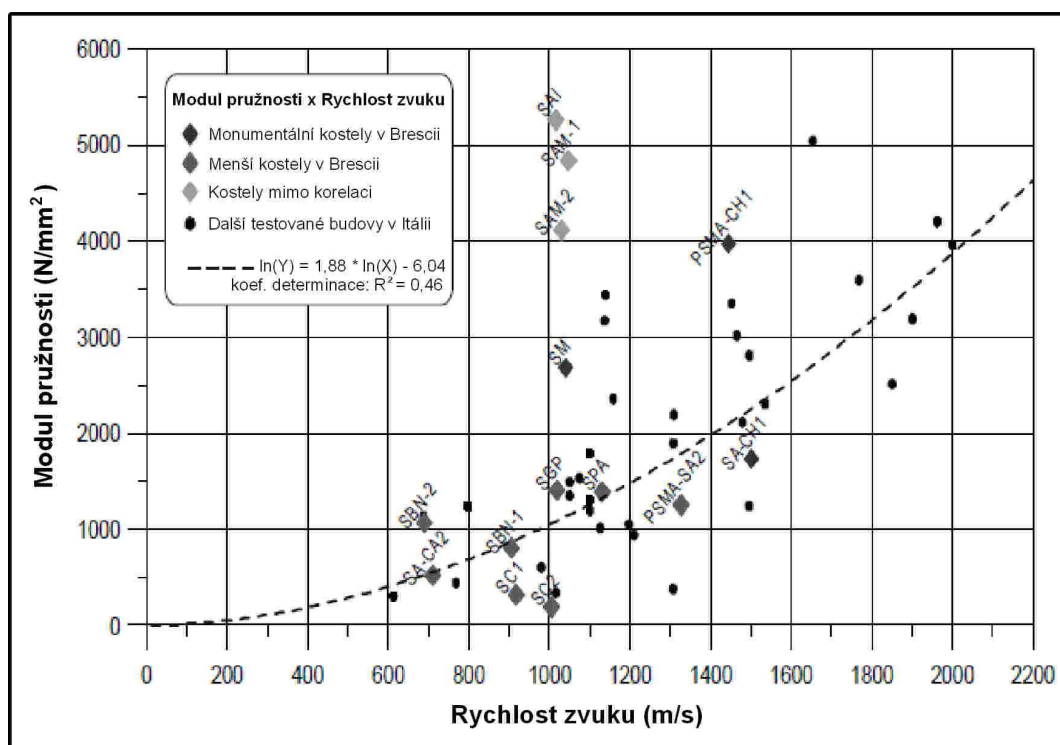
**Obr. 32:** Projev násobných odrazů od zadního líce zdiva ( $d_1$ ), resp. od vnitřní nehomogenity ( $d_2$ ) v časové doméně (vpravo nahoře) a ve frekvenční doméně (vpravo dole) – podle Maierhofer – Ziebolz – Köpp 2003.



**Obr.33:** Frekvenční spektrum získané po úderu kladiva na testovací zeď – podle McCann – Forde 2001.

## 4.2 Akustická metoda a akustická tomografie (Pulse sonic testing/ sonic wave test and sonic tomography)

Princip akustické metody spočívá v analýze průchodu elastických vln zvukových frekvencí (20 Hz - 20 kHz) zkoumaným prostředím. Vlnění je vytvářeno pomocí bodových mechanických nárazů. Rychlost akustického pulzu v homogenním a izotropním prostředí závisí na modulu pružnosti, Poissonovu číslu a hustotě materiálu, nikoliv však na frekvenci kmitů (viz **obr. 34**). V případě heterogenního materiálu odpovídá rychlost pulzu kvalitativně vlastnostem zdiva. Rychlosti tak mohou odrážet např. pevnost zdiva a obsah vody (Flint – Jackson – McCann 1999).



**Obr. 34:** Empiricky stanovená závislost mezi rychlostí zvuku a modulem pružnosti E pro historické stavby v Itálii – podle Binda – Saisi 2009.

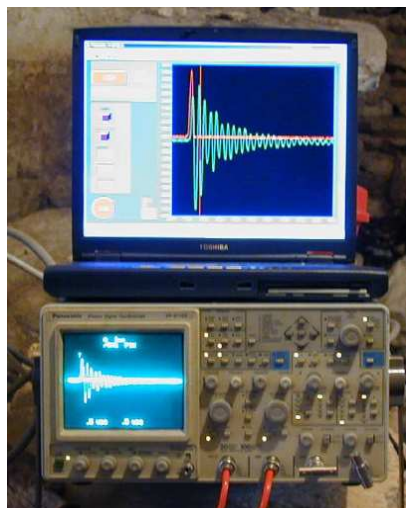
Metoda se uplatňuje při ohodnocení morfologie zdiva, dále při zjišťování přítomnosti dutin, puklin, trhlin a dalších defektů, ale i během kontroly kvality oprav prováděných během rekonstrukcí (např. injektáže).

Akustický signál je generován buď úderem speciálního kladívka, nebo prostřednictvím elektrodynamického či pneumatického zařízení, a přijímán pomocí piezoelektrického akcelerometru (**obr. 35**). Kladívko bývá opatřeno několika různými „hlavami“ s odlišnou tvrdostí, které lze alternovat na základě charakteru povrchu zdiva, ale i v závislosti na požadovaných frekvencích a energii úderu.



**Obr. 35:** Akustické měření. Vlevo: zdroj vlnění = úder kladívkem, vpravo: snímač – podle On-site investigation 2005.

V průběhu měření se registruje čas průchodu signálu mezi vysílačem a přijímačem; rychlost pulzu se počítá jako podíl vzdálenosti mezi oběma zařízeními a času průchodu. Přijaté signály jsou poté uloženy (spolu s frekvenčními charakteristikami) ve formě časových záznamů pro účely dalšího zpracování (**obr. 36**). Při něm se zpravidla využívá frekvenční analýza pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT).

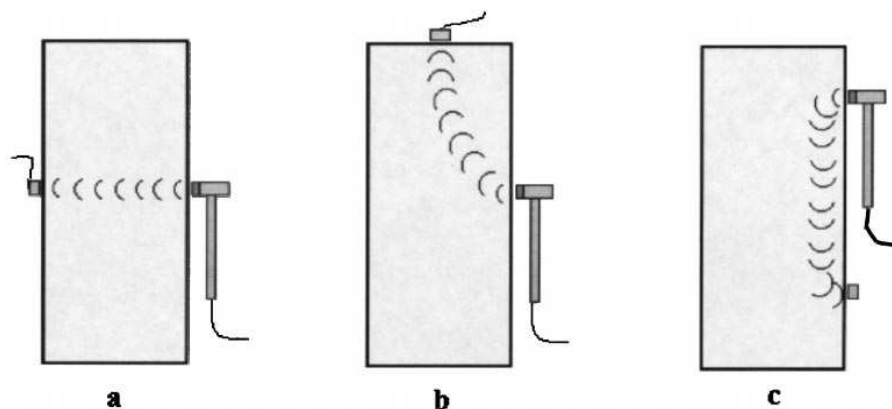


**Obr. 36:** Akustické měření – řídicí jednotka, nahoře záznam signálu – podle On-site investigation 2005.

Z hlediska geometrie měření se rozlišují tři různé případy (viz **obr. 37**):

- a) přímé testování („přes zeď“), kdy jsou kladivo a akcelerometr na opačných stranách zdi, a to přímo proti sobě,
- b) polopřímé testování, kdy jsou kladivo a akcelerometr umístěny vzájemně pod určitým úhlem,
- c) nepřímé testování, kdy jsou kladivo i akcelerometr na téže straně zdi, a měří se podél vertikálních nebo horizontálních linií.





**Obr. 37:** Varianty geometrie měření v akustické metodě: a) přímé testování, b) polopřímé testování, c) nepřímé testování – podle McCann – Forde 2001.

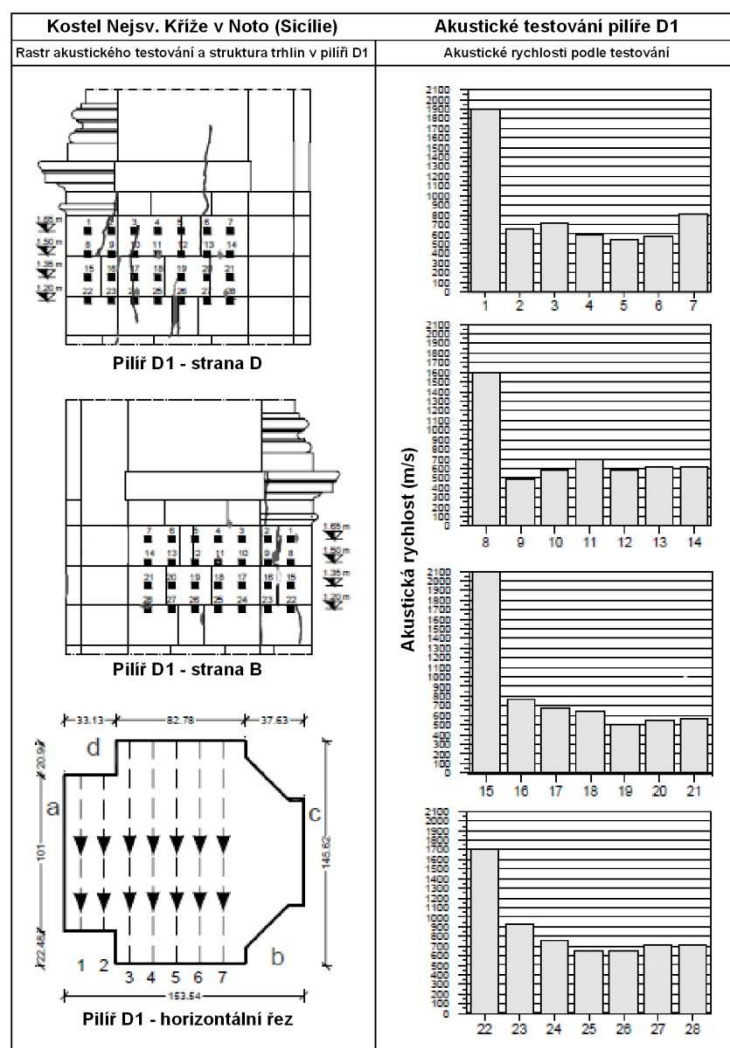
Výsledná rychlost je průměrem lokálních rychlostí podél dráhy, a proto není možné stanovit přesnou polohu a rozsah případných nehomogenit. Metoda nicméně poskytuje kvalitativní informaci o hustotních rozdílech. Měření se obvykle provádí ve stanovené plošné síti bodů, pro detailní průzkumy se doporučuje rastr 20 x 20 cm. Rozlišení závisí na textuře zdiva a hustotě použité sítě měření, vzhledem k nižším frekvencím je však menší než v případě použití ultrazvuku (On-site investigation 2005, McCann – Forde 2001, Porto – Valluzzi – Modena 2003, Milovanovič b.d.). Metoda našla uplatnění i při zkoumání historických kamenných mostů (Colla et al. 1997).

Nejmodernější variantou akustického měření v rámci NDT je akustická tomografie, která umožňuje získat detailní představu o rozdělení elastických rychlostí ve hmotě zdi nebo pilíře. Protože tato metoda využívá jak při měření, tak při zpracování dat postupy běžné v seismice, je často označována jako mikroseismická tomografie. Proto byla zařazena do podkapitoly „Mikroseismické profilování a tomografie“, kde je uveden i její popis.

- Příklady použití:

- Kostel Crociffisso v Noto (Itálie – Sicílie) (Binda – Saisi 1994).

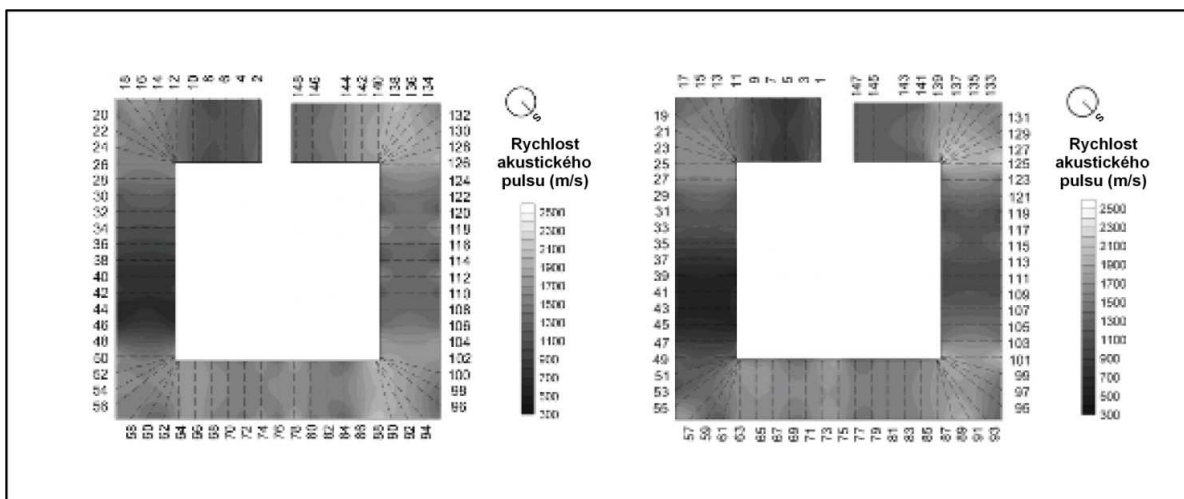
Akustická metoda ve variantě přímého testování byla využita pro analýzu rychlostí v pilíři D1, postiženém četnými makroskopickými trhlinami. Vysoké rychlosti (kolem 1800 m/s) zjištěné v bodech 1, 8, 15 a 22 indikují na této straně pilíře kompaktní zdivo, porušený zbytek pilíře charakterizují rychlosti kolem 600 m/s.



**Obr. 38:** Kostel Crociffisso v Noto: výsledky akustického testování pilíře D1: vlevo – testovací mřížka a pozice trhlin, vpravo – výsledky: rozdělení akustických rychlostí – podle Binda – Saisi 1994.

- o Věž „Isso“ v Castelleone (Itálie) (Binda – Saisi 2009).

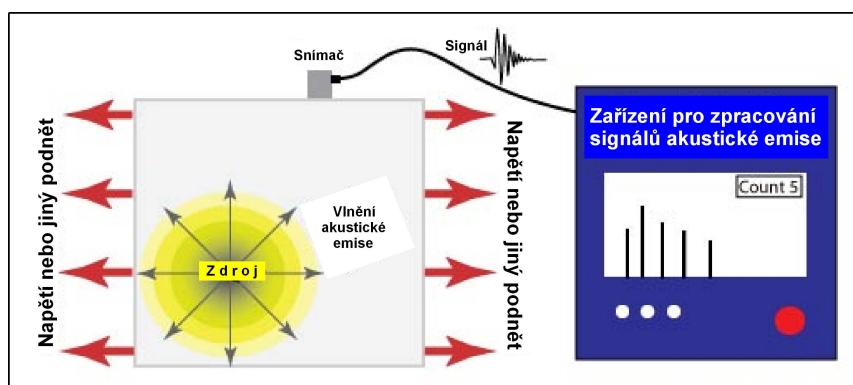
Zdivo spodní části věže pocházející ze středověku vykazuje několik trhlin a defektů, které vznikly v důsledku neodborných stavebních zásahů v minulosti. Pro posouzení kvality a kompaktnosti zdiva bylo po celém obvodu přízemí věže provedeno akustické měření ve variantě přímého testování, a to ve výškových úrovních 1,5 a 1,8 m nad terénem. Akustická rychlost se pohybovala v rozmezí od 500 do 2300 m/s, nejnižší rychlosti byly zachyceny ve střední partii jv. stěny a poblíž vstupu v jz. stěně, kde bylo poté ověřeno několik druhotně dozděných otvorů (**obr. 39**).



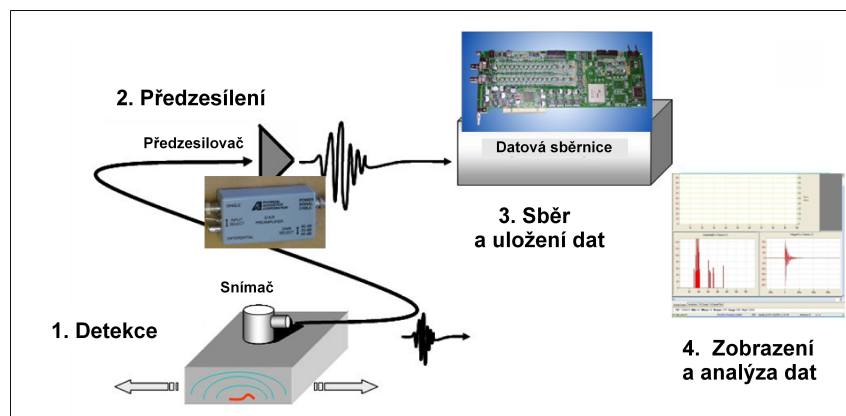
**Obr. 39:** Rozložení rychlostí akustického pulzu v přízemí věže Isso – vlevo: ve výšce 1,5 m; vpravo: ve výšce 1,8 m – podle Binda – Saisi 2009.

### 4.3 Metoda akustické emise (Acoustic emission)

Metoda akustické emise (AE) je jedinou pasivní metodou ze skupiny nedestruktivních technik, které využívají zvukové vlny. Její princip spočívá v registrování a analýze charakteristických sekvencí zvuků (elastických vln), vznikajících ve zdivu jako doprovodný efekt lokálních plastických deformací nebo mikropraskání. Zvukové impulsy jsou zachycovány seskupením piezoelektrických snímačů na povrchu zdiva. Ty převádějí elastické vlnění na elektrické signály a jsou schopny identifikovat pohyby až v řádu pikometrů (**obr. 40, 41**). Množství přenášené energie a amplituda signálu jsou funkcí velikosti a rychlosti vývoje zdrojové události (např. šíření trhliny ve zdivu). Čas příchodu určité zvukové sekvence do jednotlivého senzoru je přitom úměrný jeho vzdálenosti od ohniska vzniku zvuku.

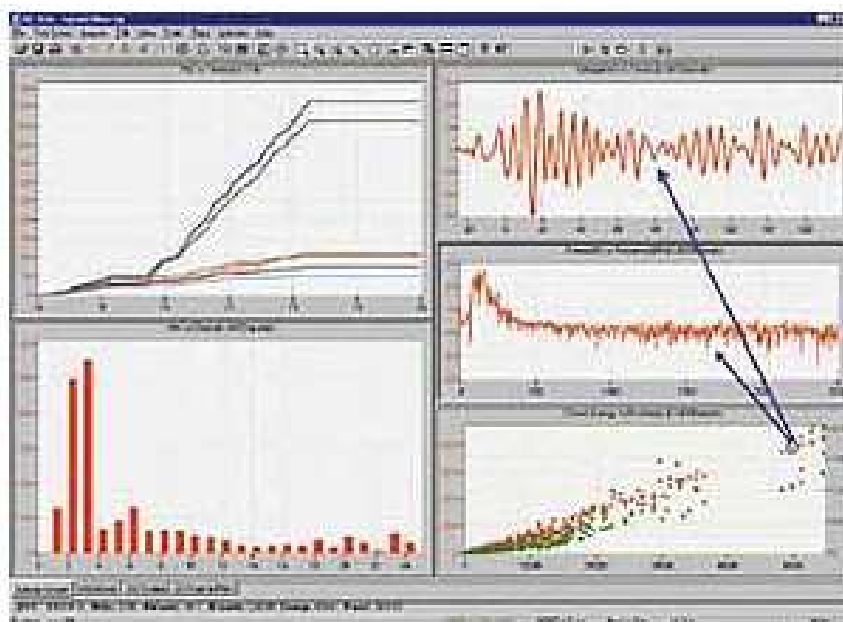


**Obr. 40:** Schéma vzniku zvukové vlny, jejího šíření, detekce a zpracování – podle [http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Intro.htm](http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.htm).



**Obr. 41:** Schéma zařízení pro měření akustické emise: 1 – detekce (snímač), 2 – předzesílení (předzesilovač), 3 – sběr a uložení dat (sběrný systém), 4 – zobrazení a analýza dat – podle [http://www.epandt.com/us/products\\_ea\\_us.html](http://www.epandt.com/us/products_ea_us.html).

