

**A geoelektromos módszerek alkalmazása
hulladéklerakók HDPE fóliás szigetelésének
ellenőrzésére**

Kőrösi Luca Zsófia

2024

Pécsi Tudományegyetem
Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar
Környezetmérnöki Tanszék

**A geoelektromos módszerek alkalmazása hulladéklerakók HDPE fóliás
szigetelésének ellenőrzésére**

Készítette: Kőrösi Luca Zsófia
Évfolyam: 3. évfolyam

Belső konzulens:

Dr. Szűcs István CSc., habil. egyetemi docens

Külső konzulensek:

Varga Mihály, geofizikai szakértő

Vincze László, okleveles geofizikus, villamosmérnök, földtani
szakértő, ügyvezető igazgató

Pécs

2024

Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. Szigetőő fóliák geoelektromos vizsgálatának elvi alapjai.....	5
3. A Geoelektromos Geofizikai Monitoring Rendszer	10
3.1. Szenzorhálózat telepítése.....	10
4. Szigetelő fóliák geoelektromos vizsgálatának gyakorlata	11
4.1. A tárgyalt terület és előzmények bemutatása	11
4.2. 2021., VI/A (telepítés, ellenőrzés).....	12
4.3. 2022., V., VI./A. (ellenőrzés)	13
4.4. 2024 április, VI/B (telepítés, ellenőrzés).....	16
4.5. 2024 október, V., VI. ütem (ellenőrzés).....	21
5. Megoldási lehetőségek, hibák detektálása esetén.....	25
5.1. Javításra alkalmas módszerek.....	25
5.2. Gyakorlati példa hibahely javítására	25
6. Összefoglalás	28
7. Köszönetnyilvánítás.....	29
8. Irodalomjegyzék	30
9. Ábrajegyzék	31

1. Bevezetés

Az Európai Unióban viszonylag egységes követelményeknek kell eleget tenni a környezet védelme érdekében. Ennek megfelelően a tagországokban érvényre kell juttatni az egyre szigorodó műszaki és gazdaságossági kihívásoknak megfelelő alapelvek érvényesítését, amelyek szerint: a környezet védelmének minden ágára ki kell terjednie; a megelőzésre kell fektetni a hangsúlyt; szennyezést forrásánál kell megszüntetni; intézkedést ott kell meghozni ahol a leghatékonyabb.

Napjainkban-, de sajnos a múltbeli ipari tevékenységek örökségeként is jelenlévő és felhalmozódó heterogén fázisú szennyezőanyagok által generált problémák hatékony kezelését sokszor ellehetetleníti, vagy rendkívüli módon megdrágítja a roncsolásos (elsősorban fűrésos mintavételezésű) diagnosztizálással összefüggő további járulékos elszennyeződés kockázata.

A felszín alatti szennyeződések roncsolásmentes kimutatása tehát egyre fontosabb eszköz a környezeti diagnosztikai eljárások során. A műszakilag és gazdaságilag optimalizált követelményeket teljesítő geofizikai módszereken alapuló, megfelelő felbontóképességű vizsgálatok alkalmazásával a felmérések pontosíthatóak, az időben változások monitorozhatóak, nyomon követhetőek és előrejelezhetőek,

Korábbi — „A geoelektromos módszerek szerepe a környezetvédelmi feladatok megoldásában (2024)” című — TDK dolgozatomban a geofizikai környezetvédelmi problémák feltárásában és elhárításában betöltött helyét és szerepét elemezve a lehetőségek igen széles spektrumú tárházából az erőtergeofizikai módszerek közül a geoelektromos módszerekre és azok gyakorlati feladatok megoldásában betöltött szerepének bemutatására és vizsgálatára helyeztem a hangsúlyt.

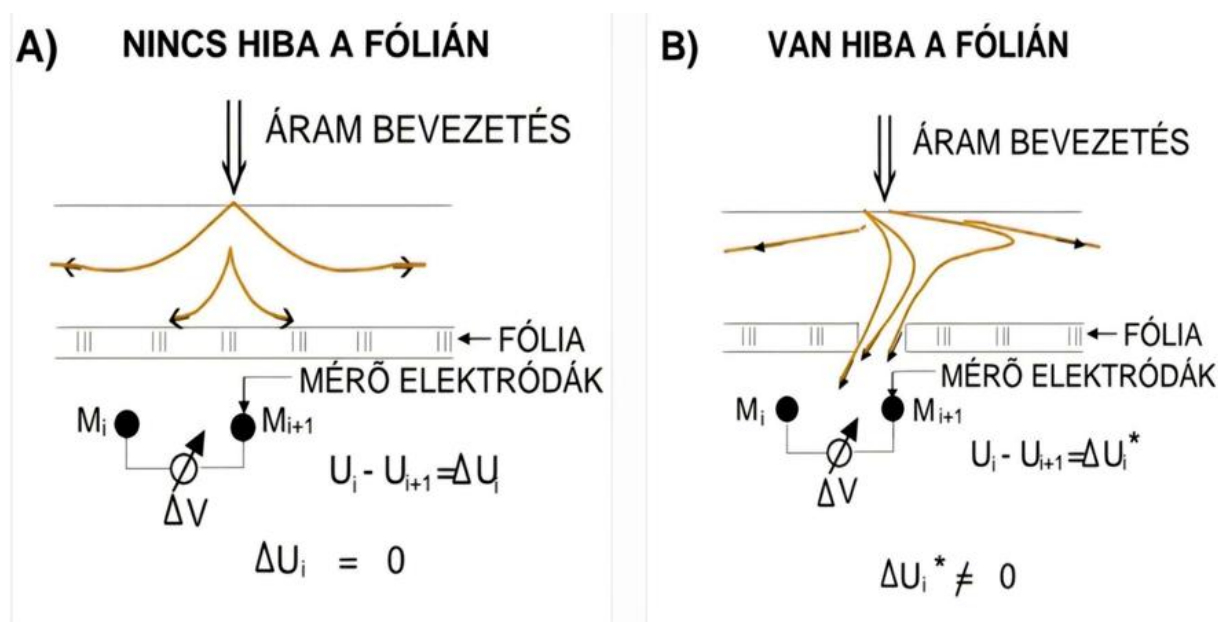
Többek között olyan hatékonyan bevezethető és a gyakorlati életből vett példákon keresztül bemutatott költségkímélő módszerek alkalmazására tettem javaslatot, amelyek a hulladéktárolók alsó védelmét szolgáló fóliázáson jelentkező sérülések detektálásához szükséges modellezést egyszerűsíthetik le. Ezt a közvetlenül a fóliaszint alatti síkra fókuszáló horizontális elektromos szelvényezés célzott és időszakonként elvégzett ismételéssel, a védőfóliák feletti tér tényleges inhomogén eloszlásképét egyetlen legmegfelelőbb értékkel helyettesítő ekvivalens homogén fajlagos ellenállás fogalmi teóriájára alapozva tudjuk megtenni.

A hagyományosan alkalmazott környezetvédelmi tényfeltárások, vizsgálatok költsége igen magas lehet amennyiben azok gerincét kizárólag a roncsolásos mintavételezések és a kapcsolódó laboratóriumokban elvégzett vizsgálatok alkotják. A kiegészítő, vagy potenciális helyettesítő módszerként felvonultatott, roncsolásmentes információszerzést biztosító geofizikai arzenál felhasználásának széleskörű elterjedése és tényleges hatékonysága azokon az ötleteken, fejlesztési irányokon múlik, amelyek a gyakorlati alkalmazási lehetőségek tárházát egyre korszerűbb alapokra helyezik. Előző dolgozatom elméleti felvetéseinek folytatásaként jelen munkámmal e szerepkör fontosságának és jelentőségének gyakorlati alkalmazásokon keresztüli megvilágításával kívánok hozzájárulni.

2. Szigetelő fóliák geoelektromos vizsgálatának elvi alapjai

A hulladéklerakók aljára fektetett szigetelő fólia állapotát hagyományos módon potenciálmérésekkel lehet ellenőrizni. A hibahelyek kimutathatósága elsősorban két dologtól függ: a hibahely, hegesztési hiba, vágás stb., nagyságától továbbá a monitorozás céljából elhelyezett érzékelők sűrűségétől. Az érzékelők száma befolyásolja leginkább a monitoring rendszer költségét, hiszen rendkívül nagy mennyiségű vezetékre van szükség az érzékelőknek a mérőhellyel való összekötéséhez. Az értelmező eljárások javításával is lehet pontosítani a hibahely lokalizálásának pontosságát, de ritka érzékelő háló esetében ez sem segít.

A monitoring rendszereknél használt geoelektromos módszer azt használja ki, hogy a szigetelő fólia elektromosan tökéletes szigetelőnek tekinthető, ezért a fólia két oldalára (alá és fölé) elhelyezett árambevezető elektródák esetében a hibátlan szigetelő-fólián keresztül nem folyhat áram.



