

# A geoelektromos üregkutató néhány kérdése<sup>1</sup>

GYULAI ÁKOS<sup>2</sup>

*A dolgozat áttekintést ad a geoelektromos üregkutató analitikus, FD (finite difference, véges differencia) előremodellező, kvalitatív kiértékelésen alapuló, az adatok szűrését megvalósító, továbbá inverziós és tomográfiai módszereiről. FD modellezés alapján vizsgálja a különböző mérési elrendezések látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeit, javaslatot tesz egy eddig még nem használatos mérési elrendezés bevezetésére. Új paraméter-érzékenységek definiálásával vizsgálja a mérési adatok információtartalmát és ennek alapján összehasonlítja a mérési elrendezéseket.*

## Á. GYULAI: Some aspects of cave research using geoelectric method

*The paper presents a summary about the methods applied to cave research using geoelectric survey which are as follows: analytical, FD (finite difference) forward modelling, the ones based on qualitative interpretation and data filtering, inversion and tomographical methods. The analysis of apparent resistivity sections (pseudo section) belonging to different configurations was made with FD modelling method and the introduction of a new geoelectric array has been proposed. Having defined new parameter sensitivities the information content of field data was studied and on the basis of that the geoelectric configurations have been compared.*

### Bevezetés

Magyarország sok településén, közöttük nagy városokban is problémát okoznak a kis mélységben (5–6 m) elhelyezkedő régi üregek, pincék, amelyek állagának romlása veszélyt jelent a meglévő épületekre és az új építkezési munkákra egyaránt.

A felszínközeli ismeretlen üregek kimutatására és helyének meghatározására sokféle geofizikai módszer alkalmas. Ebben a dolgozatban nem azt kívánjuk vizsgálni, hogy milyen környezeti, földtani viszonyok kedveznek valamelyik geofizikai módszer alkalmazásának, vagy éppen zárják ki annak lehetőségét, hanem csupán a geoelektromos (egyenáramú) módszer alkalmazásával kapcsolatos néhány kérdéssel foglalkozunk.

Abból a feltevésből indulunk ki, hogy gyakran megvanak a feltételei a geoelektromos módszer bevetésének, még részben tömedékelt vagy vízzel elárasztott esetben is. Az alkalmazásnak nem feltétele a levegővel való kitöltésből adódó „végtelen üreg-fajlagos ellenállás”, amint azt NYÁRI [1997] vizsgálatai egyértelműen mutatják.

A geoelektromos módszereknél nem tekinthetjük lezártnak sem a mérési elrendezés kiválasztásának kérdését, sem a kiértékelési — közöttük az inverziós módszerek —, értelmezési eljárások problémakörét.

### 1. Analitikus előremodellezés és inverzió

Homogén ágyazó közegben elhelyezkedő körszelvényű, végtelen hosszú, tetszőleges fajlagos ellenállású fekvő hengeres hatók esetén ismeretesek analitikus formulák a potenciál leírására [MILITZER et al. 1977]. A szerzők a potenciálfüggvényből kiindulva többféle mérési elrendezésre meghatározták a látszólagos fajlagos ellenállás függvényeket, majd ezek alapján görbesereg albumot számítottak, amelyben üreg feletti látszólagos fajlagos ellenállás profilgörbéket mutattak be. Az előbbi analitikus formulából FERENCZY [1980] levezette az axiális dipól elrendezésre a

látszólagos fajlagos ellenállás egyenletét, majd számítógépes program segítségével kiszámította az üreg által okozott anomáliákat és azok alapján vizsgálta az üregek kimutathatóságát. Ugyancsak a MILITZER és szerzőtársai [1977] által közölt potenciálfüggvényből kiindulva NYÁRI [1994, 1996–1997, 1997] tetszőleges négyelektródás felszíni mérőelrendezésre levezette a látszólagos fajlagos ellenállás egyenletét. Majd algoritmust készített és programot fejlesztett ki személyi számítógépre tetszőleges mélységű, átmérőjű és fajlagos ellenállású üreg esetében a látszólagos fajlagos ellenállások meghatározására praktikus módon egyenkénti elektródok kombinációjával megvalósítható mérési elrendezések esetére. Részletesen a Wenner  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  mérési elrendezések és az axiális dipól mérési elrendezéseket vizsgálta. A látszólagos fajlagos ellenállás anomáliák mellett megvizsgálta a dipól elrendezésre vonatkozó paraméter-érzékenységeket. NYÁRI [1995, 1996–1997] az előremodellezés mellett megoldotta az inverz feladatot. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének programkönyvtárában lévő  $L_2$ -normán alapuló linearizált és minősített inverziós programba [DOBRÓKA et al. 1991] beépítette az előremodellező üreg-programot. Ezzel lehetőség nyílt az üregparaméterek automatikus meghatározására és a paraméterek hibájának becslésére is geoelektromos mérési adatokból.

Az analitikus modellezési alapon végzett üreg-meghatározásnál sok esetben szükség van közelítések alkalmazására, hiszen az üreg ritkán körszelvényű, vagy az ágyazó közeg sok más inhomogenitást is tartalmaz. Mégis érdemes a módszer minél szélesebb körű felhasználására törekedni, hiszen rendkívül gyors, minősített becslési lehetőséget jelent a mérnöki gyakorlat számára. Az alkalmazás feltételeit, a közelítések jóságát célszerű egyéb módszerekkel, például FD (véges differencia) modellezéssel vizsgálni, ill. ellenőrizni.

### 2. 3-D véges differencia modellezés

A rendelkezésünkre álló 3-D FD előremodellező program tetszőleges keresztmetszetű, háromdimenziós és inhomogén vagy rétegzett ágyazó közegben levő tetszőleges