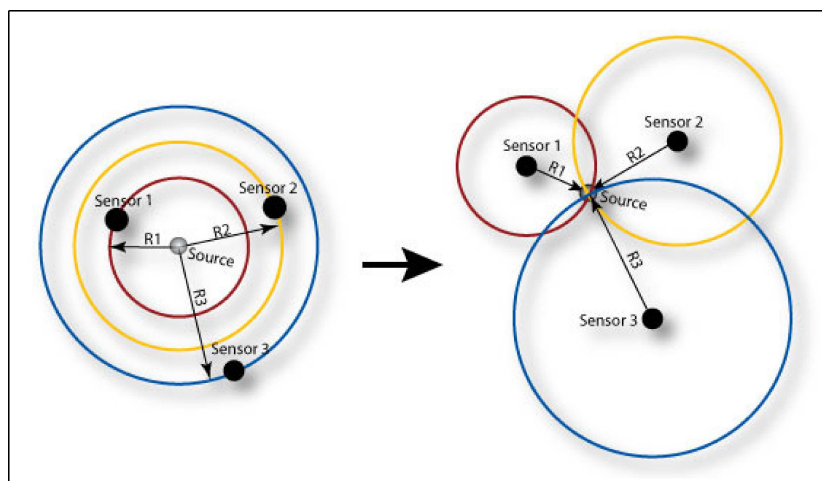
Znalost příslušných časů příchodu pro sérii snímačů umožňuje určit pozici proběhlého jevu pomocí triangulace (**obr. 42**). Metoda je využívána především pro detailní lokalizaci aktivních prasklin, trhlin a dalších poruch ve zdivu. Poskytuje tak možnost odlišit stabilizované a probíhající defekty. V některých případech umožňují získané informace i predikci následných jevů a přispívají tak k jejich omezení (Livingston 2001, Carpinteri - Lacidogna 2006, Milovanovič b.d.).



**Obr. 42:** Různé typy zobrazení zpracovaného signálu v metodě akustické emise – podle

[http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Equipment.htm](http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Equipment.htm)

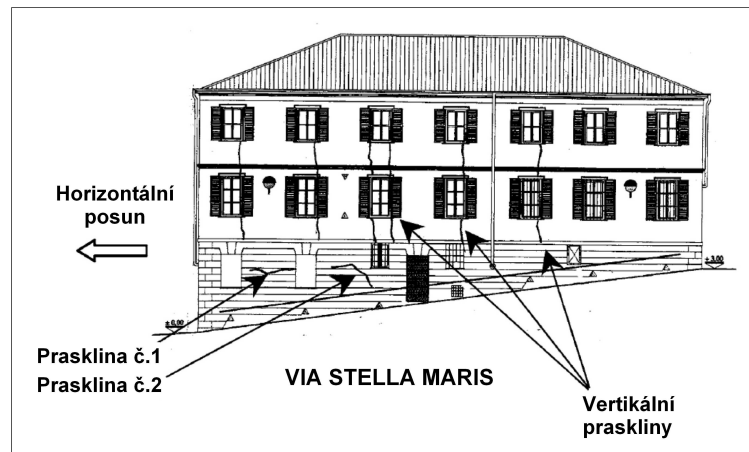
Pro lokalizaci zdroje akustické emise v rámci trojrozměrného objektu je nutné použít uspořádání nejméně čtyř snímačů (**obr. 43**). Pokud není známá rychlost šíření zvuku ve zdivu nebo je proměnlivá, je minimální počet snímačů šest; vyšší množství senzorů pak umožňuje kvalitnější eliminaci akustického šumu na pozadí.



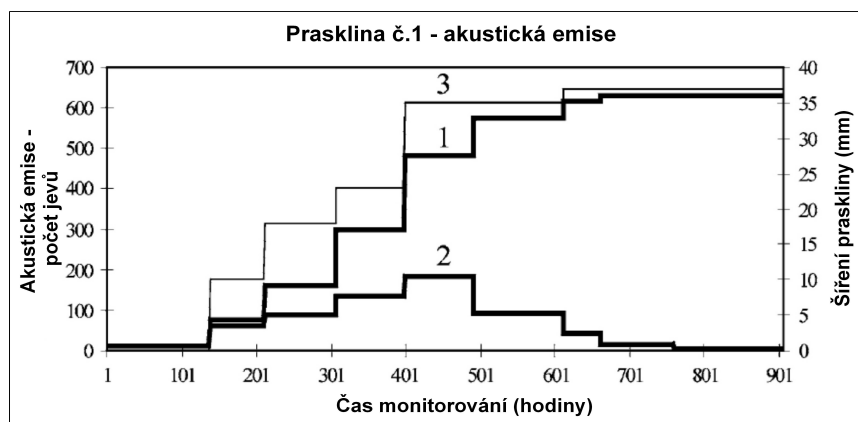
**Obr. 43:** Princip lokalizace zdroje AE (plošný model – tři snímače) – podle [http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Source%20Location.htm](http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Source%20Location.htm).

- Příklad použití:
  - Objekt „Casa Capello“ v Rivoli u Turína (Carpinteri - Lacidogna 2006).

Budova vystavěná na základech ze 14. století prodělala řadu přestaveb. Zdivo je cihelné s mocností minimálně 60 cm. Po nevhodných stavebních úpravách na konci 20. století se v důsledku horizontálního i vertikálního posunu budovy založené ve svahu objevila síť převážně vertikálních prasklin. Metoda akustické emise byla testována v blízkosti dvou horizontálních prasklin č. 1 a č. 2 (viz **obr. 44**), a to monitorováním po dobu 900 hodin (37 dní). Měřeno bylo pomocí čtyř piezoelektrických snímačů. Výsledky (**obr. 45**) ilustrují korelaci mezi četností registrovaných jevů AE a šířením praskliny; po stabilizaci postupu praskliny došlo i k utlumení akustické emise.



**Obr. 44:** Budova „Casa Capello“ v Rivoli – podle Carpinteri - Lacidogna 2006.



**Obr. 45:** Výsledky monitorování AE u praskliny č. 1:

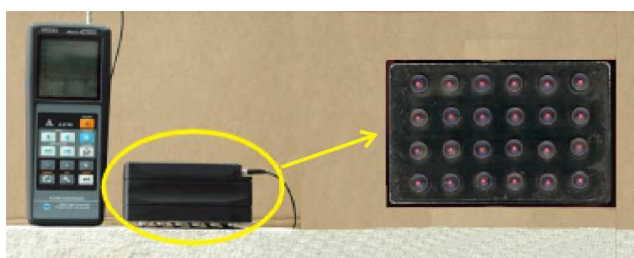
1 – kumulativní četnost jevů AE, 2 – intervalová četnost jevů AE, 3 – šíření praskliny v mm – podle Carpinteri - Lacidogna 2006.

#### 4.4 Ultrazvuková metoda – průchod a/nebo odraz (Ultrasonics)

Metoda je založena na analýze průchodu (resp. odrazu) ultrazvukových vln ve zkoumaném prostředí. Za ultrazvuk se označují zvukové vlny o frekvencích vyšších než 20 kHz, v praxi jsou však nejčastěji využívány frekvence od 50 do 150 kHz. Běžně se analyzují vlny podélné, někdy i příčné. Během měření je ultrazvukové vlnění generováno piezoelektrickým vysílačem a přijímáno jedním nebo více snímači, které jsou umístěné na povrchu zdiva (**obr. 46, 47**). Pro lepší přenos energie se vysílače i snímače často musí fixovat pomocí silikonového gelu. Rychlost šíření vlnění závisí na mechanických parametrech zdiva, reflexe na kontrastu akustických impedancí na příslušném rozhraní.



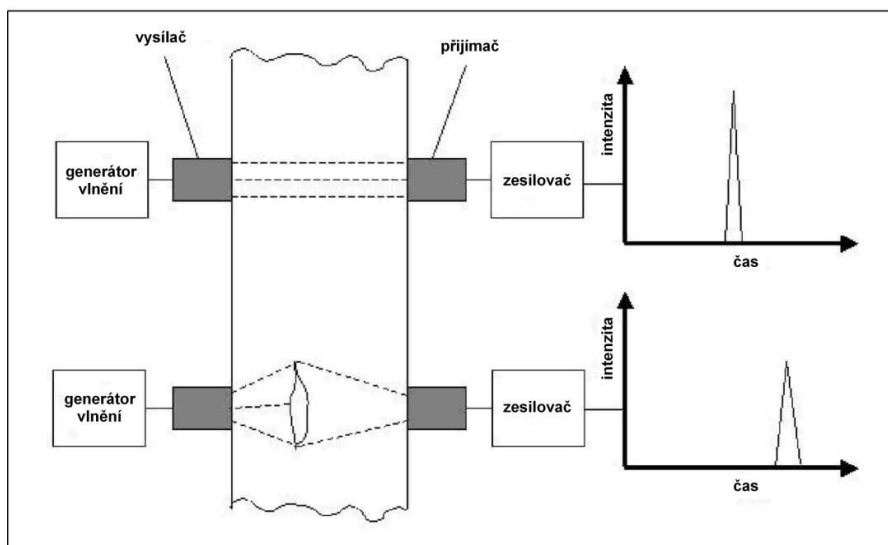
**Obr. 46:** Generátor ultrazvukového vlnění – podle On-site investigation 2005.



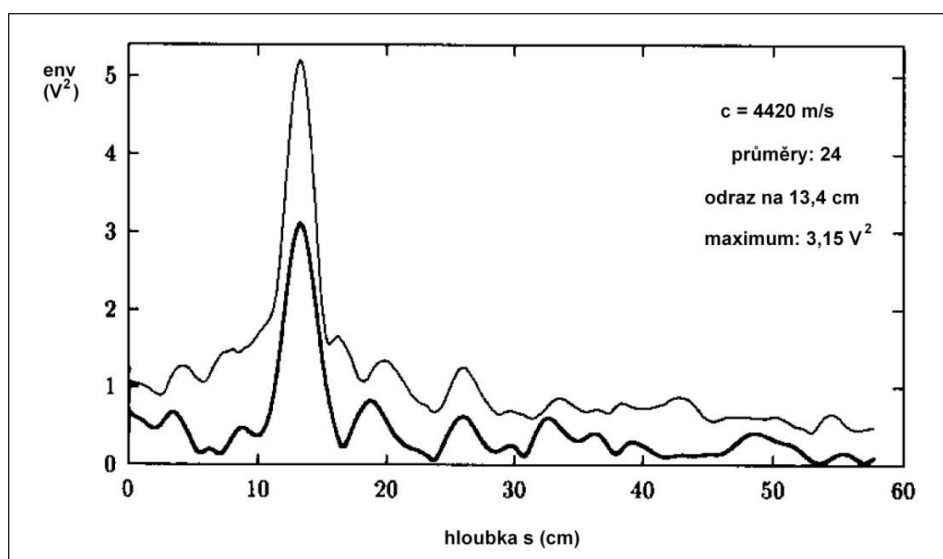
**Obr. 47:** Ultrazvuková aparatura A1220 (fa Acsys), vlevo: řídicí jednotka, vpravo: kompaktní blok bodových vysílačů/přijímačů (55 kHz) – podle Maierhofer 2005a.

Metoda umožňuje stanovení mocnosti zdiva a jeho jednotlivých vrstev, lokalizaci dutin o velikosti řádu vlnové délky použité ultrazvukové vlny (20 až 100 mm) a specifikaci trhlin nebo menších defektů. Rozsáhlejší využití je limitováno nutností používat při měření fixační gely a častými chybami vznikajícími v důsledku rozptylu vlnění a vysokých úrovní šumu.

Při detekci dutin se vzduchové prostory chovají jako rozhraní mezi dvěma různými materiály (např. cihla x vzduch) a dochází na nich k odrazu ultrazvukových vln. Vysílač i přijímač jsou umístěny na téže straně zdiva a čas příchodu odražené vlny je úměrný hloubce odrazivého rozhraní (za předpokladu konstantní rychlosti šíření). Při tomografické variantě se měří čas průchodu signálu zdivem, a proto je vysílač na jedné a sestava snímačů na protilehlé straně zdiva (**obr. 48, 49**). Čas průchodu je ovlivněn vnitřní strukturou zdiva. Aby se dosáhlo prostorového vykrytí, registruje se procházející signál v různých pozicích snímačů vzhledem k poloze vysílače. Pro zajištění maximální přesnosti měření se využívá odečet prvního nasazení signálu (On-site investigation 2005, Livingston 2001, Maierhofer – Ziebolz – Köpp 2003, McCann – Forde 2001, Milovanovič b.d.).



**Obr. 48:** Schéma měření (vlevo) a čas průchodu signálu v prostředí bez dutin (vpravo nahoře) a v prostředí s dutinami nebo nehomogenitami (vpravo dole) – podle Maierhofer 2005a.

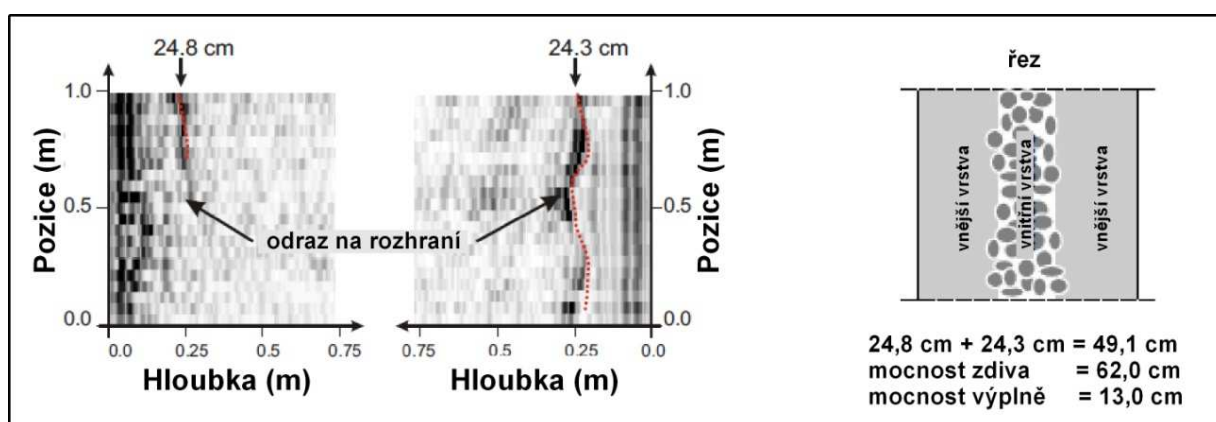


**Obr. 49:** Grafický výstup testovacího ultrazvukového měření na bloku zdiva o rozměrech 0,7 x 0,5 x 0,36 m s vyvrtanou válcovou dutinou o průměru 10 cm. Maxima na obou křivkách (silná čára: fázově citlivý signál, tenká čára: fázově necitlivý signál) indikují přítomnost dutiny v hloubce 13.4 cm – podle Jansohn – Kroggel – Ratmann 1997.



- Příklad použití:
  - Kostel „Sant Alessandro“ v Lucca (Itálie) (Maierhofer 2005a)

Cílem průzkumu bylo stanovit vnitřní strukturu třívrstvého zdiva o celkové mocnosti 62 cm, jehož lícové části tvoří mramorové desky a vnitřní část lité zdivo s lomovým vápencem. Ultrazvukové měření (aparatura A1220) v reflexní variantě bylo realizováno nezávisle z obou stran zdi. Zjištěné reflexy na pozici 1A (**obr. 50**, vlevo) indikují mocnost mramoru z vnější strany 24,8 cm a z vnitřní strany 24,3 cm. Rychlost vlny byla určena na 3100 m.s<sup>-1</sup>, resp. 3600 m.s<sup>-1</sup>. Interpretovaný řez zdí je na **obr. 50**, vpravo. Mocnost vnitřní vrstvy byla stanovena na 13,0 cm.



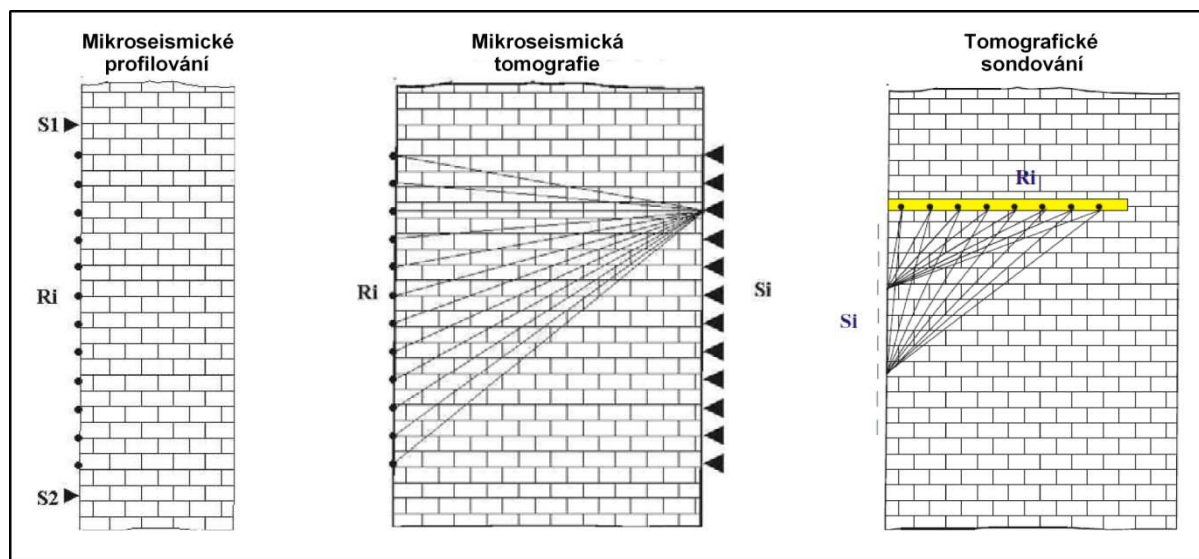
**Obr. 50:** vlevo: Záznamy měření ultrazvukovou metodou na zdivu v pozici 1A, vpravo: Interpretovaný řez zdivem v pozici 1A – podle Maierhofer 2005a.

#### 4.5 Mikroseismické profilování a tomografie (Micro-seismic profiles and tomographies)

Mikroseismické metody využívané v kontextu NDT při průzkumu historického zdiva lze rozdělit na varianty profilovací (výstupem jsou informace podél linie) a tomografické (výstupem jsou plošné informace - v řezu). Z hlediska typu použitého elastického vlnění se může jednat o varianty založené na šíření podélných vln (P-vlny) nebo vln příčných (S-vlny). Mikroseismická tomografie je v odborné literatuře často označována jako akustická tomografie, oba výrazy jsou prakticky záměnné.

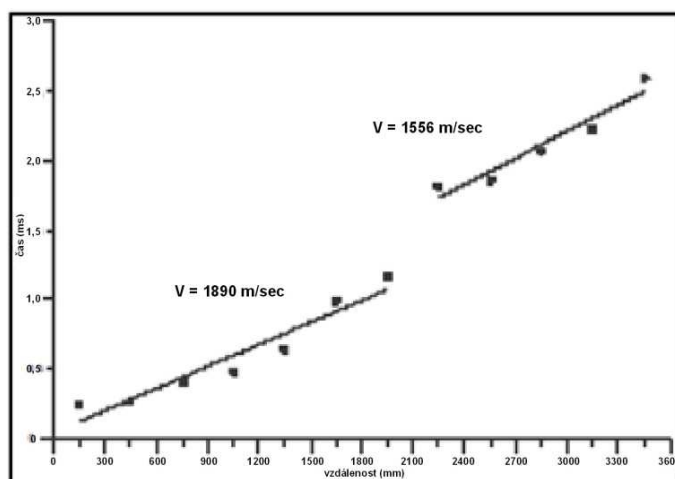
*Mikroseismické profilování* je založeno na buzení elastických vln mechanickými údery kladivem na povrch zkoumaného zdiva a registraci vytvořeného vlnění sérií piezoelektrických snímačů umístěných v linii (**obr. 51**, vlevo). To umožňuje vypočítat rychlost pohybu vyvolaného vlnění podél profilu; tato rychlost pak odráží kvalitativní vlastnosti přípovrchové partie zdiva.

Z hlediska metodiky měření se jedná o mikrovariantu mělké refrakční seismiky, která je využívána v povrchové geofyzice.



