

# Komplex geofizikai kutatások a Budai Várban<sup>1</sup>

PATTANTYÚS-Á. MIKLÓS, HERMANN LÁSZLÓ, PRÓNAY ZSOLT, TÖRÖS ENDRE<sup>2</sup>

*A budai Várhegy alapközete márga, amelyet mészkő és a feltalaj takar. A történelmi idők folyamán igen sok üreget, pincét vájtak ebbe a puhább anyagba. A mai időkre már egy komplex, háromszintű labirintus rendszer alakult ki a felszínen lévő történelmi épületek alatt — van is olyan mondás, hogy egy egész föld alatti város létezik a Budai Vár alatt. Ezek a pincék igen sok esetben mára már nagyon rossz állapotban vannak. A járatok egy része nincs is feltárva, sok helyen egy-egy később épített falazás zárja el a folytatást, a legtöbbjük törmelékkel van tele. Emiatt a várban igen gyakori a felszíni süllyedés vagy omlás.*

*A geofizika feladata az utak, járdák és parkok alatti feltáratlan pincék megkutatása annak érdekében, hogy ez alapján tervezhető legyen a föld alatti feltárás és megerősítés. A kutatásnak gyakran régészeti célja is van, például amikor a régi várfalak kimutatása a feladat. A meglévő térképek jó része pontatlan, illetve egymásnak ellentmondó, ezért a geofizika feladata volt a föld alatti (több, mint 10 m mélyen elhelyezkedő) pontok azonosítása is a felszínen.*

*A felsorolt sokféle feladat megoldására szeizmikus reflexiók, refrakciók és tomográf módszert, a földradart és különböző tekercs-elrendezésű elektromágneses méréseket alkalmaztunk. A mészkő aljzat változását szeizmikus reflexióval kutattuk. A pincék és üregek kimutatására szeizmikus és radar módszert használtunk, de a földradar eredmények értelmezésénél problémát jelent, hogy a különböző vízcsövek és közművek által okozott reflexiók interferálnak a hasznos jelekkel.*

**M. PATTANTYÚS-Á., L. HERMANN, ZS. PRÓNAY, E. TÖRÖS: Combined geophysical investigation on Buda Castle Hill**

*Castle Hill in Budapest is formed of marl covered by limestone and topsoil. Many of the caves and cellars in the area were deepened and excavated into this soft material during historical times. Nowadays, a complex, three-level labyrinth exists under the ancient buildings — sometimes it is said that there is an underground town beneath the Castle. In many cases, the condition of these cellars is extremely poor. Some of the galleries are unexplored, many of them are closed off by walls built later, and/or filled with debris. Surface subsidence or collapse are frequent events at these places.*

*The task of geophysics is to investigate the unexplored cellars beneath the roads, pavements and parks in order to guide the underground excavation and reinforcing activities. Frequently, prospecting is needed for archaeological purposes, such as tracing the remains of ancient walls. Since the existing site maps of cellars tend to be incorrect and contradictory, identification of underground points (at a depth of more than 10 m) on the surface could also be a geophysical prospecting task.*

*Seismic reflection, refraction and tomography, ground penetrating radar (GPR) and electromagnetic measurements with several transmitter-receiver coil configurations are the geophysical methods utilised for these complex tasks. The relief of the limestone bedrock was prospected by seismic reflection profiles. Responses of cellars and caves were investigated by seismics and GPR but the reflections of the latter are superimposed on and interfered with the reflections of water pipes and other public utilities.*

## 1. Földtani leírás

A Budai Várhegy természeti és mesterséges kinésével felbecsülhetetlen értéket képvisel mind a főváros, mind a nemzet számára, ezenkívül a világörökségnek is része. Az itt található értékek közé sorolhatók a barlangok és mélypincék ugyanúgy, mint a várfalak és támfalak, a lakóházak és a paloták, és mélyépítési szempontból mindezek szoros kapcsolatban vannak egymással — és persze a teljes közműhálózattal is. Ennek az összetettségnek a szem előtt tartása a legfontosabb a geotechnikai

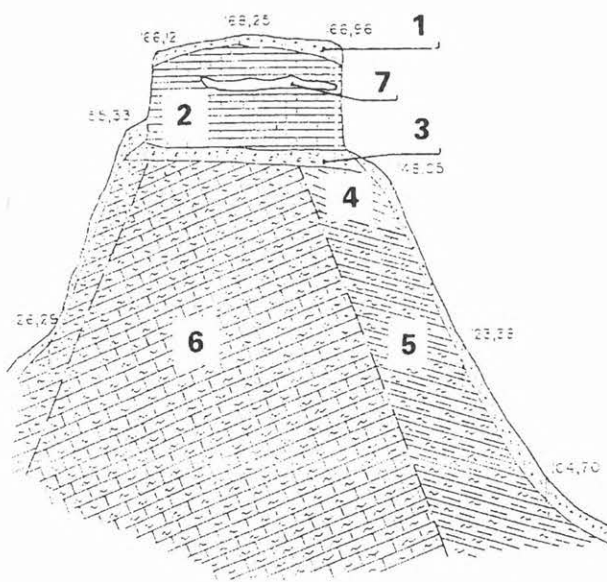
vizsgálatoknál, és ez befolyással van a geofizikai kutatásra is.

