

Kőzettest osztályozás mélyfúrás-geofizikai mérésekből

Szongoth Gábor

Geo-Log Környezetvédelmi és Geofizikai Kft. posta@geo-log.hu

Szücsi Péter

Geo-Log Környezetvédelmi és Geofizikai Kft. posta@geo-log.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A kőzettest-osztályozások hagyományos — a magok vizsgálatán alapuló — módszerei sok szubjektivitást tartalmaznak, időigényesek, valamint sok esetben meghatározások körülményes is. A cikkben bemutatjuk, hogy — előzetes tapasztalati összefüggések birtokában — a mélyfúrás-geofizikai mérések nagymértékben segíthetik és gyorsíthatják a kőzettest osztályozását, így segítve az alagút hajtás pontosabb megtervezését, valamint annak méretezését.

Kulcsszavak: mélyfúrás-geofizika, kőzettest osztályozás, RMR és Q módszerek, kőzetmechanikai paraméterek

1 BEVEZETÉS

Az üveghutai "Kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezése" projekt keretében nagy számú felszíni fúrás mélyült a Mórágyi gránit megismerése céljából. A fúrásokban a Geo-Log Kft. végezte a mélyfúrás-geofizikai vizsgálatokat, amelyek célja adatszolgáltatás a geofizikai, földtani, tektonikai, valamint a vízföldtani kutatások számára.

A fúrásokban komplex vizsgálatot végeztünk, amely tartalmazta a konvencionális méréseket (fajlagos ellenállás, sűrűség, neutron-porozitás, természetes gamma, akusztikus hullámkép, stb.), valamint akusztikus lyuktelevíziós és nagy érzékenységű áramlás mérést is. A fúrások közel 100 %-os magkihozattal készültek, a magokat több szempontból is részletesen vizsgálták: geológiai és tektonikai leírás, magszkennelés, geotechnikai vizsgálat (in situ és laboratóriumi mérések), stb. A geomechanikai vizsgálatok során 8 db, átlag 300 m mély fúrásban került sor RMR rendszerű kőzettest osztályozásra. Az eredmények megismerésekor vetődött fel az ötlet a Geo-Log Kft. részéről, hogy bizonyára található összefüggés a magok alapján készített RMR osztályozás és a kőzetmechanikai paraméterekre érzékeny mélyfúrás-geofizikai módszerek között.

A cikk ezen összefüggéseket vizsgálja és néhány példán keresztül bemutatja, hogy — elsősorban a fajlagos ellenállás és a kőzetsebesség alapján — megbízhatóan kijelölhetők a kőzet-tömbök határai és besorolhatók a megfelelő kőzetosztályba.

2 A KŐZETEK GEOTECHNIKAI ÁLLAPOTÁT TÜKRÖZŐ MÉLYFÚRÁS-GEOFIZIKAI PARAMÉTEREK

Az üveghutai kutatás során alkalmazott mélyfúrás-geofizikai módszerek információ-tartalmuk jellege szerint két nagy csoportba oszthatók: olyanokra, amelyek elsősorban a kőzet tagoltságával, mechanikai állapotával kapcsolatos információt adnak, illetve olyanokra, amelyek elsősorban a kőzet anyagától függő paraméterekre érzékenyek.

Az előbbi csoportba elsősorban a kőzetek fajlagos ellenállását mérő módszerek (elektromos, laterológ, mikroellenállás), az akusztikus hullámterjedést vizsgáló módszer (teljes akusztikus hullámkép), a lyukfalleképező módszer (akusztikus lyukfaltelevízió) és a vízbeáramlási helyeket jelző módszerek (hőimpulzusos áramlásmérés, nagyérzékenységű áramlásmérés, differenciál hőmérséklet mérés) tartoznak.

Az RMR kategorizálás céljából az elektromos módszerek közül a hosszú (40 centiméteres) potenciál szelvény (E40) látszik a legalkalmasabbnak. A mikroellenállás és a rövid (10 centiméteres) potenciálmérés (E10) felbontása túl részletes, míg a laterológmérés kivitelezése a vízszinteshez közeli fúrásokban nehézkes.

A teljes akusztikus hullámképből — esetenként a sűrűségmérés adatait is felhasználva — több közetmechanikai paraméter is számolható (V_p — longitudinális, V_s — transzverzális hullám-terjedési sebesség, nyírási modulus, Young-modulus, stb.). Ezek közül a V_p sebesség meghatározása viszonylag egyszerű és gyors, míg a V_s sebességé kissé körülményes, ezért a V_s -en alapuló további paraméterek kiszámítása is nehézkes.

Az akusztikus lyukfaltelevíziós mérésből szintén több olyan paraméter képezhető: pl. repedéssűrűség, átlagamplitúdó (a visszaverődő jelamplitúdók mélységpontonkénti átlagai), amely a kőzet geotektonikai állapotát tükrözi, sőt amelyik a kőzettest-osztályozás alapvető paramétere (repedések települése).