**Obr. 51:** Základní varianty seismických měření v rámci NDT: S – zdroje vlnění, R – snímače – podle Marchisio et al. 2003.

Před vlastním měřením je třeba připevnit sérii snímačů (obvykle 6 až 12) k povrchu testované zdi. Seismické vlnění je generováno lehkými údery na obou koncích profilu (**obr. 52**, vlevo). Během měření se registrují doby průchodu („travel-time“) vlny od zdroje ke každému ze senzorů a poté se vynesou grafy závislosti těchto časů na vzdálenosti od zdroje (tzv. hodochrony). Nakonec se ze sklonu jednotlivých přímých úseků na hodochronách vypočítá rychlost seismických vln v příslušných částech profilu (**obr. 52**, vpravo).



**Obr. 52:** Mikroseismické profilování, vlevo: uspořádání snímačů podél profilu, vpravo: hodochrona a stanovené rychlosti „v“ seismických vln ve dvou úsecích – podle On-site investigation 2005.

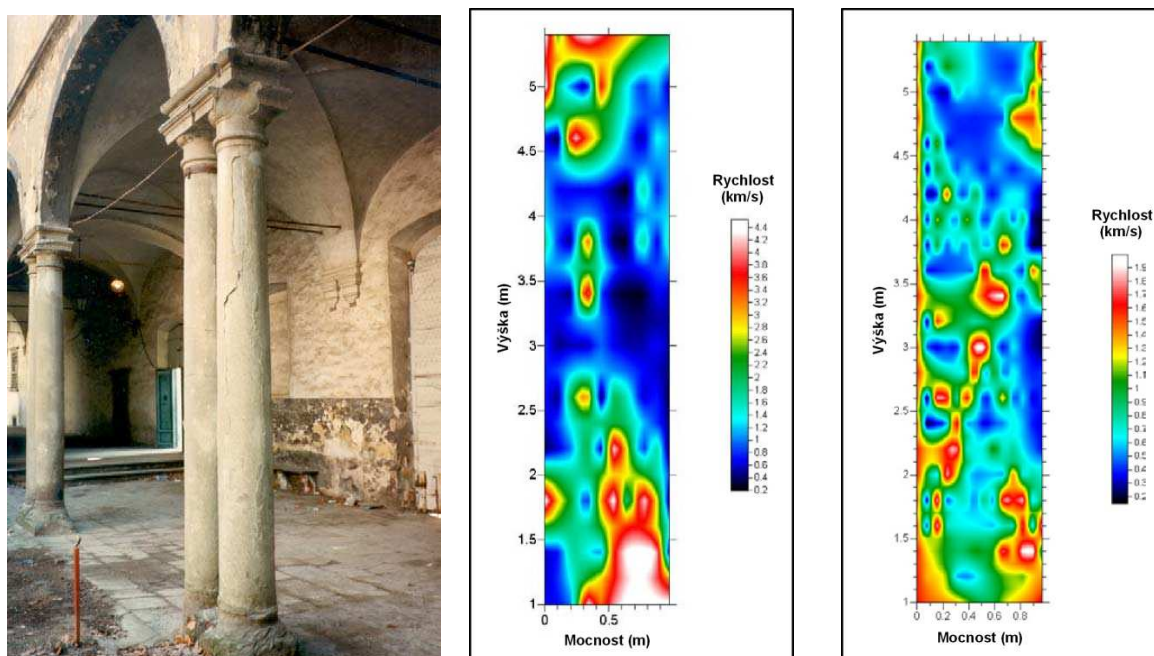
Ve většině případů se při mikroseismickém profilování využívají podélné P-vlny. Nicméně paralelní použití P-vln a S-vln někdy umožňuje vymezit ve zdivu i odlišný typ anomálií než samotná varianta P-vln. Principiálně se jedná o možnost přenosu dynamických hodnot modulů pružnosti do statického modelování. Postup měření při využití příčných S-vln je analogický jako v případě P-vln, pouze zdroj vlnění musí generovat S-vlny (přesněji SH-vlny) a jako snímače musí být použity horizontální geofony. Výhodou použití S-vln je vyšší rozlišení; paralelní využití obou typů vlnění umožňuje úplný popis elastických dynamických vlastností testovaného zdiva. Z poměru  $v_S/v_P$  lze stanovit i Poissonovu konstantu (On-site investigation 2005).

Nejmodernější variantou využití elastického vlnění zvukových frekvencí v rámci NDT je *mikroseismická tomografie (akustická tomografie)*, která umožňuje získat podrobnou informaci o rozložení elastických rychlostí v příčném řezu zdi nebo pilířem. Tak lze vymezit případné dutiny, defekty, hustotní nehomogenity, odlišné vrstvy zdiva, kvalitu injektáže apod. Prakticky nejzajímavější je však skutečnost, že výsledný obraz ilustruje změny rychlosti, které jsou závislé především na dynamickém modulu pružnosti. Výstupy mikroseismické tomografie však mohou být do značné míry ovlivněny i vlhkostí zdiva.

Podmínkou použití tomografického měření je přístupnost zkoumané konstrukce z obou stran. Na jedné straně zdi se umístí v profilové linii řada přijímačů (malých geofonů) propojených s multikanálovým seismografem. Na protilehlé straně zdi se ve vybraných bodech symetricky umístěného profilu postupně provádí série úderů (**obr. 51**, uprostřed). Pro každý úder se registrují časy příchodu signálu do všech přijímačů. Celý řez zdi je tak pokryt hustou sítí paprsků spojujících zdroje a přijímače. Zpracování dat (inverze) spočívá v tomografické rekonstrukci rozdělení rychlostí v ploše řezu (segmentované do jednotlivých čtvercových pixelů o velikosti 10 až 20 cm). Výstupem je podrobný rychlostní řez zdi či pilířem, na jehož základě lze provést přesnou lokalizaci různých typů nehomogenit. Hlavním technickým problémem pro přesné stanovení rychlostí je nutnost měřit extrémně krátké časy, pro potřebné rozlišení je proto nezbytné pracovat s velmi vysokými frekvencemi. V praxi se nejčastěji využívají vysoké zvukové frekvence v rozmezí 4000 až 5000 Hz. Kromě standardního využití podélných vln (P-vlny) lze pro mikroseismickou tomografii využít i vlny příčné (S-vlny). Ty vykazují nižší rychlosti šíření a kratší vlnové délky, důsledkem je vyšší rozlišení (On-site investigation 2005, Maierhofer – Ziebolz – Köpp 2003, McCann – Forde 2001, Porto – Valluzzi – Modena 2003, Flint – Jackson – McCann 1999, Marchisio et al. 2003, Marchisio 2005b).

- Příklady použití:
  - Katedrála „Sant Alessandro“ v Lucca (Itálie) (Maierhofer – Ziebolz – Köpp 2003, Marchisio et al. 2003).

Významný románský kostel, jehož nejstarší stavební části pocházejí z 12. až 14. století. Cílem průzkumu, založeného na metodě seismické tomografie, bylo stanovit vnitřní strukturu poškozené zdi transeptu. Provedena byla dvě měření, první s využitím P-vln, druhé s pomocí S-vln. V obou výsledných řezech (**obr. 53**) bylo zachyceno několik zón o vyšších rychlostech, které pravděpodobně indikují přítomnost kompaktních kamenných struktur, a několik nízkorychlostních oblastí, kde lze předpokládat spíše zdivo porušené. Oba řezy vykazují podobné trendy, detailnější obraz poskytuje řez na základě S-vln.

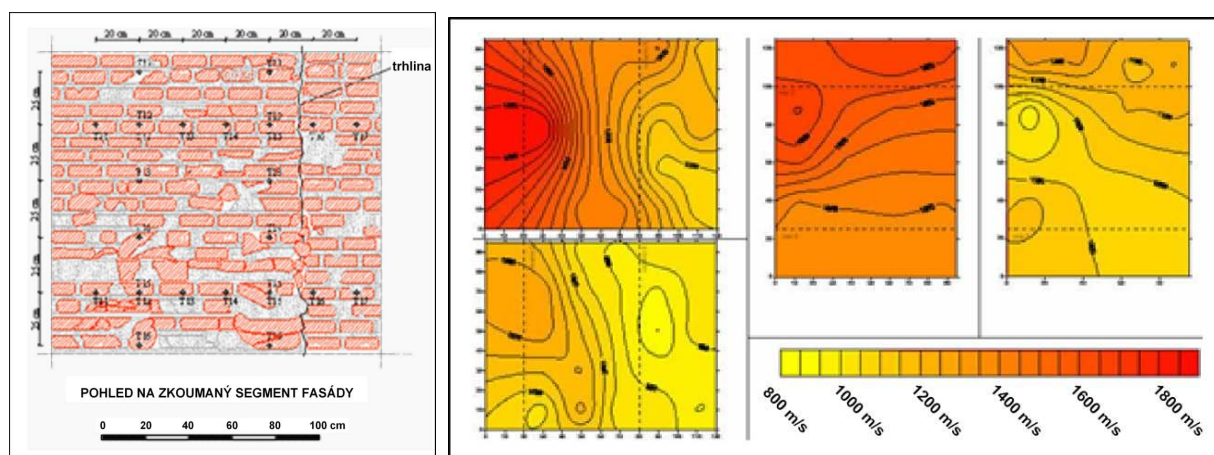


**Obr. 53:** Vlevo: katedrála v Lucca (v pozadí zkoumaná zeď), uprostřed: rychlostní řez podle mikroseismické tomografie (P-vlny), vpravo: rychlostní řez podle mikroseismické tomografie (S-vlny) – podle Maierhofer – Ziebolz – Köpp 2003.

- Kostel „Carmine“ v Padua (Itálie) (Porto –Valluzzi – Modena 2003).

Středověký kostel ze 14. století, jehož fasáda je až do výšky 10 m z původního (smíšeného) zdiva, zatímco horní partie je mladší. Fasádu porušuje několik převážně vertikálních trhlin. V kontextu s plánovanými opravami byl prostor jedné z hlavních trhlin (nacházející se ve výšce asi 6 metrů) v roce 2001 detailně zkoumán metodou mikroseismické tomografie (**obr. 54**, vlevo).

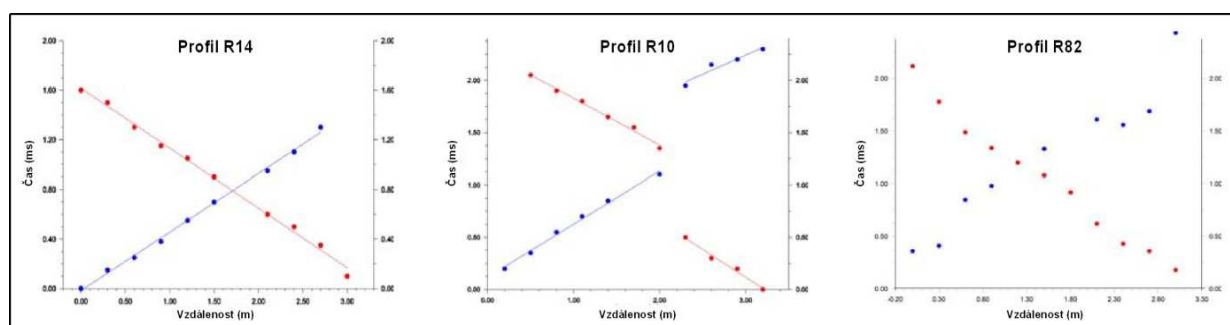
Proměřeny byly dva horizontální a dva vertikální řezy (**obr. 54**, uprostřed a vpravo). Zjištěné rychlosti se pohybovaly mezi 900 až 2000 m/s. Patrné jsou nízké rychlosti v blízkosti trhliny, a to jak na obou horizontálních řezech (v jejich pravé části), tak na pravém vertikálním řezu, situovaném pouze 20 cm od poruchy. Obecně nižší rychlosti ve spodní části testovaného segmentu fasády souvisejí pravděpodobně s vyšším stupněm nehomogenity zdiva.



**Obr. 54:** Výsledky seismické mikrotomografie: vlevo - schéma zkoumaného segmentu fasády, uprostřed - horizontální rychlostní řezy, vpravo - vertikální rychlostní řezy (80 a 20 cm od trhliny) – podle Porto –Valluzzi – Modena 2003.

- o Katedrála v Nikósii (Itálie – Sicílie) (Marchisio et al. 2003).

Katedrála vystavěná ve 14. století v gotickém stylu byla později přestavěna. Neuvážené stavební úpravy a celkový havarijní stav stavby podminily počátkem 21. století provedení rozsáhlého průzkumu za dominantního využití mikroseismických metod. Na **obr. 55** jsou uvedeny tři typické profily (vstříčné hodochrony), a to pro různé typy zdiva z hlediska jeho porušení (neporušené, s výraznou puklinou, povrchově porušené).



**Obr. 55:** Katedrála v Nikósii – mikroseismické profilování, vlevo: profil v neporušeném zdivu, uprostřed: profil přetínající zónu s hlubokou puklinou, vpravo: profil v prostoru s přípovrchovými nehomogenitami – podle Marchisio et al. 2003.

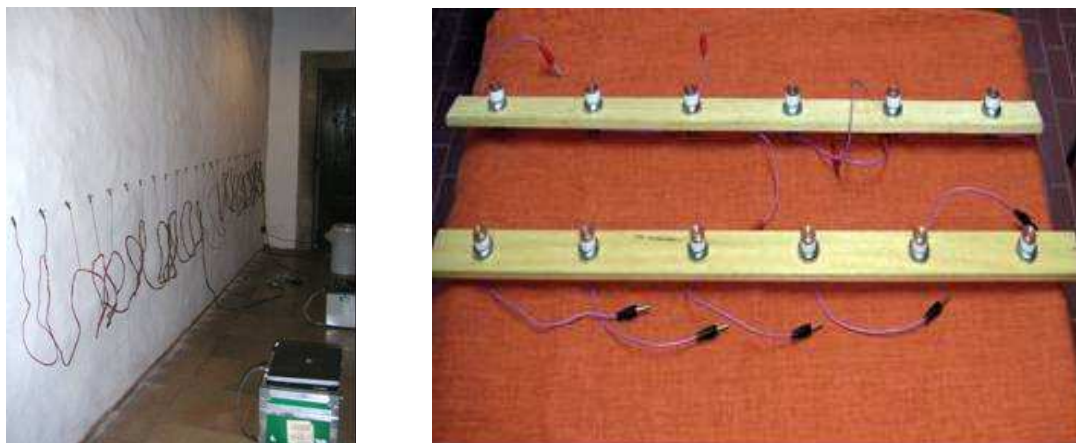
#### 4.6 Elektrická odporová tomografie (Electrical resistivity tomography – ERT)

Základem elektrické odporové tomografie je diferenciacie zkoumaného zdiva na základě měrného elektrického odporu. Metoda vychází ze stanovení odporu prostředí podle Ohmova zákona: dvě elektrody slouží k zavedení proudu, mezi dalšími dvěma se měří rozdíl elektrického potenciálu (napětí). Z hodnot proudu a napětí je vypočítán zdánlivý měrný odpor příslušné oblasti. V případě odporové tomografie se nepoužívají čtyři, ale obvykle několik desítek elektrod.

V kontextu NDT umožňuje odporová tomografie lokalizovat ve zdivu odporové anomálie, podmíněné např. přítomností vyšší vlhkosti nebo existencí dutiny. Dále lze touto metodou stanovit mocnost zdiva, hloubku základů zdiva (dvojím měřením na zemi v blízkosti zdi) atd.

Vlastní měření se provádí pomocí řady mini-elektrod (obvykle 24 až 48), které jsou různými technikami fixované podél profilu na povrchu zdi (**obr. 56**), někdy i pomocí vodivého kontaktního gelu. Použity mohou být různé konfigurace elektrod (Wenner, dipól-dipól, pól-dipól atd.). Řídící jednotka pak zapojuje vždy 4 elektrody a měří zdánlivé měrné odpory. Měření postupně zahrnuje všechny potřebné kombinace, a to pro různé vzdálenosti mezi elektrodami. Zpracování dat se provádí pomocí programu pro inverzi (2D, případně 3D) a grafickým výstupem je kvantitativní odporový řez, který zachycuje rozložení „skutečných“ měrných odporů ve hmotě zdiva pod povrchem (On-site investigation 2005). Nicméně řada případů dokládá, že zatímco tvar zjištěných odporových nehomogenit bývá reálný, hodnoty odporů jsou často nerealistické (Flint – Jackson – McCann 1999). Z hlediska prostorového uspořádání měření existují dvě varianty. V případě *odporové tomografie s. s.* se využívá uspořádání elektrod podél profilu na jedné straně zdiva, zatímco v případě *„transparency“ tomografie* jsou využita dvě uspořádání elektrod, která jsou umístěna v linii dvou profilů situovaných na protilehlých stranách zkoumané zdi (Marchisio 2005a).

Hlavním technickým problémem pro tento typ odporového měření je vysoký přechodový odpor mini-elektrod vzhledem ke zdivu. Proto je nutné používat aparaturu s velmi vysokým vstupním odporem (řádu 10 M $\Omega$  a více) a někdy i vyvrtat pro zlepšení kontaktu elektrod se zdivem malé otvory. Rozlišovací schopnost metody je v závislosti na použitých vzdálenostech elektrod a homogenitě prostředí zpravidla 25 až 30 cm (On-site investigation 2005, Flint – Jackson – McCann 1999, Marchisio 2005a, Marchisio et al. 2003).

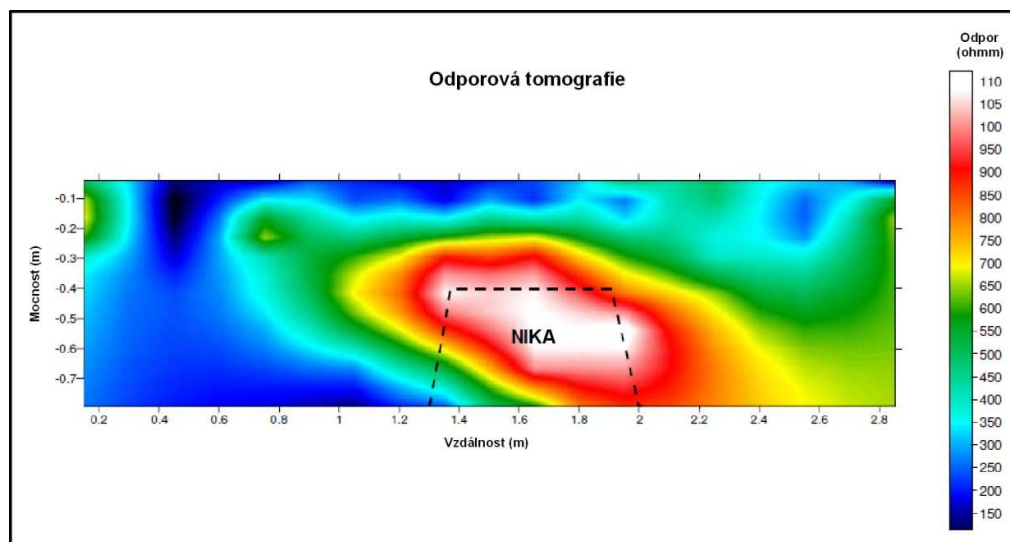


**Obr. 56:** Vlevo: uspořádání pro měření ERT s vyvrtanými otvory pro elektrody, vpravo: systém elektrod s přítlačnými kontakty – podle Hennen – Maierhofer 2005.