Az üledékes kőzetekből álló hegy fő tömege a felső eocén kori budai márga, amelyre több helyen agyag települt (1. ábra). A pleisztocén korban működött melegvíz-forrásokból lerakódott édesvízi mészkő megvédte a hegyet a lepusztulástól. Ez alatt a „mészkő-sapka” alatt — 7–11 m mélységben — számos barlangpince, illetve pincerendszer található, többnyire a puhább márgába vájva.

A barlangok eredetileg a mészkő alsó síkjánál az alulról feltörő hévíz üregképző hatására jöttek létre. Később a középkori háztulajdonosok mélypincéikből megnyitották az üregeket, és ezeket egymással összekötve több kilométer hosszú labirintus alakult

<sup>1</sup> Poszter szekció keretében bemutatásra került az 56. EAEG-konferencián Bécsben, 1994-ben. A kézirat beérkezett 1997. március 14-én

<sup>2</sup> Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.



1. ábra. A Budai Vár földtani felépítése. 1: feltalaj, feltöltés, 2: édesvízi mészkő (pleisztocén), 3: alluviális pleisztocén hordalék, 4: kiscelli agyag (középső oligocén), 5: tardi márga (alsó oligocén), 6: budai márga (felső eocén), 7: üreg, barlang

Fig. 1. Geological structure of Buda Castle Hill. 1: debris, 2: limestone (Pleistocene), 3: alluvial deposit (Pleistocene), 4: clay (Middle-Oligocene), 5: argillaceous marl (Lower-Oligocene), 6: marl (Upper-Eocene), 7: cavity

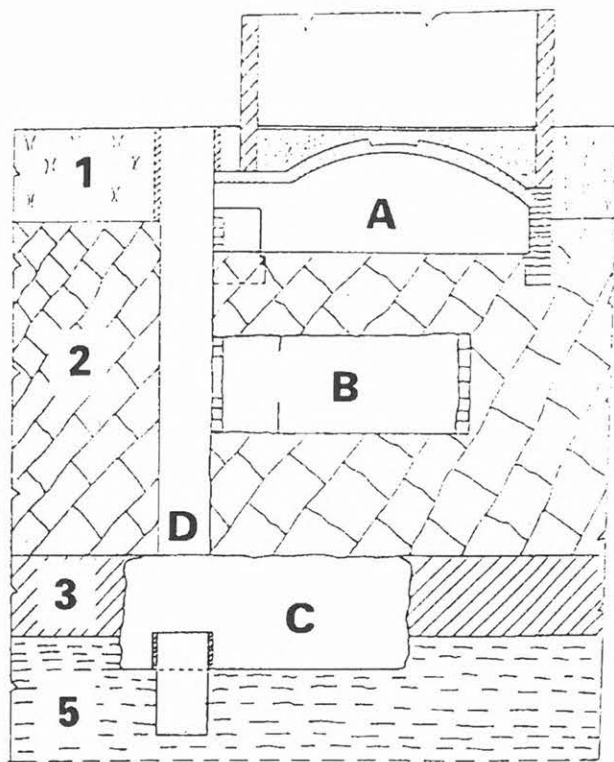
ki. Jelenlegi ismereteink alapján 52 kisbarlang maradt egymástól független. A barlangok összes alapterülete meghaladja a 18 000 m<sup>2</sup>-t és mára egy háromszintű rendszert képeznek a pincékkel együtt (2. ábra).

## 2. Kihívás a geofizika számára

Ilyen összetett és sokrétű feladat megoldására több geofizikai módszer bevetésére van szükség, ezenkívül fel kell használni az összes létező egyéb információt, mint pl. történelmi dokumentumok, egykori térképek a beépítésről vagy a pincékről, és a jelenlegi közműtérképek. A kihívást az jelenti, hogy városi és zajos környezetben, komoly gyalogos- és gépkocsiforgalom mellett, utcaköveken vagy aszfalton kell ún. terepi geofizikai méréseket végezni.

A geofizikai kutatással megoldandó feladatok a következők:

- Üres vagy többé-kevésbé feltöltött, második szintű (2. ábra) pincejáratok kutatása közterületen végzett mérésekkel (utcákon, járdán vagy tereken),
- Egy sarokbástya (rondella) belső szerkezetének kutatása, ezen belül régebbi várfalak vagy feltételezett üreg kimutatása,



2. ábra. A pincék és barlangok elhelyezkedése. 1–5: ld. 1. ábra. A: az épületek felső szintű, épített pincéi, B: az épületek középső szintű, vájt pincéi, C: részben természetes barlangpincék, D: kút

Fig. 2. Location of cellars and caves. 1–5: see Fig. 1. A: upper cellar of houses (built), B: lower cellar of houses (exploited), C: cave-cellar (natural formation), D: well

— Föld alatti pontok helyének gyors azonosítása a felszínen mérésekkel, mivel a geodéziai felmérés túl sok időt venne igénybe vagy majdnem lehetetlen.