A többi geofizikai paraméter kapcsolata a mechanikai fellazultsággal nem mindig nyilvánvaló, még abban az esetben sem, ha maga a mért eredmény elvileg függ attól. Mivel a kristályos kőzetek porozitása kicsi, az ebből eredő sűrűségváltozás és neutron-porozitás változás kisebb lehet, mint ami a kőzetanyag minőségváltozásából adódik, másrésről a bontottabb szakaszokon kavernásodás lehetséges, és az lecsökkenti a látszólagos sűrűséget és megnöveli a neutron-porozitást, így közvetve mégis a bontottságot jelzi. A neutron-porozitás esetében bonyolítja a helyzetet, hogy nemcsak a töréses övekre jellemző agyagásványosodás ad látszólagos többletporozitást, hanem a korábbi hidrotermás metasomatózisból eredő OH^- tartalmú ásványok is, amelyek nem teljesen egyértelműen befolyásolják a kőzetminőséget. A természetes gamma szint a gránit összletben változatos, körülbelül 30-60 $\mu\text{R/h}$ aktivitás közt ingadozik, a mállási kéregbeli és a töréses övekben tapasztalható bontottság hatására káliumvesztés miatt csökken, egyes töréses övekben azonban, ahol korábban nagyobb vízmozgás volt, — U-felhalmozódás miatt — még meg is nőhet a környezetéhez képest.

Összefoglalva: egyik radioaktív módszer sem tartozik az RMR becslésre alkalmas kategóriába, inkább a kőzet összetételére, átalakulására jellemző indikátorok.

A vízbeáramlási helyek meghatározása több módszerrel történhet, a vízföldtani adottságok és technikai lehetőségek függvényében. A hőimpulzusos áramlásmérés rendkívül érzékeny módszer, a 0,1 l/min beáramlásokat is jelzi. Hátránya, hogy a mérés felső határa csak 3,7 l/min, ami nem minden esetben teszi lehetővé a megfelelő depresszió létrehozását és igen érzékeny a lyukfalegységtelenségekre (nem lehet mindenütt megfelelő pakkerezést alkalmazni). Az extra nagyérzékenységű forgólapátos áramlásmérő szondánál az alsó méréshatár kissé magasabb (0,3–0,5 l/min), viszont itt a mérés felső határa nem jelent korlátozást. Igen hatékonyak bizonyultak a repedések kimutatásában a differenciál hőmérséklet mérés, de ez a módszer csak a beáramlások helyét jelzi, a mértéket legfeljebb becsülni lehet; az átmérőváltozásra viszont kevésbé érzékeny a módszer.

A mélyfúrás-geofizikai módszerek információtartalma szerint az RMR minősítés alapját jelentő hat geotechnikai paramétert az alábbi mélyfúrás-geofizikai módszer, illetve paraméter írja le a legjobban:

- a mátrix anyag nyomószilárdsága — akusztikus kőzetsebességből számított nyírási modulus,
- a fúrómag repedezettségi állapota — fajlagos ellenállás, illetve kőzetsebesség,
- repedések átlagos távolsága — repedéssűrűség (akusztikus lyukfaltelevíziós mérés),
- repedések települése — akusztikus lyukfaltelevíziós mérés,
- repedések kitöltése (jelleg, anyagminőség) — neutron-porozitás és természetes gamma görbék aránya (a mállottság becslése),
- vízbeáramlási viszonyok — áramlásmérés, illetve differenciál-hőmérséklet mérés.

Mint a felsorolásból látható, valamennyi geotechnikai paraméterhez megtalálható a megfelelő információtartalommal rendelkező mélyfúrás-geofizikai mérés.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a legjobb eredmény az elektromos ellenállás mérésből (E_{40}), az akusztikus hullámterjedési sebességből (V_p), valamint az akusztikus lyukfaltelevízió repedéssűrűség paramétereiből származhat. A repedéssűrűség szelvény azonban viszonylag sok munkával (minden repedés településének meghatározása) állítható elő, és az erősen tektonizált területeken a repedések nem különíthetők el egymástól, így ezt a módszert nem vizsgáltuk tovább.

3 A GEOTECHNIKAI OSZTÁLYOZÁS ÉS A MÉLYFÚRÁS-GEOFIZIKAI MÉRÉSEK KORRELÁCIÓJA

Az alábbiakban áttekintjük, hogy milyen technikája van a mélyfúrás-geofizikai és a magminták-ból származó adatok együttes vizsgálatának. Tekintetbe véve, hogy az RMR értékelés hosszabb intervallumokra érvényes, a mélyfúrás-geofizikai paramétereket pedig 0,1 m vagy még nagyobb (akusztikus lyukfaltelevízió) mintavételezési sűrűséggel mértük, sokkal szorosabb korrelációt kapunk az RMR minősítésekkel, ha egyenként az RMR értékelési intervallumoknak megfelelő átlagokat képezünk a mélyfúrás-geofizikai paraméterekből, és azt ábrázoljuk kereszt diagramon. Ehhez hasonló eljárást alkalmaztunk a geomechanikai laboradatok és a mélyfúrás-geofizikai adatsor összehasonlítása során is (Zilahi-Sebess et al. 2001). Az eljárás lényege a geofizikai adatsornak az RMR-hez hasonló lépcsős függvénné alakítása.