- Příklady použití:

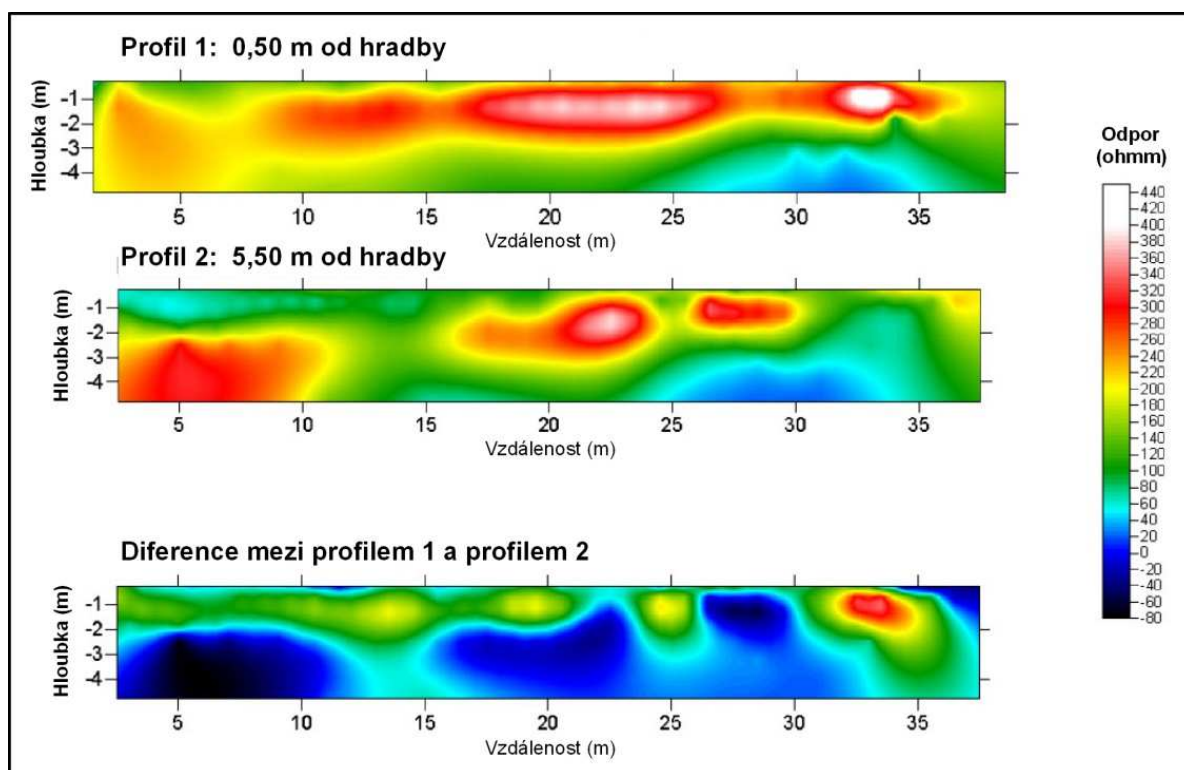
- Městská hradba v městečku Vicopisano u Pisy (Itálie) (Marchisio et al. 2003).

Středověká kamenná hradba o výšce přibližně 6,5 m je mocná téměř 0,9 m. Testovací měření metodou ERT bylo provedeno podél horizontálního profilu situovaného na její vnější straně, a to v místech, kde se na protilehlé straně nacházel ve zdi výrazný výklenek. Odporové maximum (**obr. 57**) přesně odpovídá poloze výklenku, jeho asymetrie je podmíněna použitou konfigurací elektrod (pól-dipól).



**Obr. 57:** Horizontální odporový řez (ERT) hradební zdi ve Vicopisano se zakresleným výklenkem na opačné straně zdiva – podle Marchisio et al. 2003.

U téže hradební zdi byla testována možnost stanovit pomocí odporové tomografie hloubku základů. Na povrchu terénu byly proměřeny dva paralelní profily; první ve vzdálenosti 0,5 m od hradby, druhý (neovlivněný přítomností základového zdiva) ve vzdálenosti 5,5 m od hradby (**obr. 58**, nahoře a uprostřed). Následně byl vypočítán (bod po bodu) a vykreslen diferenční odporový řez (**obr. 58**, dole). Hloubka základů (subhorizontální odporové rozhraní na diferenčním řezu) byla odhadnuta na 2,0 až 2,5 m.

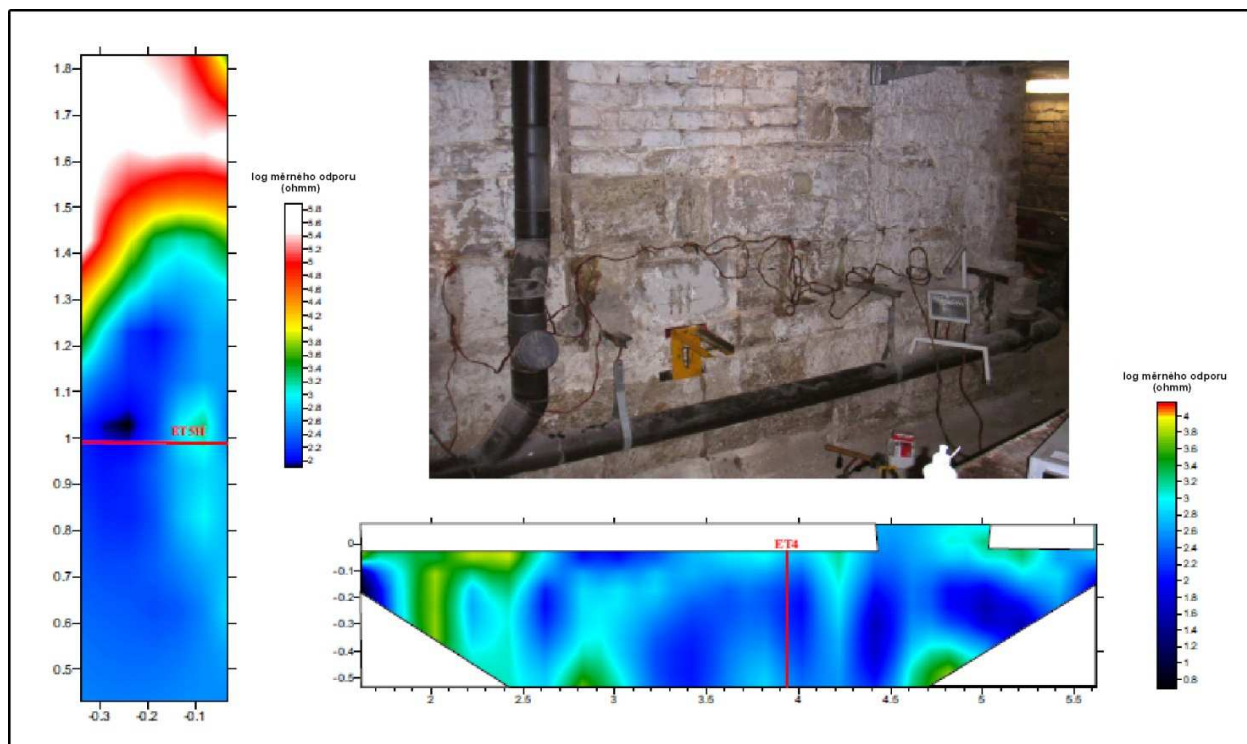


**Obr. 58:** Nahoře a uprostřed: vertikální odporové řezy (povrch terénu) podle ERT na profilech vzdálených 0,5 a 5,5 m od hradební zdi, dole: diferenční odporový řez – podle Marchisio et al. 2003.

- o Altes museum (Marchisio 2005a).

Základové zdivo v suterénu objektu (**obr. 59**, vpravo nahoře) bylo proměřeno pomocí metody ERT ve vertikálním i horizontálním směru. Vertikální odporový řez (**obr. 59**, vlevo) dokládá výrazně nízké odpory ve spodní části základového zdiva (do výšky přibližně 1,4 m), které vykazuje vysokou vlhkost. Prakticky stejně nízké odpory charakterizují i zdivo podél horizontálního odporového řezu (**obr. 59**, vpravo dole), nevýrazně zvýšené odpory v levé části řezu souvisejí se zadržovanou nikou.

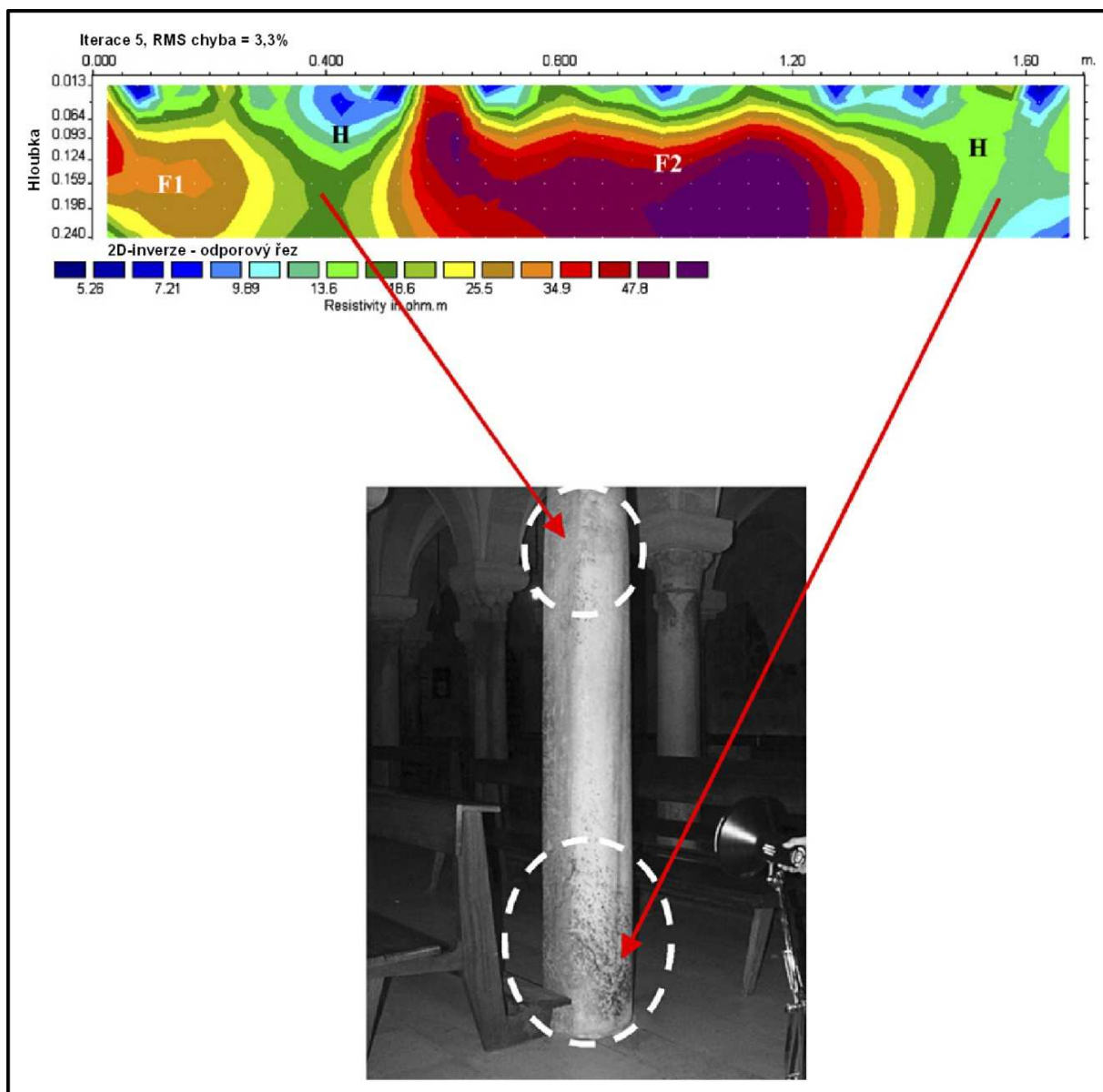




**Obr. 59:** Altes museum – odporová tomografie: vpravo nahoře – základové zdivo s nainstalovanými elektrodami, vlevo – vertikální odporový řez, vpravo dole – horizontální odporový řez – podle Marchisio 2005a.

- o Katedrála v Otranto (Itálie – Apulie) (Leucci et al. 2007b).

Krypta katedrály v Otranto je významnou kulturní památkou. Byla vybudována ve 12. století a částečně přestavěna roku 1481. Její klenbu podepírá 42 sloupů. Postupně se zhoršující stavební stav krypty, ohrožující statiku celé katedrály, vedl začátkem 21. století k jejímu komplexnímu průzkumu, jehož klíčovou složkou bylo i zkoumání stavu nejvíce postižených sloupů. Výsledky odporové tomografie pro sloup C5 ilustruje řez v linii vertikálního profilu (**obr. 60**). Dvě oblasti vysokých odporů (F1, F2) jsou projevem centrálního podélného zlomu, který je tvořen drceným mramorem s vysokou porozitou. Naopak dvě úzké zóny snížených odporů (H) odpovídají partiím mramoru s vysokým obsahem vody.



**Obr. 60:** Vertikální odporový řez (ERT) sloupem C5 krypty katedrály v Otranto – podle Leucci et al. 2007.

#### 4.7 Bezkontaktní měření vodivosti a odporu (Conductivity and resistivity measurement)

Bezkontaktní měření vodivosti je v principu založeno na elektromagnetické indukci. Vysílací cívka přístroje vytváří primární magnetické pole, které v závislosti na vlastnostech prostředí vybudí sekundární magnetické pole. Jeho vybrané parametry jsou registrovány přijímací cívkou; nejčastěji je měřena vodivost (resp. měrný odpor) a složka INPHASE, která je zhruba úměrná magnetické susceptibilitě. Zjištěné rozdíly ve vodivosti zdíva pak umožňují odhalit přítomnost vodivých struktur, jejich geometrii a elektrické

vlastnosti. Anomálie složky INPHASE souvisí zpravidla s přítomností magnetických (železných) komponent ve zdivu. Hloubka průniku závisí na vzdálenosti cívek  $s$  a na použité frekvenci ( $s$  rostoucí frekvencí klesá), není však závislá na rozložení vodivosti ve zkoumaném materiálu. Pro vertikální orientaci cívek je hloubkový dosah přibližně 1,5 násobkem jejich vzdálenosti  $s$ . Ve většině případů narůstá vodivost zdiva s vlhkostí, salinitou a obsahem jílové složky (Cola et al. 1997, McCann – Forde 2001).

Měření vodivosti je nejčastěji používáno pro stanovení:

- obsahu vlhkosti ve zdivu,
- obsahu solí ve zdivu (souvisí s vlhkostí),
- výšky kapilárního vzlínání,
- tloušťky zdiva,
- vícevrstvé struktury zdiva,
- přítomnosti dutin a nehomogenit,
- přítomnosti kovových výztuh, trubek apod.

(McCann – Forde 2001, Catarino 2012, Demaus b.d.).

#### **4. 8 Georadar (Impulse radar / Ground penetrating radar – GPR)**

Princip georadarového měření spočívá ve vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického pulzu a následné registraci části vlnění odraženého od anomálních struktur ve zdivu. Při známé rychlosti pulzu lze hloubku příslušného rozhraní stanovit výpočtem z času příchodu odrazu. Ve skutečnosti není přesná rychlost známá a pro výpočty se používá kvalifikovaný odhad. Obecně vykazuje vyšší rychlost zdivo suché a nižší rychlost zdivo vlhké. Základní součásti měřicí aparatury jsou vysílací a přijímací anténa a řídicí jednotka (**obr. 61**). Běžně užívané frekvence se pohybují v rozmezí od 200 MHz do 1,5 GHz. V rámci průzkumu pomocí GPR se nejčastěji provádějí profilová 2D – měření v konfiguraci „impulz – odraz“ (tj. vysílač i přijímač jsou na téže straně zdiva) a data se zpracovávají v časové doméně. Pouze malá část aplikací georadaru při průzkumu zdiva se realizuje v tomografické konfiguraci, kdy jsou vysílač a přijímač umístěny na opačných stranách zkoumané struktury. Jistou nevýhodou použití georadaru je v některých případech problematická „čitelnost“ a „výklad“ výsledků, ty by z tohoto důvodu měly být interpretovány pouze odborníky (Maierhofer – Ziebolz – Köpp 2003, Livingston 2001, Milovanovič b.d., Binda – Saisi 1994).



**Obr. 61:** Vlevo: měření georadarem na zdivu v exteriéru (Conimbriga, Portugalsko) – podle Catarino 2012, vpravo: měření georadarem (500 MHz) na severní zdi „Landgrafenzimmer“ na hradě Wartburgu – podle Hennen – Maierhofer 2005.

Georadarová metoda v reflexní variantě umožňuje stanovení mocnosti zdiva a hloubky základů, diferenciaci jednotlivých vrstev zdiva, lokalizaci pohřbených zdí a sklepů, detekci dutin, různých inkluzí, velkých kamenů, skrytých puklin a kovových nebo dřevěných prvků. Používá se i pro lokalizaci sekundárních maltových výplní a stanovení obsahu vlhkosti a stupně zasolení (On-site investigation 2005, Maierhofer – Wöstmann – Hennen 2003, Catarino 2012, Milovanović b.d., Demaus b.d.).

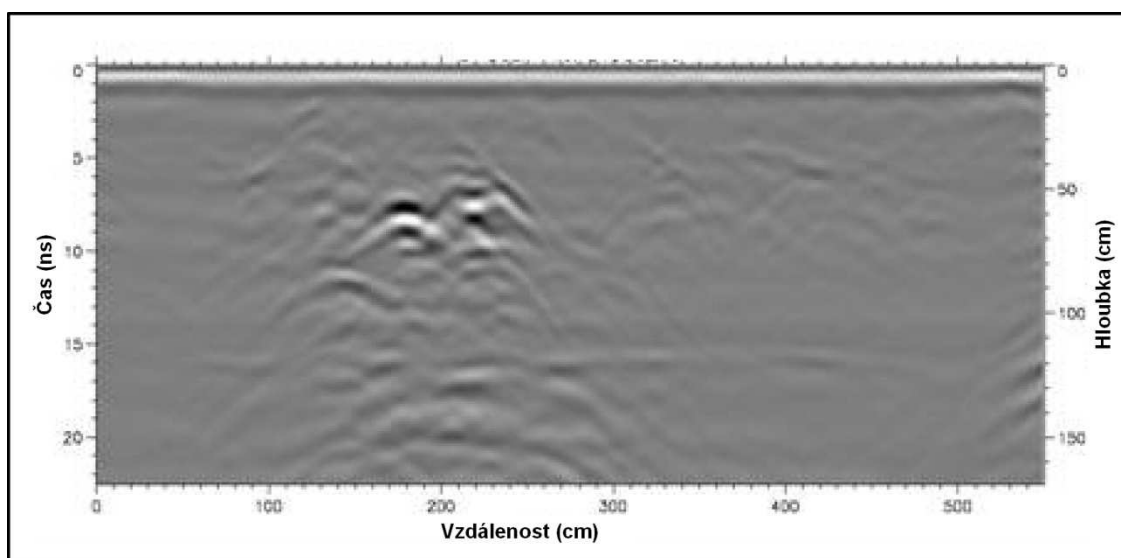
Georadar je široce využíván pro kontrolu vnitřní struktury zděných konstrukcí, jako jsou pilíře mostů a viaduktů. Nedestruktivní testování zděných konstrukcí obvykle vyžaduje anténu o vyšší frekvenci (nad 1 GHz), aby se dosáhlo potřebného rozlišení pro malé hloubky. V některých případech, jako je vyhodnocení vnitřní struktury zděných obloukových mostů nebo přístavních zdí, je vyžadován větší hloubkový průnik elektromagnetické energie, a proto se využívají antény o nižších frekvencích v rozmezí 100 až 500 MHz, což však vede k určité ztrátě rozlišení. Georadar reprezentuje patrně nejužívanější metodu ze skupiny NDT používanou při průzkumu mostů, a to jak historických (Solla et al. 2011, Solla et al. 2012), tak i mladších (Colla et al. 1997). Radarové vlnění snadno proniká vzduchem a dutinami, ale jeho amplituda se výrazně zeslabuje při průchodu vodivým prostředím. Proto signál radaru neprochází kovy, což ale současně umožňuje detekci kovových komponent ve zdivu, jako jsou potrubí, kanalizace nebo armatury (Flint – Jackson – McCann 1999). Průnik a útlum elektromagnetického vlnění v konkrétním prostředí závisí kromě frekvence vlnění především na dielektrické konstantě a elektrickém odporu. Rozlišení je ovlivněno především použitou frekvencí, ale i strukturou zdiva. V případě běžného kamenného zdiva se uvádí pro frekvenci 900 MHz horizontální i

vertikální rozlišení v rozmezí 3 až 7 cm, pro frekvenci 500 MHz 7 až 13 cm a pro frekvenci 100 MHz 35 až 65 cm (McCann – Forde 2001). Přesnost je významně ovlivněna přítomností vlhkosti. Hloubkový dosah GPR v betonu a podobných materiálech může dosahovat až šesti metrů (Livingston 2001).

- Příklady použití:

- Hrad Wartburg u Eisenachu v Německu (Hennen – Maierhofer 2005).