Ezekre a célokra a szeizmikus és az elektromágneses módszerek különböző fajtáit alkalmaztuk az alábbiak szerint:

- Az aljzat változásait szeizmikus reflexiós és refrakciós mérésekkel követtük.
- Az üregeket földradar szelvényezéssel és szeizmikus felszíni tomográfiával kutattuk.
- A földalatti pontok felszíni azonosítását különböző tekercs-elrendezésű elektromágneses mérésekkel végeztük.
- A rondella belső szerkezetét fúrólukak, valamint fúróluk és a fal közötti szeizmikus átvilágítással, a felszínről pedig földradarral kutattuk.

Ki kell hangsúlyozni, hogy ezekben a speciális esetekben nem volt lehetséges a nyersanyagkutatásban megszokott normál geofizikai módszerek rutinszerű alkalmazása: minden esetben találékony-ságra volt szükség a megfelelő módszer és elrendezés megtervezéséhez. A mérések jó részét éjszaka

kellett végezni. Az adatgyűjtés és az értelmezés kitarító, gondos és körültekintő munkát igényelt, a feldolgozáshoz sok esetben egyedi, különleges programokat kellett kidolgoznunk.

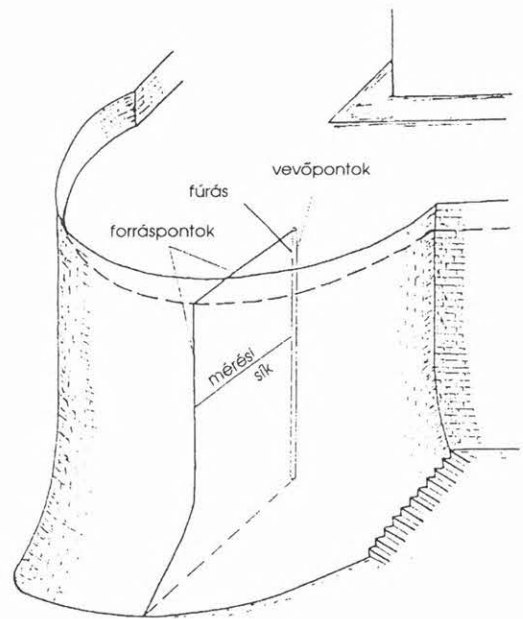
### 3. Szeizmikus tomográfia — Esztergomi rondella

Szeizmikus tomográfia módszerével kutattuk a Budai Vár egyik sarokbástyáját, az Esztergomi Rondellát. A rondella kb. 40 m átmérőjű, magassága, illetve belsejének mélysége 11 m. Vastag téglafallal van körülveve, a felszínén néhány ülőpadon kívül csupán egy zászlórúd található hatalmas betonlapzattal. A kutatás célja a belső szerkezet, a „tartalom”: régebbi építésű falakat, üregeket feltételeztek 5–10 méteres mélységben egy korábbi részleges feltárás alapján.

Végül is komplex geofizikai kutatást végeztünk: a földradar módszert a felszínközeli tartomány vizsgálatára, a szeizmikus refrakciót az aljzat követésére, a fúrólukak, valamint fúróluk és az oldalfal közötti szeizmikus tomográfiát pedig a belső szerkezet leképezésére alkalmaztuk. A 3. ábra ez utóbbi mérés kivitelezésének vázlatát mutatja. A tomografikus mérésekhez két fúróluk mélyült a rondella középső részén, amelyek rétegsora szintén információt jelentett a belső szerkezetet illetően. A továbbiakban csupán a szeizmikus tomográfia eredményeit ismertetjük részletesebben, mivel a többi módszer nem adott jelentős többlet információt a belső szerkezetre.

A tomografikus méréseket a következőképp végeztük: a geofonok (hidrofonok) a fúrólukban voltak elhelyezve fűzérben, a forrás pedig kalapácsütés volt fél méterenként 8 vonal mentén először a felszínen, majd lefelé a várfal külső részén (3. ábra). A mérőműszer a rugalmas hullámok beérkezési időit rögzítette.

A mérési adatok feldolgozásához egy PC-re kifejlesztett sebesség-tomográf programot használtunk. A program saját fejlesztésű, a SIRT-algoritmuson alapszik a beérkezési idők görbült sugárutas időmező modellezésével. A módszer lényege, hogy a kezdeti modell sebességmezőjéből számított időket összehasonlítja a mért beérkezési időkkel. A következő lépésben az algoritmus megváltoztatja a sebességmezőt olyan irányban, hogy az időeltérések csökkenjenek. Ez a lépés iterációval sokszor megismétlődik. A művelet konvergens, így — néhány módosítás után — a számított sebességmező egyre jobban megközelíti a valóságos (mért) sebesség eloszlást.