A másik lehetőség, amelyet az összehasonlításnál használhatunk, az, hogy a szórás kiküszöbölésére a mélyfúrás-geofizikai mérésadatokat vagy az azokból számított paramétert első lépésben az RMR értékek szerint sorba rendezzük. Az egyforma RMR értékek esetén az adatok sorrendjét a mélység adja meg. Ilyenformán az egyenlő RMR értékkel jellemzett adatok több mélységintervallumból származnak. Második lépésben a mélyfúrás-geofizikai adatokat 10 RMR egység hosszúságú intervallumokra átlagoltuk, és ezeket ábrázoltuk a kereszt diagramon. Az eljárás eredménye egy olyan lépcsős függvény, ahol a lépcsők az RMR értékek sorrendjébe vannak rendezve. Tapasztalatunk szerint az így kapott átlagok jól korrelálnak az RMR értékekkel, így ez a megoldás jól áthidalja a különböző mélységfelbontásból eredő problémákat.

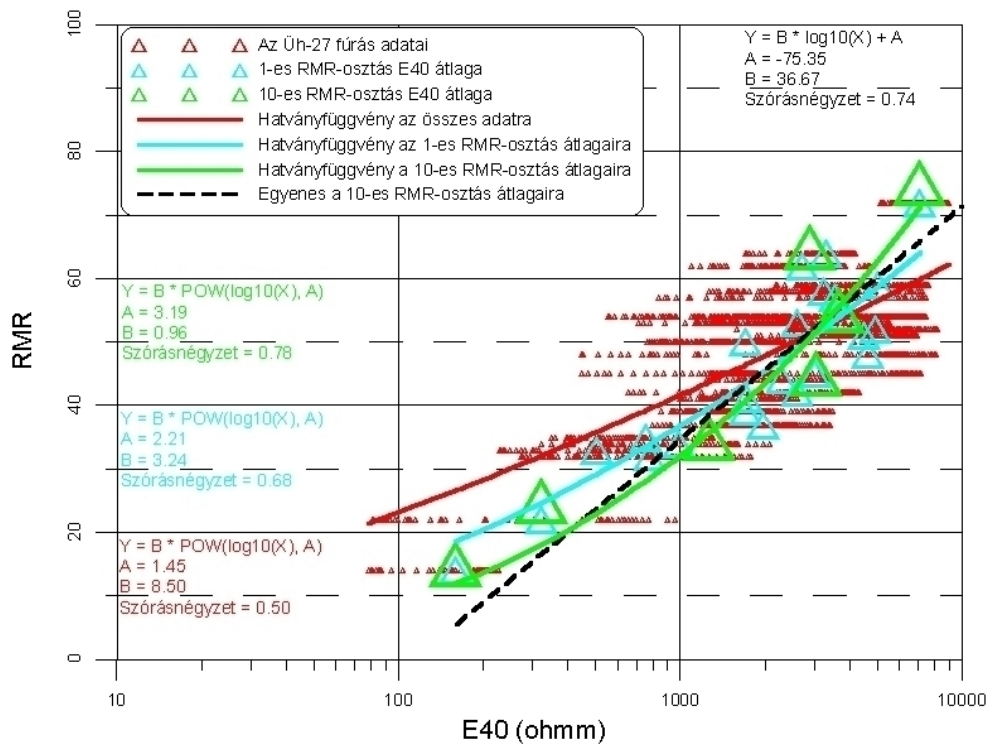
Mindkét átlagolási megoldás jóval hatékonyabb, mintha bármilyen matematikai simító szűrőt alkalmaznánk. Az adatok szűrése ilyen adatsornál azért nem hatékony, mert az automatikus szűrő algoritmusok nem ismerik a mesterségesen megadott határokat, ezért az intervallumok egymással szomszédos részeit is átlagolják, vagyis ily módon nem lehet a mélyfúrás-geofizikai adatsort az RMR-hez hasonló lépcsős függvénné alakítani.

A szelvény csak akkor vesz fel az előzőhöz képest más értéket, ha kategória-átlépés történik. Ekkor azonban előfordulhat, hogy ha egy kategória-határ közelében ingadozik az eredeti görbe, akkor túl gyakori értékváltozás történik hosszabb intervallumok esetén. A továbbiakban megvizsgáltuk a két legjobban illeszkedő és viszonylag egyszerűen előállítható mélyfúrás-geofizikai paraméterhez [$\lg(E_{40})$, illetve $\lg(E_{40}) \cdot V_p$] tartozó korrelációs egyenleteket. Először az Üh-27 fúráshoz tartozó lineáris egyenleteket elemeztük, majd a jobban illeszkedő hatványfüggvénnel végeztünk kísérleteket, hogyan lehet a meglevő adatrendszerek között a legjobb kapcsolatot megteremteni.