Středověký hrad se vypíná na kopci nad městem Eisenach v Durynsku. Jeho nejstarší část – hradní palác byl vystavěn mezi lety 1156 až 1172. V roce 2004 byl v prostoru hradu proveden testovací průzkum komplexem NDT a v jeho rámci i měření pomocí GPR. Řez podél severní zdi „Landgrafenzimmer“ (**obr. 62**) vykazuje výrazné reflexy v úseku 140 až 260, kde se patrně nachází druhotně zazděný dveřní otvor. V těchto místech je ve srovnání s ostatními částmi profilu (s minimem odrazů) zřejmě i méně homogenní zdivo.

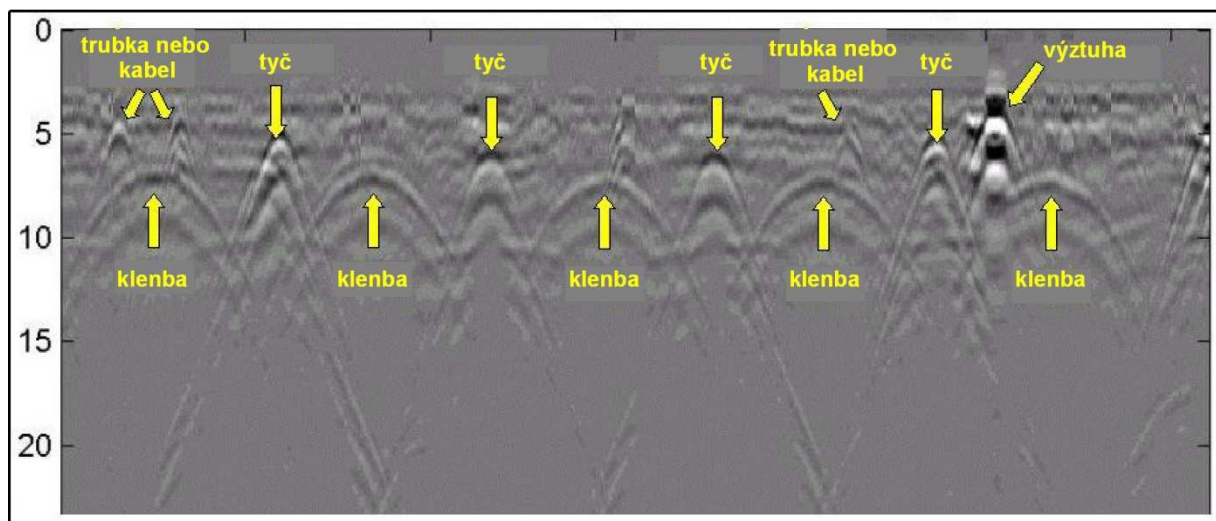


**Obr. 62:** Radarogram podél severní zdi „Landgrafenzimmer“ – podle Hennen – Maierhofer 2005.

- Villa „Lita Modignani“ u Milána v Itálii (Binda et al. 2003, Binda 2005, Binda – Saisi 2009).

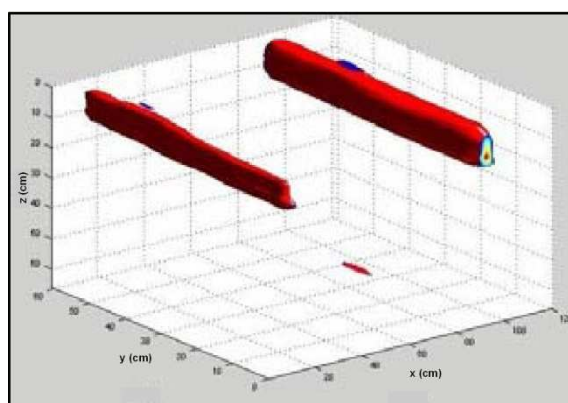
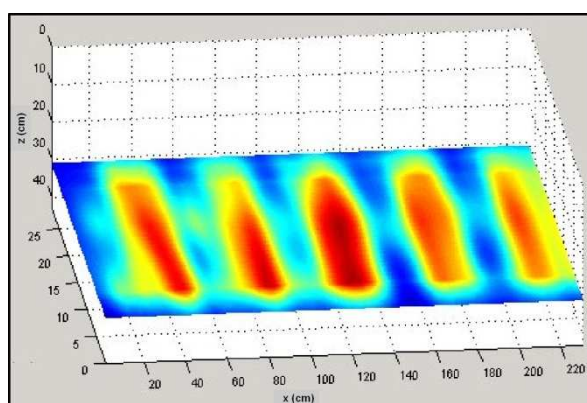
Venkovský palác, vystavěný po roce 1687 na základech staršího středověkého objektu, trpěl na konci 20. století řadou stavebně-technických problémů. Před plánovanou rekonstrukcí byl proto proveden hloubkový stavební průzkum objektu, který zahrnoval i použití georadaru.

Na **obr. 63** je georadarový profil situovaný na podlaze knihovny v patře a proměřený anténou o frekvenci 1 GHz. Profil přetnul zaklenuté prostory v přízemí; na radarovém řezu lze vidět tvary kleneb a více difrakčních hyperbol vyvolaných stavebními prvky, které jsou orientované kolmo k profilu. Konkrétně se jedná o horizontální tyče mezi klenbami, dále o dešťové svody a elektrické kabely pod podlahou, a konečně o kovovou výztuhu v linii dveří (vpravo).



**Obr. 63:** Villa Lita Modignani – georadarový řez v linii profilu na podlaze knihovny – podle Binda et al. 2003.

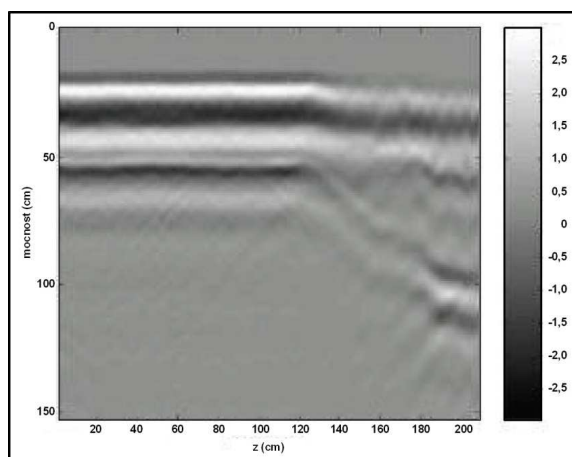
Cílem dalšího průzkumu bylo specifikovat polohu dřevěných trámů pod podlahou několika místností. I v tomto případě byla využita anténa o frekvenci 1 GHz. Plošné měření na podlaze kaple (**obr. 64**, vlevo) detailně zachytilo polohu pěti trámů vzdálených navzájem od sebe 44 cm. V jiné části objektu umožnilo 3D zpracování georadarových dat rekonstruovat přesnou pozici dvou menších trámků (**obr. 64**, vpravo).



**Obr. 64:** Villa Lita Modignani – výstupy georadarového měření. Vlevo: Horizontální řez GPR s vykresleným projevem pěti dřevěných trámů, vpravo: 3D-rekonstrukce dvou menších trámků – podle Binda 2005.

- Projev změny vlhkosti zdiva – laboratorní experiment (Binda – Saisi 2009).

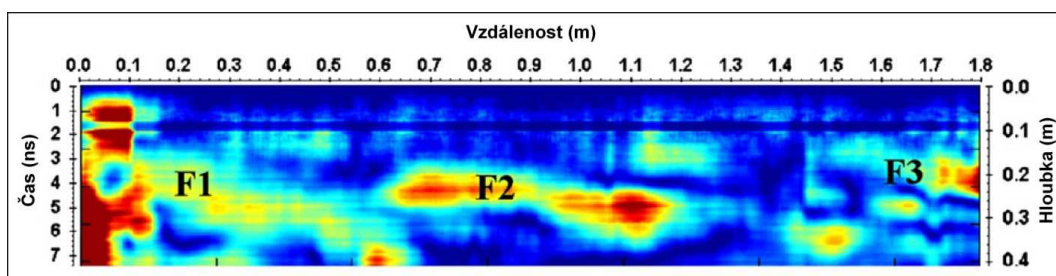
Testovací měření pomocí 1 GHz antény bylo provedeno podél vertikálního profilu o délce asi 2 m, jehož spodní (na **obr. 65** pravá) část zasahovala do vlhké půdy. Výsledky testů prokázaly, že se zvyšující se vlhkostí zdiva klesá rychlost EM-vlny a současně se zvyšuje její útlum. Souvisejícím efektem je postupné prodlužování času odrazu z opačné strany zdiva.



**Obr. 65:** Georadarový řez zdivem o různé vlhkosti (vlevo suché, vpravo vlhké) podle Binda – Saisi 2009.

- Katedrála v Otranto (Itálie – Apulie) (Leucci et al. 2007).

Krypta katedrály v Otranto byla vybudována ve 12. století a částečně přestavěna roku 1481. Její klenbu podepírá 42 sloupů. Progresivně se zhoršující stavební stav krypty, ohrožující statiku celé katedrály, vyústil začátkem 21. století do komplexního průzkumu, jehož klíčovou složkou bylo i zkoumání stavu nejvíce postižených sloupů. Výsledky georadarového měření pro sloup C5 ilustruje řez v linii vertikálního profilu (**obr. 66**). Tři oblasti s vysokým zastoupením reflexů (F1, F2, F3) jsou projevem centrálního podélného zlomu, který je vyplněn drceným mramorem s vysokou porozitou.



**Obr. 66:** Vertikální georadarový řez sloupem C5 krypty katedrály v Otranto – podle Leucci et al. 2007.

#### 4.9 Termometrie a termografie (Thermometry and thermography)

Termometrie a termografie zahrnuje skupinu pasivních a aktivních metod, které využívají elektromagnetické záření v infračervené (tepelné) oblasti, odtud i označení infračervená termografie (McCann – Forde 2001, Damaus b.d.).

*Termometrie* představuje kontaktní či bezkontaktní měření teploty v síti vhodně zvolených bodů, zpracovaná data jsou nejčastěji zobrazena ve formě teplotních profilových křivek nebo plošných výstupů.

*Pasivní termografie* využívá prosté snímkování zájmového objektu v oblasti infračervených vlnových délek, pořízené materiály jsou následně digitálně zpracovány (různé typy filtrací) tak, aby se zdůraznily jemné teplotní diference, a nakonec analyzovány (Livingston 2001).

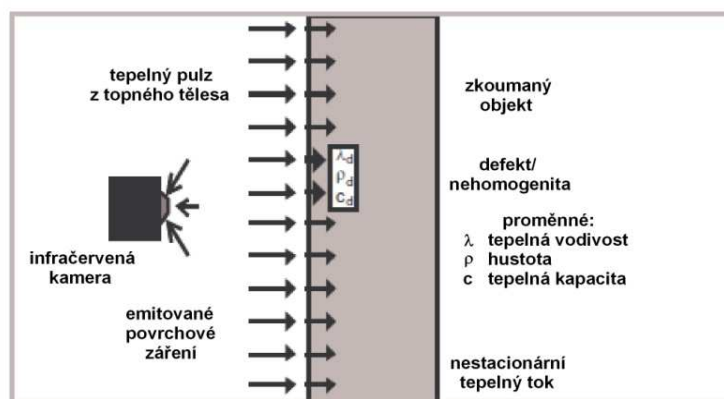
Princip *aktivní termografie* spočívá v registraci povrchových teplotních rozdílů poté, co je povrch zkoumaného objektu vystaven externímu tepelnému záření, které vyvolá nestacionární tepelný tok. Šíření tepla do hloubky zdiva přitom závisí na jeho materiálových vlastnostech, jako jsou emisivita, tepelná vodivost, tepelná kapacita a hustota. Pokud jsou v přípovrchové části nehomogenity, vzniknou v přilehlém okrsku povrchu zdiva měřitelné teplotní rozdíly (viz **obr. 67**). Po vypnutí tepelného zdroje jsou povrchové změny teploty spojené s chladnutím zaznamenávány v reálném čase pomocí infračervené kamery. Získaná data jsou digitálně zpracována do formy termogramů, jejichž následná analýza umožňuje vymezení teplotních anomálií, a tudíž i lokalizaci příslušných přípovrchových nehomogenit (Maierhofer – Roellig 2009). Různé anomální struktury se mohou projevit jako teplejší či chladnější zóny, rozdíly v teplotách se nejčastěji pohybují pouze v desetinách stupně (Binda – Saisi 1994). Hlubkový dosah metody je přibližně 10 cm (On-site investigation 2005).

Termické metody lze využít pro lokalizaci dutin a různých nehomogenit (spáry, praskliny, pukliny) v přípovrchové části zdiva, vymezení míst s omítkou oddělenou od zdiva, odhad mocnosti omítky, zkoumání struktury zdiva za omítkou, stanovení druhotně vyplněných míst, určení průduchů s pronikajícím vzduchem (průvan) a detekci vlhkosti. Místa s větší vlhkostí zdiva se v důsledku odpařování vody z povrchu projevují výraznými teplotními minimy. Obecně je voda ve srovnání se stavebními materiály lepší tepelný vodič (On-site investigation 2005, Milovanovič b.d., Catarino 2012, Damaus b.d.).

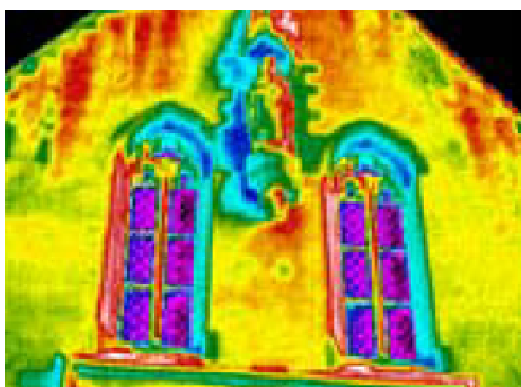
Jako zdroj tepelného záření u *aktivní termografie* může v některých případech sloužit osvětlení Sluncem, zpravidla se však používají speciální tepelné zářiče nebo halogenové lampy. Podmínkou pro úspěšné použití metody je stejnorodý povrch zdiva, pro měření v exteriéru i stabilní



povětrnostní podmínky (zataženo, beze srážek, bezvětrí). Všeobecně se doporučuje měřit v zimním období, a to brzy ráno, pozdě večer či v noci. Z hlediska zpracování naměřených dat se v praxi uplatňují u aktivní metody dvě varianty: impulzní termografie (IT) a pulzně-fázová termografie (PPT). Interpretace teplotních dat v metodě IT vychází z analýzy závislosti povrchové teploty na čase chladnutí ve vybraných oblastech, a to jak s nehomogenitami, tak i bez nich. Řešení inverzní úlohy, jež umožňuje získat z rozdílových křivek informace o tepelných a prostorových vlastnostech zjištěné nehomogenity, se provádí pomocí numerických simulací. Metoda PPT je založena na využití frekvenční analýzy dat, nejčastěji pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT), která je aplikována na přechodovou křivku každého pixelu. Výstupem jsou zobrazení amplitud a fází pro všechny frekvence. Amplitudová zobrazení odrážejí vnitřní strukturu materiálu do maximální dosažené hloubky, fázová zobrazení pouze v rámci určitého hloubkového rozmezí (v obou případech v závislosti na frekvenci). Nehomogenity se projevují změnami v amplitudě nebo fázi (Maierhofer – Roellig 2009).



**Obr. 67:** Schéma měření metodou aktivní termografie – podle On-site investigation 2005.

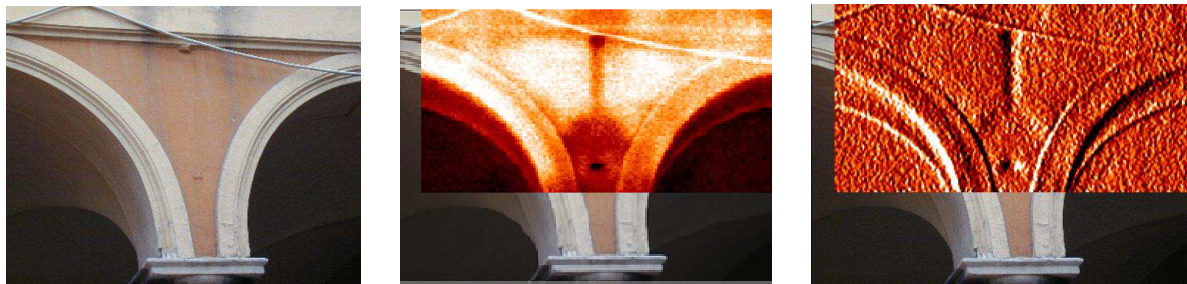


**Obr. 68:** Infrasnímek průčelí kostela sv. Marka – podle Milovanovič b.d.

- Příklady použití:

- Villa „Lita Modignani“ u Milána v Itálii (Binda et al. 2003, Binda 2005, Binda – Saisi 2009).

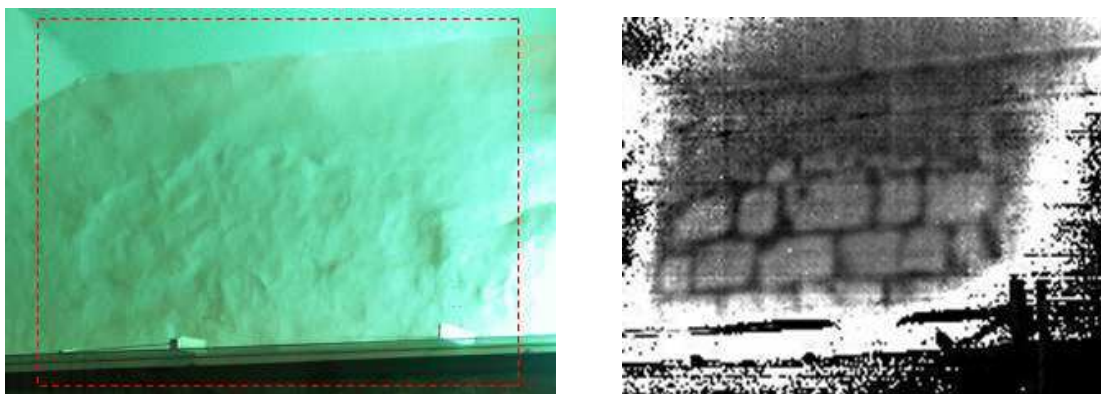
Venkovský palác, vybudovaný po roce 1687 na základech starší středověké stavby, trpěl na konci 20. století řadou stavebně-technických problémů. Před plánovanou rekonstrukcí byl proto proveden hloubkový stavební průzkum objektu, který zahrnoval i použití pasivní termografie (termovize). Teplotní měření umožnila identifikovat pod omítkou a ve zdivu řadu konstrukčních detailů (kovové prvky, dutiny, sádrové výplně, stavbu zdiva) – viz **obr. 69**.



**Obr. 69:** Vlevo: fotografie detailu kleneb; uprostřed: termosnímek – patrná je přítomnost dilatačního táhla (tmavé), skrytého pod vrstvou omítky; vpravo: termosnímek po použití digitálního gradientového filtru – podle Binda et al. 2003, Binda 2005, Binda – Saisi 2009.

- Hrad Wartburg u Eisenachu v Německu (Hennen – Maierhofer 2005, Maierhofer 2005b).

Středověký hrad je situován na kopci nad městem Eisenach v Durynsku. Jeho nejstarší část – hradní palác byl vybudován mezi lety 1156 až 1172. V roce 2004 bylo na lokalitě provedeno testovací měření pomocí komplexu NDT a v jeho rámci i aktivní termografie metodou PPT. Vyhodnocení teplotního měření v prostoru severní obvodové zdi umožnilo lokalizovat pod omítkou dřívější otvor - průchod, který byl později zazděný odlišným typem zdiva (**obr. 70**).



**Obr. 70:** Výsledek aktivní termografie v prostoru severní obvodové zdi. Vlevo: fotografie zkoumaného místa; vpravo: termografie (zobrazení fáze) - v horní části zdivo z pravidelných kamenných kvádrů, v dolní části patrný obrys dřívějšího otvoru zakončeného nízkým obloukem – podle On-site investigation 2005, Hennen – Maierhofer 2005.

