

Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján¹

ZILAHÍ-SEBESS LÁSZLÓ², FANCSIK TAMÁS², TÖRÖK ISTVÁN², KOVÁCS ATTILA CSABA²

Az elmúlt tíz évben az ELGI részt vett a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló földtani kutatásban. A kutatás során számos módszert alkalmaztak. Általában a geofizikai méréseket a kőzetek mechanikai tulajdonságok szerinti osztályozására, vagyis főleg a szerkezeti földtani kép körvonalazására használják, amivel többnyire nem közvetlen módon függnek össze a hidrogeológiai tulajdonságok. A kiértékelés eredményeként általában a közvetlen mért fizikai paraméterek alkotta teret szokták közölni némi földtani értelmezéssel, amely sok esetben nem igazán értékelhető a geológus szakemberek számára. Ennek a tanulmánynak a célja, hogy közelebb hozza a geofizikát a földtani értelmezésben valóban érdekes paraméterekhez és egyben megmutassa a mélyfúrás-geofizika közvetítő szerepét a fúrásból származó hidrodinamikai információk és a felszíni geofizikai mérések közt. A kőzetek vízvezető-képessége a környezetvédelmi kutatások — mint például a radioaktív hulladék elhelyezéssel kapcsolatos vizsgálatok — fontos tényezője. A mérésekből szerzett tapasztalatok szerint a felszíni geofizikai mérések elektromos ellenállás–szeizmikus sebesség összefüggése nagyon hasonlít a mélyfúrás-geofizikai mérések (elektromos ellenállás és szónikus sebesség) alapján megállapíthatóhoz. A tapasztalatok szerint a mélyfúrás-geofizikai mérések alapján számított permeabilitás görbék alakja közelítőleg hasonló a rövid idejű hidrogeológiai tesztek (gyors-tesztek) alapján meghatározott szivárgási tényező görbékéhez. Ebből következik, hogy a mélyfúrás-geofizikai mérések alapján a hidrogeológiai adatokra normált empirikus összefüggések a felszíni mérések közötti kapcsolatokra is átvihetők, vagyis azokból a kőzetek potenciális áteresztőképességére információt nyerhetünk. Egyetlen megszorítás, hogy a felszíni geofizikai mérések alapján végrehajtott szivárgási tényező becslés csak tömbjellemző lehet, vagyis a hidraulikus permeabilitást egyfajta elsődleges porozitás függvényeként kezeljük.

L. ZILAHÍ-SEBESS, T. FANCSIK, I. TÖRÖK, A. Cs. KOVÁCS: Estimation of hydraulic permeability based on geophysical measurements

In the past decade ELGI took part in the geological site investigation of a low and intermediate radioactive waste deposit. During that numerous geophysical methods were applied. Generally the geophysical measurements are used for outlining a structural geological picture and for classification of rocks according to the geomechanical properties, which usually can not be linked directly with hydrogeological properties. As a result of evaluation commonly the distribution of the physical parameters with some geological explanation are reported which frequently are not the proper information for geologists. The aim of this study is to bring closer geophysical evaluation to the useful parameters of geology and in the same time to show the role of well logging in the communication between hydrogeological evaluations based on data originated from borehole and on interpretation of surface geophysical measurements. The hydraulic permeability of rocks is an important factor in the environmental research such as a site investigation of a radioactive waste repository. According to the observations the relation between electric resistivities and seismic velocities measured on the surface is very similar to that based on well logging measurements (electric resistivity and sonic velocity). Experiences show that the shape of permeability curves based on well logging is approximately similar to the shape of the seepage factor curves got from hydrogeological tests in short time (early time test). It follows from the foregoing that the empirical relation based on well logging data normalized to hydrogeological ones might be applied to the parameters got from surface geophysical measurements, too, in other words, information for the possible hydraulic permeability can be gained from surface geophysical measurements, too. There is only one restriction, i.e. that the permeability estimation based on surface geophysical methods may be valid only for the investigated blocks so the hydraulic permeability has to be considered as a function of a certain primary porosity.