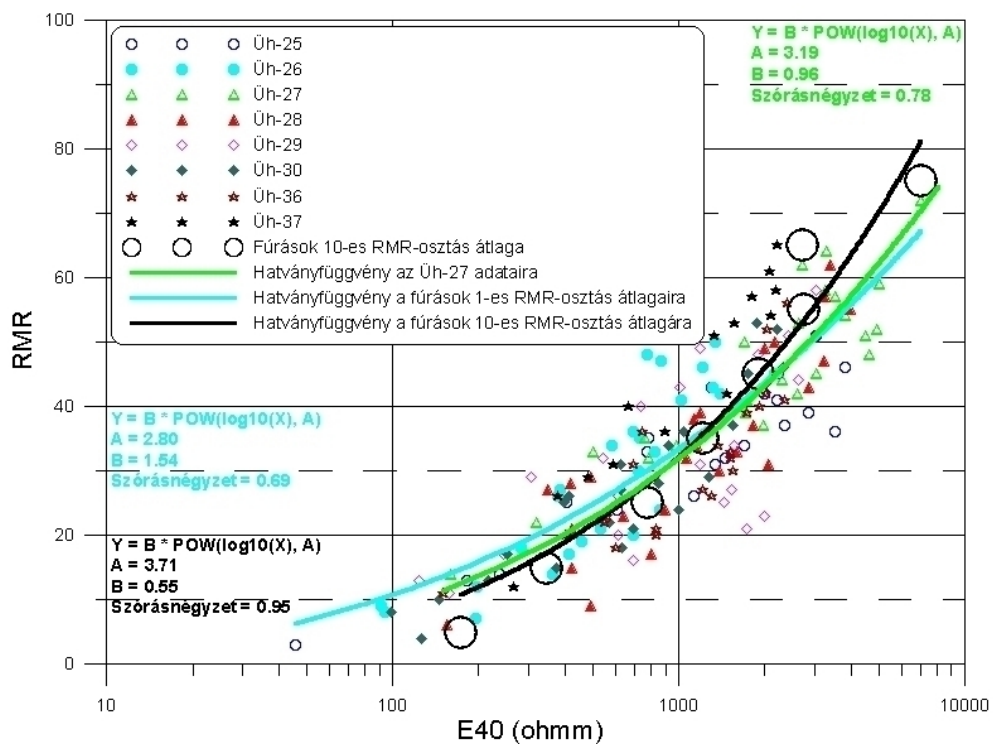
Az illesztések végrehajtása előtt az elektromos és akusztikus mérési adatokból kiszűrtük azokat, amelyek nem voltak megfelelőek. (Ilyen pontokat az esetleges mérési hiányos szakaszok vagy mérési hibák eredményezhettek.)

A vizsgálatainkhoz az öt RMR kategóriát 100 egységre osztottuk (1 kategória = 20 egység), és a $\lg(E_{40}) - RMR$, illetve a $\lg(E_{40}) \cdot V_p - RMR$ kereszt diagramokra függvényeket illesztettünk azért, hogy megtaláljuk a megfelelő összefüggést az RMR kategóriák és a mérési eredményeink között.

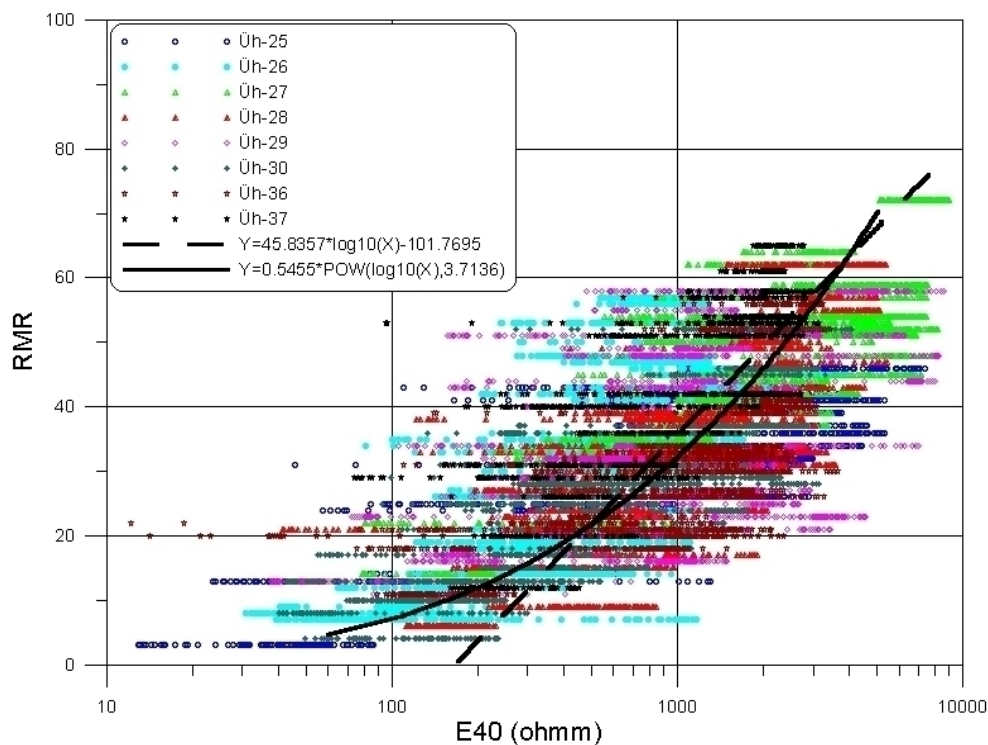
Az egyenes, illetve hatványfüggvény illesztést először egyetlen fúráson végeztük el (1. ábra), majd a legjobbnak tűnő módszert az összes fúrára alkalmaztuk (2. ábra). A 3. ábrán bemutatjuk, hogy az összes ponthoz hogyan illeszkedik az elsőfokú és a másodfokú görbe.