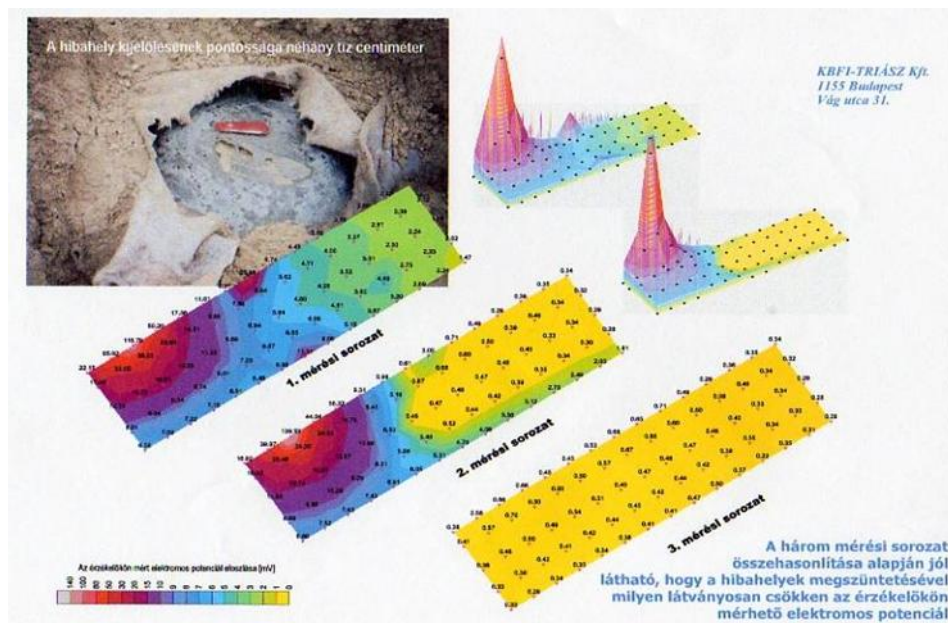
1. ábra: Szigetelő fólián jelentkező hibahely detektálása potenciálméréssel

Ehhez az kell, hogy az egyik árambevezető elektróda a szigetelő-fóliával a környezetétől teljesen elzárt térrész fölé kerüljön, a másik pedig azon kívülre. Ebben az elrendezésben hibátlan fólia esetén nem tud záródni az áramkör, ezért nem folyik áram, tehát a mindig mérhető, különböző intenzitású zajon kívül potenciálkülönbség nem mérhető a szigetelő fólia alatt és/vagy felett hálóban elhelyezett mérőelektródák között. (Lásd: 1. A ábra.)

Amennyiben hiba van a fólián, akkor folyik áram az árambevezető elektróda-pár között és ennek megfelelően a mérőelektródákon az átfolyó áram nagyságának és a mérőelektródának a hibahelytől mért távolságának megfelelő potenciálkülönbséget mérünk. (Lásd: 1. B ábra.) Amennyiben a fólia alá beépítünk egy, az egész területet lefedő elektróda rendszert, akkor a rendszeresen elvégzett mérésekkel a fólián jelentkező hiba helyet detektálni tudjuk.

Ennek azért is nagy jelentősége van, mert a lerakók üzemelése során egy akár több tíz méter vastagságú hulladék alatt a mai ismereteink szerint nehezen vagy egyáltalán nem javíthatók a fólián az üzemeltetés során keletkezett sérülések még akkor sem, ha a hiba helye pontosan ismert. Ilyen esetben a monitorozás eredményeként megismert lassabb szennyezés-terjedési sebesség esetén vagy veszélytelen irányba történő áramlás esetén, akár hosszú ideig sem biztos, hogy közvetlen veszélyt jelent a fólia meghibásodása. Veszélyes irányban történő és gyorsabb áramlás estében kell csak megfelelő időben megtenni a szükséges óvintézkedéseket.

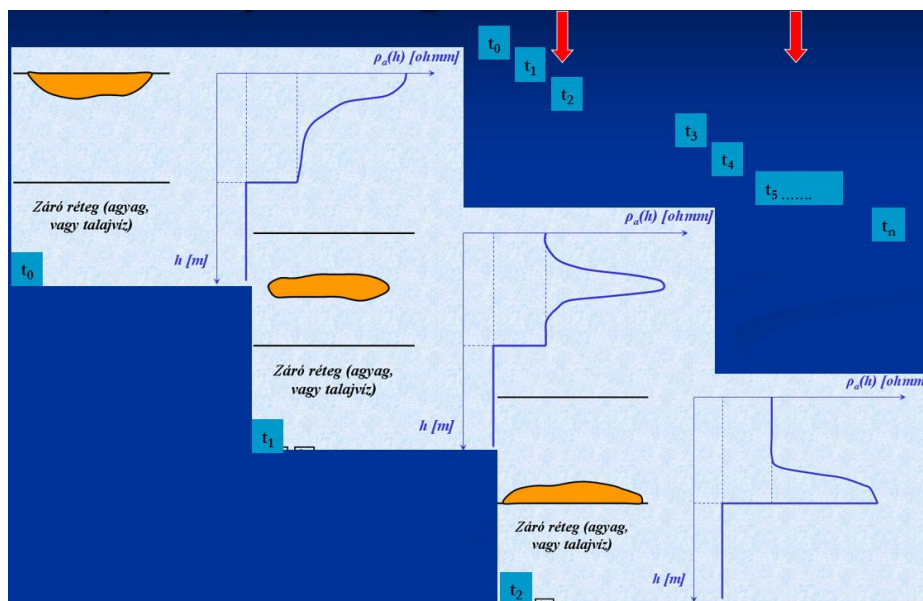
A nagyobb alapterületű lerakók esetében a fóliázás alatt és felett hálóban, szisztematikusan és megfelelően nagy számban elhelyezett elektródák telepítése és használata bonyolult és igen költséges feladat. Az érzőkelők ritkítása az átlagos felbontóképességet csökkenti, de akár néhány célirányosan elhelyezett pontérzékelő is a 2. ábrán látható eredményeket hozhatja. Kezdetben két hiba volt a fólián, az egyik, ami a szokásosnál nagyobb méretű, a bal felső sarokban, a másik elég kis távolságra tőle. A második méréssorozat a kisebbik lyuk kijavítása után készült, a harmadik pedig mindkét hibahely kijavítása után. Ez utóbbi esetben látható, hogy a kijavított, hibátlan fólia esetében már csak zajt mérünk. [3.]



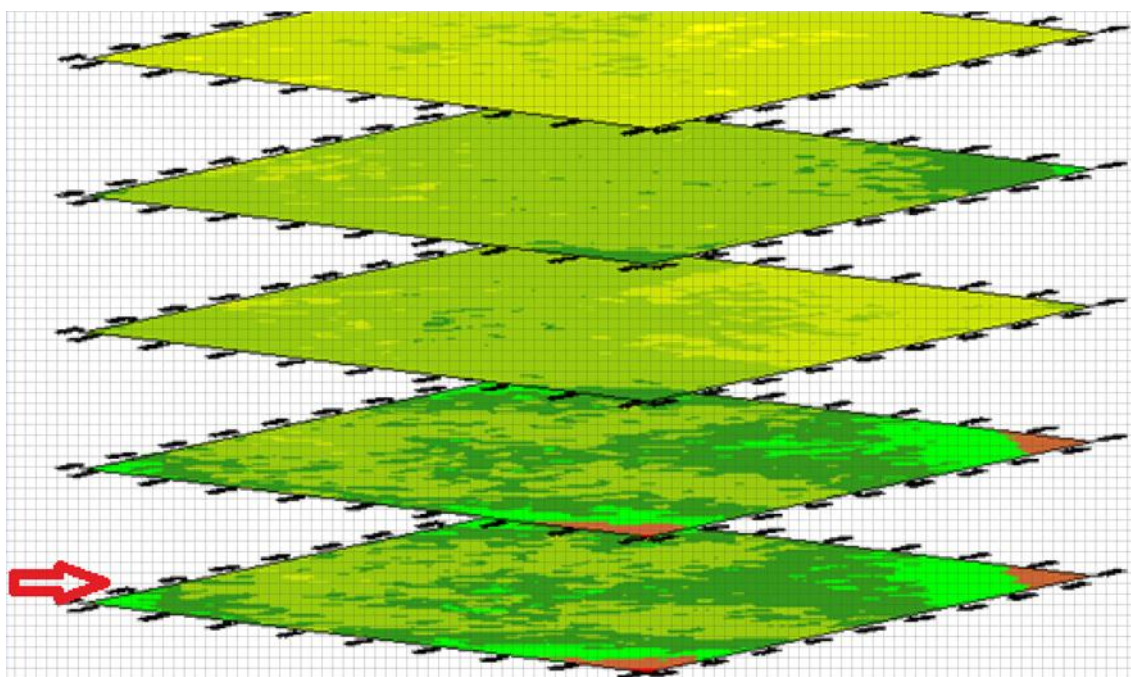
2. ábra: Kimutatott és kijavított fólia hibák geoelektromos indikációi [3.]

A hibahely fentiekben vázolt meghatározásán túl a rendszeresen elvégzett mérések adataiból a környezetvédelmi geofizikában használt értelmezési eljárások felhasználásával (pl. VESZ és/vagy HESZ mérésekkel, ill. azok kombinációjával) is meghatározható és nyomon követhető a szennyeződés terjedésének iránya és sebessége. (Pl. friss szénhidrogén szennyeződés esetére lásd: 3. ábra)

A szénhidrogén szennyeződések vizsgálataikor mindig figyelembe kell vennünk a szennyeződés korát is. A friss szennyeződések jellemzően magas ellenállással jelentkeznek ezért ebben az esetben ezen zónák mozgását, jelenlétét tudjuk vizsgálni, nyomon követni. Kimutatták, hogy a régebbi (egy évnél idősebb) korú szennyezéseknél általában megváltozhat ez a tendencia. Az idősebb szénhidrogén szennyeződések esetében pl. az olajszenyeződés a biodegradációs folyamat következtében akár kisellenállású anomáliaként is jelentkezhet a nyugalmi talajvízszint mélységének környékén. A biodegradáció azt jelenti, hogy a talajban mindig meglevő baktériumok elkezdik átalakítani az olajat, diszpergálják, azaz apró gömbökből állóvá alakítják át, közben elfogyasztják, és ezáltal folyamatosan szaporodnak. A baktériumok bioréteget hoznak létre a szemcsék felületén, majd a pórustérben is. A biorétegek közé betelepülnek az olajszemcsék így újabb felületek alakulnak ki, "biofilm"-et létrehozva. A biofilmek hatására un. elektromos kettősrétegek jönnek létre, amelyek elektromosan jól vezető szerkezetekként viselkednek, emiatt válhat a szigetelő olajjal szennyezett talajréteg fokozatosan viszonylag jó vezetővé. Kőzetfizikai tekintetben a szennyezett talaj kvázi-agyagként kezd el viselkedni. [3.]