Bevezetés

Az elmúlt évtizedben az ELGI részt vett a Bábaapáti térségében folytatott kis és közepes radioaktivitású erómuvi hulladékok elhelyezésére irányuló földtani kutatásban, melynek során számos mérési módszert próbáltak ki. A geofizikai méréseket általában a kőzetek tagolására, szerkezeti földtani kép kialakítására használják, és többnyire nem szokták összekapcsolni a hidrodinamikai tulajdonságokkal. A kiértékelés során általában a közvetlen mért fizikai paraméterek alkotta teret szokták közölni, amely sok

esetben nem igazán értékelhető a geológus szakemberek számára. Ennek a tanulmánynak a fő célja közelebb hozni a felszíni geofizikát a földtani értelmezésben valóban érdekes paraméterekhez és egyben megmutatni a mélyfúrás-geofizika közvetítő szerepét a fúrásból származó hidrodinamikai információk és a felszíni geofizikai mérések közt¹.

A radioaktív hulladék elhelyezéssel kapcsolatos geofizikai kutatások célja sokban hasonlít a fluidumbányászat céljaihoz, hiszen mindkét esetben a kőzetek hidrogeológiai tulajdonságai a fontosak. A kőzetek áteresztőképessége nemcsak az olajipari és a vízkutatás során a legfontosabb

¹ Beérkezett: 2007. június 2-án

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

¹ A cikkben felhasznált felszíni geofizikai méréseket az ELGI, a mélyfúrás-geofizikai méréseket a Geo-Log Kft. és az ELGI, a hidrodinamikai méréseket a Golder Associates Kft. végezte.

tulajdonság, hanem a környezetvédelmi kutatásokban is. A környezeti szennyeződések döntő része a felszín alatti vizekkel terjed, ezért fontos az egyes képződmények szennyvezetés-érzékenységének vizsgálata, amely azok porozitásának, permeabilitásának², ionabszorpciós képességének a függvénye. Ezek a paraméterek geofizikai mérések alapján becsülhetők, noha közvetlenül nem ezeket mérik. A vízvezető térrészek mindig valamilyen repedezettséggel kapcsolódnak. A vízvezető repedezettség többnyire valamilyen nagyobb térfogatra kiterjedő mechanikai, és a gyakran ezzel járó kémiai elváltozásokhoz kapcsolódik. A kristályos kőzetek porozitása általában kicsi, ezért sok esetben a kőzet sűrűsége alig változik, azonban az elektromos ellenállásban és a szeizmikus hullámterjedési sebességben már a kőzet kis mértékű bontottsága is jól mérhető eltéréseket jelenthet.

A mérésekből szerzett tapasztalatok szerint a felszíni geofizikai mérések elektromos ellenállás-szeizmikus sebesség összefüggése erősen hasonlít a mélyfúrás-geofizikai mérések alapján megállapíthatóhoz. A tapasztalatok szerint a mélyfúrás-geofizikai mérések alapján felállított elvi permeabilitás görbék menete hozzávetőlegesen korrelál a gyorsteszt³ alapján meghatározott szivárgási tényező⁴ görbékével. Ebből következik, hogy a mélyfúrás-geofizikai mérések alapján a hidrogeológiai adatokra normált empirikus összefüggések a felszíni mérések közti kapcsolatokra is átvihetők, vagyis azokból a kőzetek potenciális áteresztőképességére információt nyerhetünk. Az így becsült paraméterek és a valóságos áteresztőképesség közt a repedések különböző kitöltöttségi állapotából következően nagyságrendi eltérések is lehetnek, ám a gyengült zónákat jellemző átlagos paraméter hasznos lehet a hidrogeológiai modellezés számára. A geofizikai mérések alapján a kőzetek vízátteresztő képességére tett becslés permeabilitás jellegű, viszont az adatsort szivárgási tényező adatokra kalibrálják. Meg kell említenünk, hogy a szivárgási tényező becslés nem azonos a hidrogeológiai modellel, csak egy bemenő adata annak, vagyis nem következik belőle közvetlenül az áramlási rendszer. Az áramlási rendszer modellezéséhez a másik fontos bemenő adat a geofizika részéről a térbeli tagoltság, vagyis egyfajta szerkezetföldtani kép megadása. A hidrogeológiai modell kialakításához tehát mind a két információra szükség van. A felszíni geofizikai mérések alapján végrehajtott szivárgási tényező becslés lényegében a fúrás információk kiterjesztése, ezért önmagában csak