<sup>1</sup> Beérkezett: 1998. április 23-án

<sup>2</sup> Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc, Egyetemváros

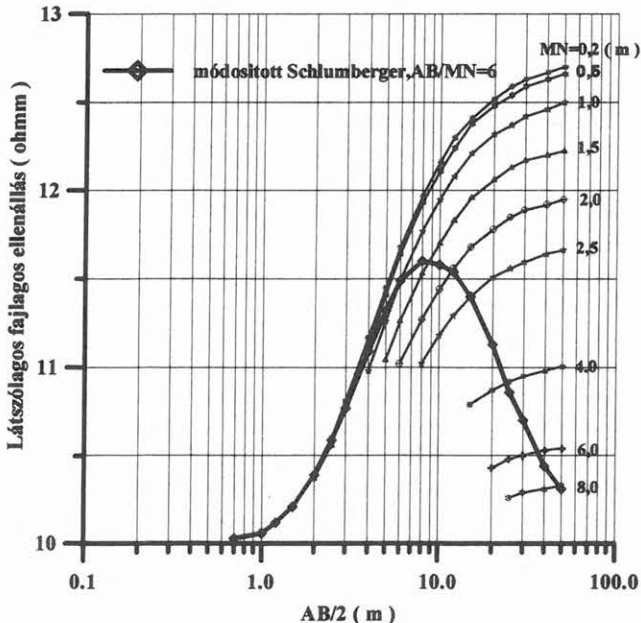
fajlagos ellenállású üregek vizsgálatát is lehetővé teszi [GYULAI 1996–1997a]. A véges differencia programot SPITZER német kutató [SPITZER 1995] bocsátotta rendelkezésünkre egyetemi kutatásainkhoz. Az  $x$ ,  $y$  rácselemek maximális száma 73, a  $z$  rácselemké 39. A dipólforrás az  $x$ ,  $y$  sík rácspontjaiban tetszőlegesen elhelyezhető, a potenciálértékek az  $x$ ,  $y$ ,  $z$  tér tetszőleges rácspontjaiban számíthatók. A program végeredményként Schlumberger VESZ látszólagos fajlagos ellenállás adatokat számít és tárol le, közbülső adatként azonban kinyerhetők a háromelektrodos („fél-Schlumberger”) szondázás látszólagos fajlagos ellenállás adatai, illetve az ezeknek megfelelő potenciálkülbségek. A program számítási pontossága lehetővé teszi, hogy az előbbi adatokból dipól-dipól (axiális dipól) elrendezésre is kiszámítsuk a látszólagos fajlagos ellenállás értékeit. Egy-egy szondázási görbe kiszámítása kb. 3 percet vesz igénybe 486-os személyi számítógéppel.

### 2.1. Az üregmodell

Az eddigi vizsgálatainkhoz 2 m mélységben lévő 2x2 m-es négyzet, 3x2 m-es fekvő téglalap és 2x3 m-es álló téglalap keresztmetszetű „végtelen hosszú” hasábokkal modelleztük az üreget. A homogén ágyazó közeg fajlagos ellenállását 10  $\Omega\text{m}$ -nek, az üreg fajlagos ellenállását 10 000  $\Omega\text{m}$ -nek választottuk. Vizsgáltuk a rétegzett ágyazó közeg esetét is, amikor is az első réteg fajlagos ellenállását 30  $\Omega\text{m}$ -nek, a második réteget 10  $\Omega\text{m}$ -nek választottuk. A nagyobb pontosság eléréséhez a forrás dipól minden számításnál helyben maradt, továbbá arra törekedtünk, hogy a rácssűrűség elegendően nagy legyen azoknál az eseteknél, amelyeknél az üreg a forrás dipól közelében helyezkedett el.

### 2.2. Szondázási görbék az üreg felett

Az 1. ábra Schlumberger mérési elrendezésre számított szondázási görbék mutat különböző  $MN$  távolságok esetére.

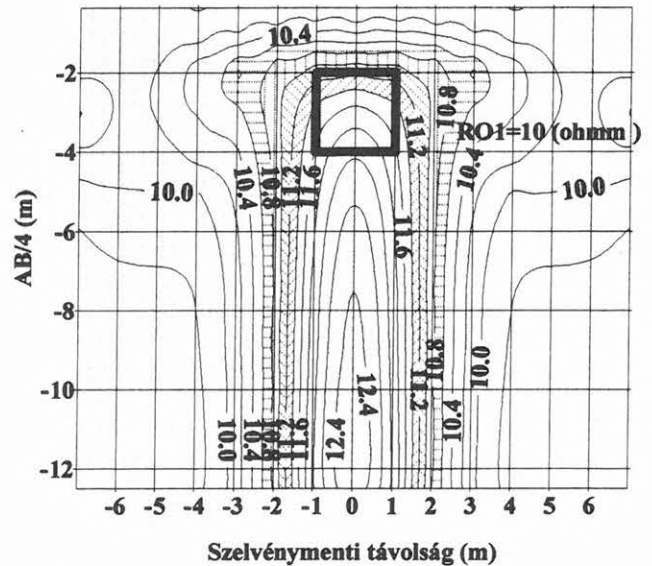


1. ábra. Schlumberger VESZ görbékkel szerkesztett módosított Schlumberger szondázási görbe üreg felett

Fig. 1. Modified Schlumberger sounding curve measured above a cave based on Schlumberger VES curves

Látható, hogy az  $MN$  távolság fokozatos növelésével a szondázási görbék egyre alacsonyabb látszólagos fajlagos ellenállás értékekhez tartanak, továbbá, hogy a nagy behatolást jelentő  $AB/2$  távolságoknál is magukon viselik az  $MN$  távolságtól függően az üreg hatását. Nevezük ezt a jelenséget az egyenáramú szondázásoknál *geometriai eltolásnak*, amely megfelel a frekvenciaszondázásoknál tapasztalt „static shift” esetén jelentkező amplitúdó eltolódásnak. Az ún. geometriai eltolás hatásnak az értelmezése két vonatkozásban is fontos az üregkutatásban. Egyrészt igen nagy behatolású mérések is hordoznak a felszín közeli üregre vonatkozó információkat (a szondázás kiértékelését más vonatkozásban ez persze zavarja), másrészt lehetetlenítik az üreg mélységi lokalizálását kvalitatív módszerrel. Kérdéses, hogy a nagy behatolású mérések adatait meddig hasznos a felszín közeli üregkutatásban felhasználni.

Az 1. ábra alapján felvetjük egy új mérési elrendezés — nevezük módosított Schlumberger-elrendezésnek — alkalmazását. Ez annyiban tekinthető Schlumberger-elrendezésnek, hogy az  $AB/MN$  arány megfelelő megválasztásával teljesül a mérés gradiens jellege, viszont más szempontból a lépésről lépésre változó  $MN$  távolság miatt a mérés a Wenner-elrendezésre hasonlít. A mérési elrendezésnek nagy előnye, hogy a Wenner-elrendezéshez hasonlóan nem jelentkezik geometriai eltolás, viszont az üreg által okozott anomália maximális értéke nagyobb, mint a Wenner-elrendezésnél (2., 3. ábra).



2. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény üreg felett Schlumberger-elrendezéssel

Fig. 2. Pseudo section measured using the Schlumberger arrays above a cave

### 2.3. Szelvény menti szondázási görbék homogén ágyazó közegben lévő üreg esetében

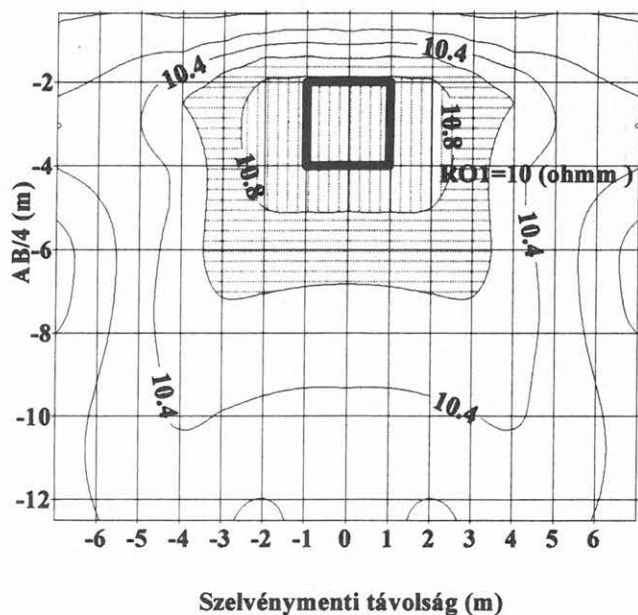
A 2.1.-ben leírt üregmodellekre több mérési elrendezésre számítottunk szondázási görbét, az üreget magában foglaló szelvény több pontjára. Az adatokat kétféle módon dolgoztuk fel. A négyzetes keresztmetszetű hasáb alakú üreg esetében az adatokat a jó áttekinthetőség érdekében ún. látszólagos fajlagos ellenállás szelvény (pseudosection) formájában jelenítettük meg. A téglalap keresztmetszetű adatokat a követke-

ző fejezetben leírt paraméter-érzékenység számításokhoz használtuk fel.

Az üregkutatásnál az ún. pszeudoszelvényeket gyakran mint „végeredményt” szolgáltatják [CSÓKÁS, GYULAI 1974] az üregek helyének kvalitatív meghatározásához. Ehhez a kiértékeléshez fontos a különféle mérési módszerek anomáliaképének ismerete, továbbá a mérési adatok vonatkozási pontjainak jó megadása.

A 2. ábra Schlumberger mérési elrendezésre szerkesztett látszólagos fajlagos ellenállás szelvényt mutat be  $AB/4$  vonatkozási mélységre ( $MN$  közep alatt) szerkesztve. Az ábrából kiolvasható, hogy az anomália a maximális 24%-os értékét ( $10 \Omega\text{m}$ -es ágyazó közegben  $12,4 \Omega\text{m}$ -es látszólagos fajlagos ellenállást) csak jóval az üreg alatt éri el. A geometriai eltolás jól megfigyelhető, amely lehetetleníti az üreg kvalitatív mélység lehatárolását. Ez azonban még nem zárja ki például analitikus előremodellezésre jó inverziós kiértékelés lehetőségét!

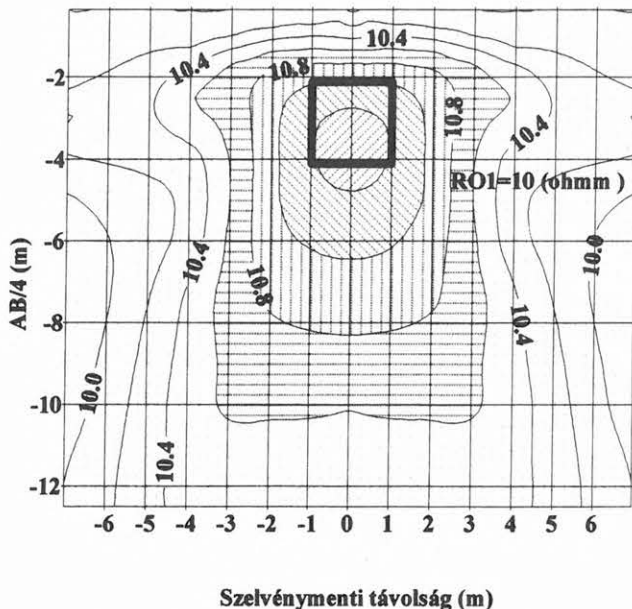
A 3. ábra Wenner-elrendezés pszeudoszelvényét mutatja be. Megállapítható, hogy az anomália értékei sokkal kisebbek, mint a Schlumberger-méréseknél, viszont az anomália lezárul a mélység felé. Az  $AB/4$  vonatkozási mélység alapján az anomália 9%-os maximuma pontosan az üreg területére esik, azaz kvalitatív módszerrel is lokalizálható az üreg. A viszonylag alacsony értékű anomália miatt viszont problémát jelenthet az üreg elkülönítése az ágyazó közeg egyéb inhomogenitásaitól.



3. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény üreg felett Wenner-elrendezéssel ( $AB/MN=3$ )

Fig. 3. Pseudo section for Wenner arrays ( $AB/MN=3$ ) above a cave

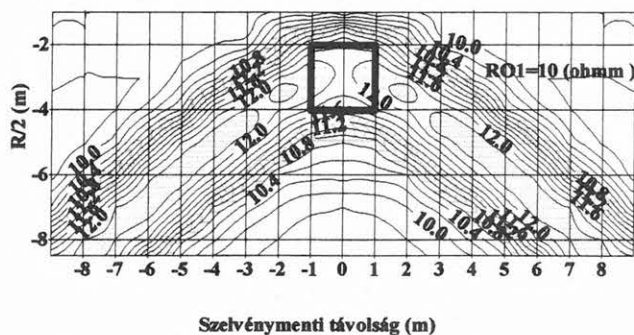
Az 4. ábra módosított Schlumberger-elrendezés szelvényét mutatja. Megfigyelhetjük, hogy az anomália értékek magasabbak, mint a Wenner-elrendezésnél (max. 12%), az anomália maximum viszont kissé mélyebbre került. Az  $AB/MN$  arány növelésével az anomália értékét növelni lehetne, ezzel viszont az anomália maximum fokozatosan mélyebbre kerülne. Ez felveti a vonatkozási mélységek  $AB/5$ -nek megfelelő megválasztását az üreg helyes lokalizálása érdekében.



4. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény üreg felett módosított Schlumberger-elrendezéssel ( $AB/MN=4$ )

Fig. 4. Pseudo section for modified Schlumberger arrays ( $AB/MN=4$ ) above a cave

Az 5. ábra mutatja a hazai üregkutatásoknál leggyakrabban alkalmazott axiális dipól látszólagos fajlagos ellenállás szelvényét. A dipól méréseknél megszokott és ismert anomáliakép alakul ki, amelyet az üregtől két oldalra  $45^\circ$ -os irányba mutató maximumokkal jellemezhetünk. Az anomália 22%-os maximális értéke csaknem azonos a Schlumberger-méréseknél számítottakkal. Az anomália két oldalán a dipól mérésnél is jelentkezik geometriai eltolás, ez azonban nem zavarja az üreg lokalizálhatóságát a jellegzetes anomáliakép miatt.



5. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény üreg felett axiális dipól elrendezéssel

Fig. 5. Pseudo section for dipole axial arrays above a cave

### 3. Paraméter-érzékenységi vizsgálatok

A geoelektromos szerkezetek kvantitatív meghatározásában fontos szerepet játszanak a paraméter-érzékenységek. A paraméterbecsléseknél az információ mennyiség egyik mérőszáma a paraméterekre vonatkozó Fisher-féle információ mennyiség, amely

$$[I(P_{\text{becsült}})]_{i,j} = \sum_K \left\{ \frac{\partial \rho_a(P)}{\partial P_i} \cdot \frac{1}{\sigma_K^2} \cdot \frac{\partial \rho(P)}{\partial P_j} \right\}_{P=P_{\text{becsült}}} \quad (1)$$

alakban írható fel [SALÁT et al. 1982], ahol  $\sigma_k^2$  az adattérbeli eltérések szórásnégyzete.

Nevezzük  $\frac{\partial \rho_a}{\partial p}$  mennyiségeket, illetve ezek normált for-

máit a geoelektromos mérés paraméter-érzékenységeinek [GYULAI 1989]. A paraméter-érzékenységekkel praktikusán vizsgálhatjuk, hogy honnan származik a geoelektromos mérés információja. A paraméter-érzékenységeket (fajlagos ellenállásokra és a geometriai paraméterekre) mindig az adott (vizsgált) modellre célszerű számítani. Végtelen nagy fajlagos ellenállású üregekre a fajlagos ellenállás érzékenység 0, ezért az üreg kimutathatóságát csupán a fajlagos ellenállás érzékenységgel nem jellemezhetjük.

### 3.1. Üreg-szélesség érzékenység

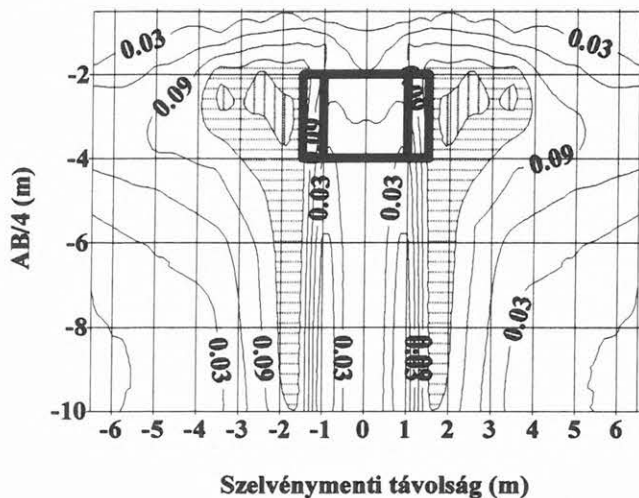
Az üreg-szélesség érzékenységet úgy definiáljuk, hogy

$$\psi_{sz} = \frac{\partial \rho_a}{\partial sz} \cdot \frac{sz}{\rho_a}, \quad (2)$$

ahol  $sz$  az üreg megnövelt szélessége.

A paraméter-érzékenységeket ugyanazokban a vonatkozási pontokban ábrázolhatjuk, mint a látszólagos fajlagos ellenállásokat, így jól áttekinthető képet kapunk az információ és a vizsgált objektum viszonyáról.

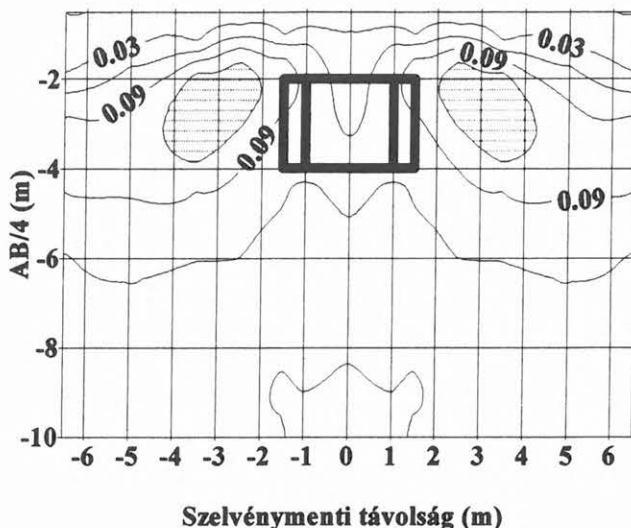
Schlumberger-elrendezés üreg-szélesség érzékenységeit a 6. ábra mutatja. Jól látható, hogy az üreg középvonala feletti mérések — bár az anomália itt volt a legnagyobb — az üreg szélességéről alig adnak információt ( $\psi_{sz} \approx 0,03$ ). A szélességre vonatkozó legtöbb információ nem az üreg peremére eső, hanem jóval az azon kívüli méréseknél jelentkezik. Az érzékenység maximuma az üreg két oldalán (kívül), az üreg mélységében jelentkezik. Ezért is választottuk az adatok vonatkozási mélységének  $AB/4$ -et. Megfigyelhető még, hogy jelentős érzékenységek adódnak nagy mélységeknél is, ami a geometriai eltolásra utal.



6. ábra. Üreg-szélesség érzékenység Schlumberger-elrendezésre

Fig. 6. Cave-width sensitivity for Schlumberger array

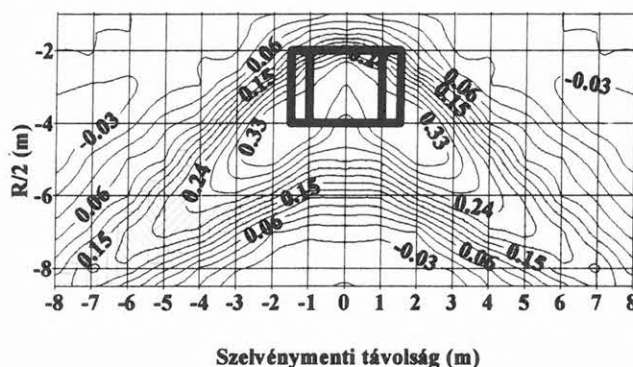
A Wenner-elrendezésre vonatkozó üreg-szélesség érzékenységek a 7. ábrán láthatók. Ehhez teljesen hasonló képet ad a módosított Schlumberger-elrendezés.



7. ábra. Üreg-szélesség érzékenység Wenner elrendezésre ( $AB/MN=3$ )

Fig. 7. Cave-width sensitivity for Wenner configuration ( $AB/MN=3$ )

A 8. ábra axiális dipól elrendezés üreg-szélesség érzékenységeit mutatja. A maximális értékek az üreg közvetlen közelében helyezkednek el, amely megerősíti az üreg jó kvalitatív lokalizálhatóságát, amelyre a látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeknél már utaltunk.