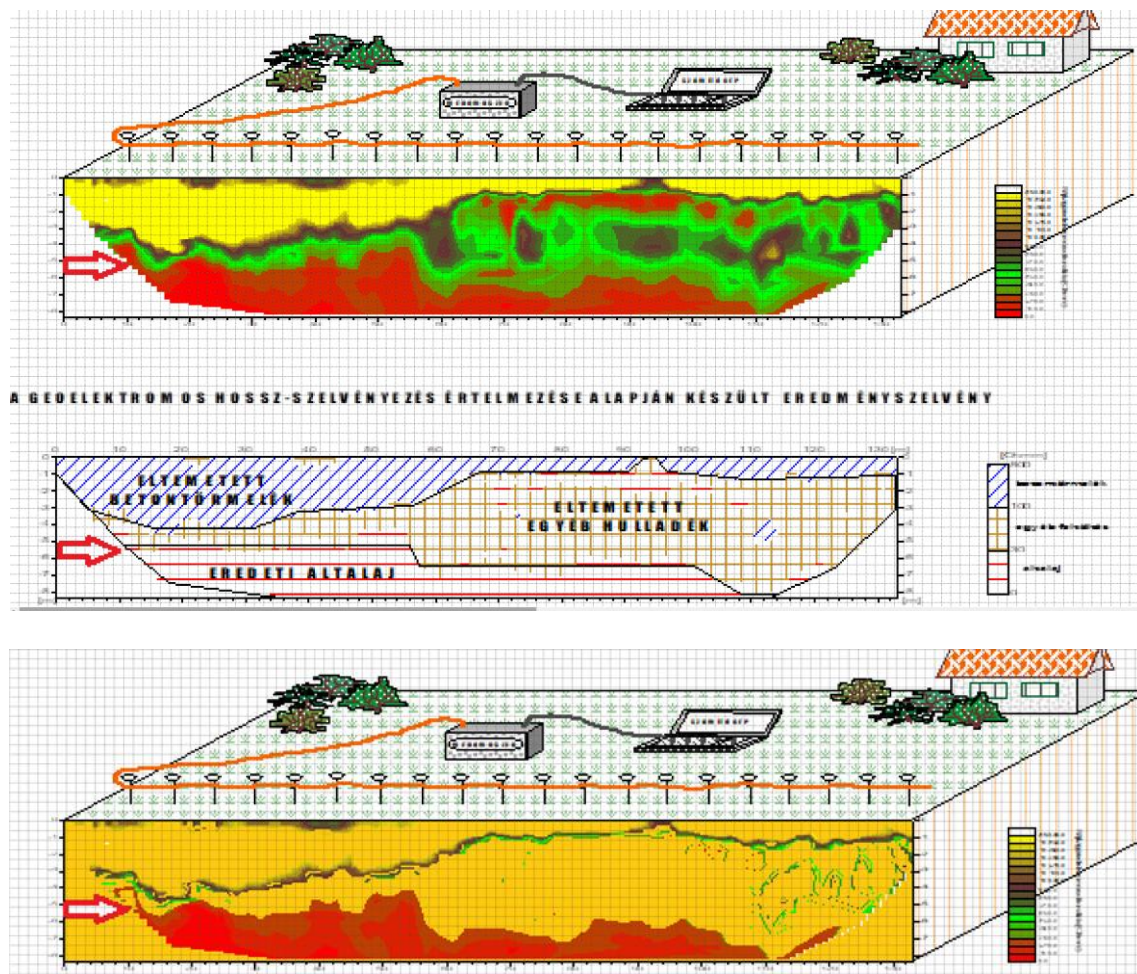
3. ábra: Friss olajszennyeződés terjedés monitorozása 1D VESZ szelvényezéssel



4. ábra: Szennyeződés eloszlás 2D monitorozása HESZ szelvényezéssel [2.]

Jelentősen csökkentheti a vizsgálatok költségeit, ha egyetlen olyan folyamatos monitoring megfigyelési szintet állítunk be fókuszterületként, hogy az közvetlenül a fölíázás alatti, a felszíntől mért h mélységű (4. és 5. ábrán piros nyíllal jelölt) szintre kihegyezett eredményeket adjon. (Pl. Schlumberger elrendezésű HESZ szondázás felszíni tápelektroda távolságainak fix $\sim \mathbf{AB}=3h$ beállításával.) A modellezést jelentősen leegyszerűsíti, ha a hulladéklerakó anyagtartalmának változatos inhomogenitásait tükröző VESZ szelvény fajlagos

ellenállás eloszlás értékeit (5. ábra felső része) egyetlen integrált fajlagos ellenállás értékkel (ekvivalens homogén fajlagos ellenállással) helyettesítjük (5. ábra alsó része, narancssárga színnel). Az ekvivalens homogén fajlagos ellenállás (analóg módon a szeizmikában, szeizmológiában alkalmazható ekvivalens homogén terjedési sebességhez) egy olyan, alkalmasan választott érték, amely az inhomogén eloszlást, az azt legjobb módon felváltó, egységes értékű homogén paraméterrel helyettesíti.



5. ábra: Hulladéklerakó fajlagos ellenállás modellje [3.]

A vizsgálatok kalibrálását mesterségesen iniciált hibahelyek fizikai szimulációjával végezhetjük el oly módon, hogy különböző modelljeink legjobb ekvivalens homogén fajlagos ellenállásaként a hibahelyet legjobban megközelítő eredményt hozó értéket fogadjuk el.

3. A Geoelektromos Geofizikai Monitoring Rendszer

3.1. Szenzorhálózat telepítése

A medencék aljzatának kialakítása után, a helyszínrajz alapján elektródákat helyeznek el 5 méteres négyzetháló mentén. A pontokat optikai geodéziai módszerrel tűzik ki, majd 2x2x30 cm-es fa karókat helyeznek a megjelölt pontokra. Az elektródák rozsdamentes acélból készült lapkák (6. ábra), amelyeket egy rövid, forrasztott vezetékkel látnak el, amit epoxi műgyantával védenek. A PVC-szigetelésű, sodrott vörösréz kábelek biztosítják a tartósságot és a korrózió elleni védelmet.



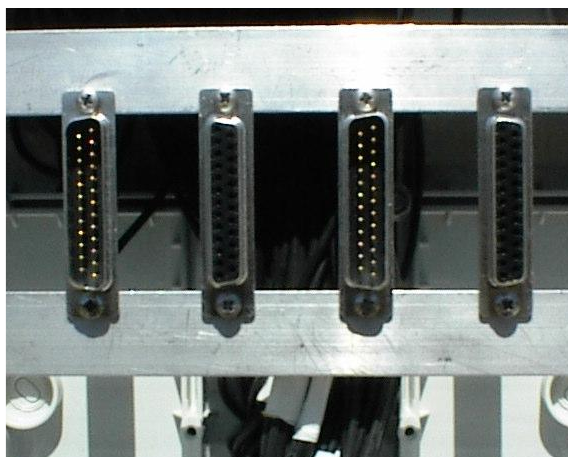
7. ábra: Szenzor elektróda



6. ábra: Elektróda beütése [5.]

A telepítés során a szenzor elektródákat a kábelek végére forrasztják, zsugorcsővel védik, majd ideiglenesen rögzítik a kitűzött pontokon. A kábelek rendezése érdekében kötegelőt használnak. A telepítés végén a karókat eltávolítják, helyükre az elektródákat kalapálják (6. ábra) speciális szerszámmal, és vízzel beiszapolják, hogy stabilan illeszkedjenek a talajba.

A kábeleket a medence szélén elhelyezett csatlakozódobozokhoz vezetik, amelyek IP56-os besorolású műanyagból készültek, ipari D-sub csatlakozókkal (8. ábra). Egy dobozba maximum 5 csatlakozó fér, a szenzorok sorrendje megegyezik a csatlakozók elrendezésével. A vezetékek flexibilis műanyag védelmet kapnak, a dobozokhoz pedig, 40 mm-es PVC védőcsövön keresztül kapcsolódnak. A csatlakozódobozokat zártszelvényből készült állványokra szerelik. [5.]



8. ábra: A doboz belsejében található csatlakozók [5.]

4. Szigetelő fóliák geoelektromos vizsgálatának gyakorlata

4.1. A tárgyalt terület és az előzmények bemutatása

A dolgozatban említett méréseket az A.K.S.D. Kft. megbízásából, az GEOELEKTRO Geofizikai, Környezetvédelmi Szolgáltató Kft. végezte, Debrecenben, a Regionális Hulladékkezelő Telep V., illetve VI. ütemén (9. ábra). Az itt folyó méréseken, én is tevékenyen részt vettem.