tömbjellemzőként használható, tehát fizikai tartalmában nem jelent többet, mint azok a mérésadatok, amelyekből számítják. A többlet információt az adja, hogy a szivárgási tényező, mint mennyiség a hidrogeológia számára közvetlen felhasználható és a becslés valós információ kiterjesztését jelenti a fúrások közötti térbe, tehát a tektonikai zónák által határolt kőzettömbökre legalább nagyságrendileg korrektnek fogadható el.

A vizsgálatok előkészítése, szakirodalmi példák

A Bábaapáti (Üveghuta) kutatási területen a karbon korú Mórógyi Gránit Formációt 40–60 m pleisztocén korú lösz fedi, kibúvások csak a völgyekben találhatóak. A negyedidőszaki fedőüledékek alatt a gránit átlag 60 m vastagságban többé-kevésbé bontott. Az üde felszíni hatásoktól nem érintett kőzet tektonikai zónák által határolt tömbökre tagolódnak.

Az üveghutai, kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló földtani kutatás keretében lemélyült fúrások közül négyet választottunk ki, az Üh-2, Üh-23, Üh-27, Üh-28 jelű fúrásokat. Ezekben a fúrásokban a szükséges mélyfúrás-geofizikai méréseken kívül többféle, a vízbeáramlásra, áteresztőképességre vonatkozó információ is rendelkezünk. Néhány szakirodalmi példát alapul véve választottuk ki a mélyfúrás-geofizikai mérésekből képzett szivárgási tényező meghatározás kalibrálására leginkább megfelelő hidrogeológiai adatrendszer, a fúrások közeli hatásokra leginkább érzékeny gyorsteszteket (rövid idejű hidrodinamikai teszt).

A szakirodalom nagy része homogén térre vonatkozó szivárgási tényező meghatározások fizikai hátterével foglalkozik. A szivárgási tényezőt meghatározó Darcy-féle egyenlet eredeti alakja:

$$Q = K A (dh/L) \quad (1)$$

ahol

Q [m³/s] — a vízhozam,

A [m²] — az áramlás keresztmetszete,

dh/L — a hidraulikus gradiens,

dh [m] — a hidrodinamikai szintkülönbség két adott pont között,

L [m] — a két pont távolsága,

K [m/s] — a szivárgási tényező, amely egyenesen arányos a permeabilitással (κ [cm²]), a folyadék fajsúlyával (γ), fordítottan arányos a dinamikai viszkozitással (μ):

$K = \kappa \gamma / \mu$, ahol $\gamma = \rho g$, ρ — a folyadék sűrűsége, $g = 981$ cm/s² — a gravitációs gyorsulás.

A Darcy-egyenletet a permeabilitással kifejezve

$$Q = (\kappa \rho g / \mu) A (dh/L) \quad (2)$$

A $\rho g \cdot dh / L$ kifejezés, ha a két pont nagyon közeli, akkor a dp/dx alakba írható át, vagyis a nyomásgradienst kapjuk.

A kifejezést továbbalakítva a Darcy-egyenlet nyomásgradienssel kifejezett alakját kapjuk:

$$Q = (\kappa A / \mu) \cdot dp / dx \quad (3)$$

Az egyenlet egyik formájában sem szerepel a porozitás és a tortuozitás, ami viszont a földtudományokban alapvető fontosságú. Az e paraméterektől való függést általában a κ permeabilitás kifejezésén keresztül építik be az egyenletekbe. Általános megállapítás, hogy a szivárgási tényező fordítottan arányos a hézagter tortuozitásával és valamely hat-

