

# Felszín alatti szennyeződések kutatása 2D és 3D egyenáramú elektromos módszerekkel — esettanulmányok<sup>1</sup>

NYÁRI ZSUZSANNA<sup>2</sup>, NEDUCZA BORISZLÁV<sup>2</sup>

*A felszín alatti szennyeződések roncsolásmentes kimutatása fontos lépés a környezeti diagnosztikai eljárások során. Az ilyen módszerek alkalmazásával lehetőség nyílik a szennyezőanyag kimutatására anélkül, hogy felmerülne a szennyeződés függőleges irányú továbbterjedése. Az egyenáramú elektromos mérési elrendezések hasznosnak bizonyulnak ilyen feladatok során, amennyiben vezetőképesség szempontjából a szennyezőanyag eltér a földtani környezetétől. A bemutatásra kerülő munka két kísérleti területen mutatja be különböző típusú 2D és 3D mérési elrendezések alkalmazásának lehetőségeit. Az eredményeket minden esetben független földtani és geokémiai vizsgálatok alapján érvényesítettük.*

**Zs. NYÁRI, B. NEDUCZA: Detection of near-surface contamination with 2D and 3D geoelectrical methods — case histories**

*Non-invasive detection of near-surface contaminants is an important step during the process of environmental diagnostics. Applying such method the delineation of the contaminant will be possible without the risk of the contaminant's vertical spread. Geoelectrical surveying methods are useful for these tasks when there is significant conductivity contrast between the contaminant and its geological surroundings. This paper introduces the possibilities of application different types of 2D and 3D survey methods at two test sites. All the results were validated by independent geological and geochemical research.*

## Bevezetés

A múltbeli ipari tevékenységek örökségeként a felszín alatti szennyezések között gyakori a vizes fázisú szennyezőanyagok jelenléte, melyek a talajvízben önálló vagy külön fázisban halmozódnak fel. Ez a felhalmozódás gyakorlatilag ellehetetleníti, vagy rendkívül megdrágítja a szennyezőanyag-eloszlás diagnosztikáját, mert itt a mélyebb földtani szerkezetek vizsgálatára nem alkalmazható a hagyományos, közvetlen fúrásos feltárás és mintavétel a mélyebb víztartók elszennyeződésének kockázata miatt. Az ilyen típusú szennyezőanyagok és szennyezések gyakoriak, a leginkább elterjedtek közülük a szerves halogénezett oldószerek, higany, savak, lúgok, fémcsók tömény oldatai stb.

Az említett szennyezőanyagokat önálló fázisban tározó földtani közeg megfelelő diagnosztikájának hiányában leggyakrabban csak kevésbé hatékony kármentesítéseket alkalmaznak az anyag vízzel történő transzportútvonalának megszakítása céljából. Az ilyen típusú, 2–3 évtizede üzemelő kármentesítések tapasztalatai alapján gyakran több évtizedre–évszázadra tehető a kármentesítés teljes időtartama, ami sokszor gazdaságilag elviselhetetlen terhet jelent a szennyeződésért felelős és a környező területek lakossága számára.

A felszín alatti szennyezőanyagok terjedésének pontos ismerete meghatározó információ a későbbi kármentesítés tervezéséhez. A geofizikai adatokon alapuló, megfelelő megbízhatóságú hidrodinamikai transzport modellek alkalmazásával az időbeli folyamatok előre jelezhetők, geofizikai monitoring mérésekkel pedig a változások nyomon követhetők [SZÜCS, MADARÁSZ 2006].

A fenti probléma megoldására kutatási konzorciumot hoztunk létre az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, a BGT

Hungária Kft. és a Miskolci Egyetem Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Tanszéke kutatóinak részvételével. A Nemzeti Fejlesztési Terv keretében olyan alkalmazott kutatás-fejlesztési programot hajtottunk végre, melynek célja, hogy teszt területeken végzett vizsgálatok alapján kifejlesszünk egy, a felszín alatti szennyeződések roncsolásmentes diagnosztikájára alkalmazható módszeregyüttest.

## Az alkalmazott mérési módszerek

Az egyenáramú elektromos mérési módszer felszínközei szennyeződések kutatására való alkalmazása a szakirodalom szerint széleskörben elfogadottnak számít. Laboratóriumi mérésekkel igazolták, hogy állandó víztartalom mellett az oldott ionkoncentráció növekedése jelentős csökkenést okoz a közet- és talajminták fajlagos ellenállásában [YOON, OH, PARK 2002]. A MURRAY, LAST, TRUEX [2005] által készített összefoglaló jelentés a fő geofizikai módszereket osztályozza aszerint, hogy a különböző típusú szennyezőanyagok milyen hatékonysággal kutathatók az elterjedt geofizikai módszerekkel. A tanulmány az egyenáramú elektromos mérési módszerek közül a felszíni háromdimenziós és a fúrólyukban végzett átvilágításos módszerek alkalmazását kíválnak ítéli a probléma megoldására fémesszennyeződések esetén. A két módszer kombinált alkalmazásával a szerzők nem foglalkoztak.

A bemutatásra kerülő esettanulmányokban a két- és háromdimenziós egyenáramú mérési módszer alkalmazhatóságát vizsgáltuk felszín alatti, vizes fázisú szennyeződések esetén. GUÉRIN et al. [2004] savüzem és cinklerakó területén alkalmazták a felszíni 3D-s mérést szennyeződéshelyizálásra, pole-pole elrendezés esetén. Kutatásunk során további elrendezéseket is vizsgáltunk, valamint a felszíni és fúrólyukbeli átvilágítás módszereit ötvözve a vizsgált térrész teljes háromdimenziós leképezését végeztük el. A felszíni mérési háló esetén a LOKE [1996–2004] által ajánlott

<sup>1</sup> Beérkezett: 2007. október 10-én

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

elrendezések közül a pole-pole, a dipól-dipól és a bipól-bipól elrendezéseket alkalmaztuk. Az elektróda konfigurációk főbb jellemzőit az 1. táblázat ismerteti.

| Elrendezés neve | Elektródák helyzete                                    | Felbontás | Kutatási mélység |
|-----------------|--------------------------------------------------------|-----------|------------------|
| Pole-pole       | $C_2 \infty \leftarrow C_1 P_1 \rightarrow \infty P_2$ | gyenge    | nagy             |
| Dipól-dipól     | $C_1 C_2 \rightarrow P_1 P_2$                          | jó        | sekély           |
| Bipól-bipól     | $C_1 P_1 \rightarrow C_2 P_2$                          | jó        | sekély           |

1. táblázat. Háromdimenziós mérési elrendezések és főbb jellemzőik. C: táp-, P: mérőelektróda

Tab. 1. Three-dimensional survey arrays and their main characteristics. C: current, P: potential electrodes

Nagyobb, illetve beépített területeken nehézségekbe ütközhet a 3D-s mérési háló lefektetése, ezért ilyen esetekre ajánlott a 2D-s mérési vonalak hálózatának alkalmazása. DAHLIN, ZHOU [2006] végzett zajérzékenységi vizsgálatokat kétdimenziós mérési vonalak esetére, különböző elektróda elrendezések alkalmazásával, eltemetett hulladéklerakó lehatárolásához, illetve felszínközeli térrész elektromos módszerrel történő leképezéséhez. Figyelembe véve a zajérzékenységi adatokat és korábbi tapasztalatainkat, az inverz Schlumberger-elrendezést választottuk, amelynek részletes ismertetése számos szerzőnél, pl. LOKE [1996–2004] megtalálható.