1. ábra. lg(E40) – RMR keresztidíagram I. (Üh-27 fúrás)



2. ábra. lg(E40) – RMR keresztidíagram II. (összes fúrás)

3. ábra. $\lg(E40)$ – RMR keresztmetszeti diagram III. (összes fúrás)

Az összes fúrásra a legjobban illeszkedő hatványfüggvény:

$$RMR = 0,55 \cdot [\lg(E40)]^{3,71} \quad \text{szórásnégyzet } (\sigma^2): 0,95 \quad (1)$$

A $\lg(E40) \cdot V_p$ paraméternél hasonló módszerrel állapítottuk meg a legjobban illeszkedő egyenletet

$$RMR = 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot [\lg(\lg(E40) \cdot v_p)]^{20,05} \quad \text{szórásnégyzet } (\sigma^2): 0,98 \quad (2)$$

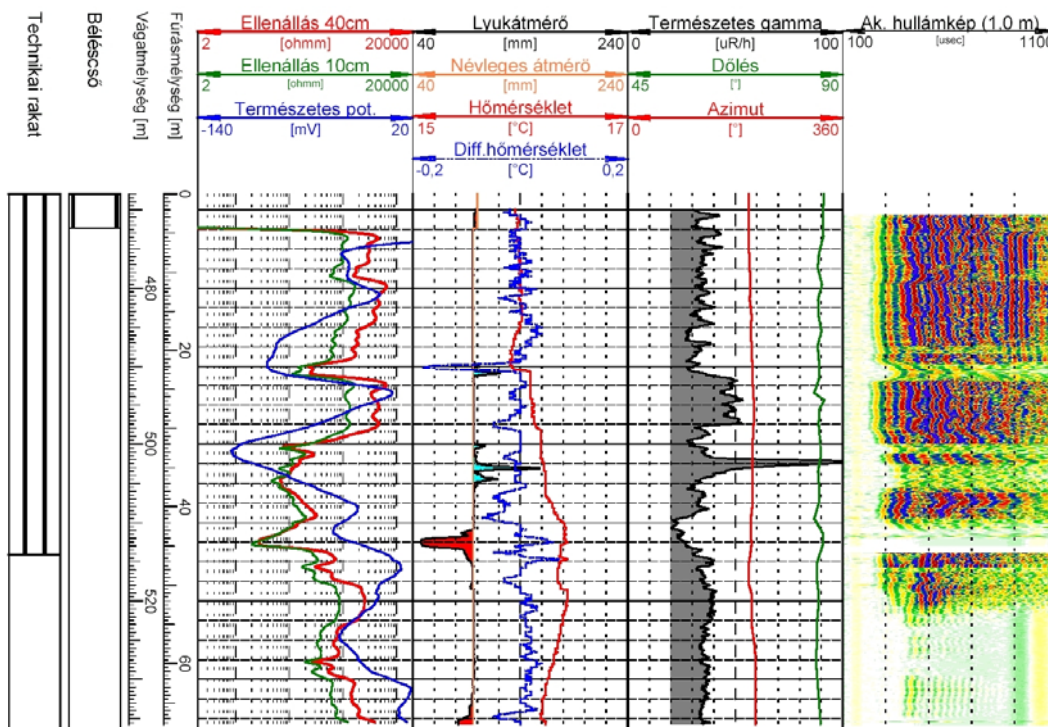
azonban a továbbiakban csak a legegyszerűbb — $E40$ -re alapozott — összefüggést alkalmazzuk.

4 NÉHÁNY PÉLDA A MÉLYFÚRÁS-GEOFIZIKÁRA ALAPOZOTT KŐZETTEST-OSZTÁLYOZÁSRA

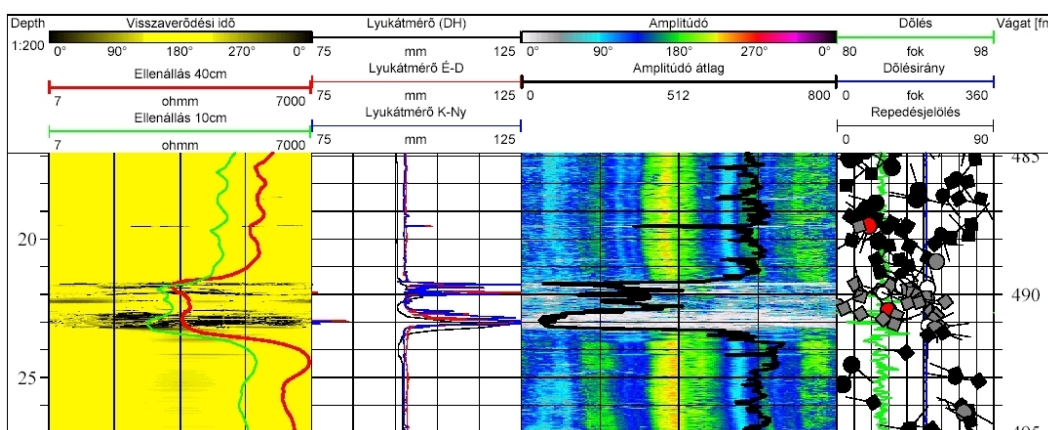
Az előző fejezetben ismertetett összefüggést eddig 3 felszín alatti fúrásban teszteltük, az alábbiakban ezek eredményeit mutatjuk be.