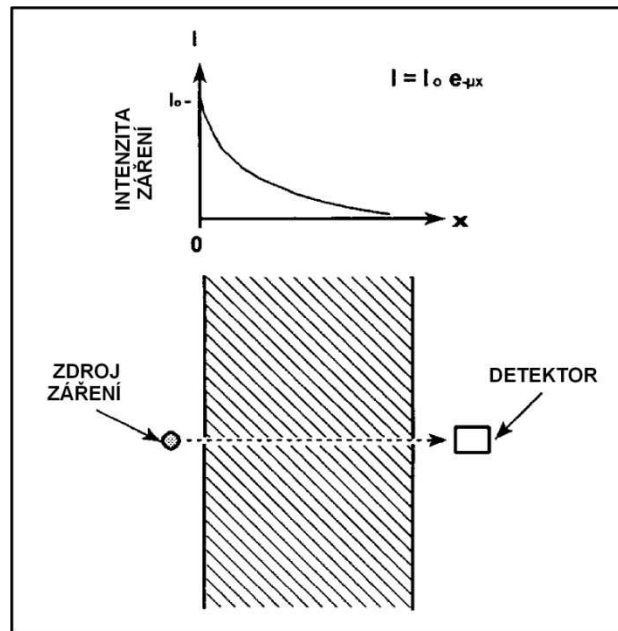
#### 4.10 Radiační metody (Penetrating radiation methods)

Radiační metody zahrnují větší skupinu nedestruktivních technik, které využívají různé druhy pronikavého záření, počínaje neutrony a beta-částicemi a konče určitými typy EM-záření, kam patří Rentgenovo záření, gama-záření a kosmické záření. Vlastní měření je založeno na analýze stupně pohlcení paprsku použitého záření ve sledovaném prostředí (viz **obr. 71**, nahoře). Tento útlum je dán Beerovým zákonem, podle něhož intenzita záření klesá exponenciálně s délkou dráhy paprsku v příslušném materiálu, současně však závisí i na určitých parametrech materiálu, konkrétně na jeho hustotě a na atomovém čísle jeho komponent. Měří se buď v úzkém nebo širokém svazku paprsků. Uspořádání s úzkým svazkem paprsků je zachyceno na **obr. 71** (dole): zdroj, pro gama-záření zpravidla izotop  $^{137}\text{Cs}$ , je umístěn na jedné straně zdiva a detektor (Geigerův počítač) na straně druhé. V průběhu měření se postupně mění poloha zdroje i detektoru.

Alternativou k použití úzkého svazku paprsků je radiografie, kde se používá široký svazek paprsků a jako zobrazovací médium (detektor) slouží nejčastěji speciální typ fotopapíru. Jasnost jednotlivých bodů na vyvolaném médiu je pak nepřímo úměrná útlumu podél příslušné trajektorie. Moderní varianty radiografie využívají pro detekci scintilační snímací plochu s fotonásobičem, což umožňuje nejen následné digitální zpracování dat, ale i realizaci 3-D výstupů (radiografická tomografie). Vzhledem k velikosti koeficientů útlumu pro různé typy záření a bezpečnostním požadavkům se pro potřeby diagnostiky zdiva používají jako zdroje záření prakticky pouze gama-zářiče (Livingston 2001, McCann – Forde 2001).

Pokud jsou zjištěné změny v útlumu záření podmíněny primárně hustotou, mohou indikovat přítomnost dutin, anomálie vlhkosti nebo rozdíly v porositě zdiva (Catarino 2012, Livingston 2001).

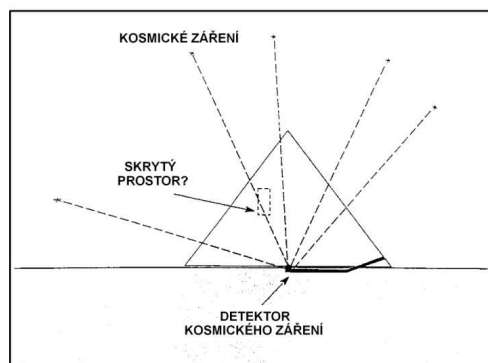
Pro nedestruktivní průzkum za účelem zjištění rozdílů ve složení zdiva pod slabou vrstvou omítky by bylo možné využít jako pasivní metodu i gama-spektrometrii, která by pravděpodobně byla schopná odlišit např. cihelné zdivo (vyšší obsah uranu i draslíku) od zdiva kamenného s převahou pískovce či opuky (nižší obsah uranu i draslíku).



**Obr. 71:** Schéma radiačního měření – podle Livingston 2001.

- Příklad použití:
  - Rachefova (Chafrevova) pyramida u Gízy (Egypt)

Pro lokalizaci možných neznámých prostor v tělese pyramidy byl v roce 1970 realizován značně „exotický“ výzkum, při němž bylo jako testovací médium využito kosmické záření. V něm převažují částice o energiích 40 až 70 GeV (přibližně  $10^4$ x větších než u běžných zdrojů), což zaručuje jejich hluboký průnik do hmoty. Detekční komory pro měření kosmického záření byly instalovány v místnosti při základně pyramidy a poté registrovaly tok záření přicházející z různých směrů. Proskenovalo bylo 18% objemu pyramidy. Výzkum sice nezjistil přítomnost skrytých prostor, ale prokázal funkčnost zvolené metodiky, neboť zachytil projev reliktního vápencového obložení při vrcholu pyramidy.



**Obr. 72:** Schematické zobrazení výzkumu Rachefovy pyramidy s využitím kosmického záření – podle Livingston 2001.

#### 4.11 Kapametrie (Magnetic susceptibility measurement)

Měření magnetické susceptibility (kapametrie) není zatím v rámci průzkumu historického zdiva nijak využíváno. Metoda je založena na závislosti indukčnosti cívky, která je přiložena ke zkoumanému materiálu, na jeho magnetické susceptibilitě. Cívka může být buď součástí přístroje (**obr. 73**, vlevo) nebo samostatná (**obr. 73**, vpravo). Hloubkový dosah je závislý na průměru cívky a pohybuje se obvykle od 2 do 10 cm.



**Obr. 73:** Vlevo: kapametr typu Terraplus KT-10 – podle

<http://anugrahinstrumen.itrademarket.com/3486713>,

vpravo: kapametr typu Bartington MS2 – podle

<http://pzp.de/1/technology/suszeptibility.html>.

Metodu lze v některých případech využít k jednoduché diagnostice různých typů zdiva pod slabší vrstvou omítky. Pomocí kapametrie tak bylo např. možné odlišit cihelné zdivo s vyššími hodnotami magnetické susceptibility od staršího kamenného zdiva (kvarcity, ruly) s nižší magnetickou susceptibilitou v prostoru středověkých sklepů domu čp. 24 v Jeseníku (měřeno v roce 2006, Dohnal-ústní sdělení 2014).

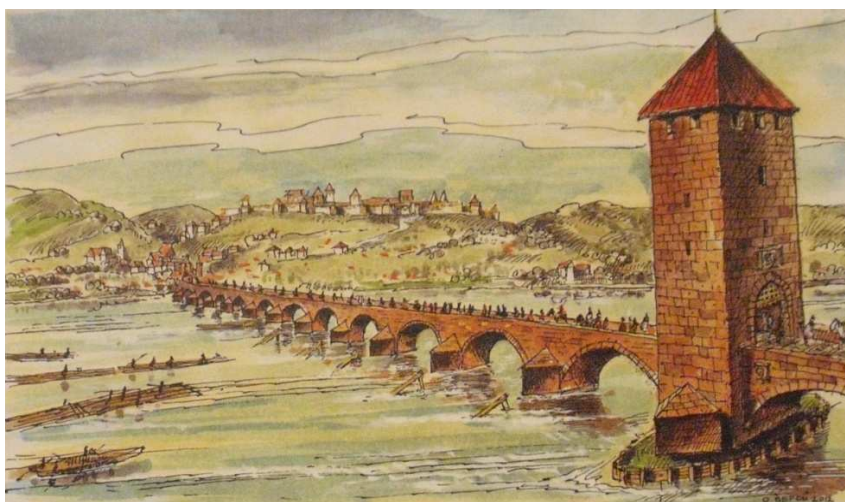
## 5. LOKALIZACE PILÍŘE JUDITINA MOSTU V PRAZE

### 5.1 Juditin most

Nejstarším způsobem překonání řeky byl brod, který využívali obyvatelé Prahy před vybudováním prvního mostu. Brod vedl od Klárova na levém břehu k pravobřežní osadě Ungelt v oblasti Starého Města. V tomto prostoru se nacházela mělčina vytvářená tzv. skalním říčním prahem.

Předchůdcem Juditina mostu byl most dřevěný, jehož přesná poloha není známá. Dřevěné kůly nalezené při opravě Karlova mostu po povodni v roce 1890 naznačují, že se nacházel pravděpodobně v jeho blízkosti.

Juditin most byl postaven ve 12. století v pozdně románském slohu a pojmenován po Juditě Durynské, manželce krále Vladislava I. Měl délku 514 metrů a šířku 6,8 metrů a byl vybaven i mohutnými ledolamy. Na jeho stavbu byly použity železité a slepencové pískovce. Most měl tzv. římské dělení, tzn., že oblouky se směrem do centra rozšiřovaly. Často musel odolávat náporu povodní. Osudnou se stala povodeň v roce 1342, která most částečně zničila; není však známo, v jakém rozsahu. Poté byl dočasně vyspraven dřevěnými lávkami a sloužil nadále jako komunikace přes Vltavu až do doby dostavby Karlova mostu v roce 1407 (Státníková et al.2013).



**Obr. 74:** Juditin most, kresba O. Ševců (Státníková 2013).

#### 5.1.1 Pilíře

Pro reálnou interpretaci výsledků provedeného měření je nutné uvést dostupné informace o výstavbě a především konstrukci pilířů Juditina mostu.

Torza mostu na obou březích Vltavy jsou dobře prozkoumána, naopak podstatně méně informací existuje o pilířích v řečišti (Dragoun 1989).

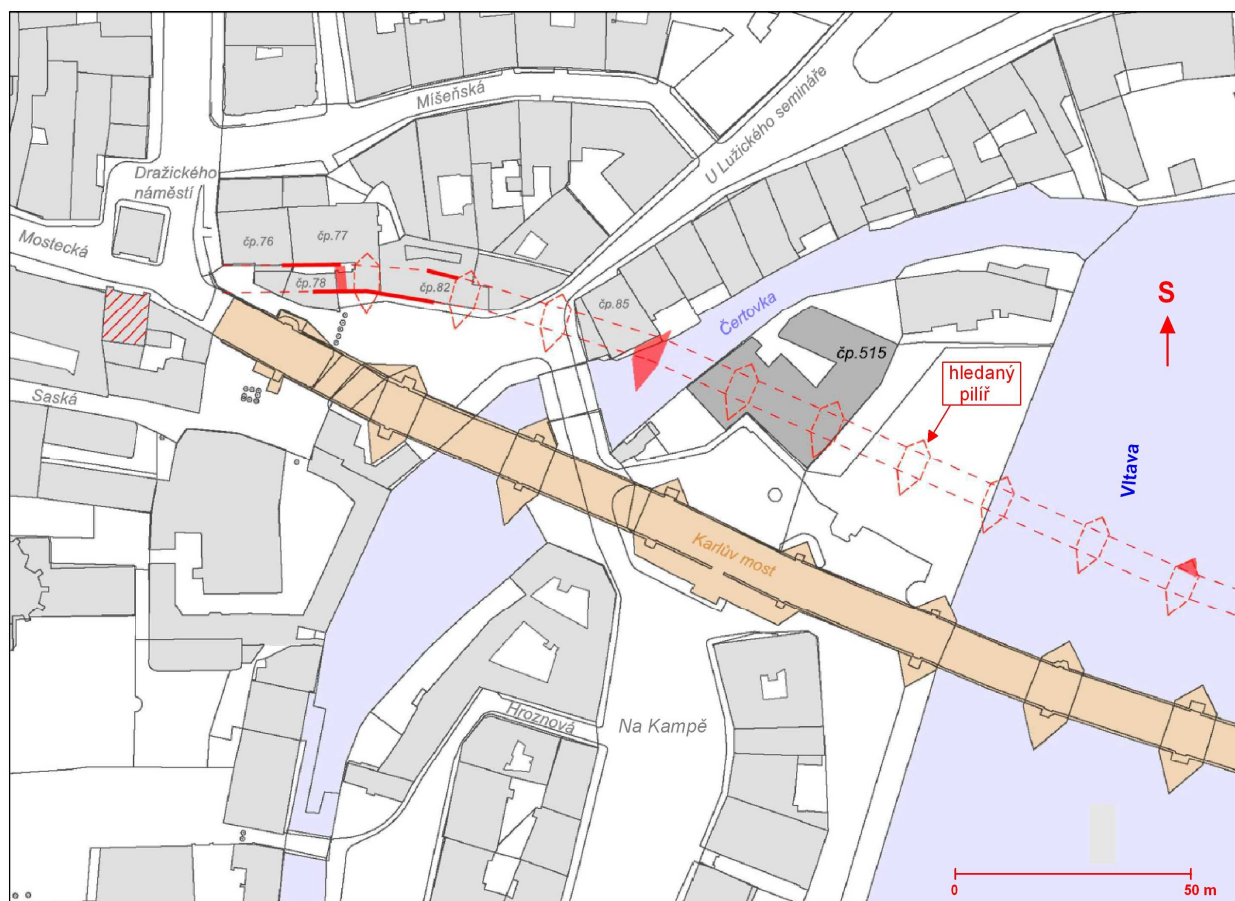
Způsob založení pilířů není bezpečně známý. Určité poznatky přinesl výzkum jednoho z nich v letech 1988-1989, který zjistil pod zděnými základy zbytky dřevěné konstrukce. Obecně se tedy předpokládá, že pilíře Juditina mostu byly založeny na dřevěných trámových roštích. Tento způsob založení byl detailně dokumentován u středověkého kamenného mostu v Roudnici nad Labem (Cihla, Panáček 2006a). Před vlastní výstavbou pilíře byla vybudována stavební jáma (jímka), z které byla následně vyčerpána voda. Ohraničení jámy tvořily dvě souběžné uzavřené štětové stěny, mezi které byl napěchován nepropustný materiál – jíl. Po vyčerpání vody z jámy pomocí šlapacích kol byl na jejím začištěném dně vybudován ležatý dřevěný rošt, jehož vnitřek byl vyplněn jílem (Cihla, Panáček 2006b). Poté byla položena dřevěná podlaha a vytvořeno bednění. Vlastní zdivo pilíře bylo založeno na prkenné podlaze dřevěného roštu. Jeho líce byly vyzděny z kvádrů kladených na vápennou maltu, vnitřek pilíře byl vyplněn kompaktním litým zdivem z vápenné malty a horninových štěpů. Předpokládá se, že po vyzdění pilíře byl prostor mezi tímto bedněním a zdivem pilíře opět napěchován jílem. Pilíře měly výšku kolem 8,8 m a mostovka se nacházela ve výšce 6,6 až 7,5 m nad hladinou Vltavy, která byla tehdy skoro o 4 metry níže než je dnes. Na jejich stavbu byly použity železité křídové pískovce (Čarek 1947; Březinová et al. 1996), místy i opukové kvádry (Merhoutová 1971).

Archeologickými sondami v prostoru domu Na Kampě čp. 515 byla zachycena zdiva, která pravděpodobně představují zbytky dvou pilířů Juditina mostu. Jejich koruna se nacházela ve výšce 184,6 až 185,6 m n.m. Předpokládaná výška těchto reliktních je odhadována na 1,5 až 2,0 m.

Z hlediska provedení geofyzikálního průzkumu je podstatné, že předpokládané relikty stavebních konstrukcí pilíře nemusí zahrnovat pouze jeho zdivo (patrně o vyšším měrném odporu), ale i pozůstatky „dřevo-jílovitého pláště“ s měrným odporem nízkým.



**Obr. 75:** Dřevěný základový rošt jednoho z pilířů Juditina mostu – podle Státníková 2013.



**Obr. 76:** Pravděpodobná poloha pilířů a reliktnů Juditina mostu – podle Podliska 2013.

## 5.2 Geologie

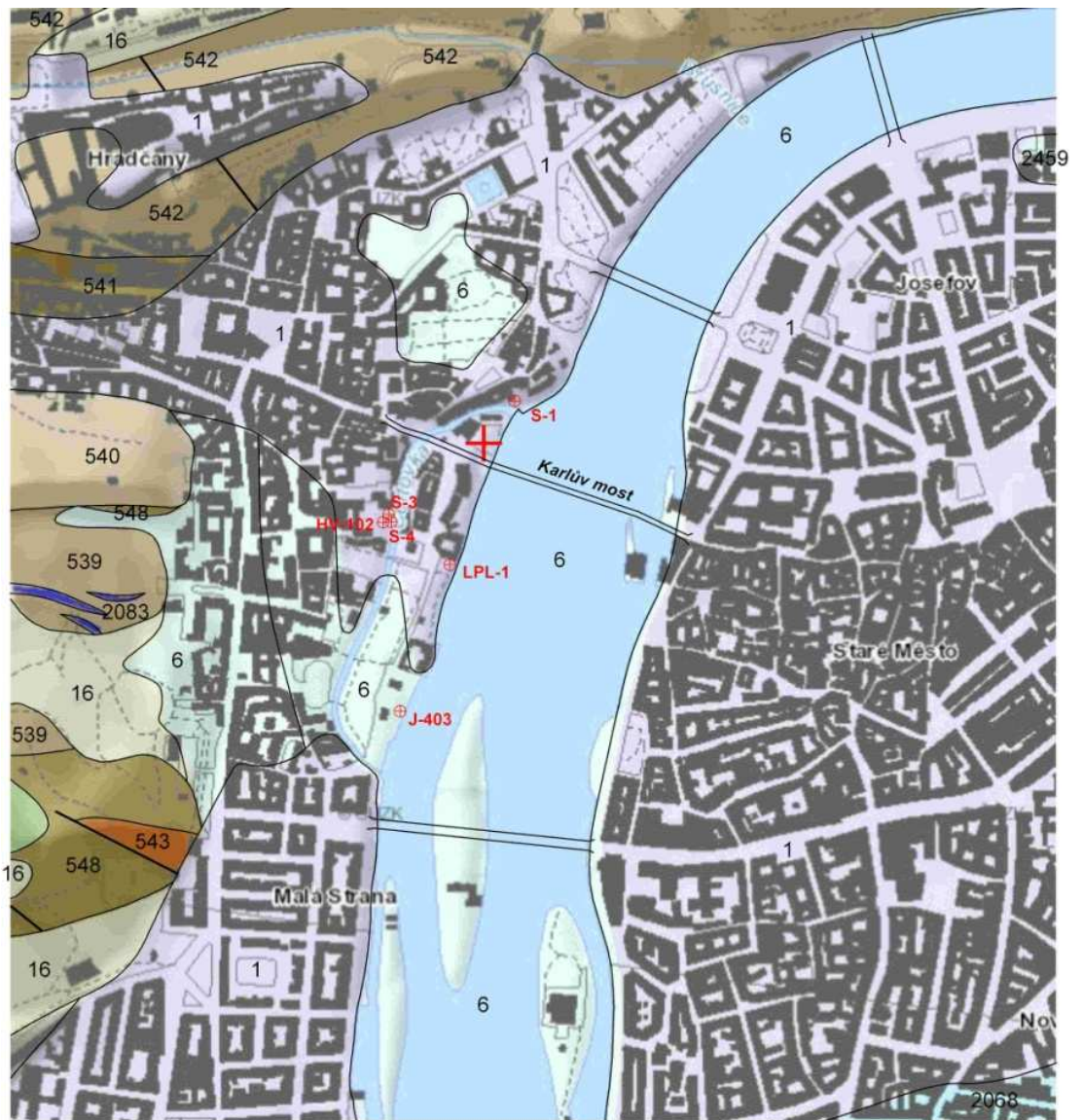
Ostrov Kampa se nachází na levém břehu Vltavy, zaujímá plochu 5,5 ha. Geologické poměry jsou vyznačeny v geologické mapě (**obr. 77**).