Mindkét kísérleti területen rendelkezésünkre álltak fúrásadatok, víz- és talajkémiai elemzések eredményei, amelyek segítségével minden geofizikai mérés értelmezését ellenőrizni és igazolni tudtuk.

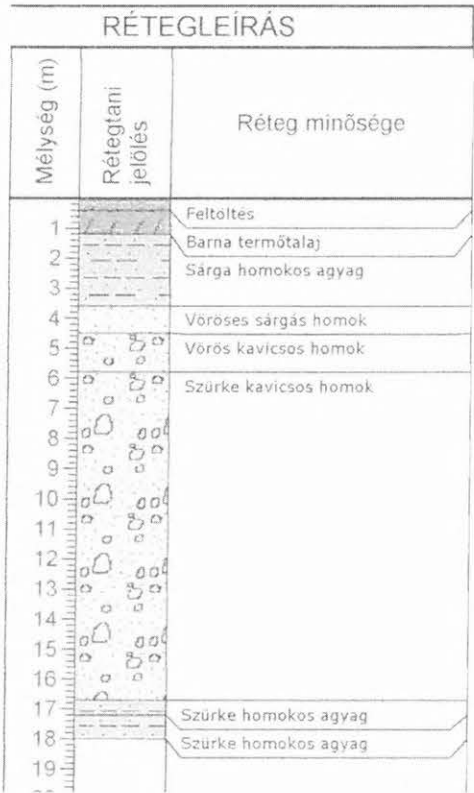
### Az 1. sz. kutatási terület vizsgálata

A terület Észak-Magyarországon található egy vegyi üzem területén. A felszín alatti térrész erősen szennyezett elsősorban fémes és ionos szennyezőanyagokkal, de kimutatható szerves eredetű szennyeződések jelenléte is. A szennyezőanyag felhalmozódása a talajvízhez köthető.

#### Földtani ismeretek

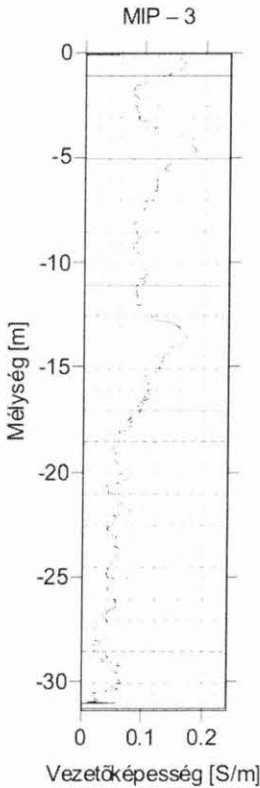
A kutatási területről származó földtani ismereteink a helyszínen végzett fúrások és CPT (Cone Penetration Test — Mérnökgeofizikai Szondázás) szelvényeken alapulnak. A területre folyóvízi üledékes rétegsor jellemző, erre mutat példát az 1. ábrán látható, fúrások feltárás nyomán készített rétegjellemzés. A felszíni termőréteg alatt 1–5 m vastag agyag található, amelyet homokos-kavicsos összletek követnek, helyenként vékony agyagbetelepülésekkel. Ez a réteg lehet alkalmas a szennyezett talajvíz tárolására. A függőleges irányú terjedést egy 18–20 m mélységben lévő agyagréteg akadályozza meg, ennek hiányban következhet be a szennyeződések vertikális terjedése. A vízzáró réteg alatt kavicsos, homokos, kőzetlisztes rétegek váltakoznak.

A CPT vizsgálatok során mért ellenállásszelvényekből tudjuk (2. ábra), hogy az agyakok és a területen található nagyobb szemcsenagyságú anyagok vezetőképessége között 2–3-szoros különbség a jellemző. Ellenben a szennyeződéstől nagyjából vagy teljesen mentes területeken mért CPT vezetőképesség értékek egy-két nagyságrendnyi eltérést



1. ábra. Jellemző fúrásos rétegsor az 1. sz. kísérleti területen

Fig. 1. Typical borehole structure on test site 1



2. ábra. Jellemző CPT vezetőképesség szelvény. A 0,15 S/m feletti értékek utalnak szennyeződés jelenlétére

Fig. 2. Typical CPT conductivity section. Values above 0,15 S/m are referring to presence of contamination

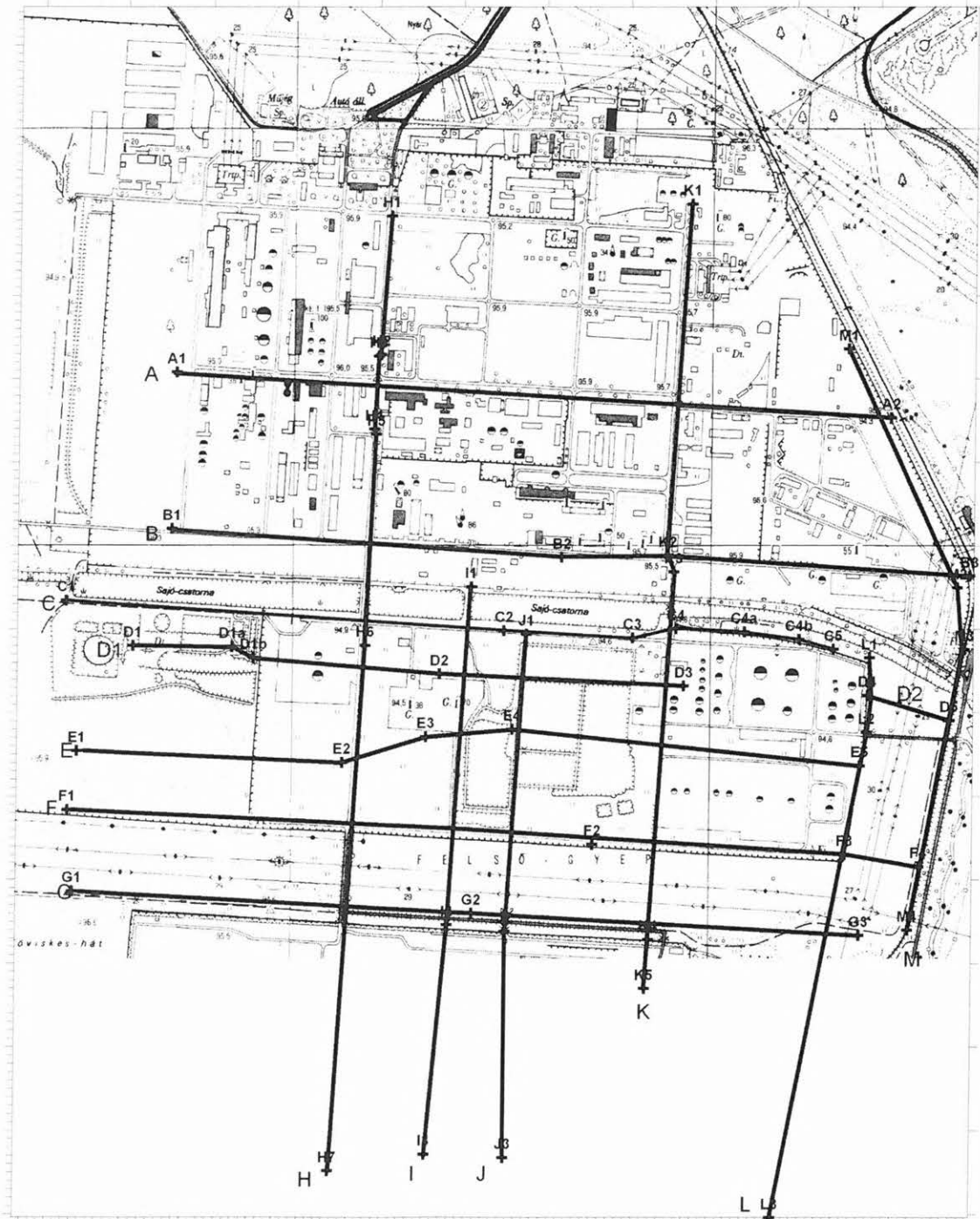
mutatnak a szennyezett területeken mértékhez képest, amiből arra következtethetünk, hogy a földtani szerkezet változása nem okoznak jelentős fajlagos ellenállás kontrasztot, míg a szennyezett területeken kiugróan eltérő ellenállás értékeket mérhetünk. A kis ellenállás értékek ( $3 \Omega\text{m}$  alatt) nem lehetnek földtani eredetűek, azok inkább a megemelkedett ion- és fémkoncentráció eredményei.