4.1 BeK-5 vágat előfúrás

A fúrásban a felszín alatti méréseknél alkalmazott, leszűkített komplex mérési sorozatot (ellenállás, akusztikus hullámkép, természetes gamma, lyukátmérő, diff. hőmérséklet, akusztikus lyukfaltelevízió) hajtottuk végre (4. és 5. ábra).



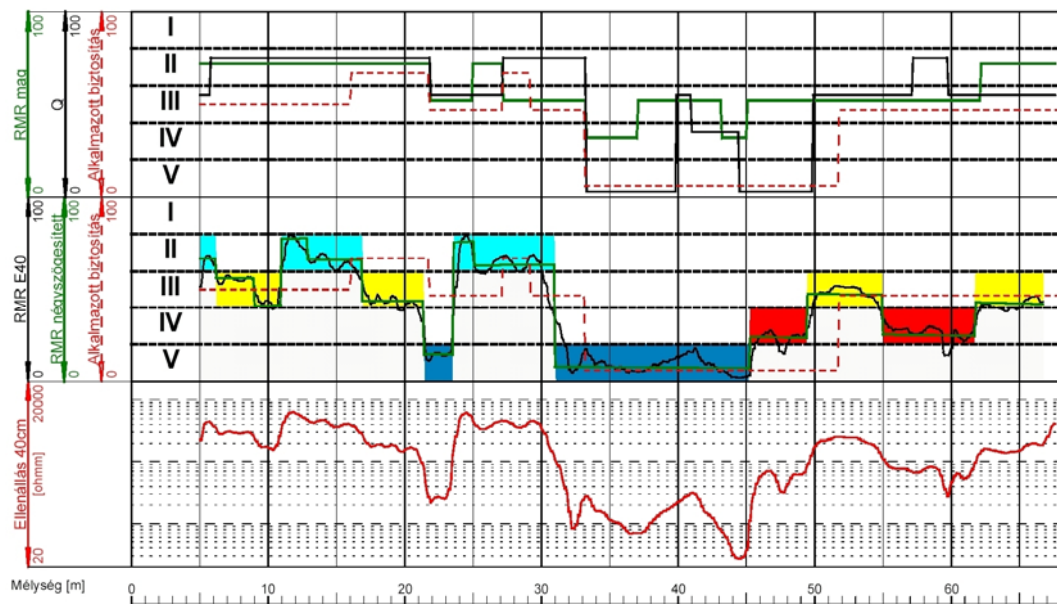
4. ábra. A BeK-5 fúrásban végzett komplex mérések egy szakasza



5. ábra. A BeK-5 fúrásban végzett akusztikus lyukfaltelevíziós felvétel egy részlete

A fúrásban az RMR alapú kőzettest-osztályozást az alábbi módon végeztük el. A mért E40 szelvény és a fentiekben meghatározott összefüggés alapján elkészítettük az "RMR szelvényt" (6. ábra, középső mező). A görbék alapján kijelöltük a réteghatárokat, majd a határok között átlagoltuk a görbét (négyzetesítettük a folytonos RMR görbét), ezután — bizonyos megfontolások alapján — összevontuk az egy RMR kategóriába eső intervallumokat és így megkaptuk az RMR osztályozás végeredményét.

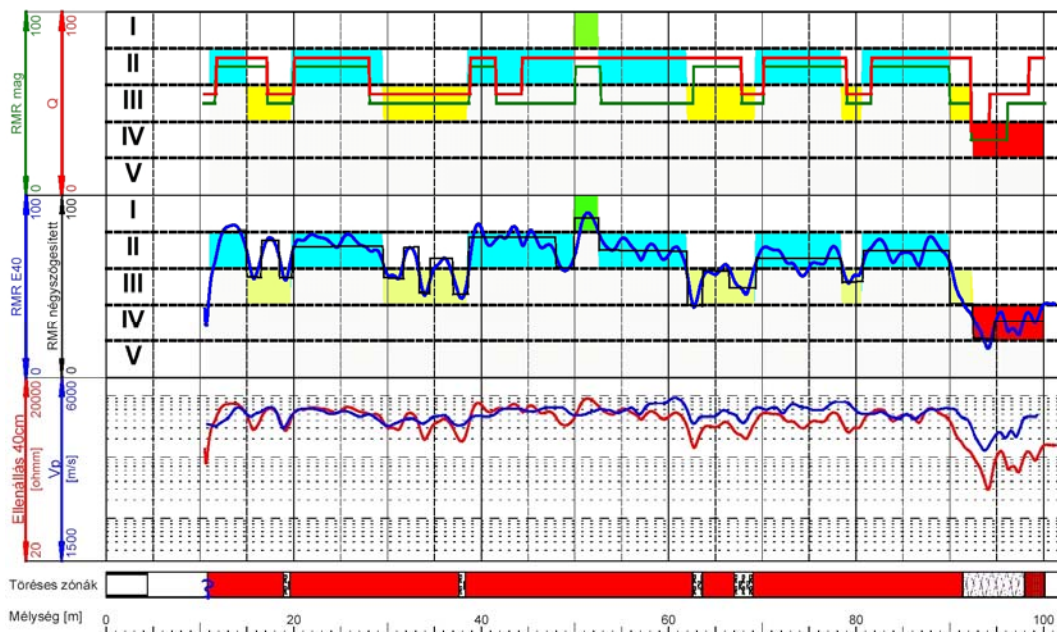
Az ábrán a felső mezőben feltüntettük a magleírás alapján készített RMR és Q értékelést, valamint az alkalmazott kőzetbiztosítást (ezt a középső mezőben is). Megfigyelhető, hogy a mélyfúrás-geofizikából meghatározott és a mag vizsgálatokon alapuló értékelés nagyon jól egyezik.