8. ábra. Üreg-szélesség érzékenység axiális dipól elrendezésre

Fig. 8. Cave-width sensitivity for dipole configuration

### 3.2. Üreg-magasság érzékenység

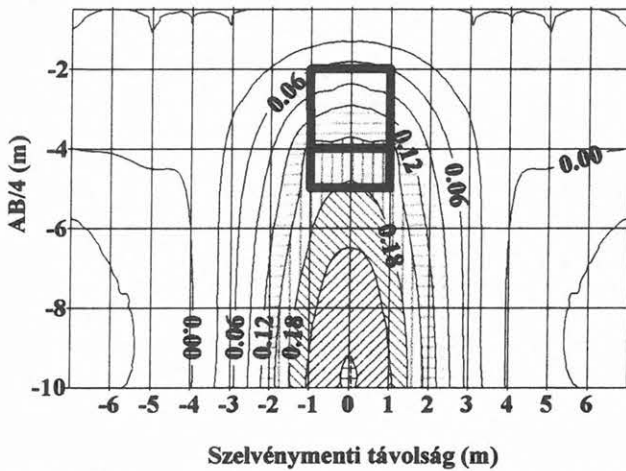
Az üreg-magasság érzékenységet úgy definiáljuk, hogy

$$\psi_m = \frac{\partial \rho_a}{\partial m} \cdot \frac{m}{\rho_a} \quad (3)$$

ahol  $m$  az üreg megnövelt magassága. Az egyszerűség miatt az üreg talpmélység növelésével elérhető magasság-érzékenységeket számítottuk.

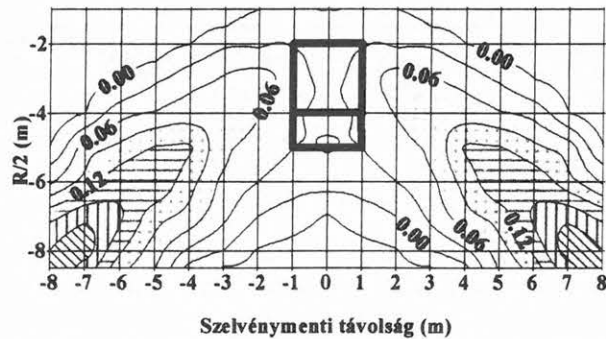
A Schlumberger mérési elrendezés üreg-magasság érzékenység szelvénye a 9. ábrán látható. Az anomália vizsgálataknál leírt geometriai eltolás jelenség oka jól megfigyelhető ezen az ábrán. A magasság-érzékenység maximuma a szélesség érzékenységgel ellentétben az üreg alatt helyezkedik el. Ez azt jelenti, hogy a mérés magasságra vonatkozó információja elsősorban az  $MN$  középpont alatti térből, míg a szélességre vonatkozó információ az áramelektrodok irányába eltoló térrészből származik. Az is megállapítható, hogy a magasság-

érzékenység jóval nagyobb, mint a szélesség-érzékenység, ami azt jelenti, hogy a mérés inkább az üreg magasságára érzékeny, mint a szélességére.



9. ábra. Üreg-magasság érzékenység Schlumberger-elrendezésre  
Fig. 9. Cave-height sensitivity for Schlumberger configuration

Az axiális dipól elrendezésnél az üreg-magasság érzékenység (10. ábra) a szélesség érzékenységtől eltérően alakul. Az üreg környezetében csak nagyon kis magasság-érzékenység alakul ki és az üregtől távol jelentkező maximális értéke jóval kisebb, mint a szélesség-érzékenységnél jelentkező maximum. Az üreg-magasság csak az üregtől távoli helyeken befolyásolja az anomáliák kialakulását. Az üreg közvetlen környezetében az üreg szélessége a meghatározó az anomália alakításában. A fentiek alapján megállapítható, hogy Schlumberger-elrendezéssel a magasabb, axiális dipól elrendezéssel a szélesebb üregek kutatása a kedvezőbb.



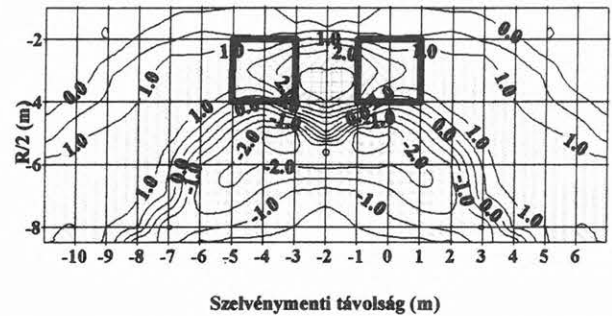
10. ábra. Üreg-magasság érzékenység axiális dipól elrendezésre  
Fig. 10. Cave-height sensitivity for axial dipole configuration

#### 4. Homogén közegben levő két üreg együttes hatása

Alápincézett területeken gyakran előfordul, hogy olyan közel van egymáshoz két pince, hogy a hatásuk a mérési adatokban együtt jelenik meg. FERENCZY [1980] modellmérési szerint nem követünk el nagy hibát, ha két pince esetében az egyenként okozott anomáliájukat összeadjuk a szelvény mentén. Ilyen módon szerkesztett meg anomáliákepeket több üregre. A szerkesztés pontossága elegendő volt ahhoz, hogy ennek alapján kvalitatív kiértékelést lehessen végezni.

Az analitikus inverziós módszer hasonló elven történő alkalmazásához [NYÁRI 1996–1997] az előbbinél pontosabb vizsgálatok szükségesek, amelyeket FD modellezéssel végeztünk el.

A 11. ábrán FD modellezéssel két üregre együttesen számolt anomáliák és egyenként számított anomáliák összegzésével kapott anomáliák eltérése látható. A százalékban kifejezett anomáliák kis értékű, a számítási hibáknál alig magasabb (1–2%-os) eltérése mind a Schlumberger, mind pedig az axiális dipól elrendezés esetében azt mutatja, hogy egymáshoz nem túlságosan közeli üregek esetében valóban élhetünk azzal a közelítéssel, hogy két üreg együttesének anomália szelvényét az egyenkénti szelvények egyszerű összegzésével számíthatjuk. Az így elkövetett hibáknak az inverzióban a paraméterekre gyakorolt hatását a későbbiekben vizsgálni szükséges.