### Geofizikai mérések

A geofizikai mérések feladata az volt, hogy lehatároljuk a szennyezett talajvíz felhalmozódási zónáit, és kijelöljük

azokat a helyeket, ahol a szennyeződés függőleges irányú terjedésére lehet számítani.

A kutatási terület mérete hozzávetőlegesen  $3,5 \times 2,5 \text{ km}$  volt, ami túl nagy háromdimenziós mérési háló alkalmazásához. Több, kisebb méretű mérési rendszer lefektetésére a terület sűrű beépítettsége miatt nem volt lehetőség. Ezért a kutatást sűrűn elhelyezett mérési vonalak mentén végeztük el, melyek nyomvonalai igazodtak a terepi lehetőségekhez. A mérési vonalak helyszínrajzát a 3. ábra mutatja. A teljes szelvényhossz  $22,5 \text{ km}$  volt, 14 db szelvény mentén.



3. ábra. A mérési vonalak helyszínrajza az 1. sz. kísérleti területen

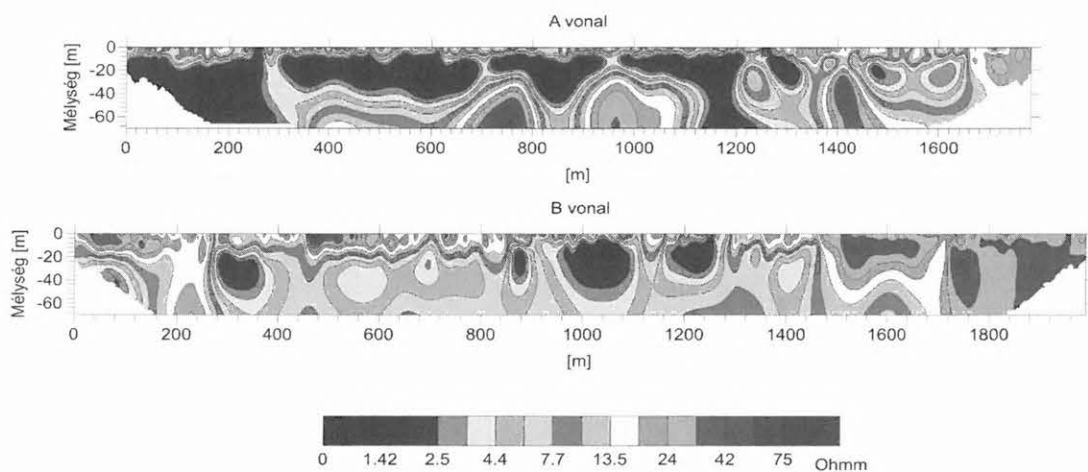
Fig. 3. Location map of survey lines on test site 1

Figyelembe véve a szakirodalmi adatokat, a mérési vonalhálózat terepi adottságok által meghatározott elhelyezkedését, a megkívánt behatolási mélységet és az egyes elektrodaelrendezésekhez tartozó felbontóképességet, az inverz Schlumberger-elrendezés használata mellett döntöttünk. A maximális behatolási mélység, ahonnan még fajlagos ellenállás értékeket mérhetünk, 70 m körül adódott ezzel az elektroda kiosztással. A viszonylag nagy behatolási mélységet a korábbi (2003. évi) VESZ mérési eredményekből megismert mélységi anomáliák ellenőrzésének igénye is indokolta. A terepi munkára 2006 októberében és novemberében került sor, amikor a kedvező időjárási viszonyok miatt a talaj menti fagyok nem befolyásolhatták a mérési eredményeket. A mé-

réseket a SuperSting R8 sokelektrodás egyenáramú elektromos mérési rendszerrel végeztük.

#### Adatfeldolgozás, értelmezés

A mérési adatok feldolgozását a LOKE, BARKER [1996] inverziós módszerét alkalmazó Res2Dinv programmal végeztük. A mért látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeket egyenként feldolgoztuk és értelmeztük, majd területi értelmezést készítettünk a vonalak térbeli megjelenítése alapján. A 14 mérési vonalból a terjedelmi korlátok miatt csak kettő értelmezését mutatjuk be részletesen, melyek inverzió után kapott fajlagos ellenállás értékeit a 4. ábra mutatja.



4. ábra. A és B vonalak fajlagos ellenállás szelvényei

Fig. 4. Resistivity sections of profiles A and B

Az A vonal a kutatási terület északi részén található Ny-K irányú szelvény. Uralkodóan rendkívül alacsony ( $3 \Omega\text{m}$  alatti) fajlagos ellenállás értékeket kaptunk eredményül, ami fémes-ionos szennyeződés jelenlétére utal. A szelvényen látható, hogy a felszíni fedőréteg alatt már néhány méteres mélységben megjelenik a kis ellenállású, szennyezett talajvíz. A 20 m környékén fúrásokból kimutatott agyagréteg a szelvény nagy részén nem követhető: a szennyezett zónákban vagy hiányzik, vagy olyan vékony, hogy nem gátolja a szennyeződés vertikális terjedését, annak hatását az ellenállás szelvényen elnyomja. A mérési vonal első kb. 600 m-en az alsó és felső, homok- és kavics-tartalmú víztartó rétegek teljesen telítettek látszanak a szennyezett talajvízzel, a két réteg közti határ nem kimutatható. A 380–1100 m-ig terjedő szelvényhosszon fokozatosan feltűnik az alsó víztartó és az azt határoló agyagréteg jelenlétére utaló, nagyobb ellenállású anomália. Ez alapján arra lehet következtetni, hogy a szelvény második felében a szennyezőanyag jelenléte a felső víztartó rétegre korlátozódik, kivéve egy rövidebb szakaszt az 1800-as szelvényméteren.

A B vonal párhuzamos az előbb elemzett A vonallal, attól délre kb. 300 m-re helyezkedik el. A szelvény első 900 m-en a 20 m fölötti felső víztartó réteg tisztának tűnik, jellemzően  $60\text{--}80 \Omega\text{m}$ -es fajlagos ellenállás értékek jellemzik. A  $8\text{--}10 \Omega\text{m}$  körüli fajlagos ellenállású agyagréteg alatt jól körülhatárolható  $3 \Omega\text{m}$  alatti ellenállás értékekkel je-

lentkezik a szennyezett talajvíz. A 160–280 m közti szakaszon a vízzáró réteg eltűnik, ezen a helyen történhetett az alsó réteg elszennyeződése. A 900 m-től keletre lévő szakaszon megfigyelhető, hogy a kis ellenállású értékek fokozatosan a felszínközeli részekben is jellemzők lesznek, miközben az agyagrétegre utaló anomália eltűnik. Ez a felső víztartó réteg A vonalhoz hasonló mértékű elszennyeződését jelenti. A szelvény hátsó szakaszán, 1400 m után megnövekednek a fajlagos ellenállás értékek, ami tiszta, szennyeződésmentes közegre utal.