² A permeabilitás a kőzetek folyadék vezetőképessége, amely nem függ az áramló folyadék tulajdonságaitól. Definíció szerint 1 darcy permeabilitása van a kőzetnek egyfázisú, 1 centipoise viszkozitású, a teljes rendelkezésre álló pórusteret kitöltő folyadék áramlás esetén, ha a folyadék 1 cm/sec sebességgel áramlik át a kőzet 1 cm² keresztmetszetű felületén 1 atm/cm hidraulikus gradiens mellett. Más szóval 1 darcy permeabilitás mellett 1 s alatt 1 cm² felületen 1 cm³ térfogatú folyadék áramlik át, vagyis az 1 D permeabilitás esetén 10⁻² m/s az áramlás sebessége, 1 mD esetén pedig 10⁻⁵ m/s áramlási sebességgel számolhatunk. 1 D permeabilitású közeg szivárgási tényezője 10⁻⁵ m/s.

³ A gyorsteszt rövid idejű, 0,5–2 órás termeltetési teszt a fúróluk közeli környezete szivárgási tényezőjének meghatározása céljából. A tesztnek hatótávolsága 1–2 m.

⁴ A hidrogeológiai gyakorlatban szokásos a szivárgási tényező vagy hidraulikus vezetőképesség használata, amely egy adott keresztmetszeten egységnyi idő alatt keresztuláramló vízmenyiség mérőszáma (definícióját ld. a szövegben).

vány szerint egyenesen arányos a hézagterfogatával. A szivárgási tényező függ a póruskitöltő folyadék fajsúlyától, hőmérsékletétől, dinamikus viszkozitásától és üledékes kőzetek esetén a szemcsék alakjától, a fajlagos felülettől, a tortuozitástól.

Mindezeknek egyik kifejezési formája az egymáshoz hasonló alakú Darcy-féle szivárgási egyenlet szivárgási tényezőjének és a Kozeny-féle permeabilitási egyenlet permeabilitásának egy, a porozitást tartalmazó, CSÓKÁS által felírt formája is [CSÓKÁS 1986]:

— Darcy féle szivárgási egyenlet

$$K = \frac{1}{5} \frac{\gamma}{\eta} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \frac{D_h^2}{\alpha^2} \quad (4)$$

— Kozeny-féle permeabilitási egyenlet

$$K = \frac{1}{5} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \left(\frac{1}{tS_v} \right)^2 \quad (5)$$

ahol

Φ — a porozitás,

D_h — a Kozeny-féle effektív szemcseátmérő,

γ — a pórúsvíz fajsúlya,

η — a pórúsvíz dinamikus viszkozitása,

α — az átlagos szemcsealakfaktor [KOVÁCS 1981],

t — tortuozitás,

S_v — fajlagos felület.

A Darcy-képletet eredetileg szemcséközi porozitású kőzetekre alkalmazták, a Kozeny-egyenlet általánosabb, benne a póruskitöltő folyadék tulajdonságai nem szerepelnek, azokat állandónak tekintik, a szemcse-alakfaktor, a szemcse és az effektív szemcseátmérő egyaránt a fajlagos felület fogalmába lettek összesűrítve.

CSÓKÁS [1986] a fenti két egyenlet összevetéséből, valamint a Kozeny-féle effektív szemcseátmérő ellenállásból történő becslésére vízáadó homokokra vezetett le összefüggést a szivárgási tényező ellenállásból és porozitásból történő becslésére:

$$K = 2,332 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} \cdot \frac{\left(\log \frac{R_0}{R_w} \right)}{\left(\frac{R_0}{R_w} \Phi \right)^{1,2}} \quad (6)$$

ahol

K [m/s] — szivárgási tényező,

Φ — a porozitás,

R_0 — a mért ellenállás,

R_w — a póruskitöltő fluidum ellenállása,

C — hőmérsékletfüggő együttható.

Az egyenlet érvényességi tartománya a homokoknál előforduló porozitásokra (maximum 40%-ig) és az ellenállásban kb. 100–200 Ω m-ig tart.