3. ábra. A rondella fala és egy fúróluk közötti szeizmikus átvilágítás mérési vázlat

Fig. 3. Sketch of the seismic transmission measurement carried out between the wall-face of the roundel and one borehole

A 4. ábra a kezdeti modell hullámterjedési sugárújtait mutatja (A), valamint a fenti iteráció eredményeképp kapott végleges sebesség-eloszlás térképét (B) az egyik fúróluk és a fal egy függőleges vonalának síkjában. A modellt a már említett részleges feltárás alapján állítottuk fel, amely egy régebbi falmaradványt talált. E tomografikus mérések eredményeképp néhány mérési síkban egyértelműen elkülöníthető volt egy nagyobb sebességű zóna (4. ábra: B), amely a középkorból származó régebbi fal maradványaira utalhat, míg más mérési síkokban ilyen anomália nem volt tapasztalható. Ily módon az adott mérési síkokban sikerült a falmaradványt kimutatni.

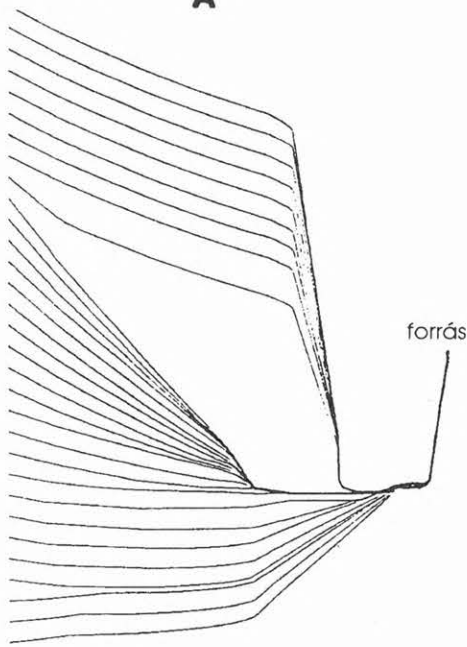
### 4. Földradar mérések — üregkutatás

Az üregek és pincék feltárása és állagmegóvása már évtizedek óta folyik a Budai Várban. A geofizikai mérések célja ebben a témában ismeretlen pincék felkutatása a közterületek alatt, valamint a bizonytalan vagy feltételezett pincék helyének meghatározása a föld alatti feltáró munkát elősegítendő.

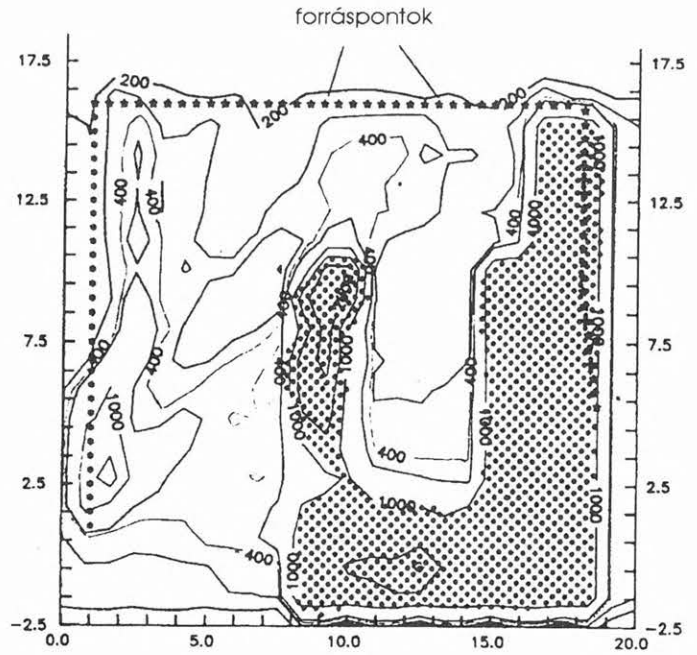
A földradar módszer közismerten alkalmas a felszínközeli szerkezet, valamint eltemetett tárgyak kutatására. Az üregek és pincék általában jellegzetes alakú reflexiót okoznak a radarfelvételen. Ugyanakkor más eltemetett objektumok is (pl. szerelőaknák, csövek, kábelek, nagyobb kövek) hatása

mérőpontok

**A**



**B**



4. ábra. A: Az oldalfal és egy fúróluk közötti átvilágítási mérés kezdeti sugárút-modellje egy forrásponttól a fúrólukban lévő geofonokig. A kezdeti feltétel egy nagyobb sebességű falmaradvány jelenléte. B: Az iterációval számított végső sebességtérkép (izovonalak: m/s)

Fig. 4. A: Initial ray tracing of seismic transmission measured between a borehole and the wall-face. Geophones are in the hole and only one shot-point is considered. The initial consumption was the presence of a wall with higher velocity. B: The final velocity field of the iteration (isolines are given in m/sec)

is megjelenik a felvételen. Mindezek a hatások egymásra szuperponálódva, vagy jobban mondva egymással interferenciában észlelhetők. Ezeken felül — lévén a radar elektromágneses műszer — a mért jelekre az összes, a közeli környezetben lévő EM zajforrás is hatással van.