A területi értelmezést az 5. ábrán található háromdimenziós leképezés alapján végeztük, figyelembe véve az egyedi vonalak értelmezésével kapott eredményeket. Horizontálisan lehatároltuk a kis fajlagos ellenállás értékkel jellemezhető szennyezett talajvíz elterjedését. Kijelöltük az alsó és felső víztartó réteg közti, vertikális gátat jelentő agyagrétegben található hiányokat, ahol a szennyezőanyag függőleges irányú terjedése valószínűsíthető.

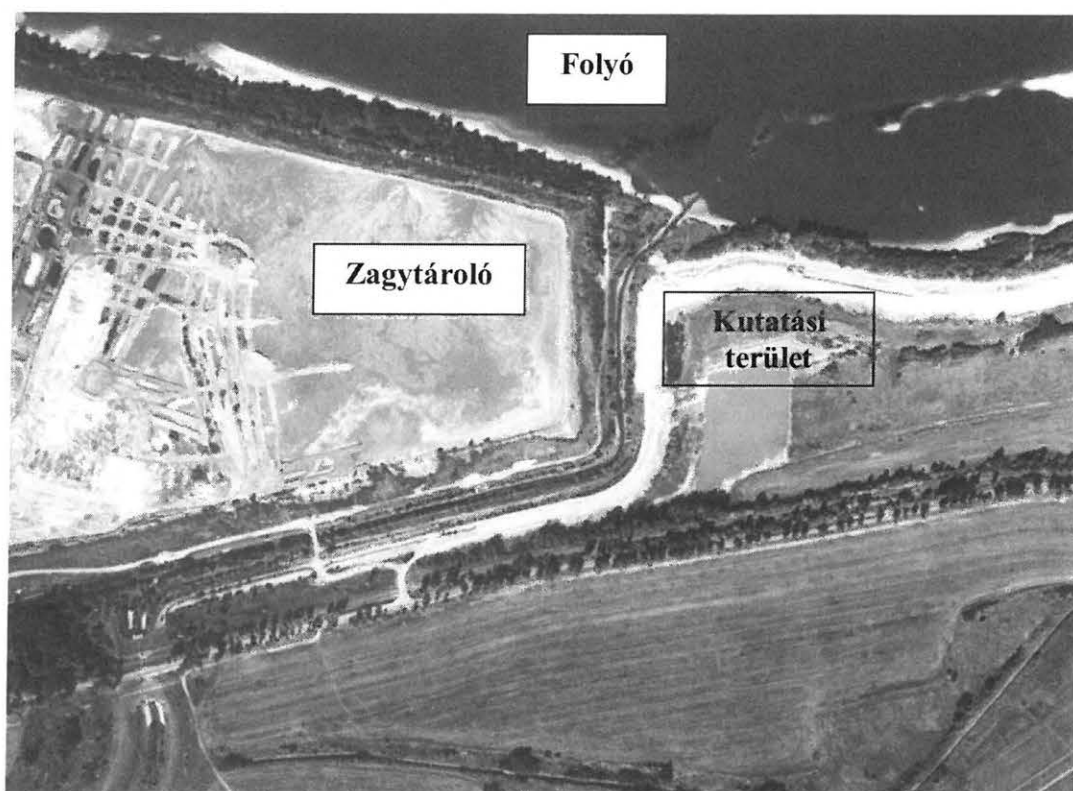
## A 2. sz. kutatási terület vizsgálata

A kutatási terület a Kisalföldön található, egy timföldgyári melléktermékeket tartalmazó zagytározó közvetlen közelében. A területről készített légi felvétel látható a 6. ábrán. A geofizikai mérések célja az volt, hogy vizsgáljuk a felszín alatti szennyeződések kimutatásának lehetőségeit különböző háromdimenziós mérési rendszerek alkalmazásával.



5. ábra. Fajlagos ellenállás értékek térbeli eloszlása a mérési vonalak mentén

Fig. 5. Spatial distribution of resistivity values along the survey lines



6. ábra. Légi felvétel a 2. sz. kísérleti területről

Fig. 6. Air photo of test site 2

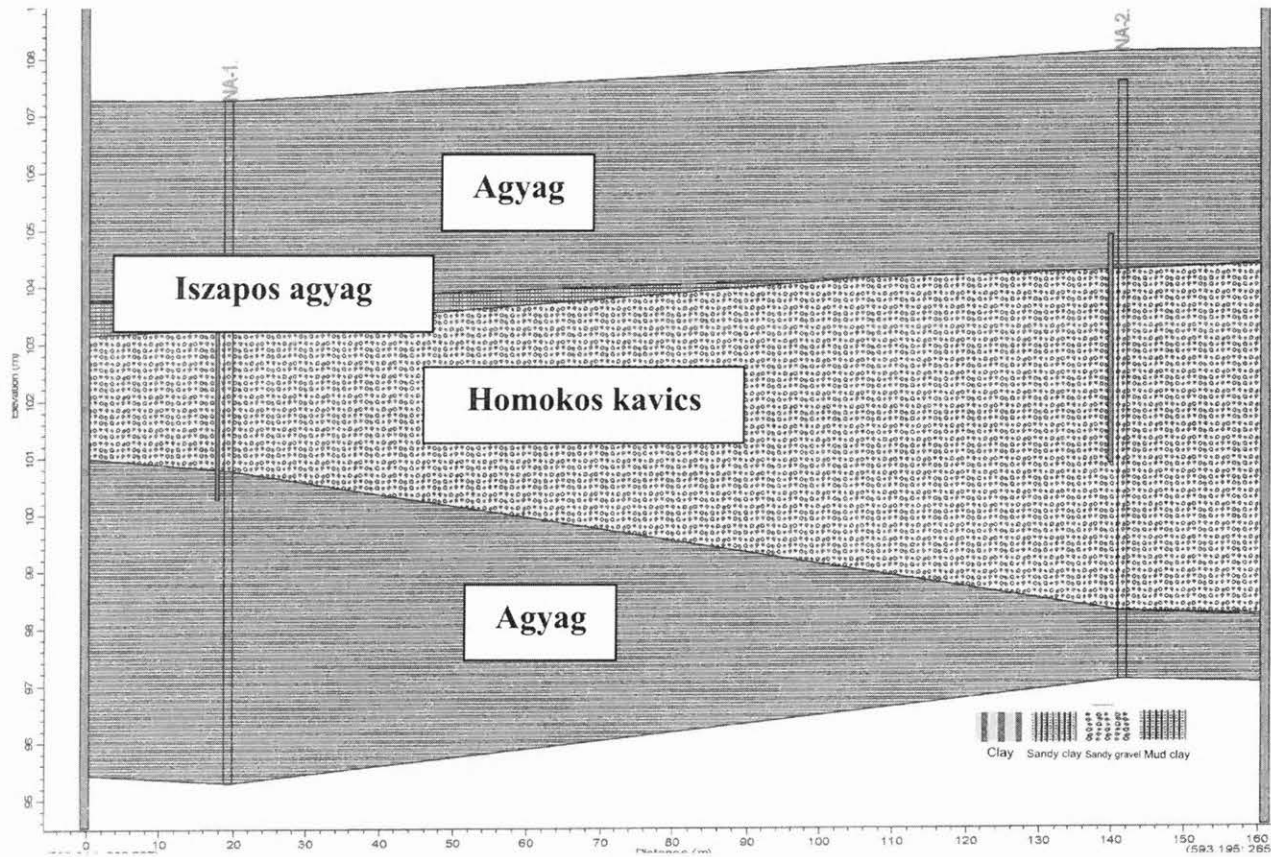
#### A kutatási terület jellemzése

A szennyezőanyagot termelő timföldgyár környezetében található zagykazettákban az üzem működésének kezdete (1951) óta, a technológiai folyamat részeként halmozódott fel a vörösiszap. A terület földtani és geokémiai vizsgálatainak eredményét HALMÓCZKY [2005] nyomán ismertetjük. A zagykazetták nélkülözik a tökéletes természetes, valamint a mesterségesen kialakított