6. ábra. Kőzettest-osztályozás RMR módszer alapján a BeK-5 fúrásban
(a színezett sávok a javasolt RMR osztályozást jelölik)

4.2 Bv-1 vágathatás fúrás

Valamennyi fúrás közül ez a fúrás harántolta a legüdébb gránitot, csak a fúrás utolsó szakaszán (91-98 m között) van egy tektonizált zóna (7. ábra).



7. ábra. Kőzettest-osztályozás a Bv-1 jelű fúrásban
(a színezett sávok a javasolt RMR osztályozást jelölik)

Mindezt jól tükrözi az egymástól független és mégis nagyon jól korreláló, igen magas ellenállás és kőzetsebesség (V_p) szint.

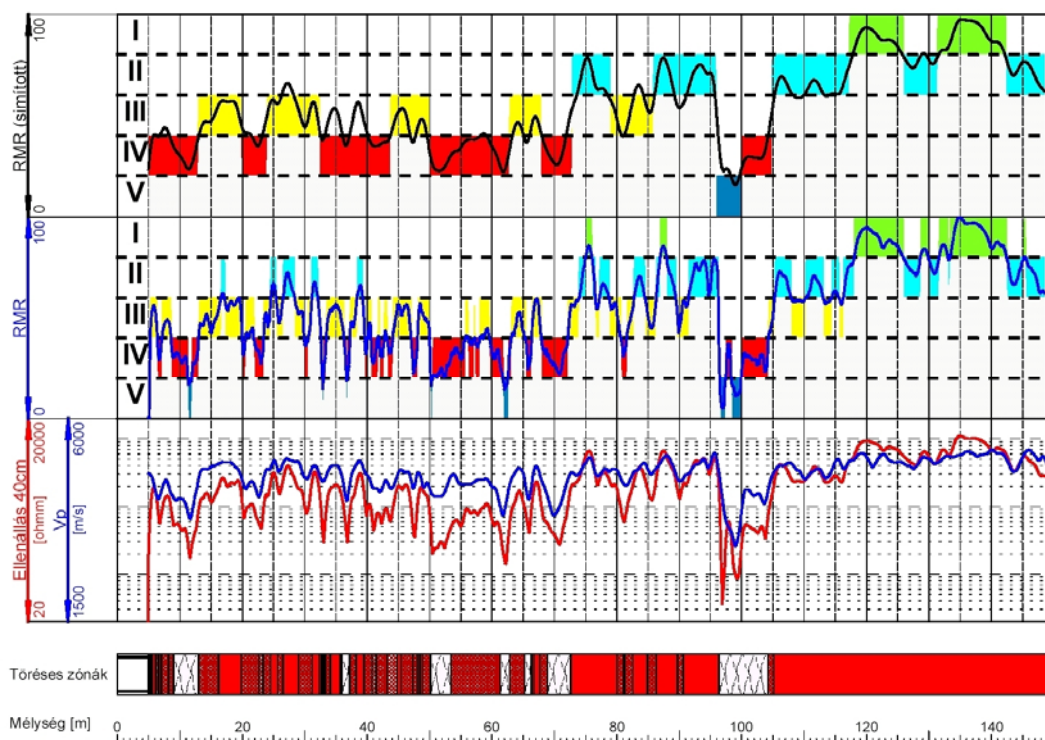
A középső mezőben a számított RMR szelvényt, annak négyesítő változatát, és az RMR osztályozást tüntettük fel. A felső mezőben a magvizsgálat szerinti RMR és Q kőzetminősítést, valamint a mélyfúrás-geofizika szerinti RMR osztályozást ábrázoltuk. Látható, hogy az egyezés az RMR osztályozással itt is igen jó. A legnagyobb eltérés 42-62 m között van, ahol az E40 egy-

gyel magasabb RMR kategóriát mutat, ugyanakkor a fúrás alsó szakaszán majdnem tökéletes az egyezés, csak a réteghatároknál van 1-2 méteres különbség. A Q alapján történő besorolás azonban szinte tökéletesen megegyezik a számított RMR-rel.

4.3 Bp-1 potenciál fúrás

Ez volt a leghosszabb fúrás (150m), ahol — az előzőekben meghatározott összefüggés szerint — RMR meghatározást végeztünk, azonban még nem készült el a magok geotechnikai leírása alapján készített RMR feldolgozás, így egyelőre nem volt mód az eredmények ellenőrzésére.