A földradar mérések végterméke egy reflexiós időszelvény, amely együttesen tartalmazza az összes, előzőekben említett hatást. A zaj és a nem kívánt hatások városi környezetben sokszor túl erősek is lehetnek, mivel az antennákat nem lehet tökéletesen árnyékolni. Emiatt a pincék kutatásához a radar szelvényezés mellett legtöbbször szeizmikus reflexiós (vagy felszíni tomografikus) méréseket is alkalmazunk.

A földradar méréseket a pulseEKKO 100 típusú (Sensors & Software Inc., Kanada) berendezéssel 100 MHz frekvencián végeztük. Ennek a berendezésnek a dipól antennái nem árnyékoltak, így a mérés folyamán elengedhetetlen az igen gondos adatgyűjtés és értelmezés.

Az 5A. ábra egy, a várban mért tipikus radar-szelvényt mutat. Bár a szelvény igen sok külső hatást tartalmaz, mégis sikerült a mérési vonalat keresztező két pince hatását elkülöníteni. Ehhez az értelmezéshez felhasználtuk a közműtérképet és a pincék feltételezett helyének térképét. Az igen sok

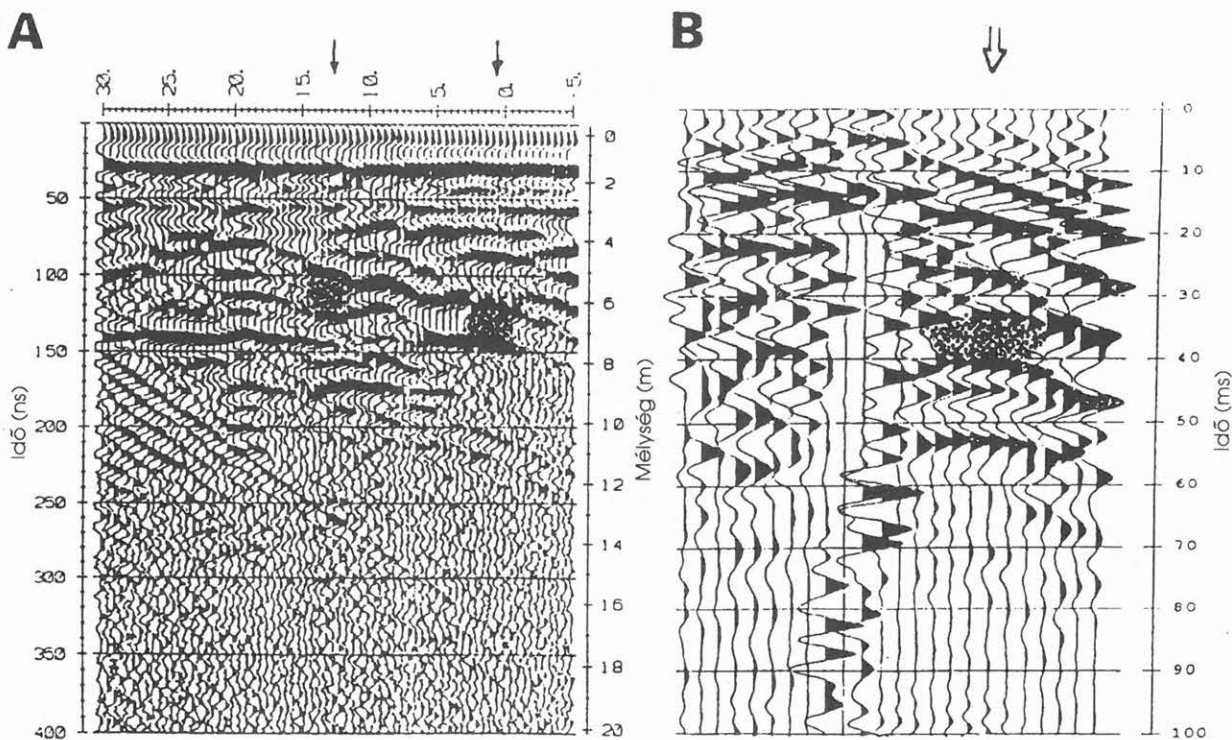
feldolgozási és megjelenítési eljáráson kívül az előzetes megfontolások is igen nagy szerepet játszottak az értelmezésben.