műszaki védelmet, így a II. osztályú veszélyes hulladék, a vörösiszap közvetlen kapcsolatban áll a pleisztocén homokos-kavicsos összletben tárolt talajvízzel. Az elérhető vízkémiai vizsgálati eredmények alapján a térségben kiemelkedően magas a fajlagos elektromos vezetőképesség ( $3000\text{--}9000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ), amely magas oldott sókoncentrációt jelez. A magas sótartalmat elsősorban a nátrium, szulfát, klorid, foszfát, fluorid, ammónium ionok okozzák. A

kutakban mért pH is magas, általában 8–10 közötti. A toxikus fémek közül meg kell említeni a molibdént, amely 1000–4000 ppm nagyságrendű. A 10–100 mg/l nagyságrendű KOI és TOC értékek magas szervesanyag-tartalmat prognosztizálnak. A felszín alatti vízben tehát összetett, szerves és szervetlen vegyületek, elemek alkotta szennyezetttség mutatható ki, amelynek eloszlása és horizontális kiterjedése jelenleg kevésbé ismert.

A területen folyóvízi üledékes rétegsor jellemző (7. ábra). A felszíni talajréteget egy 3–5 m vastag agygréteg követi. Alatta található egy 2–6 m vastagságú homokos-kavicsos, változó szemcseméretű víztároló összlet némi iszapos-agyagos közbetelepüléssel, amelyet alulról újabb vastag vízzáró agygréteg határol. A pleisztocén kavicsos összletben tárolt talajvíz mindenkor áramlási viszonyait a közeli folyó vízállása határozza meg.

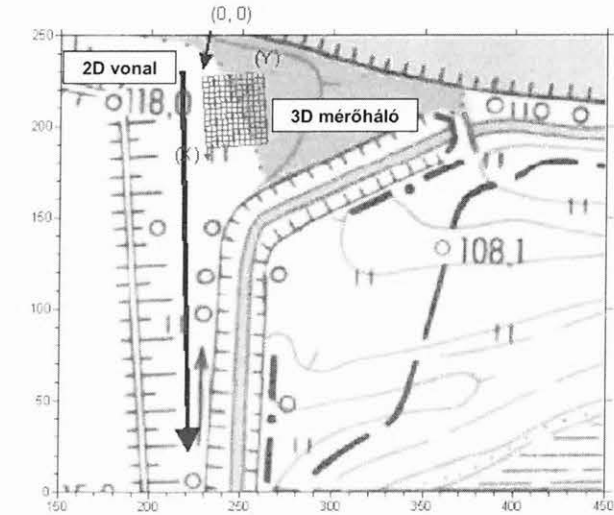


7. ábra. Fúrásos adatokon alapuló földtani rétegsor a 2. sz. kísérleti területen

Fig. 7. Geological structure based on borehole data on test site 2

Előzetes geofizikai vizsgálatok

A kutatási területen a háromdimenziós mérési háló optimális elhelyezésének érdekében először egy hosszú, két-dimenziós szelvény mentén végeztünk méréseket. A mérési vonal elhelyezésénél szempont volt, hogy az minél több fúrás közelében haladjon el, melynek adatai felhasználhatók az értelmezésnél, valamint hogy áthaladjon mind bizonyítottan szennyezett, mind tiszta területeken. Az előzetes adatok alapján a területet DK-ről határoló patak mentén mértünk, mert a rendelkezésünkre álló vízminta adatok alapján itt volt a legmagasabb a szennyeződés koncentrációja. A szelvény a folyó partján elhelyezkedő NA-1 fúrástól indult és érintette az NA-2, II/1 és II/2 fúrásokat. A mérést kis mélységű kutatásra terveztük, mivel a szennyeződés valószínűleg a felső néhány méterben található kavicsra korlátozódik. A vízminták alapján a szelvény végén már nem található felszínközeli szennyeződés. A 2D mérési vonal és későbbi 3D mérési háló elhelyezkedését a 8. ábra mutatja.

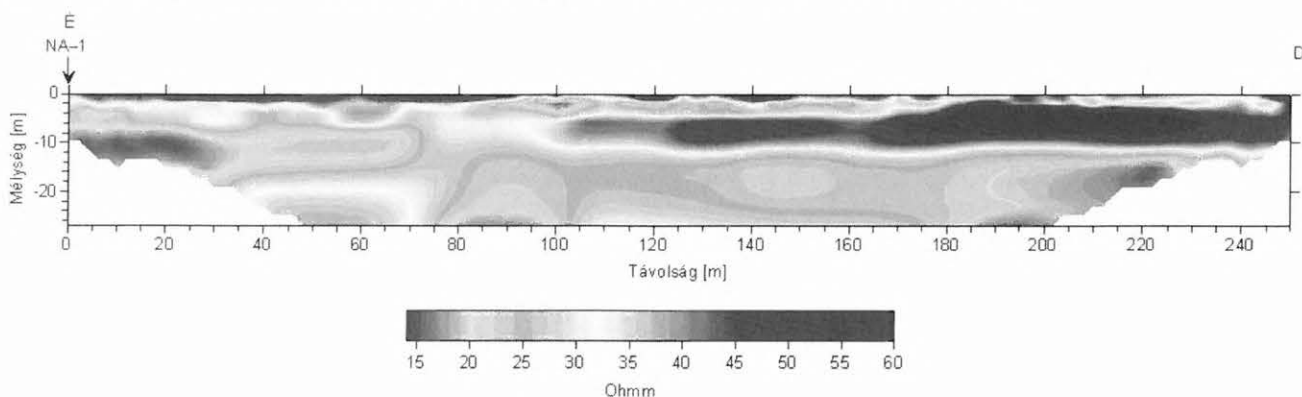


8. ábra. 2D és 3D mérések nyomvonalai a 2. sz. kísérleti területen

Fig. 8. Locations of 2D and 3D surveys on test site 2

A mérést a jó horizontális felbontóképességgel jellemezhető dipól-dipól elrendezéssel végeztük. Bár a módszernek nagyobb elektródátávolságok esetén már jelentős a zajérzékenysége [NYÁRI 2000], esetünkben a csekély kutatási mélységhez nem volt szükség arra, hogy a dipólok távolságát jellemző  $n$  értéket a szakirodalom által ajánlott

6 fölé emeljük. Az egységnyi elektródátávolság 2 m volt, és a 30 m-es maximális behatolást a dipólok túlzott eltávolítása nélkül, 23 mélységszinttel sikerült elérni úgy, hogy a jel/zaj viszony romlásakor növeltük a dipólt alkotó elektródák távolságát. A teljes szelvényhossz 250 m volt, a méréshez 126 elektródát használtunk.