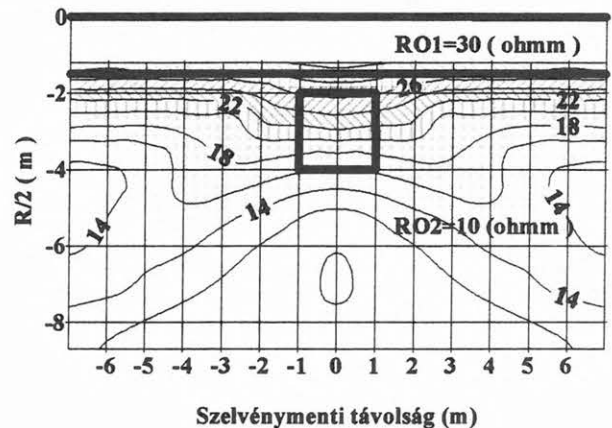


11. ábra. Két üreg anomáliája összegzésének hibája axiális dipól elrendezésnél

Fig. 11. The superposition error of the response of two caves in case of dipole configuration

#### 5. Rétegzett közegben elhelyezkedő üreg

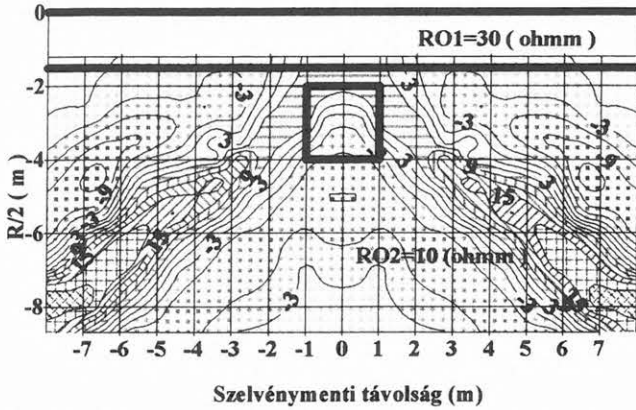
Az FD modellszámításokat a terepi méréseknél gyakran előforduló esetre végeztük, amikor is a laza, feltöltött, szárazabb, nagyobb fajlagos ellenállású réteg ( $30 \Omega\text{m}$ ) alatt az üreg kisebb fajlagos ellenállású ( $10 \Omega\text{m}$ ) ágyazó rétegben található. A modellszámítások eredménye a 12. ábrán látható. A rétegzett közegre számított látszólagos fajlagos ellenállások alapján megszerkesztettük az üreg által okozott (maradék) anomália szelvényét. Összehasonlítva ezeket az értékeket a homogén ágyazó kőzetnél kapott maximális értékekkel (24%) megállapíthatjuk, hogy a rétegzett modellnél jóval nagyobb (30%) anomália jelentkezett, tehát az ilyen fajlagos ellenállású rétegződés kedvező az üreg kimutatásához.



12. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény axiális dipól elrendezésre (üreg kétréteges közegben)

Fig. 12. Apparent resistivity section for axial dipole array when the cave is imbedded in a two-layered earth model

A rétegzett közeg látszólagos fajlagos ellenállásképe részben elfedheti az üreg hatását (12. ábra). Az üreghatás kiemelésének egyik lehetősége a maradék anomália kiszámítása az előbb említett módon. Ez azonban inkább elméleti lehetőség, amelyet csak akkor alkalmazhatunk, ha meg tudjuk határozni a rétegeparamétereket zavartalan rétegzett esetre. A gyakorlatban sokkal inkább követhetőnek látszik a mérési adatok valamilyen szűrése [TSOKAS, TSOURLOS 1997]. A 13. ábrán egy ötpontos súlyozott átlagképzés után számított maradék anomáliakép látható. Az irodalmi vizsgálatok alapján a szűrés üregkutatásbeli alkalmazása további vizsgálatokat igényel.

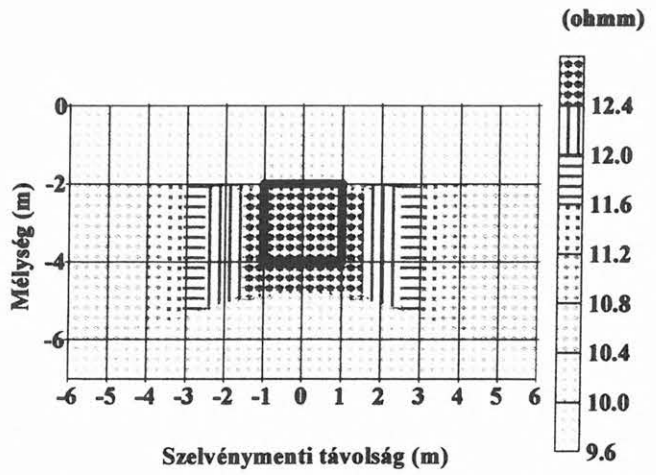


13. ábra. Szűrt anomália szelvény axiális dipól elrendezésre (üreg kétréteges közegben)

Fig. 13. Filtered anomaly of a cave imbedded in a two-layered earth for dipole axial configuration

## 6. Üregek kimutatása 1.5-D inverziós módszerrel

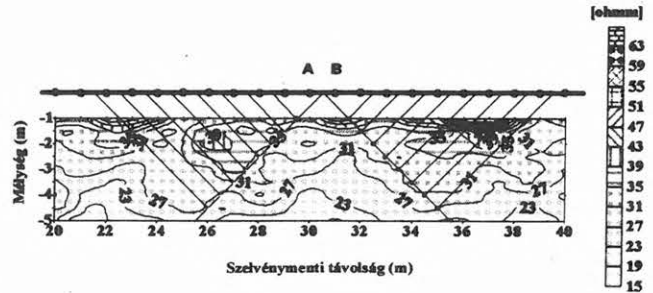
Két- és háromdimenziós geoelektromos struktúrák kutatását sokféle módon közelítik meg a gyakorlatban. A számítógépi lehetőségek növekedésével egyre nagyobb szerepet kapnak a 2-D és 3-D FD előmodellezésre alapozott inverziós eljárások [BARKER 1992, LIEBIG 1996]. A számítási gyorsaság, valamint az ezeknél a módszereknél is szükségszerűen jelentkező pontatlanságok és közelítések miatt „versenyben vannak” más közelítő inverziós módszerek. 2-D struktúrák inverziós kutatására dolgozták ki az 1.5-D együttes inverziós módszert [GYULAI, ORMOS 1997a, 1997b]. Ezt az új inverziós módszert üregek és üreges szerkezetek kimutatására is alkalmazták, részben szimulációs, részben pedig terepi mérési adatokon [GYULAI 1996–1997b, GYULAI et al. 1998]. Ezekből a vizsgálatokból egy szintetikus adatrendszerrel (3. ábra) végzett 1.5-D inverziós kiértékelés eredményét mutatja be a 14. ábra. Az inverzióban az üreg kimutatására „háromréteges” közelítést alkalmaztunk. A Wenner-elrendezéssel mért adatrendszer inverziós eredménye azt mutatja, hogy az alkalmazott közelítés következményeként az üreg hatása oldalirányban rétegszerűen „szétkenődik” és az üreg valódi fajlagos ellenállásához képest lényegesen alacsonyabb fajlagos ellenállást kapunk. A szelvény értelmezésével — amely a legnagyobb fajlagos ellenállású zóna kijelölését jelenti — mind az üreg helyzetére, mind pedig méretére jó becslést adhatunk.