Az 5B. ábrán bemutatott, ugyanitt mért szeizmogramon is jól felismerhető az üreg hatása. Ezen a helyen a két módszer eredménye jól alátámasztotta egymást. Gyakran előfordul azonban, hogy a radarszelvény egyáltalán nem értelmezhető a sok külső hatás miatt. Ilyen esetben egyedül a szeizmikus reflexiós mérés, vagy bemerülő hullámos kiértékelés vezethet eredményre.

## 5. Elektromágneses átvilágítás — lehetséges beomlási hely sürgős azonosítása

Miközben felszíni pincekutató méréseinket végeztük, egy új fajta probléma is felmerült. Járdasüllyedés történt egy helyen, amelynek elkezdődött a feltárása a felszínen. Ugyanakkor az ún. harmadik szintű labirintusban is elkezdték a tisztogatási munkát a felszíni süllyedés feltételezett helyén. Itt egy rosszul tömődékelt, ferdén felfelé nyíló kürtöt találtak, amelyből kis bolygatás hatására 4 m-nyi anyag omlott le. Ez a hely 11–13 méterre van a felszín alatt.





5. ábra. A: Két valószínű pince reflexióit tartalmazó radarszelvény. B: Ugyanazon szelvény egy részének szeizmogramja az üregre utaló reflexióval

Fig. 5. A: Radar record containing the reflections of two probable cellars. B: Characteristic seismogram of the same profile with the indication of the cavity

A feltárással a felszínről is haladtak már pár métert lefelé, de a két bontás nem akart találkozni. Ennek oka, hogy nem volt elég pontos a térkép a labirintusról. A geodéziai bemérés túl sok időt vett volna igénybe, mivel a jelzett hely a labirintus bejáratától legalább 80 méterre van és az igen sok kanyar, szöglet a sötétséggel párosulva nagyon megnehezítette volna a gyors munkát. Minket kértek meg annak meghatározására, hogy hol lehet az alul omló kürtő helye a felszínen.

Néhány évvel ezelőtt az ELGI kísérleti célra kifejlesztett egy speciális elektromágneses műszert. Ez a berendezés 2 MHz-es középfrekvencián, két 80 cm átmérőjű adó és vevő tekercssel működik. A műszert ún. „nulla-csatolású” (merőleges) tekercselrendezésben használtuk a dielektromos inhomogenitások kimutatására. A mostani feladat megoldásához a műszer adótekercsét a föld alatti labirintus több pontjára helyeztük el, és a vevőtekercssel a felszínen megfelelő hálózatban mérve megpróbáltuk meghatározni az adótekercs helyét. Az volt a feltételezésünk, hogy az adó helyét a térerő legnagyobb értéke fogja kijelölni. A tekercseket koplánáris csatolásban (mindkettő vízszintes helyzetben) használtuk.

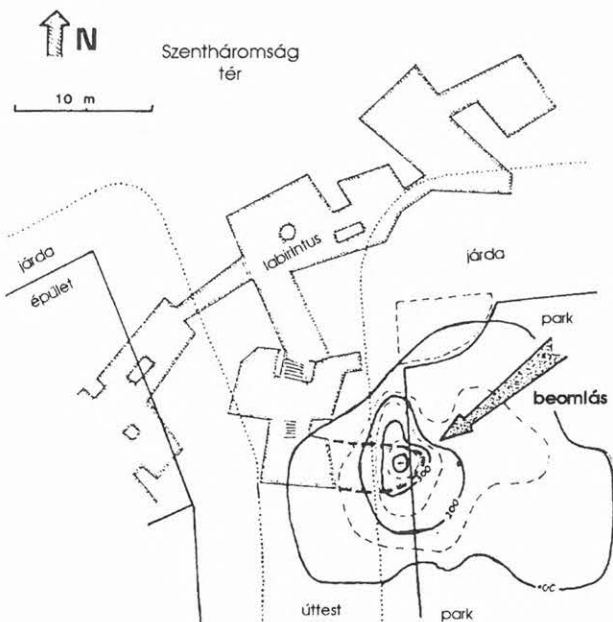
A 6. ábrán a labirintus térképe látható az elektromágneses térerő felszínen mért izovonalas térké-

pével. Néhány kísérlet alapján meglehetősen biztonsággal ki tudtuk jelölni az adó helyét. Ezenkívül — később — azt is tapasztaltuk, hogy az anomália alakja a laza feltöltésű kürtő dőlésirányára is információt ad. Mérésünk eredményeképp javasoltuk, hogy az ezen a helyen lévő buszmegállót helyezték át és a veszélyes terület kerítsék körbe. Néhány napon belül a kijelölt hely közelében az omlás bekövetkezett, 5 méteres lyukat eredményezve — szerencsére nem az aszfaltozott járdán, hanem a szélénél, a gyepes park területén.

## 6. Szeizmikus felszíni tomográfia — a Szentháromság tér kutatása

A Szentháromság tér a Budai Vár központi helye, rendszerint igen sok turista fordul meg itt. Nem sokkal korábban a járdán és az úttesten süllyedés következett be néhány helyen, ezért sürgőssé vált a tér geofizikai megkutatása. (Az előző fejezetben leírt omlás is ezen a területen történt.)