9. ábra. 2D-s fajlagos ellenállás szelvény a 2. sz. kísérleti területen

Fig. 9. 2D resistivity section on test site 2

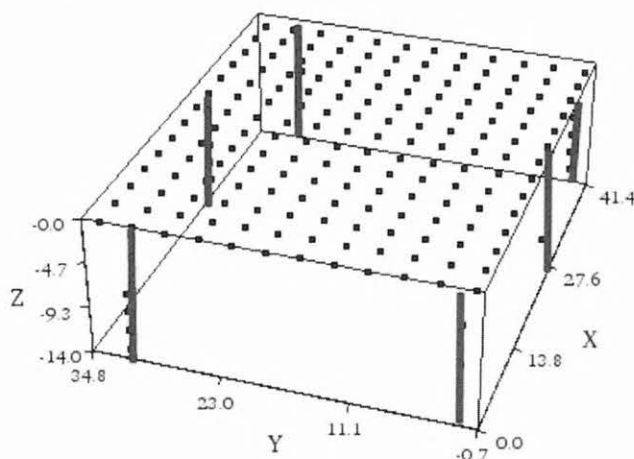
A 9. ábrán látható, inverzióval előállított fajlagos ellenállás szelvény D-i (jobb) oldalán néhány méteres fedő alatt jól kivehető a nagy ellenállású kavics 8–10 méteres mélységig. Ez alatt megjelenik az agyagos-közetlisztes, kisebb ellenállású fekvő. Ez a rétegsor illeszkedik az NA-II/2 fúrásból megismert földtani szerkezethez, a vízminták elemzése alapján pedig tudjuk, hogy szennyezőanyag nincs jelen a talajvízben. A szelvény északi oldalán ez a rétegződés már nem követhető, a várt kavicsréteg helyén kiugróan kicsi fajlagos ellenállású összlet jelenik meg. Az ezen a szelvényrészén található NA-1 fúrásban a víztartó kavicsréteg csak 2,5 m vastagságú, amely azonban a vízminták elemzése szerint 7000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  vezetőképességű, fémeket és oldott ionokat tartalmazó vízzel telített. Az előzetes mérési szelvényen látszik, hogy szennyeződésmentes területen a földtani rétegsor leképezhető a fajlagos ellenállás értékek alapján, míg a szennyezett területen a módszer a szennyeződés lehatárolására alkalmas.

#### Felszíni háromdimenziós mérések

A felszíni háromdimenziós mérési elrendezések alkalmazhatóságának vizsgálatához a rendelkezésünkre álló 168 db elektródából egy 12–14-es mérési hálót hoztunk létre, 3 m-es egységnyi elektródaközszelével (10. ábra). A mérést DAHLIN, BERNSTONE [1997] által kidolgozott „roll along” (görgetős) módszerrel végeztük. A mérési adatokat az EarthImager 3D programmal dolgoztuk fel.

Elsőnek a két jó horizontális felbontóképességgel jellemezhető elrendezést, a dipól-dipólt és bipól-bipólt vizsgáltuk. Ezek alkalmazásával kapott fajlagos ellenállás képeket mutatja a 11. és 12. ábra. Látható, hogy a felszínközeli térrész leképezése nagy részletességgel sikerült mindkét esetben, és a kis (10  $\Omega\text{m}$  alatti) ellenállású, szennyezett talajvizet tartalmazó réteg is egyértelműen kimutatható, horizontálisan jól lehatárolható. A két elrendezés között ezen anomáliaképek alapján nem lehet alkalmazhatóság szempontjából sorrendet felállítani. A 13. ábra a két elrendezéssel mért adatok együttes inverziójának eredményét mutatja be. Mindhárom esetben tehát nagyon jó felbontású képet kaptunk a felszínközeli szerkezetekről, ám a szennyezett réteg aljágig nem sikerült

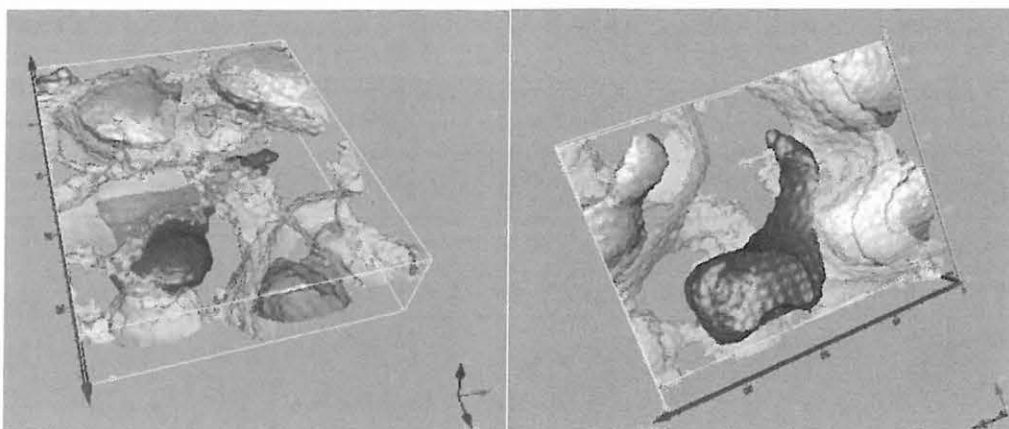
növelni a behatolási mélységet. Nagyobb kutatási mélység csak az elektródaköz, tehát a mérési háló növelésével lenne elérhető, ám ez akkor a felbontóképesség rovására menne.



10. ábra. A 2. sz. kísérleti területen 3D-s mérésekhez használt felszíni elektródarendszer és a fúrólyukak pozíciói

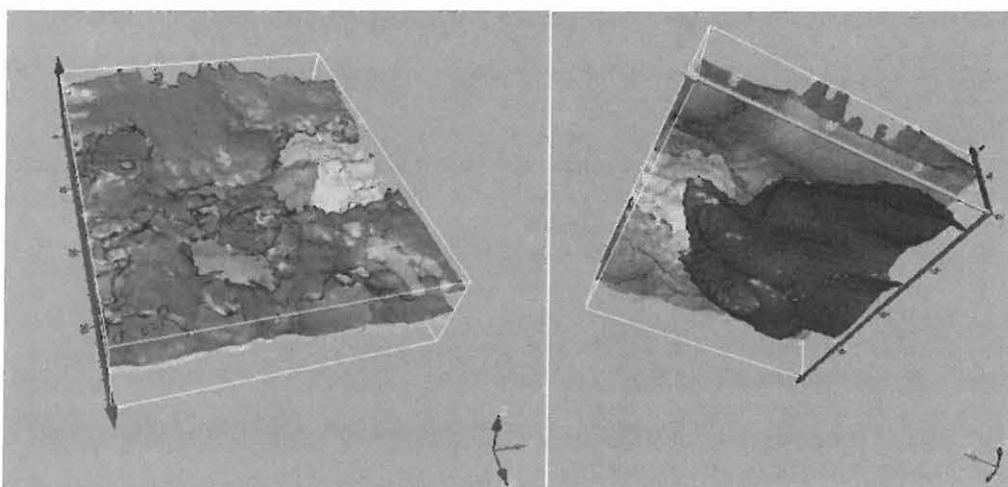
Fig. 10. Positions of surface electrode grid and boreholes for 3D surveys on test site 2

Következő lépésként a nagyobb behatolási mélységgel jellemezhető pole-pole elrendezéssel mértünk, az inverzióval kapott eredményt a 14. ábra mutatja. Az anomáliaképen a horizontális felbontóképesség egyértelműen rosszabb, mint az előző két vizsgált elektróda elrendezés esetén. Az anomália alakja ennek ellenére horizontálisan is lehatárolható, és a korábbi esetekkel szemben a kutatási mélység túlhaladt a szennyeződésre utaló anomália alján, így annak vertikális kiterjedése egyértelműen meghatározható lett. Elvégeztük a dipól-dipól és a pole-pole elrendezéssel mért adatok együttes inverzióját is, melynek eredménye a 15. ábrán látható. Az együttes inverzió alkalmazásával sikerült mindkét elrendezés előnyeit felhasználni: jó horizontális felbontóképességű, megfelelő behatolási mélységű anomáliaképet kaptunk.