A szivárgási tényező becslés gyakorlati végrehajtása mindig kísérleteken alapul, ahol figyelembe kell venni, hogy milyen méretű térrészből kapunk geofizikai, illetve hidrogeológiai információt. A következő három irodalmi hivatkozásból kettő szemcséközi porozitású közegre vonatkozó gyakorlati, egy pedig repedezett kőzetekről szóló elméleti cikk.

Stanislav MARES, Antonin ZBORIL [1990] körülbelül 100 vízkút felhasználásával végzett NaCl nyomjelzős vizsgálatokról számol be. Egy fúrásba NaCl-t adagoltak, a többiben pedig mérték az elektromos ellenállást. A nyomjelző anyag beérkezésekor a vizsgált fúrásban lecsökken az elektromos ellenállás. Adott távolságban a beérkezési időkből következtettek a tárolókőzet áteresztőképességére. Véleményünk szerint az így meghatározott áteresztőképesség a repedezett kristályos kőzetek esetében a nyitott repedésrendszer által meghatározott maximális áteresztőképességre jellemző. Tükröződése közvetlenül a geofizikai paraméterekben kevéssé várható, mert egyrészt a mérések felbontó képessége alatti vastagságú övekhez kapcsolódik, másrészt a mélyfúrás-geofizikai vizsgálatok behatoló képessége mindössze néhány dm, ami nem összemérhető a törésszerű övekhez valamilyen formában köthető repedésrendszerek méretével.

DANKHÁZI Gyula és szerzőtársai [1990] egy eredetileg az ércutatásban alkalmazott módszer, az indukált polarizáció (IP) mélyfúrás-geofizikai változatát javasolják hidrogeológiai információszerezésre. Az IP mérés a fluidumbányászatban az áteresztőképességet jelentősen befolyásoló kötött víz/szabad pórúsvíz arányra érzékeny. Ezt kihasználva az IP mérés és az elektromos ellenállás mérés kombinációját szivárgási tényező becslésre alkalmazták negyedidőszaki homok, agyag összetételű üledékekben. A tapasztalatok szerint az IP mérés mint permeabilitás indikátor repedezett kőzetekben eddig kevésbé vált be, mivel ott főleg a repedések mineralizációjára érzékeny.

S. XU, M. S. KING [1990] cikkében a pórus szerkezetre és a permeabilitásra a kőzetsebesség mérésekből egy elméleti statisztikus modellen keresztül következtettek. A modell elemei a következők voltak: repedéssűrűség eloszlása, a repedés nyílásszélesség, a repedések dimenziója (a repedés kiterjedése), a repedések összekötöttsége. A repedéssűrűség és a repedésnyílás-szélesség eloszlása a legnagyobb hatással a szeizmikus hullámterjedési sebességre van, míg a repedések összekötöttsége az elektromos ellenállást befolyásolja nagymértékben. A permeabilitás szignifikánsan az átlagos repedésdimenzióktól függ.

A geofizikai mérésekre alapozott szivárgási tényező becslés érvényességi köre

Homogén szemcséközi porozitású kőzetekben közvetlen analitikus kapcsolat van a pórustér geometriai tulajdonságai, illetve a póruskitöltő fluidum és a szivárgási tényező közt, amiből következik, hogy a mérhető fizikai paraméterek és a szivárgási tényező közt is analitikus kapcsolat van. Ez természetesen nagyon idealizált eset, hiszen a gyakorlatban a ténylegesen mérhető szivárgási tényező egyáltalán nem biztos, hogy bármiféle kapcsolatban van akár a fúrásban mérhető fizikai paraméterekkel, akár a nagyobb térrészre vonatkozó felszínen mérhető geofizikai paraméterekkel. A szivárgási tényező nagyobb értékei konszolidált kőzetekben (nem csak a repedezettekben) általában a nagyobb repedésekkel kapcsolatosak, amelyek valójában még egy repedésraj esetében is síkszerű elemek és a mérés helyétől nagyobb távolságban található térrészekkel való kapcsolatot jelentenek. A kis térfogatot képviselő síkszerű elemek a geofizikai paraméterekre csak kis hatással vannak. Ez még valójában az elektromos ellenállásra is igaz,