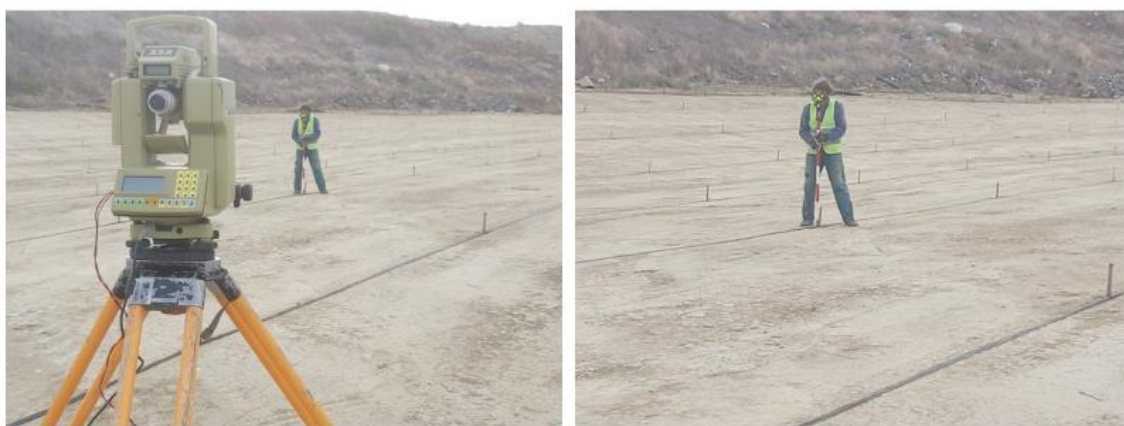


9. ábra: A hulladékkezelő telep légi képe [8.]

4.2. 2021., VI/A (telepítés, ellenőrzés)

2021-ben a GEOELEKTO Kft. a telep bővítés VI/A. ütem depónia medencéjébe, HDPE fólia vízzáróságának ellenőrzésére alkalmas Geoelectro Geofizikai Monitoring Rendszert telepítettek.

A telepítés első fázisát, a kitűzési, bemérési és szenzor telepítési munkálatokra 2021. szeptember 13.-16.-án végezték. Az ekkor kitűzött karók geodéziai bemérését WILD TC1010 total station-al végezték. (10. ábra)



10. ábra: A szenzorok bemérése WILD TC1010 total station eszközzel [5.]

A kitűzött karók alapján kerültek fektetésre a vezetékek, majd csatlakoztatták ezekre a szenzorokat, amelyeket végül elhelyeztek a kőzetanyag szigetelésbe és végül be is iszapolták őket. Ezután felszedésre kerültek a kihelyezett fa karók. Állványokra rögzített csatlakozó szekrényekben (11. ábra) helyezték el a korbácsban összefutó vezetékekhez forrasztott 25p D-sub csatlakozókat.



11. ábra: Az állványokra csavarozott csatlakozószekrények [5.]

A medence területén végül, a 2x8x1,5 mm-es rozsdamentes acél elektródából 466 db-ot helyeztek el, amelyet összesen 47.500 méter, H05V-K 1x0,5 mm² PVC szigetelésű, sodort rézvezetékekkel vezettek ki a medencék peremére, a 4 db GW44207 típusú, IP56 környezetállóságú, kültéri műanyag dobozba. Minden vezetékvéghez egy-egy aranyozott 25 pólusú D-sub csatlakozót forrasztottak, összesen 19 db ilyen csatlakozót.

Természetesen ezután a lefektetett rendszer ellenőrzése következett, amelyhez egyenáramú 100 csatornás, GeoPic-100 jelű geofizikai műszert alkalmaztak. Ekkor, az altalaj és a szenzorok közti átmeneti ellenállásokat mérték meg. A mért értékeknek 10.000 Ohm alatt kell lenniük, de a minél nagyobb pontosság érdekében jobb, ha 1.000 Ohm alattiak, vagy közeleiek, amely teljesült is. Ezek után a szenzorhálózat alaptérképét is meghatározták mérésekkel, ezeknél 2 alkalmas gerjesztő pontot választottak, a szenzorhálózaton belül. Egy távolabb elhelyezett referencia elektródához képest mérjük a szenzorok potenciálját. Amennyiben a szenzorok megfelelő helyre lettek telepítve, akkor a potenciál képnek szabályos lefutást kell mutatnia. A mérési eredmények átvitele, konvertálása, szűrése, feldolgozása és a megjelenítése grafikus és adatbáziskezelő programokkal történt. A kapott potenciálkép a megfelelő szenzorkihelyezést igazolja. [5.]

4.3. 2022., V., VI./A. (ellenőrzés)

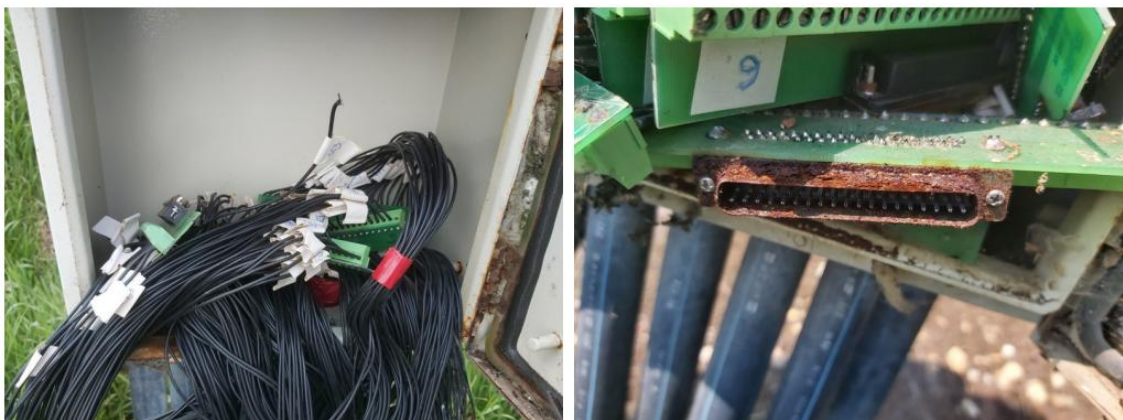
Az V. ütemen már megtörtént a rekultiválás (12. ábra), így itt csak ellenőrző mérést végeztek. Ennek a területnek a monitoring rendszerét a KBFI Triász Kft. telepítette több évvel ezelőtt és az ő 2016-os ellenőrző méréseik dokumentációjában leírtak nyújtottak alapinformációt a GEOELEKTRO Kft. szakembereinek munkájához.



12. ábra: A rekultivált V. ütem [6.]

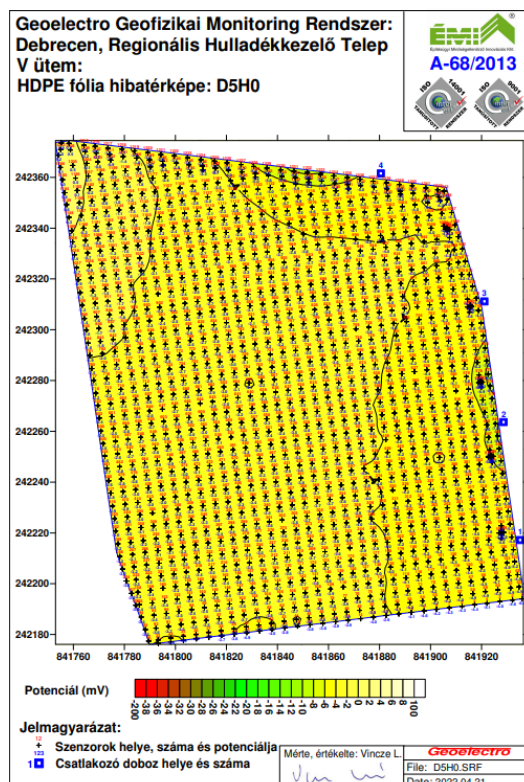
Magának a szenzor hálózat állapotának vizsgálatát kellett mindenképp elvégezni. Először a szenzor elektródák és az altalaj közti átmeneti ellenállást mérték meg. A szenzorok többsége jó állapotú, de van néhány, amely jóval nagyobb értékű átmeneti ellenállást mutatott, viszont alkalmasnak bizonyultak a mérésre és végül, pontosan, 23 darab olyan kivezetést találtak, amelyek a potenciálmérésre alkalmatlanok voltak. Vezetékek szakadtak le a csatlakozókról, vagy éppen a szigetelés alatt szakadtak le a vezetékek.

A csatlakozó panelek a csatlakozó szekrényekben nincsenek rögzítve, ami miatt, a mérések alatti mozgástól a bekötő vezetékek eltörhetnek, szakadhatnak. Emellett nem megfelelő a szekrények szigetelése sem, így a bejutó nedvesség és a depónia gáz erősen korródáló hatású a vezetékekre tekintve (13. ábra). Ez nehezíti a mérést és több vezeték használhatatlannak bizonyult, leszakadt, vagy sérült. Ezután ezeknek a szekrényeknek a javítására, kicserélésére, a csatlakozó rögzítésére és a korrodált csatlakozó panelek kicserélésére tettek javaslatot, a nedvesség és a depóniagáz bejutásának megakadályozására.



13. ábra: A nem megfelelő szigetelés hatásai

A HDPE szigetelő fólia hibatérképét is megmérték. A keleti oldalon, a 2. számú csatlakozó doboz közelében található emelkedések, átmedvesedett talaj átfedéssel magyarázhatók. Az északi oldalon látható anomália pedig, a belső gerjesztő elektróda elhelyezésére vezethető vissza. (14. ábra) Összességében a medence belső részén a fólia sérülésére utaló anomáliákat nem fedeztek fel.