A levéltárakban találtunk néhány előzetes információt: a tér néhány régi térképét és utalásokat egykori omlásokra. Néhány száz évvel ezelőtt a tér házakkal volt beépítve, ami arra enged következtetni, hogy az épületeknek pincéi lehettek, amelyek mára ki



6. ábra. A beomlás helyének kijelölése elektromágneses térképezéssel. Az ábrán a föld alatti labirintus elhelyezkedése és az EM térerősség izovonalas térképe látható

Fig. 6. Localisation of potential site of subsidence by EM mapping. The map of the underground labyrinth and the anomaly map of EM field intensity is shown in the Figure

tudja milyen állapotban vannak. A geofizikai felmérés célja a lazán feltöltött zónák kimutatása volt.

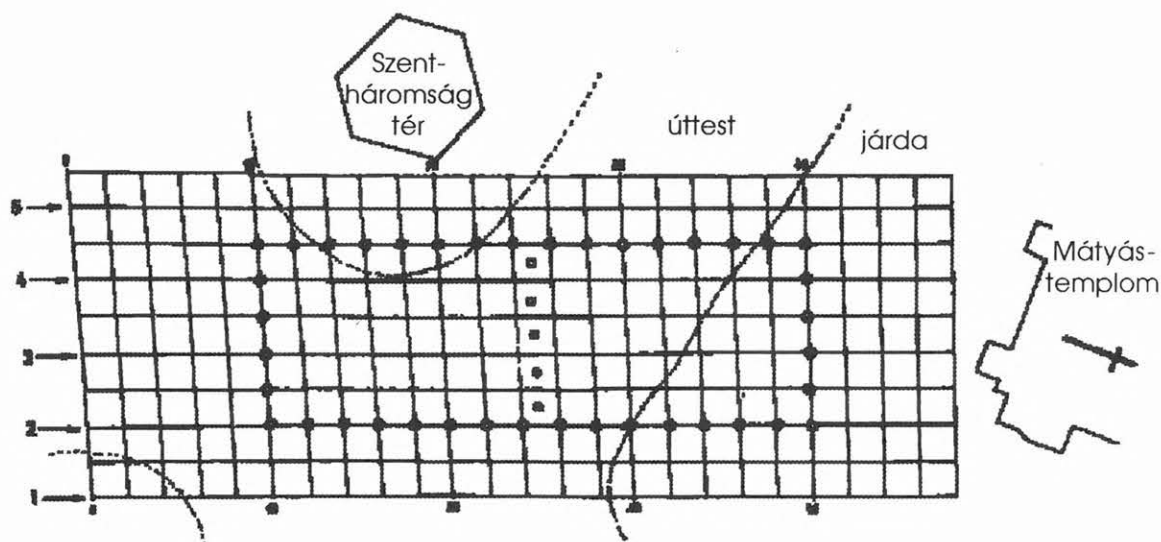
Komplex, több módszert alkalmazó kutatást terveztünk, mivel számíthattunk a közművek által okozott nehézségekre: víz- és távfűtő csövek, elektromos kábelek és szennyvízcsatorna keresztezik

egymást ezen a területen. Egy ilyen összetett helyzetben egy módszerrel nemigen érhető el kétséget kizáró értékelés, megfelelő értelmezést csak több módszer egymást alátámasztó eredményei alapján adhatunk.

Az alkalmazott módszerek a földradar, elektromágneses térképezés és a szeizmikus felszíni tomográfia volt. A legelfogadhatóbb eredményt az utóbbi módszer adta — a többi módszerrel a szeizmikus sebességtérkép anomáliáinak értelmezését tudtuk csak alátámasztani. Az elektromágneses módszerek bizonytalanságát a felszín feletti zajos környezet is fokozta.