14. ábra. Üreg kimutatása 1.5-D inverzióval (Wenner-elrendezéssel,  $AB/MN=3$ )

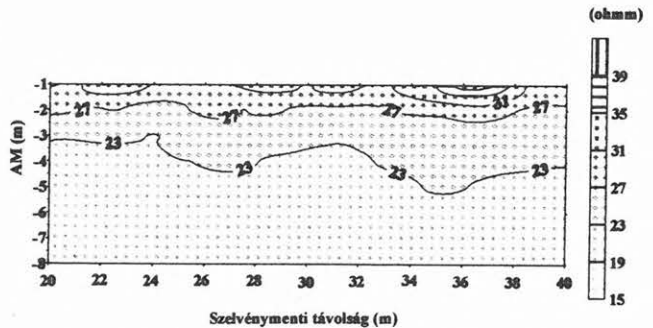
Fig. 14. Cave detection with 1.5-D inversion for Wenner configuration,  $AB/MN=3$

Az 1.5-D inverziós módszer alkalmazását üreges szerkezetek kimutatására (terepi példán) a 15–17. ábrákon mutatjuk be. A terepi adatokat egy árvédelmi gát hosszszelvényében vettük fel. A méréseket 1 m-es egyenküzi elektródákkal axiális dipól elrendezésben és kételektrodos (pole-pole) elrendezésben végeztük. A mérési adatokat korrigáltuk a gátszelvény alakja miatt, majd azokból látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeket szerkesztettünk, amelyeket a 15. és 16. ábrákon láthatunk.



15. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény dipól-dipól mérési adatokból, az  $AB$  dipólhoz tartozó vonatkozási pontokkal (árvédelmi gát, Kisköre)

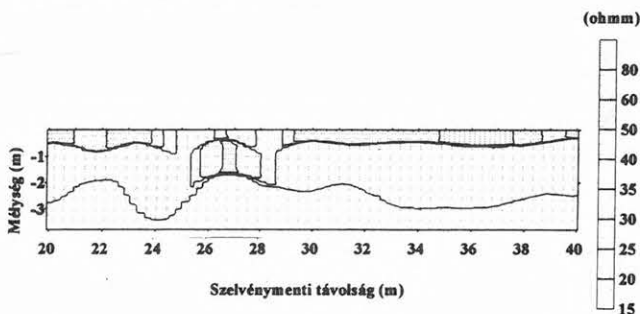
Fig. 15. Pseudo section for dipole-dipole array with reference points belonging to dipole  $AB$  (Kisköre, embankment)



16. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény pole-pole mérési adatokból (árvédelmi gát, Kisköre)

Fig. 16. Pseudo section of pole-pole configurations (Kisköre, embankment)

A mérések vonatkozási pontjai a pole-pole elrendezésnél a két aktív elektróda közepénél  $AM$  mélységben, a dipól elrendezésnél a szokásos  $R/2$  mélységben voltak. Látható, hogy a dipól elrendezés sokkal változékonyabb szelvényt szolgáltat, mint a pole-pole elrendezés. Amint azt az FD számításoknál leírtuk, a dipól elrendezésnél számítani kell a geometriai eltolás jelenségére, amely problémát jelent az 1-D közelítésnél. Ezért a dipólméréseket csak a 15. ábrán bemutatott korlátozott behatolásig vontuk be az inverzióba, a lokális struktúrák mélységi lehatárolása az inverzióban a pole-pole mérések alapján történt. A dipól és pole-pole adatok együttes inverziója a kapott eredmény megbízhatóságát is növelte (az újabb mérési adatok által szolgáltatott információk bevonásával). Az együttes inverzió eredménye határozottan és jól körvonalazva szolgáltatja a gát regionális és lokális struktúráját (17. ábra). A gát biztonsága szempontjából figyelemre méltó a 26–28 m-es szelvényben 0,5–2 m mélységközben jelentkező inhomogenitás, amely üregek zónára utal.



17. ábra. 1.5-D inverzió eredménye pole-pole és dipól-dipól mérési adatokból (árvédelmi gát, Kisköre)

Fig. 17. The result of 1.5-D inversion for pole-pole and dipole-dipole configurations (Kisköre, embankment)

A dőlésirányú méréseknél az 1-D közelítés durva hibákat is okozhat, ezért szükséges a kapott inverziós eredmény ellenőrzése. Erre 2-D FD modellezést használtunk. A 15. ábrán bejelölt áramdipólhoz tartozó mérési adatok és az FD modellezéssel számított adatok összehasonlításával kapott mintegy 5%-os eltérés nagyon jónak mondható.

## 7. Üregek kimutatása geoelektromos tomográfia módszerével

A geoelektromos tomográfiát elsősorban fűrőlyukak közötti átvilágítási mérésekkel célszerű megvalósítani. Szóba jöhetnek a fűrőlyuk-felszín közötti átvilágítások is, illetve a csak felszíni mérések geoelektromos rekonstrukciós feldolgozása. A geoelektromos tomográfia módszerét ma világszerte széles körben kutadják. A 2-D és 3-D előre-modellezésen alapuló rekonstrukciós eljárás bevezetése SHIMA [1992] nevéhez kapcsolódik. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén 1984 óta folynak a geoelektromos tomográfiával kapcsolatos kutatások, amelynek keretében többféle mérési módszerrel gyűjtött adatok feldolgozására alkalmas rekonstrukciós eljárásokat dolgoztak ki. Az első tomográfiai eredmények széntelepek geoelektromos átvilágításából születtek [CSÓKÁS et al. 1986]. A geoelektromos rekonstrukció bemenő adatait az

$$E = \frac{R_a(\text{mért}) - R_a(\text{zavartalan})}{R_a(\text{zavartalan})} \quad (4)$$

képlet alapján állítják elő, ezzel megkerülik a direkt feladat megoldását az inhomogén feladatra.