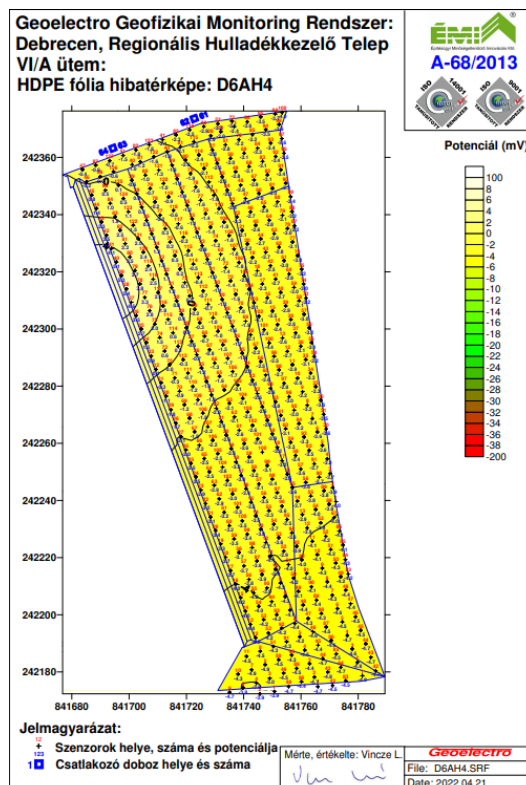


14. ábra: Az V. ütem hibatérképe

A VI/A. ütem ellenőrzését az itt elhelyezett hulladék maximum vastagságának az elérése indokolta, ami után már nagyobb nehézségekbe ütközne egy esetleges hiba feltárása és kijavítása. Itt is előbb a szenzorhálózat állapotának ellenőrzése történt meg, amely során az átmeneti ellenállásokat mérték az elektródák és az altalaj között. A területen 2 olyan szenzort találtak, ami a mérésre alkalmatlannak bizonyult, de ez érdemben nem befolyásolja a hálózat működőképességét.

Ezt követően, a HDPE szigetelő fólia hibatérképének megmérésére került sor. (15. ábra) A bejáró úton található talajfedésen átfolyó áram hatását a külső gerjesztő elektródának megfelelő elhelyezésével kompenzálták. A depónia medence belsejében jelentős hibát nem fedeztek fel, viszont a megfelelő rendszer érzékenység fenntartására ajánlották a talajfedések

elkerülését, a perem és a bejáró út tisztántartását. A nyugati peremen, egy ilyen kismértékű talajfedés hatását lehet megfigyelni. [6.]

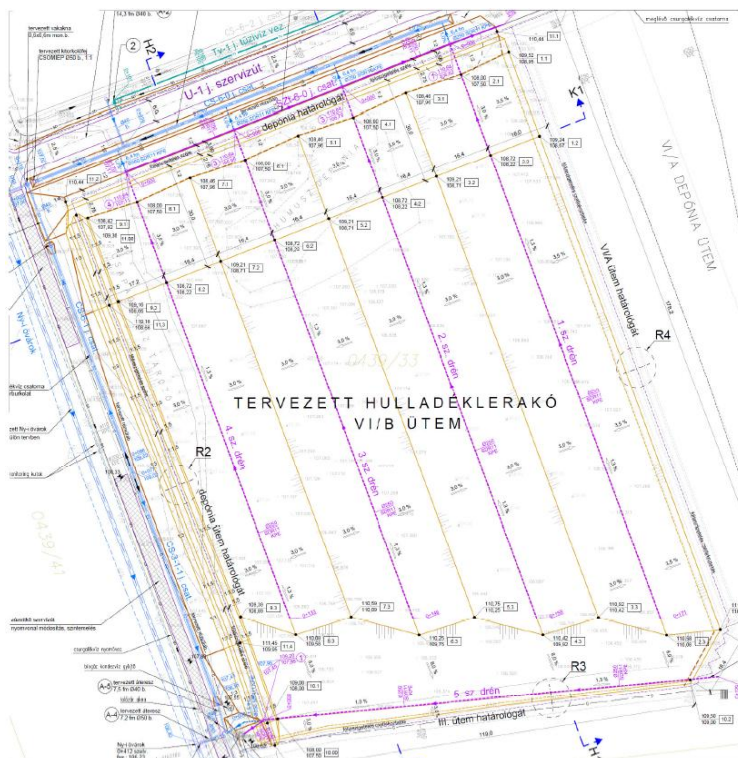


15. ábra: A VI/A. ütem hibatérképe [6.]

4.4. 2024 április, VI/B (telepítés, ellenőrzés)

A kitűzési és szenzor telepítési munkálatokra 2023. október 3-5-én kezdték meg. Az utolsó szenzor sort 2024. március 13-án sikerült befejezni a tervek szerint. (16. ábra)

A kitűzött karók geodéziai bemérését WILD TC1010 total station-al és TrimblevPro XT RTK korrekcióval működő GPS-el végezték. Tájékoztatóhoz a talajmunkák bemérési karói közül néhányat referencia koordinátaként használtak. A kitűzött karókhoz vezetékeket húztak, melyek végére került ráforrasztásra a szenzor. A forrasztásokat zsugorcsoval védték.



16. ábra: VI/B ütem terve

A végső telepítés során a karókat eltávolították, helyükre az elektródákat speciális szerszám segítségével az agyagba kalapálták. Az elhelyezés közben gondosan ügyeltek arra, hogy a forrasztott csatlakozás és a műgyantázás ne sérüljön. Az elektródákat vízzel beiszapolták, majd a maradék lyukakat a talaj eredeti anyagával töltötték fel, biztosítva a stabil érintkezést az altalajjal. (17. ábra)

A vezetékek kábelforbácsokban futnak össze, végül a csatlakozó dobozokhoz vezetnek. A kábelfűvezetések a medence szélén elhelyezett csatlakozódobozokhoz vezettek. (18. ábra) Ezek a dobozok IP56-os besorolásúak, környezetálló műanyagból készültek, és aranyozott, ipari D-sub csatlakozókkal vannak felszerelve. Egy dobozban maximum öt darab, 25 pólusú csatlakozó helyezhető el, amelyeket felváltva apa- és anya-csatlakozóként szereltek be. Az első csatlakozó 1-es számú érintkezője az 1-es számú szenzorhoz csatlakozik, és így tovább, a második csatlakozó 1-es kivezetése pedig a 26-os számú szenzort szolgálja ki.



17. ábra: Szenzorhálózat telepítése [7.]



18. ábra: A telepített csatlakozó dobozok

A vezetékezés a fólia alatt külön védelem nélkül fut, de a kábelkorbácsok flexibilis műanyag borítást kapnak a leszorító árkokban, továbbá a csatlakozódobozhoz történő felállásnál 40 mm-es PVC védőcsövet alkalmaztak. A csatlakozódobozokat zártszelvényből készült állványokra rögzítették, amelyek stabilitást és tartósságot biztosítanak a telepített rendszernek.

A szenzorhálózat telepítése után ellenőrző méréseket végeztek a rendszer működőképességének biztosítása érdekében. Első lépésként megmérték az altalaj és a szenzorok közötti átmeneti ellenállásokat. A mérések célja az volt, hogy az ellenállás értékei 10 000 Ohm alatt maradjanak, de az optimális működés érdekében előnyös, ha ezek inkább 1000 Ohm alatt vannak. Az eredmények szerint az értékek legtöbbször az 1000 Ohm-os tartományban mozogtak, igazolva a megfelelő érintkezést és a rendszer hatékony működését.

Ezután, már személyesen is bekapcsolódva a vizsgálatokba, a szenzorhálózat alaptérképét is elkészítettük. A mérés során két jól megválasztott gerjesztő pontot használtunk a

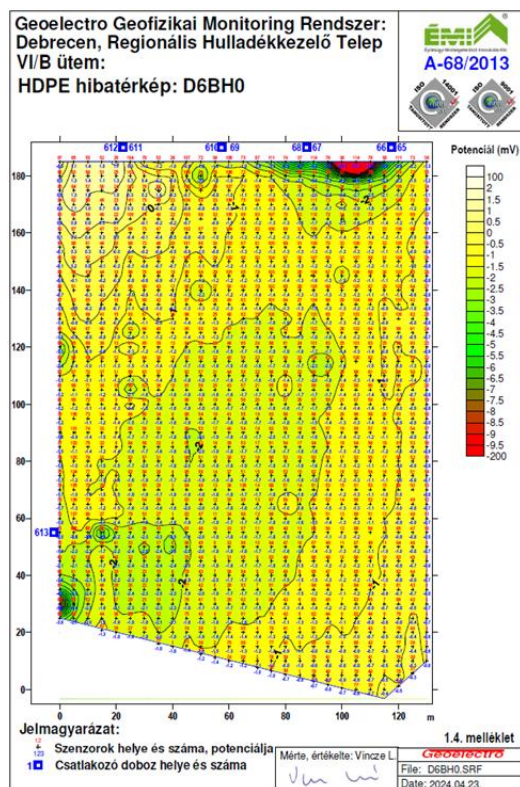
szenzorhálózaton belül, és a többi szenzor potenciálját egy távoli referencia elektródához viszonyítva rögzítettük. Az alaptérkép szabályos lefutása megerősítette, hogy a szenzorok a megfelelő helyeikre kerültek.