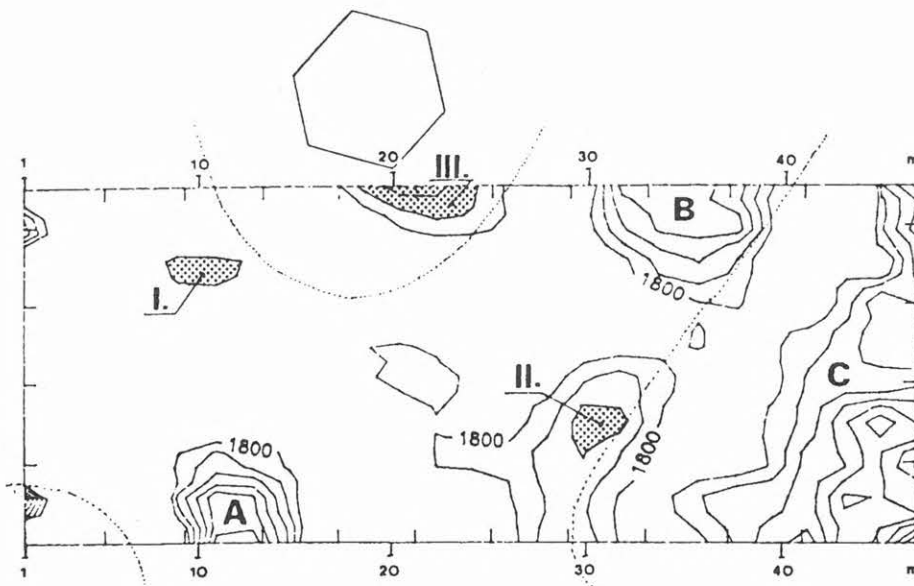
A szeizmikus méréseket 2 méteres hálózat mentén végeztük: a hálózat minden pontja a kalapácsütéssel gerjesztett rugalmas hullám forráspontja volt, míg a 45 db geofont egy különleges elrendezésben helyeztük el a hálózat belsejében (7. ábra). Ily módon igen sok, egymást keresztező sugárút mentén tudtunk adatokat gyűjteni, amelyek elégségesek voltak a tomografikus feldolgozáshoz, és ahhoz, hogy a felszínközeli vonatkozó sebességet megfelelő pontossággal számítsuk ki.

A felszíni tomografikus mérésekből számított sebességtérkép a 8. ábrán látható. A feldolgozáshoz a bemerülő hullámok beérkezési időit használtuk fel. A térképen csak azokat az alacsonyabb sebességű zónákat jelöltük, amelyek laza feltöltésre (vagy üregre) utalhatnak. A térképen azonban a felszínközeli objektumok (pl. közműaknák) által okozott anomáliák is láthatók.



7. ábra. A Szentháromság téren végzett szeizmikus felszíni tomografikus mérés elrendezési geometriája. Forráspontok: a négyzetháló minden pontja, a geofonok helye karikával jelölve

Fig. 7. Layout geometry of the seismic surface tomographic measurements carried out on the „Szentháromság tér” (Holy Trinity Square). Source points: each point of the grid; ●: geophones



8. ábra. A szeizmikus tomografikus sebességtérkép (csak a területi átlagnál alacsonyabb sebességű izovonalakat tüntettük fel). A, B: közműaknák által okozott anomáliák, C: a lazább járdaalapozás által okozott anomália, I., II., III.: valószínű pincék laza visszatöltése által okozott anomáliák

Fig. 8. Velocity map of seismic tomographic measurements (only isolines of velocities lower than the average are marked). A, B: anomalies caused by man-holes, C: anomalous zone due to the loose foundation of the pavement, I., II., III.: anomalies interpreted as loose backfilling of possible cellars

## 7. Összefoglalás és a jövő feladatai

Megállapíthatjuk, hogy a Budai Vár pincerendszerének helyreállításával kapcsolatos legtöbb kutatási probléma megoldásához — bár az ismert geofizikai módszerekkel, de — minden esetben különleges mérési eljárásokra és feldolgozási módszerekre volt szükség.

A rondella kutatásánál nemcsak fúrólukak közötti átvilágítást végeztünk, hanem fúróluk és az oldalfal közötti méréseket is, hogy a belsejének minél nagyobb részéről kapjunk információt. Ennek kivitelezéséhez (az oldalfalon történő hullámkeltéshez) emelőkosaras járművet kellett bérelnünk. A tomografikus feldolgozást saját fejlesztésű szoftverrel végeztük. A radar mérést is megkíséreltük az oldalfalon függőlegesen lefelé elvégezni, ez azonban nem járt sikerrel.

A föld alatti pontok helyének felszíni azonosításához szintén meglévő berendezést használtunk, de különleges elrendezésben: a 13 m mélységben elhelyezett adótekerccs jelét a vevővel egy felszíni hálózat mentén detektáltuk. A felszíni tomografikus

mérésekhez különleges geofon- és forráspont elrendezést kellett alkalmazni. Az adatok feldolgozása meglehetősen sok időt vett igénybe a speciális iterációs programnak köszönhetően.

Végül is mostanában egy kis szünet mutatkozik a geofizikai kutatásokban a Vár területén, mivel már túl sok megerősítendő vagy tömedékelendő, veszélyes pince ismert (pl. a Táncsics Mihály utca vége teljesen le van zárva ebből az okból). Az anyagi eszközök nagy részét most a megerősítésre, biztosításra kell fordítani, de remélhetőleg a közeljövőben megindul a szisztematikus geofizikai előkutatás is.

## 9. Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat a Budapesti I. kerületi Önkormányzat finanszírozta az Állami Pinceprogram keretében. A Budai Vár pince-helyreállítási programjának technikai szervezője a FÖMTERV Rt. Köszönet illeti a fenti intézmények képviselőit és szakértőit, akik lehetővé tették, hogy részt vegyünk ebben az izgalmas kutatásban és akik tevékenyen segítettek az értelmezési nehézségekben.