Az inhomogenitások jellemzésére bevezetik az

$$e = \frac{\rho_a - \rho_a(\text{zavartalan})}{\rho_a(\text{zavartalan})} \quad (5)$$

lokális anomália függvényt, amelyet az  $E_K$  relatív látszólagos ellenállás (látszólagos fajlagos ellenállás) eltérésekből lehet meghatározni [CSÓKÁS et al. 1986]:

$$E_K = \frac{1}{A_K} \int_{A_e} e dA \quad (6)$$

Az  $e$  lokális anomália függvényt a geoelektromos rekonstrukció módszerével számítják. A rekonstrukció eredményeül kapott lokális anomáliafüggvények [DOBRÓKA, GYULAI 1990] értelmezésével az üregek meghatározhatók. A mérési módszereknek legalább két feltételt kell kielégíteni. Egyrészt alkalmasnak kell lenni a mérési geometriától csak kissé függő átvilágítás jellegű mérésekre, másrészt elegendően nagy paraméter-érzékenységgel kell bírni az üreg kimutatásához (itt üreg-geometriai paraméter-érzékenységekre gondolunk).

## Összefoglalás

A geoelektromos üregekutatás több mint két évtizedes gyakorlati tapasztalata és az újabb kutatási eredmények azt mutatják, hogy ezekkel a módszerekkel lehetőség van az üregek kimutatására és lokalizálására. Az alkalmazás korlátai inkább technikai, mint módszertani jellegűek. A módszer kellően termelékeny és sok változata van úgy a mérési, mint a kiértékelési módszereknek. A számítógépvezérelt terepi mérések, az újabb kutatási eredmények, a ma már hozzáférhető FD-modellező programok és más inverziós kiértékelési módszerek alkalmazása hatékonyabb üregekutatást tesz lehetővé a korábbiaknál.

A kutatást támogatta az OTKA a T019088 projekt finanszírozásával, amiért a szerző köszönetét fejezi ki. Továbbá köszönettel tartozom Klaus SPITZER német kutatónak, aki egy nagyon jó 3-D FD programot adott át személyes használatra.

## HIVATKOZÁSOK

- BARKER R. D. 1992: A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break* 10, 53–62
- CSÓKÁS J., DOBRÓKA M., GYULAI Á. 1986: Geoelectric determination of quality changes and tectonic disturbances in coal deposits. *Geophysical Prospecting* 34, 1067–1081
- CSÓKÁS J., GYULAI Á. 1974: Mérnökgeofizika az építőiparban. *Építőanyag*. XXVI, 1, 13–17
- DOBRÓKA M., GYULAI Á. 1990: Geoelektromos tomográfiai módszerfejlesztés rétegzett földtani szerkezetek fizikai és geometriai jellemzőinek és inhomogenitásainak meghatározására. Kutatási jelentés. Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék
- DOBRÓKA M., GYULAI Á., ORMOS T., CSÓKÁS J., DRESEN L. 1991: Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded

- in an underground coal mine. Geophysical Prospecting 39, 644–665
- FERENCZY L. 1980: Felszínközeli üregek mélységének és méretének meghatározása geoelektromos dipól szelvényezéssel. Magyar Geofizika XXI, 4., 134–142
- GYULAI Á. 1989: Parameter sensitivity of underground DC measurements. Geophysical Transactions 35, 3, 209–225
- GYULAI Á. 1996–1997a: Geoelektromos 3-D FD modellezési vizsgálatok. II. részjelentés (OTKA T019088). Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék
- GYULAI Á. 1996–1997b: Üregek és üreges szerkezetek kimutatása 1.5-D inverziós módszerrel. III. részjelentés (OTKA T019088). Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék
- GYULAI Á., ORMOS T. 1997a: Vertikális elektromos szondázások kiértékelése 1.5-D inverziós módszerrel. Magyar Geofizika 38, 1, 25–35
- GYULAI Á., ORMOS T. 1997b: Újabb eredmények a VESZ adatok 1.5-D inverziós kiértékelésében. Magyar Geofizika 38, 4, 257–264
- GYULAI Á., ORMOS T., DRESEN L. 1998: Parameterbestimmung von 2-D geologischen Strukturen mit Simultaninversion von VES Daten — Ein neues Verfahren. 58. DGG Tagung, Göttingen, Németország, kiadvány 92.
- LIEBIG A. 1996: Zweidimensionale geoelektrische Inversion als Teil einer integrierten geophysikalischen Auswertung zur Erkundung oberflächennaher Schichten. Doktori értekezés. Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität, Bochum
- MILITZER H., RÖSLER R., LOSCH W. 1977: Theoretische Modellkurven zum geoelektrischen Hohlraumnachweis. VEB, Bus, Welzen
- NYÁRI Zs. (PLANK Zs.) 1994: Üregkutatás geofizikai módszerekkel. Diplomaterv. Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék
- NYÁRI Zs. 1995: Hohlraumerkundung mit geoelektrischen Meßverfahren. DGG Tagung, Hamburg, Németország, kiadvány 222
- NYÁRI Zs. 1996–1997: Analitikus geoelektromos előmodellezési és inverziós vizsgálatok. I. részjelentés (OTKA T019088). Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék
- NYÁRI Zs. 1997: Analitikus modellezés a geoelektromos üregkutatás lehetőségeinek vizsgálatára. Magyar Geofizika 38, 3, 194–204
- SALÁT P., TARCSAI Gy., CSEREPES L., VERMES M., DRAHOS D. 1982: A geofizikai interpretáció információs statisztikus módszerei (Szerk.: SALÁT). Tankönyvkiadó
- SHIMA H. 1992: 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data. Geophysics 57, 1270–1281
- SPITZER K. 1995: A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. Geophys. J. Int. 902–914
- TSOKAS G. N., TSOURLOS P. 1997: Transformation of the resistivity anomalies from archeological sites by inversion filtering. Geophysics 62, 36–43

## FÖLDTUDOMÁNYOK AZ INTERNETEN

A Nemzeti Információs Infrastruktúra Fejlesztési Program Koordinációs Iroda kiadásában megjelent **KOVÁCS P. Gábor: A hálózat használata a földtudományokban c. füzet**e. Az Internet földtudományi információforrásait ismertető 64 oldalas kiadvány 200 Ft-ért megrendelhető a NIIF Program Koordinációs Iroda titkárságán — 1132 Budapest, Victor Hugo u. 18–22., tel.: 349–7987 — vagy böngészhető, ill. letölthető a Webről (természetesen ingyen) a következő változatokban és címeken:

- hipertext formátumban:  
[http://www.iif.hu/dokumentumok/niif\\_fuzetek/foldtud/index.html](http://www.iif.hu/dokumentumok/niif_fuzetek/foldtud/index.html)
- WinWord 6.0 formátumban, tömörítve:  
[http://www.iif.hu/dokumentumok/niif\\_fuzetek/Foldtud.arj](http://www.iif.hu/dokumentumok/niif_fuzetek/Foldtud.arj)
- szövegfájl változatban:  
<gopher://gopher.mek.iif.hu:7070/00/porta/szint/muszaki/szamtech/wan/fuzetek/foldtud.hun>