A HDPE szigetelő fólia integritásának első vizsgálatára 2024. április 23-24-én került sor, miután a szigetelés rétegrendje elkészült (19. ábra). A mérések során biztosították a szigetelőfólia és az altalaj elektromos elválasztását, és a geotextil felületek szárazak voltak. A kavics szivárgóréteg és a geotextil megfelelően nedves állapotban biztosította a mérési feltételek optimális teljesülését. Gyenge átvezetést két helyen tapasztaltak: a száraz kavicsra épített bejáró területén, valamint az átellenes sarokban lévő mélypontnál.



19. ábra: A medence az első ellenőrző mérések idején

A vizsgálat során alacsony hibaáram mellett közepesen zajos hibatérképet kaptunk (20. ábra), amelyen jól kivehetők voltak a korábban azonosított átvezetési pontok. A mérések alapján két hibahelyet valószínűsíthettünk: az egyik a 67/62-es, a másik a 610/71-es szenzor környékén helyezkedett el. Az első hibahelyet még a vizsgálat napján feltárva, kiderült, hogy a gyenge szivárgást több apró, tűhegynyi átszűrődés okozta. A második hibahely feltárására másnap került sor, az éjszakai és nappali esőzések miatt nehezített körülmények között. Az itt talált varrathibát szintén sikeresen kijavították. (21. ábra)



20. ábra: VI/B hibatérképe



21. ábra: Javítási munkálatok képei

A javításokat követően a hibaméréseket megismételve, az új méréseken az eső miatt átázott geotextil áram kivezető hatása ugyan látható volt, de a hibatérkép már nem mutatott sérülésre utaló anomáliákat, igazolva a problémák sikeres elhárítását. [7.]

4.5. 2024 október, V., VI. ütem (ellenőrzés)

2024 októberében aktív részvételemmel ellenőrző méréseket végeztünk a telep V. és VI. ütemének depónia medencéiben. (22. ábra)



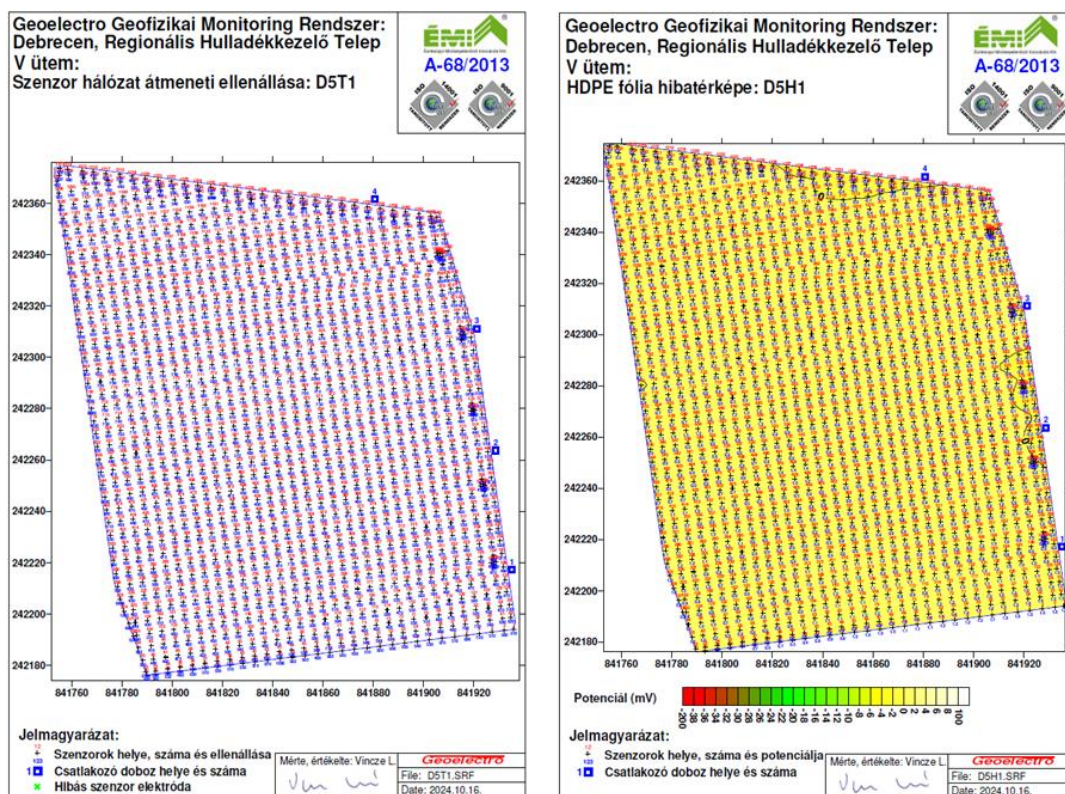
22. ábra: A mérés alatt készült képek

Az V. ütem (23. ábra) esetében a szenzorhálózat elrendezéséhez, a 2016 augusztusi ellenőrző mérés dokumentációja adott alap információt. A mérések során először a szenzorhálózat állapotának vizsgálatára megmértük a szenzor elektródák és az altalaj közt lévő átmeneti ellenállásokat. A szenzorok többsége néhány száz ohm ellenállású, megfelelő állapotú. A csatlakozópanel cseréjének eredményeként, nem találtunk hibás szenzort a területen.



23. ábra: Az V. ütem

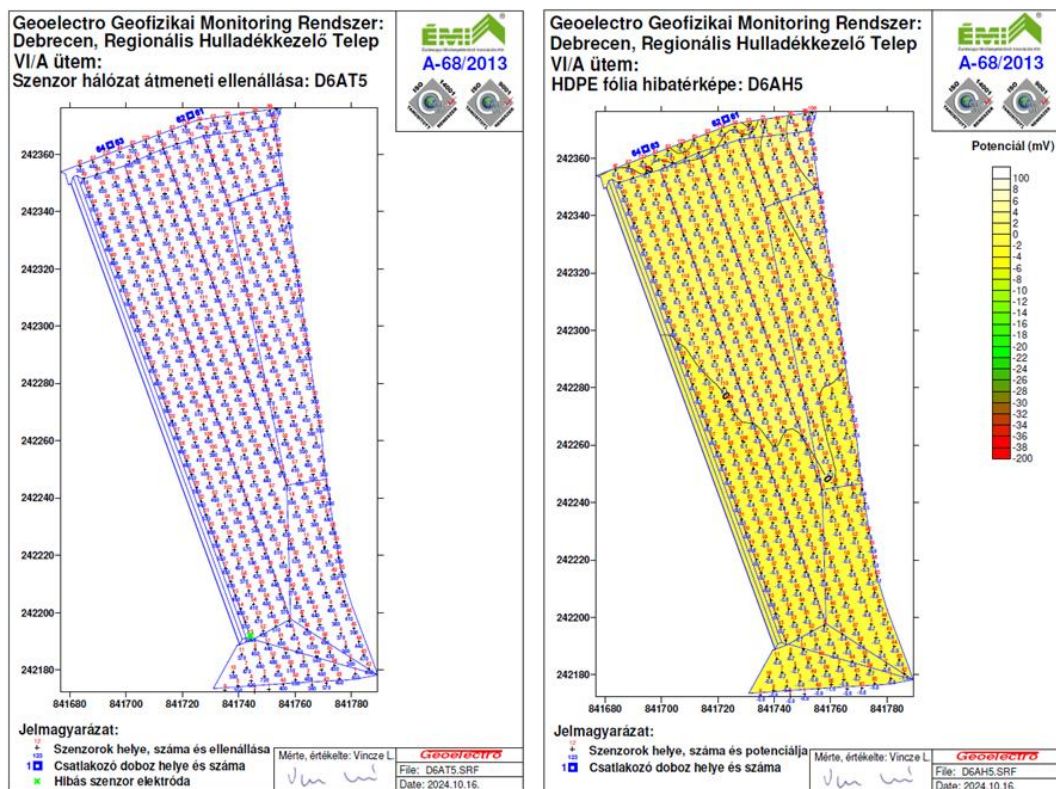
A HPDE szigetelő fólia hibatérképének mérésekor a 4. számú csatlakozó doboztól nyugatra és a 2. számú csatlakozó doboz környékén mutatkozott gyenge potenciál emelkedés, de ennek mértéke kisebb volt, mint a 2022. év mérésnél tapasztaltak (24. ábra). Az emelkedés a belső gerjesztő elektróda elhelyezésével és a fedőtalaj helyi átnedvesedésével magyarázható. Az, hogy az anomáliák idén gyengébbek voltak, azzal magyarázható, hogy idén a talaj általában szárazabb volt, mint két évvel ezelőtt.



24. ábra: Az V. ütem szenzorhálózatának ellenállása és a fólia hibatérképe [8.]

A VI/A ütem művelése lényegében befejeződött. Az itt található szenzorhálózat ellenőrzésekor, a teljes mezsgyében egy darab olyan szenzort találtunk, amely a potenciál mérésre alkalmatlan volt, de a kieső szenzor nem befolyásolja a szenzorhálózat működőképességét.

Ezek után itt is a szigetelő fólia épséget vizsgáltuk meg. Az É-i szorítótöltésen, a csatlakozó dobozok közelében két helyen látható a peremnél jelentősebb potenciál növekedés. (25. ábra) Ezek talajátfedésekkel magyarázhatók. A medence belsejében sérülésre utaló anomália nem látható.



25. ábra: A VI/A ütem szenzorhálózat ellenállása és a fólia hibatérképe [8.]