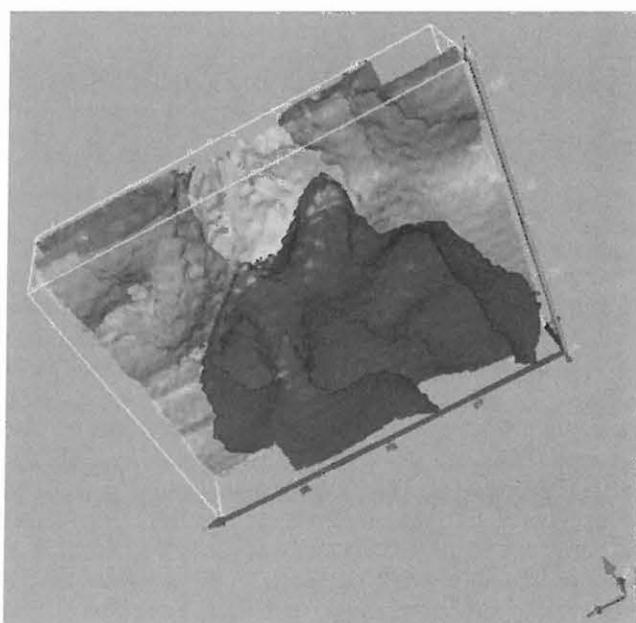
11. ábra. Dipól-dipól elrendezéssel mért fajlagos ellenállás eloszlás felül- és alulnézetből. A sötét szín a kis ellenállású, szennyeződésre utaló anomáliát jelöli

Fig. 11. Resistivity image of dipole-dipole survey from top and bottom points of view. Dark colour indicates the low resistive contaminant



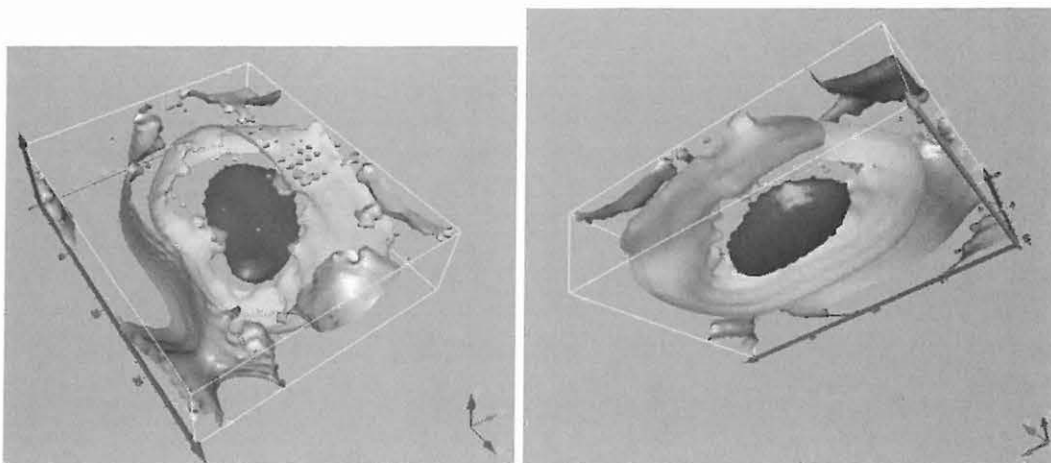
12. ábra. Bipól-bipól elrendezéssel mért fajlagos ellenállás eloszlás felül- és alulnézetből. A sötét szín a kis ellenállású, szennyeződésre utaló anomáliát jelöli

Fig. 12. Resistivity image of bipole-bipole survey from top and bottom points of view. Dark colour indicates the low resistive contaminant



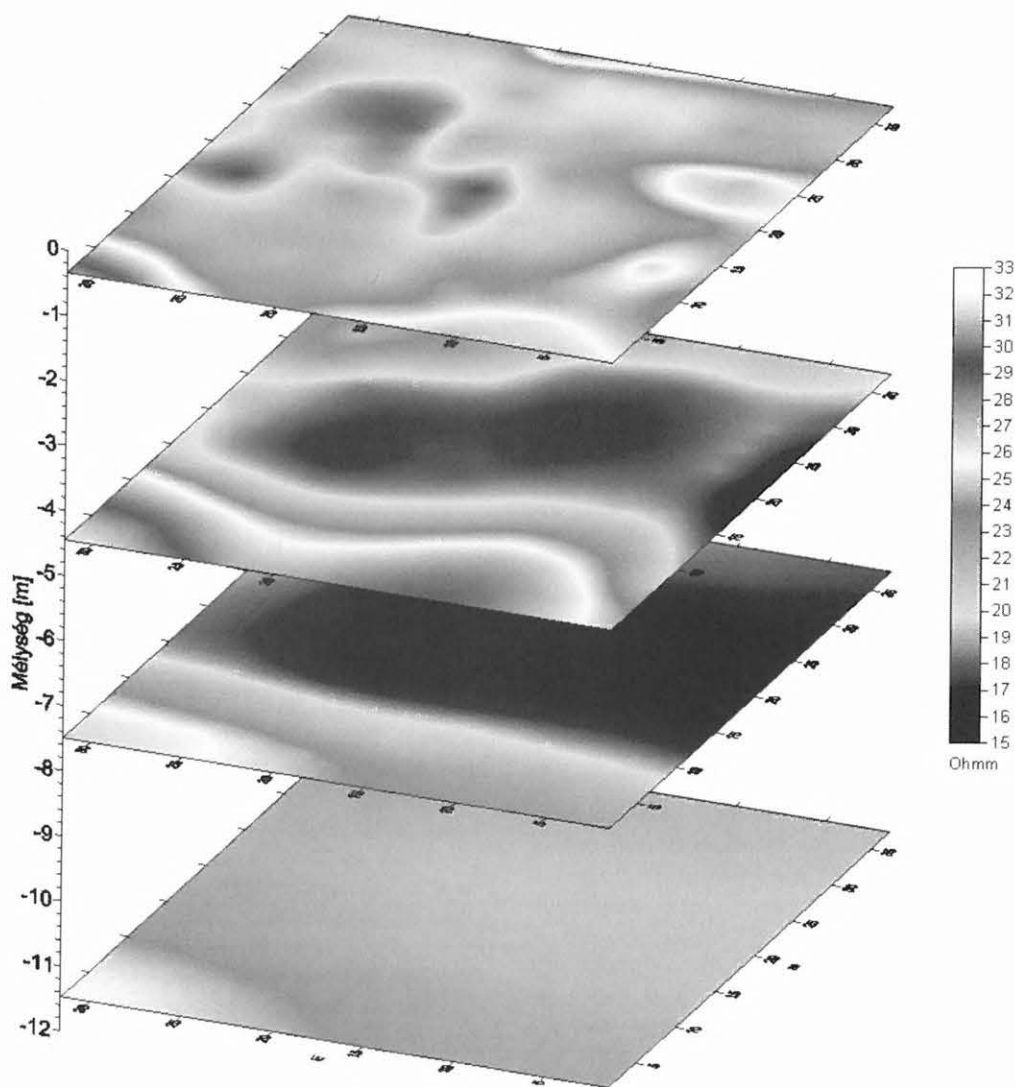
13. ábra. Dipól-dipól és bipól-bipól elrendezések együttes inverziójának eredménye alulnézetből. A sötét szín a kis ellenállású, szennyeződésre utaló anomáliát jelöli