A 8. ábrán az alsó sávban az E40 és Vp görbéket tüntettük fel. A középső sávban bemutatjuk az E40-ből számított RMR görbét és az ennek alapján készített automatikus kategorizálást.



8. ábra. Kőzettest-osztályozás a Bp-1 jelű fúrásban
(a színezett sávok a javasolt RMR osztályozást jelölik)

A harmadik sávban az RMR görbének az erősen szűrt változatát, valamint az abból készített összevont RMR kategorizálást ábrázoltuk. Az összevonást is lehetne bonyolult algoritmusokkal automatizálni, de nem érdemes, mivel bizonyos alapelvek alkalmazása (pl. egy méteres rétegvastagság felett csak lefelé korrigálunk, 4-5 méternél nem jelölünk vékonyabb RMR intervallumot), csak kevés szubjektivitást enged meg a kiértékelést végző részére. Természetesen az általunk javasolt osztályozás csak kiindulópont a biztosítási kategória eldöntéséhez, a gyakorlatban további célszerű összevonások is lehetségesek.

5 ÖSSZEFOGLALÁS

Ismereteink szerint Magyarországon eddig sehol sem alkalmazták a mélyfúrás-geofizikai méréseket kőzettest-osztályozásra. A bemutatott példákban látható, hogy a mélyfúrás-geofizikai paraméterek egy része jól korrelál a kőzettestek állékonyságával, és így ezek a mérések felhasználhatók az RMR módszer szerinti kategorizálásra.

További lehetőség, hogy nem az RMR, vagy másik (RGD, RSR, Q, GSI) kőzettest osztályozást készítjük el, hanem közvetlen az alkalmazandó biztosítási kategóriát határozzuk meg. Ez úgy lehetséges, hogy egy feladat (pl. alagút építés) során az első egy-két fúrás mérései, valamint

a kivitelezésnél alkalmazott tényleges biztosítás alapján készítjük el a korrelációs összefüggést. A továbbiakban ezen összefüggés alapján meghatározható a szükséges fejtési, illetve biztosítási technológia.

A módszer alapvető előnye, hogy — egy tapasztalati úton meghatározott korrelációs összefüggés birtokában — a méréssel egy időben előállítható egy "RMR görbe", amiből előzetes kritériumok alapján meghatározhatók az RMR intervallumok és egyben a kategóriák is. A magok geotektonikai leírásán alapuló módszerek legfőbb hátránya, hogy a magok geotektonikai leírása során először az együtt kezelendő (azonos állapotúnak tekintett) szakaszokat kell kijelölni, és ha ez hibás (a határ rossz helyre került), ez a hiba a továbbiakban már nemigen javítható. A határok kijelölése pedig erősen szubjektív... A mag vizsgálatánál további hátrány, hogy jellemző mintát kell találni a laborvizsgálat számára és ez nem mindig egyszerű, nem beszélve a laborvizsgálatok időigényéről és költségéről. A magok hiánya, esetleges felcserélése, illetve mélységbeli csúszása további hibák forrása lehet. A magok átmérője kb. 5 cm, míg a mélyfúrás-geofizikai mérések által vizsgált henger kb. 50 cm átmérőjű, tehát a vizsgált térrész egy nagyságrenddel nagyobb, ami jelentős különbség még akkor is, ha a kérdéses tartomány (a vágat keresztmetszete) kb. két nagyságrenddel ennél is nagyobb.

Mindezekkel együtt a módszer nem helyettesíti, csak segíti (intervallumok kijelölése) és kiegészíti, illetve gyorsítja (osztályba sorolás) a hagyományos kőzettest-osztályozási módszereket.

A módszert eddig csak egy területen (Mórágynál gránit) volt alkalmunk kipróbálni, a jövőben igyekeznénk más területeken, illetve kőzetekben (andezit, karbonát, homokkő, stb.) is alkalmazni.

SZAKIRODALOM

- Bieniawski, Z. T. 1976. *Rock mass classification in rock engineering*. In Bieniawski, Z. T. (Ed.) *Exploration for rock engineering* 1, 97–106.
- Kovács L. 2003. *Értékelő jelentés a Bataapáti és Mórágynál lévő kőzetek térségében 2002 folyamán mélyített kutatófúrások maganyagából elvégzett RMR-rendszerű geotechnikai minősítésről*, Kézirat, Bomix Kft., Kútfej Bt., Pécs
- Szongoth G., Zilahi-Sebess L., Szücsi P. 2004. *Geotechnikai jellemző (RMR) meghatározása mélyfúrás-geofizikai mérésekből*, Kézirat, Geo-Log Kft., Budapest
- Vásárhelyi B. 2004. Kőzettest-osztályozási módszerek összefoglalása. In *Földtani Közlöny* 134/1, 109–129.
- Zilahi-Sebess L., Kasza Z., Tóth I. 2001. *Mélyfúrás-geofizikai mérésekből kapott geomechanikai paraméterek összevetése a laboratóriumi adatokkal és a magminta töredézettség adatokkal az üveghutai fúrásokban*, Kézirat, Geo-Log Kft. Budapest