Skalní podklad zájmového prostoru tvoří podle vrtného průzkumu zahořanské vrstvy ordovického stáří. Litologicky jsou zastoupeny tmavošedými prachovci a břidlicemi; jejich povrch se pohybuje okolo nivelety 176 metrů. Skalní podloží je překryto pleistocenními písčítými štěrky a písky (terasa VIIc), které sahají zhruba na úroveň 180 m. n.m. Na nich spočívají holocenní drobné písčité štěrky o mocnosti 2 až 4 metry, jejichž povrch se nachází kolem nivelety 183 m. V místě dnešní Čertovky se nacházelo říční rameno, které postupně zaplňovaly jílovotopísčité sedimenty. Nejmladší sedimenty reprezentují mladoholocenní žluté písky až jílovité písky. Nejvyšší partie jejich spodní části (písčité až jílovité náplavy dosahující úrovně kolem 187 m n.m.) se ukládaly až ve vrcholném středověku. Svrchní část mladoholocenních sedimentů (hlinitopísčité náplavy mezi niveletami 187,0 a 187,5 m) pak odpovídá až ranému novověku. V druhé polovině 16. a na počátku 17. století byla morfologie



Kampy výrazně změněna antropogenní činností. Ostrov byl nejen rozšířen, ale byly zpevněny i jeho okraje (Podliska 2013). Terén byl postupně vyrovnán kamenitopísčnými navážkami, které zapříčinily jeho zvýšení o 1,2 až 2,0 m na niveletu cca 188,60 - 189,40 metru.

Střední nadmořská výška vlastní lokality je 189 m n.m., hladina Vltavy je v nadmořské výšce cca 186 m n.m. Vzhledem ke sklonu původního rostlého terénu k vltavskému břehu se v prostoru lokality nachází báze navážek na výrazně nižší úrovni než v centrální části Kampy. To dokládají i popisy vrtů 239 (KV 10) a 502 (V II) z 60. let 20. století (archiv společnosti K+K), které byly situovány při jižním a východním okraji zkoumané plochy (**obr. 78**). V obou vrtech dosahují heterogenní navážky mocnosti 6,5 metru a jejich báze je na úrovni nivelety 182 m. Zatímco svrchní partie navážek obsahují hrubozrnný materiál (úlomky cihel, opuky a břidlic, valouny) do velikosti maximálně 10 cm, spodní část o mocnosti 0,5 až 1,0 m obsahuje opukové kameny o velikosti až 40 cm. Pod navážkami je uložena poloha písku, která nasedá na písčité štěrky s velkými valouny. Podložní břidlice byly v obou vrtech zastíženy až v hloubce 12,8 resp. 12,5 m, tj. v úrovni nivelety 176 m.



**Obr. 77:** Geologická mapa širšího okolí lokality – podle

[http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show\\_map.php?mapa=g50&y=744100&x=1042800&s=1](http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/show_map.php?mapa=g50&y=744100&x=1042800&s=1).

## 5.3 Geofyzikální průzkum

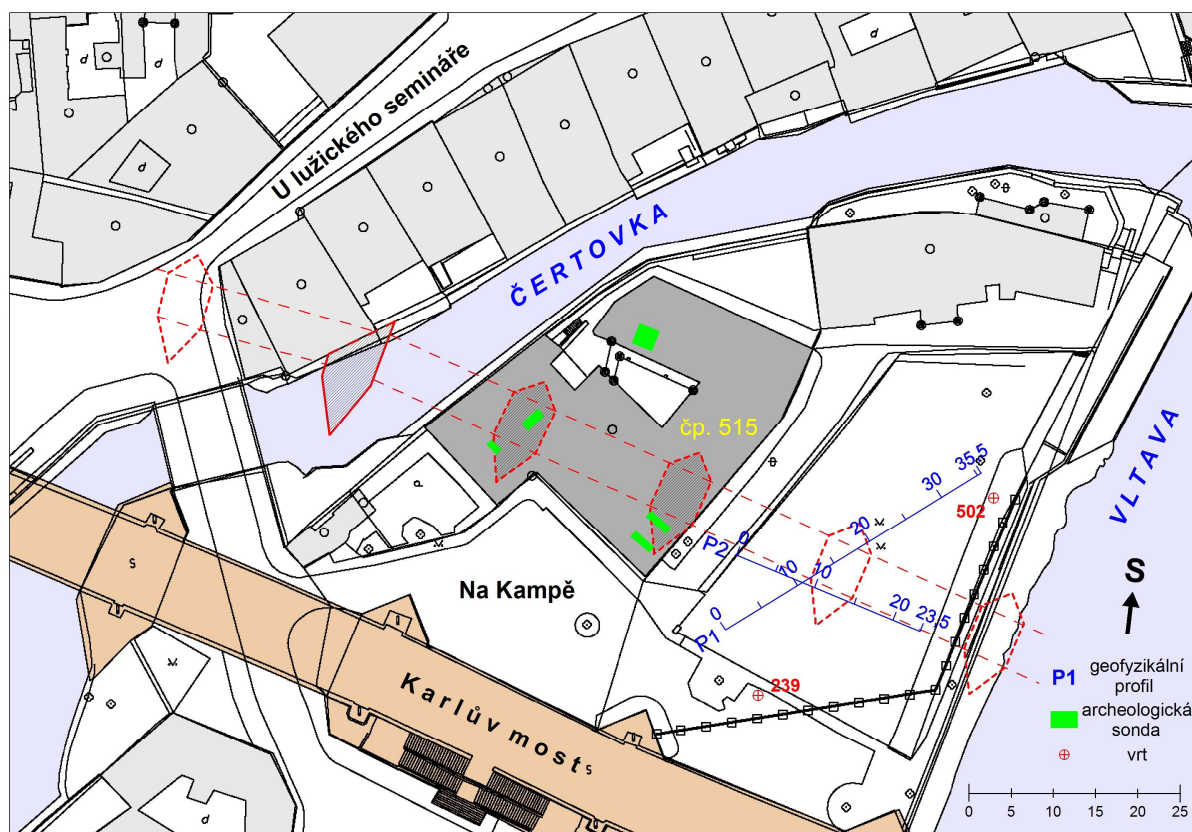
### 5.3.1 Metody a metodika měření

Volba metod vycházela z předpokladu, že objektem průzkumu je masivní relikv zděného pilíře o půdorysu stlačeného šestiúhelníku o rozměrech cca 12 x 5 m (**obr. 78**). Archeologické sondy v domě čp. 515 naznačovaly, že koruna zdiva pilíře se může nacházet v hloubce 3 až 6 metrů a okolní materiál tvoří dílem písčito-jílovité náplavy, dílem heterogenní navážky. V tomto kontextu byly pro realizaci měření zvoleny dvě geoelektrické metody, a to multielektrodová odporová metoda (ERT) a georadarová metoda (GPR). Obě by měly být schopné zjistit relikv zdiva pilíře jako nehomogenitu o vyšším měrném odporu proti okolí.

Terénní měření se uskutečnilo 14.11.2013. Vzhledem k tomu, že zájmový prostor slouží jako dětské hřiště a kolem jednotlivých herních prvků jsou plošné gumotextilní „koberce“, bylo vlastní měření provedeno na dvou profilech situovaných tak, aby přetínaly místo hypotetického pilíře a současně šly mimo uvedené „koberce.“ Profil P1 byl vytyčen ve směru JZ-SV a byl dlouhý 35,5 m, profil P2 o délce 23,5 m probíhal ve směru ZSZ-VJV (**obr. 78**).

Pro multielektrodové měření byla použita geoelektrická aparatura ARES-200E od firmy GF Instruments, s.r.o. Brno, vzdálenost mezi elektrodami byla zvolena 0,5 m. Oba profily byly proměřeny konfigurací Wenner – Schlumberger s hloubkovým dosahem zhruba AB/5.

Pro průzkum georadarovou metodou posloužil přístroj X3M firmy MALÁ, na obou profilech byla realizována dvě měření, a to s anténami o frekvencích 100 MHz a 250 MHz. Přibližný hloubkový dosah pro frekvenci 100 MHz je 5 až 10 m, pro frekvenci 250 MHz 3 až 6 m.



**Obr. 78:** Situace geofyzikálního měření (podklad podle Podliska 2013).

### 5.3.2 Zpracování dat

Data multielektrodové metody byla zpracována pomocí programu Res2DInv (Loke – Barker 1995). Prvním krokem byla grafická kontrola, zda v naměřených hodnotách zdánlivých měrných odporů nejsou některé zjevně chybné. Následně byl pomocí 2D-inverze naměřených dat vypočítán odporový model, který se graficky zobrazuje ve formě odporového řezu. V procesu výpočtu jsou naměřená data srovnávána s odezvou kalkulovaného modelu prostředí. V jednotlivých krocích jsou parametry tohoto modelu iteračním postupem (metodou nejmenších čtverců) upravovány tak, až je dosaženo určitého kritéria shody. Celý výpočetní proces zahrnuje obecně několik iterací, zpravidla 3 až 5. S každou iterací je kalkulována i RMS (root mean square) chyba; která kvantifikuje kvalitu výpočtu. Výsledným grafickým výstupem inverze je odporový řez v linii proměřeného profilu. V něm jsou zobrazeny odporové nehomogenity, tj. vrstvy a polohy s různou litologií a další odporově kontrastní objekty. Řez je podkladem pro následnou geologickou interpretaci. V našem případě byla pro grafický výstup použita 5-tá iterace a RMS-chyba u profilu P1 byla 3,5% a u profilu P2 4,2%.

Pro zpracování dat z georadarového měření byl využit program Reflexw. Vlastní zpracování provedl doc. RNDr. J. Kněz, CSc., za což mu patří můj dík. Posledním krokem při zpracování radarových řezů je transformace vertikální časové osy (ns) na osu hloubek (m). V našem případě byla pro převod na hloubky zvolena střední rychlost šíření signálu  $v = 0,08$  m/ns. Takto upravené grafické výstupy sloužily jako podklad k vlastní interpretaci.

### 5.3.3 Výsledky a interpretace měření

Výsledky průzkumu v grafické formě dokládají řezy v liniích proměřených profilů, zakreslené v měřítku 1 : 300. U obou profilů je schematicky vyznačena hypotetická pozice hledaného pilíře podle archeologického a stavebně-historického kontextu.

- **Profil 1 (obr. 78)**

Podle odporového řezu vykazuje zkoumané prostředí měrné odpory v rozmezí od 10 do 1000 ohmm. Svrchní část sahající do hloubky kolem 0,5 metru charakterizují výrazně proměnlivé odpory, které zřejmě odpovídají recentním heterogenním navážkám. Pod nimi (do hloubky kolem 2,0 metrů) se nachází v jz. části profilu navážkový materiál o středních odporech (60 až 120 ohmm), v sv. části materiál o odporech vyšších (120 až 500 ohmm). V hloubkovém intervalu 2,0 až 5,0 m byla zachycena výrazně vodivá vrstva s odpory pod 70 ohmm, která pravděpodobně odpovídá navážkám s větším podílem jemné frakce, které jsou z větší části nasycené vodou (pod úrovní hladiny Vltavy). Ve střední části profilu v úseku metrů 14 až 21 vystupuje výrazná vodivá struktura s odpory pod 50 ohmm. Tato struktura sahá do hloubky minimálně 7,0 m, do značné míry koinciduje s hypotetickou polohou pilíře (mezi metrů 12 až 19,5) a je lemována zónami zvýšených odporů v blízkosti metrů 12 a 23. Je pravděpodobné, že nějakým způsobem souvisí s hledaným pilířem.

Radarový záznam pro anténu o frekvenci 100 MHz zachycuje téměř vodorovné rozhraní v hloubce kolem 5 až 6 m, které patrně sleduje bázi antropogenních navážek. Nad tímto rozhraním je subhorizontálně uložený materiál s lokálními reflexy v přípovrchové vrstvě (do cca 2,0 m) a násobnými odrazy v metrů 1 až 6, 25 až 27 a 35. Pod uvedeným rozhraním je prostředí s řadou drobných reflexů, které odpovídá písčitému štěrku s velkými valouny. Větší útlum signálu - v celém rozsahu hloubek - charakterizuje úsek metrů 10 až 18, patrně se jedná o efekt vodivějšího materiálu.

Záznam georadaru pro frekvenci 250 MHz nepřinesl žádné další významné poznatky. Kromě rozhraní mezi navážkami a hrubými písčito-šterkovými uloženinami, které probíhá v hloubce kolem 5 m, se opět projevila řada drobných reflexů v přípovrchové vrstvě (zvláště v sv. části profilu), dále drobné mělké reflexy v úseku metrů 2 až 6 a konečně výrazné násobné odrazy v úseku 13 až 15, které indikují rušivý objekt v hloubce kolem 0,5 m.

- Profil 2 (**obr. 77**)

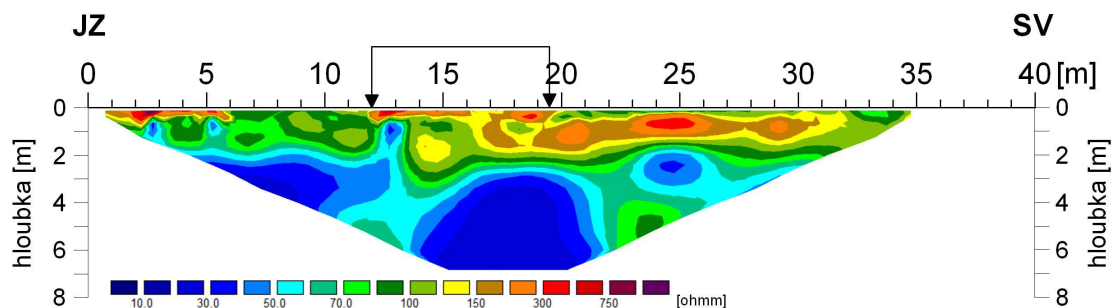
Rozpětí i prostorové rozdělení odporů v řezu podél profilu 2 je podobné situaci na profilu 1. Pod heterogenní mělkou vrstvou navážek se v hloubkovém intervalu 0,5 až 1,5 m nachází zvlněná poloha o relativně vyšších odporech (100 až 500 ohm). Podklad této vrstvy tvoří vodivý materiál s odpory nižšími než 70 ohm, reprezentující vodivé navážky, částečně pod úrovní hladiny Vltavy. V centrální části profilu (metrů 7,5 až 12,5) se opět projevila vodivá elevační struktura, která se částečně překrývá s hypotetickým místem pilíře (9,5 až 14,5). Možná souvislost bude diskutována níže.

Radarový řez odpovídající frekvenci 100 MHz zachytil v hloubce kolem 5,0 m subhorizontální rozhraní mezi navážkami a podložními písčito-šterkovými sedimenty s valouny. Heterogenitu navážkového materiálu dokládá řada lokálních reflexů, z nichž některé indikují dílčí horizontální hrubozrnější polohy (koincidence s vyššími odpory), jiné nehomogenity vyvolávající násobné odrazy, které se projevily v úseku metrů 3 až 7, 9 až 11 a 13 až 14. V podloží zmíněného rozhraní vystupují kontrastněji reflexy v úseku 8 až 15, tedy v prostoru předpokládaného pilíře, a částečně i v úseku 21 až 22.

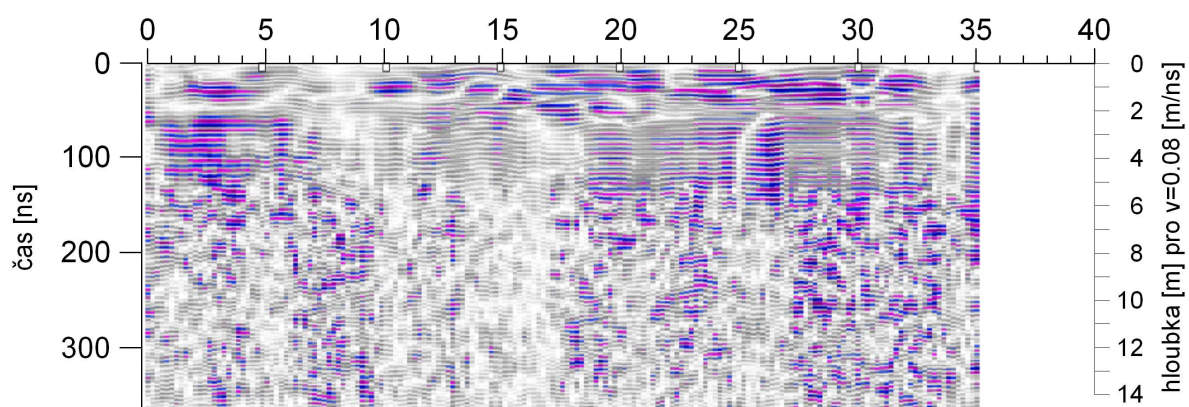
U řezu pro frekvenci 250 MHz stojí za zmínku pouze reflexy situované v navážkách, a to v úsecích 2 až 4, 6 až 8 a 16.

# PROFIL 1

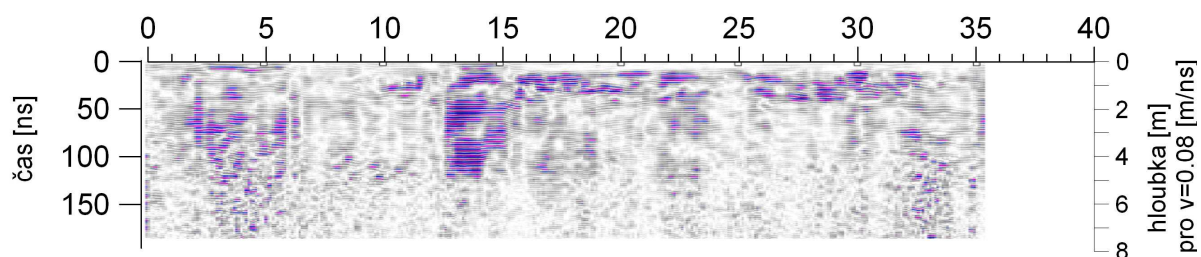
## MULTIELEKTRODOVÁ ODPOROVÁ METODA



## GEORADAR 100 MHz



## GEORADAR 250 MHz

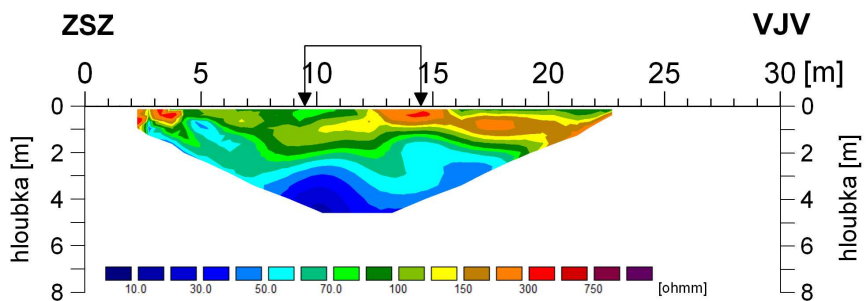


hypotetická poloha pilře,  
podle Podliska 2013

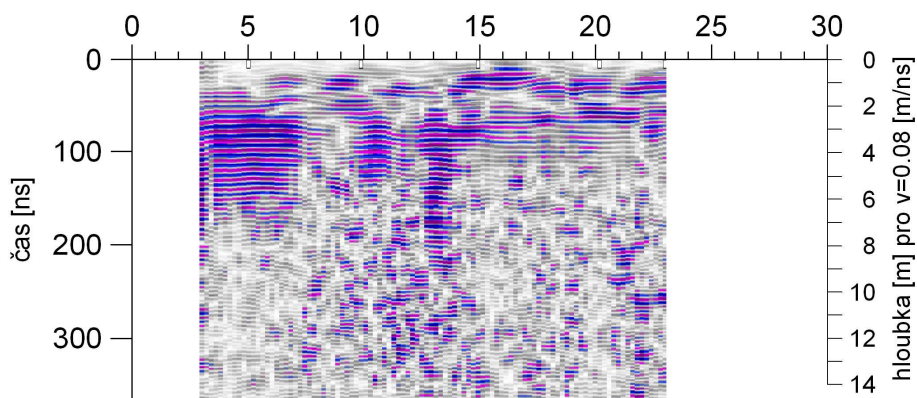
Obr. 76: Profil 1 – výsledky geofyzikálního průzkumu.

## PROFIL 2

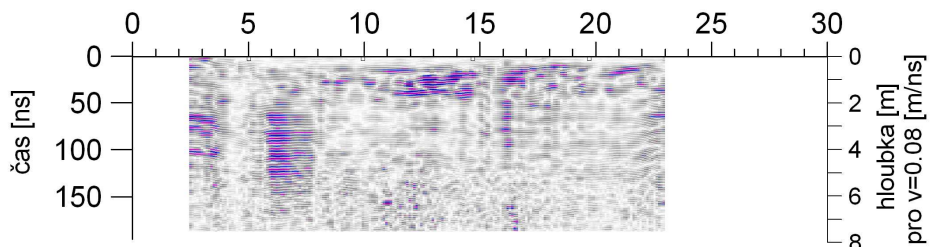
### MULTIELEKTRODOVÁ ODPOROVÁ METODA



### GEORADAR 100 MHz



### GEORADAR 250 MHz



hypotetická poloha piliře,  
podle Podliska 2013

Obr. 77: Profil 2 – výsledky geofyzikálního průzkumu.