Fig. 13. Resistivity image after combined inversion of dipole-dipole and bipole-bipole arrays from bottom point of view. Dark colour indicates the low resistive contaminant



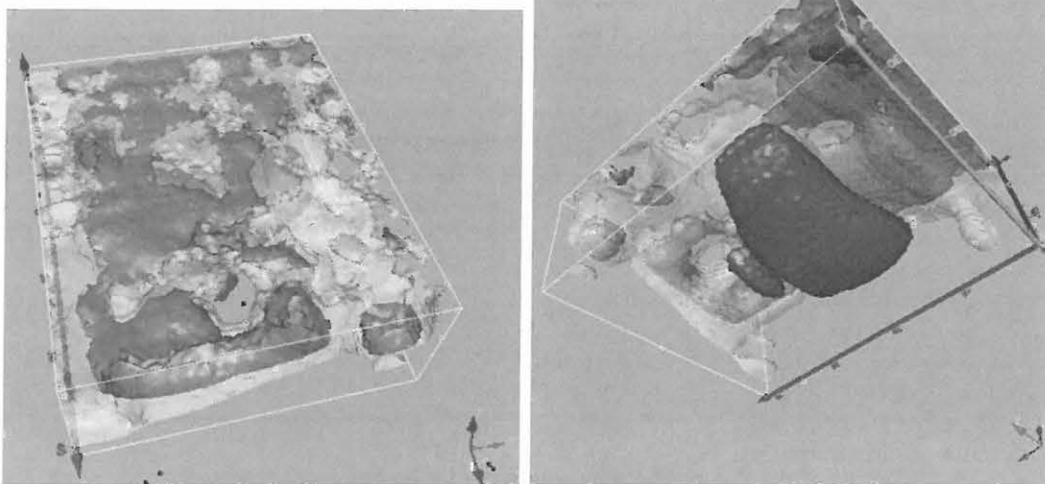
14. ábra. Pole-pole elrendezéssel mért fajlagos ellenállás eloszlás felül- és alulnézetből. A sötét szín a kis ellenállású, szennyeződésre utaló anomáliát jelöli

Fig. 14. Resistivity image of pole-pole survey from top and bottom points of view. Dark colour indicates the low resistive contaminant



15. ábra. Dipól-dipól és pole-pole elrendezések együttes inverziójának eredményéből készült mélységmetszetek. A sötét szín a kis ellenállású, szennyeződésre utaló anomáliát jelöli

Fig. 15. Depth slices from the results of combined inversion of dipole-dipole and pole-pole arrays. Dark colour indicates the low resistive contaminant



16. ábra. Fúrólukbeli és felszíni elektródákkal mért, teljes 3D-s fajlagos ellenállás leképezés felül- és alulnézetből. A sötét szín a kis ellenállású, szennyeződésre utaló anomáliát jelöli

Fig. 16. Full 3D resistivity image measured with borehole and surface electrodes from top and bottom points of view. Dark colour indicates the low resistive contaminant

### Teljes háromdimenziós mérések

Teljes háromdimenziós mérésnek a felszíni 3D-s mérőháló és fúrólukbeli átvilágítás kombinációját nevezzük. Ilyenkor a vizsgált térrész minden irányból történő leképezése valósul meg. Felszín alatti szennyeződések kutatása esetén fontos, hogy roncsolásmentes technológiát alkalmazzunk, ezáltal megakadályozzuk a szennyezőanyagok függőleges irányú terjedését. Ezért a teljes háromdimenziós mérés csak akkor használható, ha a kutatási területen előzetesen már kijelölhető a szennyeződés horizontális elterjedése, így megoldható, hogy az átvilágításhoz használt fúrólukak mélyítése csak igazoltan tiszta helyen történjék.

Jelen kutatási területen 6 db, egyenként 15 m mélységű fúrólukat helyeztünk el a mérési háló széléinél (10. ábra). Az adatfeldolgozás után kapott anomáliakép (16. ábra) a mélyebb tartományokban is rendkívül részletes információt nyújt a vizsgált térrész fajlagos ellenállás viszonyairól.

### Következtetések

Teszt területen végzett 2D és 3D mérésekkel sikerült igazolni, hogy az egyenáramú elektromos módszer sikerrel alkalmazható vizes fázisú szennyeződések horizontális és vertikális lehatárolására. Vizsgáltuk a különböző felszíni 3D-s elrendezések alkalmazhatóságát, és megállapítottuk, hogy legtöbb igényt kielégítő eredményt egy jó horizontális felbontású (pl. dipól-dipól), valamint egy nagyobb behatolású (pole-pole) elrendezés együttes inverziójával lehet elérni. A mélyebb tartományok jó felbontású leképezése teljes háromdimenziós méréssel volt megvalósítható.

Mivel a kutatási program alapkutatási tevékenységet csak nagyon korlátozott mértékben engedélyezett, következtetéseinket a teszt területeken szerzett tapasztalatok alapján tudtuk levonni. Eredményeink szélesebb alkalmazhatóságához további alapkutatás szükséges.

Az így kifejlesztésre kerülő módszeregyüttes jövőbeli alkalmazásával csökkenthető a vizsgálatok során potenciálisan bekövetkező szennyezőanyag-átfejtődés kockázata (azaz a víztartó összletek fekéjének átfúrásával akaratlanul is előidézett vertikális szennyezőanyag migráció), egyúttal ésszerűbbé, hatékonyabbá és remélhetőleg olcsóbbá tehető a környezeti diagnosztika.

### Köszönetnyilvánítás

A dolgozat a GVOP-AKF-2004-05/0187 számú kutatási projekt keretében végzett munka eredményeinek felhasználásával készült.

### HIVATKOZÁSOK

- DAHLIN T., BERNSTONE C. 1997: A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays. *Procs. SAGEEP'97* (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems), Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol. 2, 927-935
- DAHLIN T., ZHOU B. 2006: Multiple-gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging; *Near Surface Geophysics* 4, 2, 113-123
- GUÉRIN R., BÉGASSANT P., BENDERITTER Y., DAVID J., TABBAGH A., THIRY M. 2004: Geophysical study of the industrial waste land in Mortagne-du-Nord (France) using electrical resistivity; *Near Surface Geophysics* 2004, 137-143
- HALMÓCZKI SZ. 2005: Konceptcionális modell 3. kísérleti terület; tudományos jelentés, BGT Hungária Kft.
- LOKE M. H. 1996-2004: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. [www.geoelectrical.com/coursenotes.zip](http://www.geoelectrical.com/coursenotes.zip)
- LOKE M. H., BARKER R. D. 1996: Rapid least squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method; *Geophysical Prospecting* 44, 131-152
- MURRAY C. J., LAST G. V., TRUEX M. J. 2005: Review of geophysical techniques to define the spatial distribution of subsurface properties or contaminants; tudományos jelentés, US Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory

- NYÁRI Zs. 2000: Quality controlled resistivity inversion in cavity detection. *Geophysical Transactions* **43**, 1, 47–63
- SZÜCS P., MADARÁSZ T. 2006: Complex hydrogeological modelling of multifunctional artificial recharge options of the Great-Forest Park in Debrecen, Hungary; *Water Pollution VIII, Modelling, Monitoring and Management*. *Editors*: C. A. BREBBIA, J. S. ANTUNES do Carmo WIT Press, 2006, p. 177-184., ISBN: 1-84564-042-X.
- YOON G., OH M, PARK J. 2002: Laboratory study of landfill leachett effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer. *Environmental Geology* **43**, 1–2, 18–28.