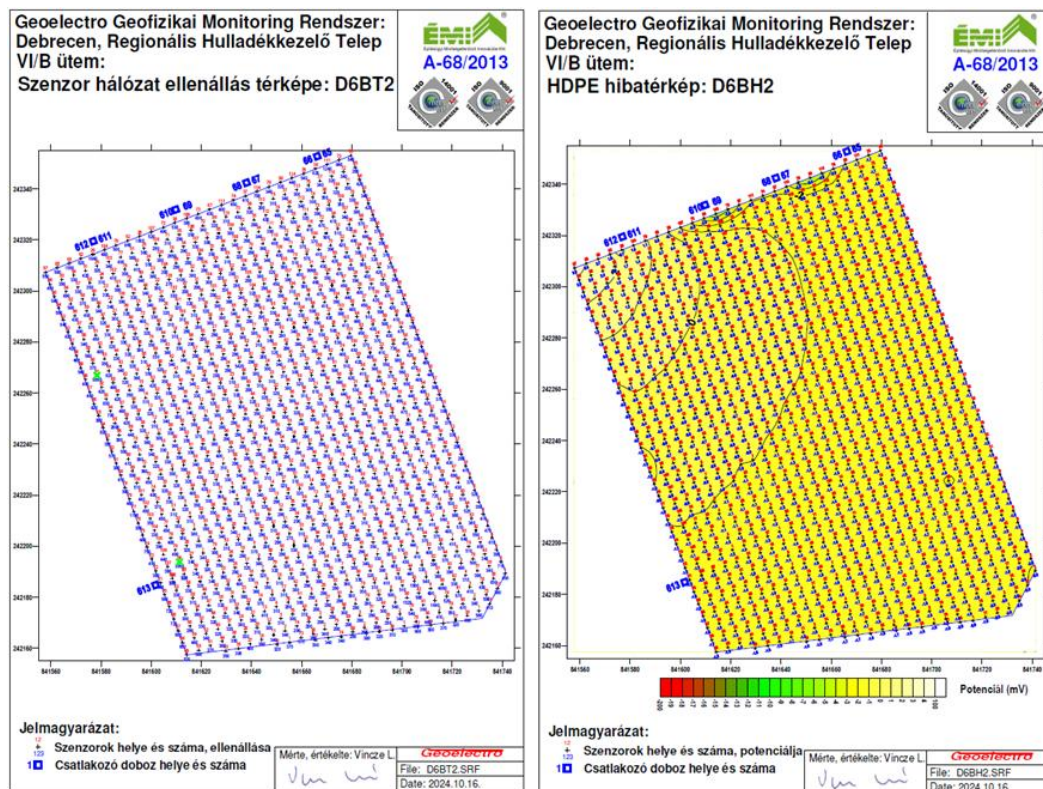
A VI/B. medence művelése elérte az átlag 1 m-es hulladék magasságot. (26. ábra) A szenzorhálózat ellenőrzésekor 2 olyan szenzort találtunk a teljes területen, amely a potenciálmérésre alkalmatlannak bizonyult.



26. ábra: A belső gerjesztő elektróda elhelyezése

A szigetelőfólia hibatérkép mérésének kiértékelésén (27. ábra), az É-i szorítótöltésen a bejáróút hatása megfigyelhető a 66. és 67. csatlakozó dobozok között. Talajátfolyás hatását láthatjuk a 67. csatlakozó doboz környékén. Kisebb talajátfolyás okozta potenciál emelkedés

látható még a Ny-i szorítótöltés közepén. A medence belső részén a szigetelés sérülésére utaló anomália nem látható. [8.]



27. ábra: A VI/B ütem szenzor hálózat ellenállás térképe és a fólia hibatérképe

5. Megoldási lehetőségek, hibák detektálása esetén

A hulladéklerakók alatti HDPE (nagy sűrűségű polietilén) fólia fontos szerepet játszik a szivárgások és talajszennyezés megelőzésében. Ha hibák vagy sérülések alakulnak ki rajta, a javításokat gyorsan és szakszerűen kell elvégezni, amit a 20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet is kimond.

5.1. Javításra alkalmas módszerek

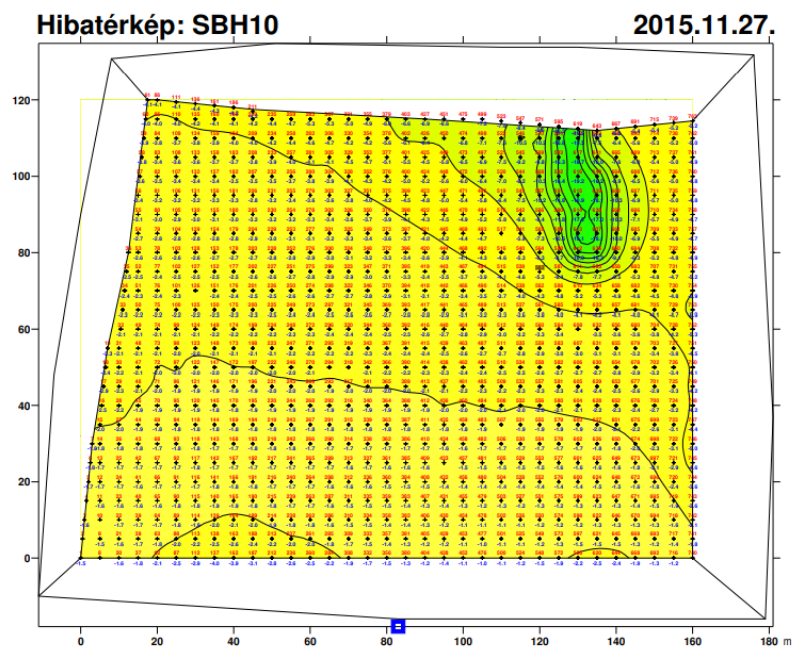
A hegesztés a legelterjedtebb módszer, ahol a fóliát hő és nyomás alkalmazásával javítják. Két félélt különböztetünk meg, az extrúziós hegesztést, amelynél egy speciális hegesztő berendezés olvasztott HDPE anyagot nyom a sérült részhez, amelyet alapos tisztítás után összeolvasztanak. A másik módszer a forró ék hegesztés, ahol a két fólia széléit hővel és nyomással egyesítik. A tapasztolás is egy javítási lehetőség. Itt egy új HDPE darabot hegesztenek a sérült terület fölé, így a javított rész vízhatlan lesz.

HDPE tapasz és gyanták használata is lehet megoldás. Speciális javító készletek kaphatók, amelyek tartós, vízhatlan tapasztokat vagy gyantát biztosítanak, amelyeket megfelelő technikával rögzítenek.

A javítás után a területet vákuumos vagy légnyomásos ellenőrzéssel tesztelik, hogy megbizonyosodjanak a vízállóságáról és a hibátlan zárásról. Ha a sérülés túl kiterjedt, vagy a fólia anyaga annyira károsodott, hogy javítás nem lehetséges, az adott részt teljesen ki kell cserélni. [11.]

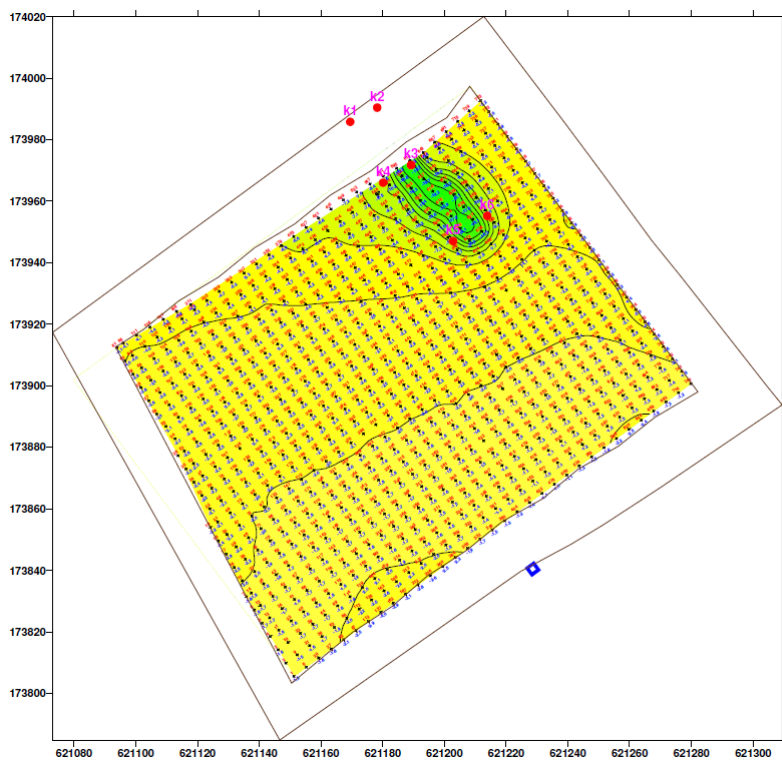
5.2. Gyakorlati példa hibahely javítására

A Geoelectro Kft. a Sárbogárdi Kommunális Hulladéklerakó HDPE szigetelő fóliájának integritását rendszeresen vizsgálta 2009 óta. A vizsgálatok során jelentős sérüléseket azonosítottak a medence alján és a rézsű alján, főként a régi bejáró környékén (28. ábra). Az anomáliák kiterjedése, a medence belseje felé haladva kb. 25–30 métert tett ki, és a vastag hulladék- és csurgalékvíz-fedés alatt voltak.