## ○ Interpretace

Georadarová metoda umožnila v souladu se známými geologickými údaji jednoznačně lokalizovat rozhraní mezi antropogenními navážkami a podložními holocenními písčitémi štěrky s valouny. Výsledky multielektrodového měření pak přispěly k rozčlenění navážek do několika subhorizontálních vrstev o různých odporech. Z pohledu základního cíle, kterým byla lokalizace zaniklého pilíře Juditina mostu, však nepřinesl průzkum jednoznačné výsledky. Podle kontextu všech dostupných informací lze předpokládat, že vodivá struktura, která byla zachycena v centrální části obou profilů, určitým způsobem souvisí s původním pilířem. Pro tuto interpretaci svědčí pozice této struktury, její rozměry, hloubkový vývoj a koincidující doprovodné indikace podle georadaru: větší útlum signálu na profilu 1 (vodivější materiál) a naopak výraznější reflexy na profilu 2 (kompaktnější materiál). Protože se zděné konstrukce obvykle projevují zvýšenými odpory, je nutné odpovědět na otázku, proč by na místě pilíře mohlo být odporové minimum. Existují dvě alternativní vysvětlení. Buď jde o efekt primárního jílového pláště souvisejícího s konstrukcí roštu a dalších pomocných stavebních prvků, nebo se jedná o sekundární jemnozrnnou výplň reliktní stavební jámy, vzniklé po zkáze Juditina mostu v roce 1342 a následném vybrání kamenného zdiva z prostoru základů pilíře.

## 6. ZÁVĚR

Problematika využití NDT, konkrétně geofyzikálních metod při vyhledávání a zkoumání historického zdiva je velmi mladou disciplínou, která se ve větší míře rozvíjí v posledních desetiletích. Při řešení konkrétních problémů zde nacházejí uplatnění poznatky z užití geofyziky, fyziky, geologie, stavitelství, stavební historie, archeologie, historie a dalších.

Konkrétní průzkum zaměřený na vyhledávání jednoho z pilířů Juditina mostu pak ilustruje šíři poznatků nutných pro validní interpretaci, i důsledky, které vyplývají z rozdílů mezi pravděpodobnými a reálnými výsledky. Analýza výstupů průzkumu vedla k závěru, že pilíř, resp. místo, kde stával, se neprojevil odporovým maximem, ale s největší pravděpodobností odporovým minimem. Příčinou může být druhotné vyplnění „základové jámy“ pilíře jemnozrnnými sedimenty.

## 7. PŘÍLOHY



**Foto 1:** Lokalita Na Kampě (p. č. 744/1): Multielektrodové odporové měření - profil 1 (Z. Jáně)



**Foto 2:** Multielektrodové odporové měření – detail zapojení elektrod (Z. Jáně)



**Foto 3:** Georadarová metoda – profil 2 (Z. Jáně)



**Foto 4:** Georadarová metoda – profil 1 (Z. Jáně)

## 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Binda, L. & Saisi, A. (2009): Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures. In: Proc. NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009, <http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/1005.pdf>.
- Binda, L. (2005): Report on the evaluation at pilot sites – pilot site Villa Litta/Italy. Project Onsiteformasonry, On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, [http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/reports/Summary\\_litta.pdf](http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/reports/Summary_litta.pdf).
- Binda, L., Lualdi, M., Saisi, A., Zanzi, L., Gianinetto, M., Roche, G. (2003): NDT applied to the diagnosis of historic buildings: a case history. 10th International Conference Structural Faults and Repair, London, 1st-3rd July 2003, CD-ROM, 10 str., [http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CJMBeBYwCQ&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F233966492\\_NDT\\_applied\\_to\\_the\\_diagnosis\\_of\\_historic\\_buildings\\_a\\_case\\_history%2Ffile%2F79e4150dc690c4ae01.pdf&ei=fq0yU\\_KZE6mN0AXNooFY&usg=AFQjCNEDL-URO3bIhhdssuK8QdW1bAI37w](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CJMBeBYwCQ&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F233966492_NDT_applied_to_the_diagnosis_of_historic_buildings_a_case_history%2Ffile%2F79e4150dc690c4ae01.pdf&ei=fq0yU_KZE6mN0AXNooFY&usg=AFQjCNEDL-URO3bIhhdssuK8QdW1bAI37w).
- Binda, L., Saisi, A. (1994): State of the Art of Research on Historic Structures in Italy. MS, Dept. of Structural Engineering - Politecnico of Milan, Italy, [http://www.arcchip.cz/w11/w11\\_binda.pdf](http://www.arcchip.cz/w11/w11_binda.pdf).
- Březinová, D. et al. (1996): Praha kamenná. Národní muzeum Praha, Praha.
- Cambridge Archaeology Field Group (2012): Investigating archaeological forms beneath the soil. 10 str., <http://www.cafg.net/docs/articles/GeophysicsPrimer.pdf>.
- Carpinteri, A., Lacidogna, G. (2006): Damage monitoring of an historical masonry building by the acoustic emission technique. Materials and Structures, Vol. 39, str. 161-167, [http://staff.polito.it/alberto.carpinteri/papers/CARPINTERI\\_2006\\_N.412\\_MS.pdf](http://staff.polito.it/alberto.carpinteri/papers/CARPINTERI_2006_N.412_MS.pdf).
- Catarino, L. (2012): Global Heritage and Sustainability: Geological, Cultural and Historical. ppt-prezentace, University of Coimbra, [http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/global-heritage-and-sustainability-geological-cultural-and-historical-gloge/contenidos/in\\_situ\\_LC.pdf](http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/global-heritage-and-sustainability-geological-cultural-and-historical-gloge/contenidos/in_situ_LC.pdf).
- Cihla, M. & Panáček, M. (2006a): Konstrukční a technologické aspekty středověkého mostu v Roudnici nad Labem v porovnání s Juditíným a

- Karlovým mostem v Praze a kamenným mostem v Písku. In: Dějiny staveb – sborník příspěvků z konference, Plzeň, str. 213-237.
- Cihla, M. & Panáček, M. (2006b): Středověký most v Roudnici nad Labem. Průzkumy památek, Vol. 13, 2, str. 3-34.
  - Colla, C., Das, P. C., McCann, D., Forde, M. C. (1997): Sonic, electromagnetic and impulse radar investigation of stone masonry bridges. NDT&E International, Vol. 30, issue 4, str. 249–254, [http://ac.elscdn.com/S0963869596000679/1-s2.0-S0963869596000679-main.pdf?\\_tid=6f2bc9ce-d6c0-11e3-b745-00000aab0f02&acdnat=1399560954\\_c21c2c77375ee56c2909ea2f5bbc3ed7](http://ac.elscdn.com/S0963869596000679/1-s2.0-S0963869596000679-main.pdf?_tid=6f2bc9ce-d6c0-11e3-b745-00000aab0f02&acdnat=1399560954_c21c2c77375ee56c2909ea2f5bbc3ed7).
  - Čarek, J. (1947): Románská Praha. Universum, Praha.
  - David, A., Linford, N., Linford, P. (2008): Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation. English Heritage, Swindon. 60 str., <http://www.english-heritage.org.uk/publications/geophysical-survey-in-archaeological-field-evaluation/geophysics-guidelines.pdf>.
  - Davis, J. L. & Annan, A. P. (1989): Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical prospecting, Vol. 37, str. 531-551.
  - Demaus, R. (b.d.): Non-Destructive Investigations, <http://www.buildingconservation.com/articles/nondestr/nondestr.htm>.
  - Dohnal, J., Jáně, Zd., Kněz, J., Valenta, J., Vilhelm, J., Zima, L. (2004): Hrad Nižbor – poznatky komplexního geofyzikálního průzkumu v letech 2000 – 2002. Castellologica Bohemica, 9, str. 291-304.
  - Dohnal, J., Jáně, Zd., Vilhelm, J. (1997): Geofyzikální průzkum pro archeologické účely v prostoru nádvoří zámku v Moravské Třebové. MS, PřF UK Praha, Praha, 9 str.
  - Dokumentace k vrtaným sondám č. 239 a 502. MS, archiv společnosti K+K průzkum, s.r.o. Praha.
  - Doležal, J., Hašek, V., Uhmán, J. (1975): Fyzikální vlastnosti hornin v oblasti karpatské čelní předhlubně a flyše na jižní Moravě. Sborník geologických věd – užitá geofyzika, Vol. 13, Praha.
  - Dragoun, Zd. (1989): K otázce pilířů Juditina mostu. Archaeologia Pragensia, 10, Praha, str. 113-131.
  - Ernenwein, E. G. & Hargrave, M. L. (2009): Archaeological Geophysics for DoD Field Use. Project 200611: Streamlined Archaeogeophysical Data Processing and Integration for DoD Field Use, 109 str, <http://www.cast.uark.edu/assets/files/PDF/ArchaeologicalGeophysicsforDoDFieldUse.pdf>.

- Fassbinder, J. W. E. (2009): Global survey of the frontiers of the Roman Empire in Southern Germany (UNESCO World Heritage Site). Archeosciences, 33, Supplementum, str. 55-58, <http://archeosciences.revues.org/1277>.
- Flint, R. C., Jackson, P. D., McCann, D. M. (1999): Geophysical imaging inside masonry structures. NDT&E International, Vol. 32, issue 8, str. 469-479, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869599000249>.
- Hašek, V., Měřínský, Z. (1991): Geofyzikální metody v archeologii na Moravě, Vlastivědná společnost v Brně, Brno, 190 str.
- Hecht, S. (2010): Geophysical prospection at Tel Azekah by means of Electrical Resistivity Tomography (2D/3D), <http://archaeology.tau.ac.il/azekah/expedition/2-uncategorised/185-cont-52>.
- Hennen, Ch., Maierhofer, Ch. (2005): Investigation of wall structures at the Wartburg Palas, Eisenach, poster. Project Onsiteformasonry, On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, [http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/BAM\\_Wartburg.pdf](http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/BAM_Wartburg.pdf).
- Horká J. (2007): Zdivo a jeho historický vývoj po současnost. MS, VUT Brno, fakulta stavební, Brno, 5 str.
- Hronek, J., Dohnal, J. (2010): Poznatky komplexního geofyzikálního průzkumu předhradí hradu Libštejna. Castellologica Bohemika, 12, str. 305-318.
- <http://anugrahinstrumen.itrademarket.com/3486713>.
- [http://iemn.univ-lille1.fr/base-web/recherches/instru\\_ang.htm](http://iemn.univ-lille1.fr/base-web/recherches/instru_ang.htm).
- <http://pzp.de/1/technology/suszeptibility.html>.
- [http://sydney.edu.au/arts/archaeology/apg/methods\\_instruments/thermal.shtml](http://sydney.edu.au/arts/archaeology/apg/methods_instruments/thermal.shtml).
- [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Equipment.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Equipment.htm).
- <http://www.armadale.org.uk/phototech03.htm>.
- [http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html).
- [http://www.epandt.com/us/produits\\_ea\\_us.html](http://www.epandt.com/us/produits_ea_us.html).
- [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Equipment.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Equipment.htm).

- [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Soource%20Location.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Soource%20Location.htm).
- <http://www.radar-solutions.com/html/methods/Resistivity.html>.
- Jansohn, R., Kroggel, O., Ratmann, M. (1997): Detection of Thickness, Voids, Honeycombs and Tendon Ducts Utilising Ultrasonic Impulse-Echo-Technique. In: NDTnet - April 1997, Vol. 2, No. 4, <http://www.ndt.net/ut0497.htm>.
- Kuna, M., Beneš, J., Dreslerová, D., Gojda, M., Hrubý, P., Křivánek, R. (2004): *Nedestruktivní archeologie*, Academia, Praha, 555 str., ISBN 80-200-1216-8.
- Leucci, G., Cataldo, R., De Nunzio, G. (2007a): Assessment of fractures in some columns inside the crypt of the Cattedrale di Otranto using integrated geophysical methods. *Journal of Archaeological Science*, Vol. 34, issue 2, str. 222-232. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440306000963>.
- Leucci, G., Greco, F., De Georgi, L., Mauceri, R. (2007b): Three-dimensional image of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the castle of Occhiola (Sicily, Italy). *Journal of Archaeological Science*, Vol. 34, issue 2, str. 233-242, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440306000975>.
- Livingston, R. A. (2001): *Nondestructive Testing of Historic Structures*. *Archives and Museum Informatics*, Vol. 13 (1999/2001), str. 249–271, <http://faculty.ksu.edu.sa/naserz/DocLib/Nondestructive%20Testing%20of%20Historic%20Structures.pdf>.
- Loke, M. H. - Barker, R. D. (1995): Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, str. 1682-1690.
- Maierhofer, Ch. (2005a): Applications of ultrasonics for the investigation of historic masonry, poster. Project Onsiteformasonry, On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, [http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/BAM\\_Ultrasound met hod.pdf](http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/BAM_Ultrasound_met hod.pdf).
- Maierhofer, Ch. (2005b): Report on the evaluation at pilot sites – pilot site Wartburg/Germany. Project Onsiteformasonry, On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, [http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/reports/Summary\\_Wartburg.pdf](http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/reports/Summary_Wartburg.pdf).



- Maierhofer, Ch., Roellig, M. (2009): Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures. In: Proc. NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009, <http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/17.pdf>.
- Maierhofer, Ch., Wöstmann, J., Hennen, Ch. (2003): Non-destructive investigation of complex historic masonry structures with impulse radar. In: International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/p063/p063.htm>.
- Maierhofer, Ch., Wöstmann, J., Hennen, Ch. (2005): Non-destructive investigation of complex historic masonry structures with impulse radar. Project Onsiteformasonry, On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, [http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/p063\\_poster.pdf](http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/p063_poster.pdf).
- Maierhofer, Ch., Ziebolz, A., Köpp, Ch. (2003): ONSITEFORMASONRY – A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry. In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, 14 str., <http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/papers/v070.pdf>.
- Mareš, St. et al. (1977): Úvod do užité geofyziky, SNTL, Praha.
- Mareš, St. et al. (1996): Geofyzikální metody v ochraně a tvorbě životního prostředí, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Frýdek - Místek, 139 str., ISBN 80-7078-365-6.
- Marchisio, M. (2005a): Geoelectric methods, poster. Project Onsiteformasonry, On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, [http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/UNUPI\\_Geoelectric\\_method.pdf](http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/UNUPI_Geoelectric_method.pdf).
- Marchisio, M. (2005b): Micro-seismic methods, poster. Project Onsiteformasonry, On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. [http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/UNUPI\\_Seismic\\_method.pdf](http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/posters/UNUPI_Seismic_method.pdf).
- Marchisio, M., D'Onofrio, L., DeFalco, A., Frediani, L., Guidoni, F. (2003): New tomographic techniques (micro-seismical and geoelectrical) for the non-destructive testing on masonry structures. In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, 11 str, <http://www.onsiteformasonry.bam.de/Results/papers/v071.pdf>.

- McCann, D. M., Forde, M. C. (2001): Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT&E International*, Vol. 34, str. 71–84,  
[http://scholar.google.cz/scholar\\_url?hl=cs&q=http://www.researchgate.net/publication/222394940\\_Review\\_of\\_NDT\\_methods\\_in\\_the\\_assessment\\_of\\_concrete\\_and\\_masonry\\_structures/file/72e7e525c7f405bc0d.pdf&sa=X&scisig=AAGBfm2Z3zf3HF3jBf-HZy8R8vU-gIsVEg&oi=scholar&ei=BaMyU8bmO8if0wXz8YDICQ&ved=0CCsQgAMoAjAA](http://scholar.google.cz/scholar_url?hl=cs&q=http://www.researchgate.net/publication/222394940_Review_of_NDT_methods_in_the_assessment_of_concrete_and_masonry_structures/file/72e7e525c7f405bc0d.pdf&sa=X&scisig=AAGBfm2Z3zf3HF3jBf-HZy8R8vU-gIsVEg&oi=scholar&ei=BaMyU8bmO8if0wXz8YDICQ&ved=0CCsQgAMoAjAA).
- Merhoutová, A. (1971): *Raně středověká architektura v Čechách*, Academia, Praha.
- Milovanović, B. (b.d.): *Nondestructive Testing in Historical Buildings*, poster. Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb,  
[https://bib.irb.hr/datoteka/564561.NDT\\_masonry\\_buildings\\_GPR\\_Thermography\\_Ultrasonics\\_Acoustic\\_emission\\_flatjack.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/564561.NDT_masonry_buildings_GPR_Thermography_Ultrasonics_Acoustic_emission_flatjack.pdf).
- On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings (2005), In: *Project Onsiteformasonry*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Germany), Florence.
- Papadopoulos, N. G., Tsokas, G. N., Dabas, M., Myeong-Jong, Y., Tsourlos, P. (2009): 3D Inversion of Automated Resistivity Profiling (ARP) Data. *Mémoire du sol, espace des hommes*, 33, Supplementum, str. 329-332,  
<http://archeosciences.revues.org/1790>.
- Podliska, J. (2013): *Nálezová zpráva. Záchranný archeologický výzkum NPÚ ú.o.p. v hl.m. Praze, Praha 1 – Malá Strana: Na Kampě 8, čp. 515, ppč. 742/7, MS, Národní památkový ústav, ú.o.p. v hl.m. Praze*.
- Porto da, F., Valluzzi, M. R., Modena, C. (2003): Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings. In: *International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003*, <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v072/v072.htm>.
- Sala, R., Garcia, E., and Tamba, R. (2012): *Archaeological Geophysics - From Basics to New Perspectives*. Archaeology, New Approaches in Theory and Techniques, InTech, 35 str., ISBN: 978-953-51-0590-9,  
<http://www.intechopen.com/books/archaeology-newapproaches-in-theory-and-techniques/archaeological-geophysics-from-basics-to-new-perspectives>.
- Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F. I., Novo, A. (2011): GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain). *NDT&E International*, Vol. 44, issue 1, str. 8-12.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869510001052>.

- Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F. I., Novo, A. (2012): Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools. *Construction and Building Materials*, Vol. 29, str. 458-465, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811005502>.
- Solla, M., Lorenzo, H., Riveiro, B., Rial, F. I. (2011): Non-destructive methodologies in the assessment of the masonry arch bridge of Traba (Spain). *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, issue 3, str. 828-835, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630710002414>.
- Státníková, P., Šefců, O., Dragoun, Zd. (2013): Kamenný most v Praze. Muzeum hlavního města Prahy, Praha, ISBN 978-80-85394-95-5.
- Svoboda, L., Bažantová, Zd., Myška, M., Novák, J., Tobolka, Zd., Vávra, R., Vimrová, A., Výborný, J. (2013): Stavební hmoty. Praha, 950 str., on line: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>, ISBN 978-80-260-4972-2.
- Syrový, B., Pechar, J., Pošmourný, J., Sklenář, K., Syrový, P., Šturma, J. (1977): *Architektura – svědectví dob*, SNTL, Praha, 447 str.
- Šimek, R. (1970): Podrobná inženýrsko-geologická mapa v měřítku 1 : 5000, list mapy, Praha 7-1. Praha.
- Škabrada, J. (2010): *Konstrukce historických staveb*, Argo, Praha, 397 str.
- Thermography. West Lothian Archeology.org.uk, <http://www.armadale.org.uk/phototech03.htm>.
- Uhmann, J. (1973): Fyzikální vlastnosti hornin v úseku STŘED. Výzkum hlubinné stavby v Karpatské neogenní předhlubni a ve flyšovém pásmu Karpat. MS, Geofond Praha.
- Valluzzi, M. R., da Porto, F., Casarin, F., Monteforte, N., Modena, C. (2009): A contribution to the characterization of masonry typologies by using sonic waves investigations. In: *Proc. NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009, <http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/134.pdf>.
- Witzany, J. (2009): Stavebně technický stav a rekonstrukce Karlova mostu, <http://web.archive.org/20070205082353/karluvmost.cvut.cz/index.php?view=publikace&language=czech&current=stavebne+technicky+stav&page+number=1>.