28. ábra: A javítás előtti utolsó hibamérés [9.]

Korábban több alkalommal végeztek részleges javításokat, azonban a csurgalékvíz jelenléte miatt nem sikerült teljes hibamentességet elérni. A 2016-os év elején váltak elérhetővé azok az erőforrások és feltételek, amelyek lehetővé tették a problémák végleges kezelését.



29. ábra: A feltárandó terület kitűzésének vázlata

A hibás területek azonosítása után pontos kitűzéseket végeztek. (29. ábra) A feltárási területek határait sarokpontokkal jelölték meg, amelyeket karókkal rögzítettek. Ezek az EOV (Egységes Országos Vetületi) koordináták alapján kerültek elhelyezésre.

Amikor a hulladék eltávolítása elérte a kavics szivárgóréteget, a terület pontosítása is megtörtént. A feltárások során jelentős fóliasérülések váltak láthatóvá, különösen a rézsú oldalán és a medence fenékközeli részein. (30. ábra) A sérülések dokumentálása mellett a terület folyamatos monitorozását és vizsgálatát is elvégezték.



30. ábra: Fólia sérülések a rézsún és a medence aljának közelében [9.]

A hibák pontos lokalizálását és a sérülések mértékének meghatározását geofizikai mérésekkel végezték. Ezek során elektromos mérések segítségével térképezték fel a szigetelés állapotát. A vizsgálatok célja a hibák pontos helyének meghatározása, az anomáliák terjedelmének és intenzitásának kiértékelése és a javítások hatékonyságának ellenőrzése. A méréseket a feltárási és javítási munkálatok különböző fázisaiban végezték, így biztosítva, hogy a beavatkozások célzottak és hatékonyak legyenek.



31. ábra: Néhány talált sérülés a megtisztított területen

A javítások a feltárt hibák (31. ábra) helyreállítására és a szigetelés integritásának helyreállítására fókuszáltak. Először az érintett területekről eltávolították a hulladékot, amíg a kavics szivárgóréteg és a sérült fólia hozzáférhetővé nem vált. A kisebb sérüléseket helyi javítással állították helyre, például hegesztéssel vagy új fóliadarabok illesztésével. A nagyobb sérüléseket teljes fóliacsere útján kezelték.

A munkák során kiemelt figyelmet fordítottak a csurgalékvíz elvezetésére, hogy az ne akadályozza a javítási folyamatokat.

A korábbi próbálkozások ellenére a 2016-ban végzett munkálatok során sikerült átfogó javításokat végezni, amelyeket nagyobb erőforrások bevonásával hajtottak végre. A csurgalékvíz problémája továbbra is kihívást jelentett, de a célzott beavatkozások révén sikerült javítani a szigetelés állapotán.

Az eredmények szerint a javított szigetelő fólia megfelelt a követelményeknek, és a korábban tapasztalt hibák számottevően csökkentek. Az utómérések a beavatkozások hatékonyságát igazolták. [9.]

6. Összefoglalás

A szigetelő fóliák geoelektromos vizsgálata olyan technológia, amely hosszú távon jelentősen hozzájárulhat a hulladéklerakók környezeti biztonságához. Ugyanakkor a rendszer tervezése, telepítése és fenntartása átfogó tervezést és anyagi ráfordítást igényel. A módszer hatékonysága és a környezetvédelmi előnyök azonban indokolják az ilyen rendszerek alkalmazását, különösen a nagyobb hulladéklerakók esetében, ahol a környezeti károk elkerülése kiemelten fontos. Az időben észlelt hibák és szennyezések kezelése nemcsak a természeti környezetet védi, hanem a hulladékkezelési folyamatok fenntarthatóságát is elősegíti. Dolgozatomban jelentős saját terepi munkát is megjelenítő-, hosszútávú és átfogó adatbázison alapuló-, gyakorlati problémamegoldáson keresztül demonstrált vizsgálatokra épül. Olyan hatékonyan bevethető költségkímélő geoelektromos módszerek alkalmazhatóságát és alkalmazását bizonyítja, amelyek a hulladéktárolók alsó védelmét szolgáló fóliázáson jelentkező sérülések detektálásához, diagnosztikájához és monitorozásához elengedhetetlenek.

7. Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnék köszönetet mondani a belső konzulensemnek, Dr. Szűcs István tanár úrnak, és külső konzulenseimnek, Varga Mihálynak és Vincze Lászlónak a dolgozatom elkészítésében nyújtott segítségéért és útmutató tanácsaikért.

8. Irodalomjegyzék

- [1.] Szűcs István: Fizikai módszerek a Föld megismerésében: a geofizika tudománya (19. fejezet) pp. 184-195. Földtudományi alapismeretek, PTE TTK (2011)
<https://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kornyezettan9/www/out/html-chunks/ch19.html>
- [2.] Varga Mihály: Környezetvédelemben használatos geofizikai módszerek Geoelektromos geofizikai módszerek alkalmazása a környezetvédelemben. Tudományos konferencia. MTA GTB-MGE, Sopron (2007)
- [3.] Sasvári Balázs: Környezetvédelmi feladatokhoz alkalmazható geofizikai eljárások diplomadolgozat, PTE MIK (2009)
- [4.] Szűcs István: Környezetvédelmi informatika, modellezés: A környezeti modellezés földtudományi, távérzékelési eszközei, Oktatási segédanyag, kézirat (2024)
- [5.] Geoelectro Kft., Geoelectro Geofizikai Monitoring Rendszer. Debrecen, Regionális Hulladékkezelő Telep VI/A. ütem. Szenzorhálózat telepítése, ellenőrző mérések. Záró jelentés. (2021)
- [6.] Geoelectro Kft., Geofizikai Monitoring Rendszer. Debrecen, Regionális Hulladékkezelő Telep V, és VI/A. ütem. HDPE fólia integritásának ellenőrzése. Értékelő jelentés. (2022)
- [7.] Geoelectro Kft., Geoelectro Geofizikai Monitoring Rendszer. Debrecen, Regionális Hulladékkezelő Telep VI/B. ütem. Szenzorhálózat telepítése, ellenőrző mérések. Záró jelentés. (2024)
- [8.] Geoelectro Kft., Geofizikai Monitoring Rendszer. Debrecen, Regionális Hulladékkezelő Telep V, és VI. ütem. HDPE fólia integritásának ellenőrzése. Értékelő jelentés. (2024)
- [9.] Geoelectro Kft., Sárbogárd, kommunális hulladéklerakó. Depónia szigetelésjavítást támogató geofizikai vizsgálatok. Jelentés. (2016)
- [10.] Vincze László, A HDPE szigetelő fólia sérüléseinek detektálása és a hibahelyek lokalizálása geoelektromos módszerrel. Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola (2022)
- [11.] Ian D. Peggs, Geomembranes and Seams (2004)
<https://www.geosynthetica.com/Uploads/GeoAsia04Peggs.pdf>

9. Ábrajegyzék

1. ábra: Szigetelő fólián jelentkező hibahely detektálása potenciálméréssel.....	5
2. ábra: Kimutatott és kijavított fólia hibák geoelektromos indikációi [3.]	7
3. ábra: Friss olajszennyeződés terjedés monitorozása 1D VESZ szelvényezéssel.....	8
4. ábra: Szennyeződés eloszlás 2D monitorozása HESZ szelvényezéssel [2.].....	8
5. ábra: Hulladéklerakó fajlagos ellenállás modellje [3.].....	9
6. ábra: Elektróda beütése [5.]	10
7. ábra: Szenzor elektróda	10
8. ábra: A doboz belsejében található csatlakozók [5.]	11
9. ábra: A hulladékkezelő telep légi képe [8.]	11
10. ábra: A szenzorok bemérése WILD TC1010 total station eszközzel [5.].....	12
11. ábra: Az állványokra csavarozott csatlakozószekrények [5.].....	13
12. ábra: A rekultivált V. ütem [6.].....	14
13. ábra: A nem megfelelő szigetelés hatásai	14
14. ábra: Az V. ütem hibatérképe	15
15. ábra: A VI/A. ütem hibatérképe [6.].....	16
16. ábra: VI/B ütem terve	17
17. ábra: Szenzorhálózat telepítése [7.]	18
18. ábra: A telepített csatlakozó dobozok.....	18
19. ábra: A medence az első ellenőrző mérések idején.....	19
20. ábra: VI/B hibatérképe	20
21. ábra: Javítási munkálatok képei.....	20
22. ábra: A mérés alatt készült képek.....	21
23. ábra: Az V. ütem	21
24. ábra: Az V. ütem szenzorhálózatának ellenállása és a fólia hibatérképe [8.]	22
25. ábra: A VI/A ütem szenzorhálózat ellenállása és a fólia hibatérképe [8.].....	23
26. ábra: A belső gerjesztő elektróda elhelyezése	23
27. ábra: A VI/B ütem szenzor hálózat ellenállás térképe és a fólia hibatérképe.....	24
28. ábra: A javítás előtti utolsó hibamérés [9.]	26
29. ábra: A feltárandó terület kitérésének vázlata.....	26
30. ábra: Fólia sérülések a rézsón és a medence aljának közelében [9.].....	27
31. ábra: Néhány talált sérülés a megtisztított területen	27

Nyilatkozat

Én, Kőrösi Luca Zsófia nyilatkozom, hogy a tudományos diákköri dolgozat a saját munkám, a felhasznált irodalmat korrekt módon kezeltem és a munkámra vonatkozó jogszabályokat betartottam.

.....
Kőrösi Luca Zsófia