mert kevésszámú repedés viszonylag kis járulékot ad a vezetőképességhez. A konszolidált szemcseközi porozitási közetekben biztosan, a repedezettelnél, pedig nagy valószínűséggel a kőzet pórustérfogatának zöme a nagyobb repedésekkel határolt közettömbökben van. Más szóval a konszolidált közetek esetében mindig kettős porozitás rendszert tételezhetünk fel, amiből a blokkporozitás⁵ mindig felülmúlja a repedésporozitást⁶. Ha lenne is olyan kristályos kőzet, ahol a permeábilis nagyméretű repedések térfogata felülmúlja a blokkporozitást, a fajlagos felület nagy része akkor is a csatlakozó mellékrepedés-rendszerhez kötődne, következésképpen az ellenállást döntően a legalább a mért tér nagyságrendjében homogénnek tekinthető mellékrepedés-rendszer befolyásolja. Ahol kettős porozitásrendszer létezik, ott kettős permeabilitás rendszer is van, amelyből a repedések permeabilitása a domináns. A geofizikai mérésekből becsült szivárgási tényező tehát szükségszerűen csak a blokkok, vagyis a homogén térrészek permeabilitásáról adhat számot. Ez látszólag azt is jelenthetné, hogy ne is próbálkozzunk a szivárgási tényező becsüléssel, hiszen az úgysem találkozik a valósággal. Ez azonban felületes szemlélet, hiszen az a szivárgási tényező, amit a geofizikai mérésekből lehet becsülni, éppen a pórustér nagyobbik részére, vagyis a blokk-porozitásra jellemző. Ez például a fluidum bányászathatban a termelvény utánpótlásának ütemét szabja meg, vagyis a termelés ütemének is ehhez kell igazodnia, nem a repedésrendszer nagyságrendekkel nagyobb szivárgási tényezőjéhez. A hulladéktárolók építéskor a blokk átteresztőképesség azért fontos, mert építéskor vagy elkerüljük a nyitott repedéseket tartalmazó szakaszokat vagy kicementezük, eltömmedékeljük azokat. Mindezek miatt a homogén térre vonatkozó szivárgási tényező meghatározás fizikai háttere a repedezett közetek esetében is lényegében ugyanaz kell legyen, mint az üledékek esetében, legfeljebb a mikrorepedések alkotta hézagtér geometriája különbözik kismértékben egy izometrikus pórusról álló hézagterétől.

A felszíni geofizikai mérések alapján történő szivárgási tényező meghatározás menete

Felszíni geofizikai mérések alapján csak akkor lehet szivárgási tényezőt meghatározni, ha a mélyfúrásokból a mélyfúrás-geofizikai mérések segítségével meghatározott, a hidrogeológiai mérésekre kalibrált átteresztőképesség-mélység görbék állnak rendelkezésre.

A felszíni geofizikai mérések szerinti szivárgási tényező becsülést a fúrásokban szerzett hidrogeológiai információk

⁵ Blokkporozitás: olyan porozitás, amely egy-egy kőzetblokkon belül jellemző porozitás és permeabilitás szempontjából homogénnek tekinthető. Ennél kevésbé általános meghatározás a mátrixporozitás vagy elsődleges porozitás, amely a kőzet keletkezésével egyidejűleg létrejött hézagterefogat arányát jelöli a teljes kőzet-térfogathoz képest.

⁶ A repedésporozitás a repedések által képviselt hézagterefogat arányát jelöli a teljes közettérfogathoz képest. A repedésporozitás a másodlagos porozitásnál szűkebb fogalom. A folyadék átteresztőképesség szempontjából a repedés-porozitást célszerű jó átteresztőképességű repedezettségre illetve gyenge, elhanyagolható átteresztőképességű mikrorepedezettségre felosztani. Ez utóbbi hidrogeológiai szempontból mátrix-porozitásnak tekinthető.

birtokában formálisan a következő műveletek végrehajtása után tehetjük meg:

1. Elvi szivárgási tényező becsülési algoritmus felállítás
- 1/a. elvi szivárgási tényező becsülési felállításánál használt szempontok számbavétele és az alapján próbafüggvény felállítása, amely a fizikai határfeltételeknek eleget tesz;
- 1/b. a próbafüggvény alapján számított szivárgási tényező-ről hisztogram készítése.
2. Szivárgási tényező termelési adatok alapján
- 2/a. fúrásban mért szivárgási tényező meghatározások közül a geofizikai mérésekkel való összevetésre legalkalmasabb méréssorozat kiválasztása;
- 2/b. a fúrásban mért termelési adatok alapján kapott szivárgási tényezőkről hisztogram készítése.
3. A szivárgási tényező becsülési próbafüggvényének felparaméterezése
- 3/a. a termelési adatokból készült szivárgási tényező görbét a skálák illesztése szempontjából a mélyfúrás-geofizikai adatokból formálisan számított szivárgási tényező görbére rajzoljuk;
- 3/b. a szivárgási tényezőkből alkotott hisztogramok skálájának összeillesztése;
- 3/c. a szivárgási tényező becsülési függvény felírása, azaz a paraméterezés.
4. A szeizmikus, illetve a mélyfúrás-geofizikai V_p hullámterjedési sebesség összehasonlítása
- 4/a. a szeizmikus sebesség és a mélyfúrás-geofizikai akusztikus sebesség közti arányossági tényező meghatározása vagy az elvi azonosság igazolása;
- 4/b. a szeizmikus sebesség porozitásra kalibrálása.
5. A felszíni elektromos ellenállás mérés és a mélyfúrás-geofizikai elektromos ellenállás mérés összehasonlítása
6. Szivárgási tényező becsülések és összehasonlításuk
- 6/a. szivárgási tényező becsülési szeizmikus és geoelektromos mérések alapján a fúrások helyére számolva;
- 6/b. a felszíni adatokból a fúrás helyén becsült szivárgási tényező becsülési összehasonlítása a fúrásban mért szivárgási tényezőkkel és a mélyfúrás-geofizikai becsüléssel.
7. A felszíni mérésekből számított szivárgási tényezők térbeli eloszlási képének ábrázolása.

A jelen tanulmányban mélyfúrás-geofizikai mérésekre alapozott, homogén közege alkalmazott elvi szivárgási tényező becsülési összefüggésnél használt szempontok

A permeabilitás a közetekben a repedések méretével és azok összekötöttségével arányosan változik (ld. (5) képlet). A Dual-Water modellből [CLAVIER, COATES, DUMANOIR 1977] kiindulva az elektromos ellenállás durván fordítottan arányos a fajlagos felülettel, mert a felületen kötött iondús adszorpciós kettős réteg nagyságrendekkel nagyobb vezetőképességű, mint a szabad pórusfolyadék. A szivárgási tényező fordítottan arányos a tortuozitással. Az elektromosan vezetőképes pórusnak biztosan van fajlagos felülete, azonban nem bizonyos, hogy permeabilitása is van. Megfordítva: a szivárgási tényező kis értékei jelenthetnek nagy elektromos vezetőképességet (pl. az agyagok, vagy elagyagosodott repedésrendszerek) és kis elektromos vezetőképességet, vagyis nagyon nagy ellenállást is, ami a nagyon kis porozitású nagy tortuozitású kis fajlagos felületű kristá-

lyos kőzetekben fordul elő. Amennyiben az effektív fajlagos felületet úgy definiáljuk, hogy az a szabadon mozgó folyadék és a kötött folyadék közti határfelület, akkor egy bizonyos pórusméret alatt hidraulikai szempontból nincs effektív fajlagos felülete a kőzetnek. Ebből következik, hogy a kis ellenállású, elektromos szempontból nagy fajlagos felületű kőzeteknek nincs hidraulikai szempontból effektív belső fajlagos felületük (a továbbiakban effektív belső felület) — ennek értelmében sem a tiszta agyagképződményeknek, sem a nagyon vékony repedéseknek nincs effektív belső felületük, aminek következtében permeabilitásuk sem. Formálisan tehát konstans porozitás mellett a permeabilitás az effektív belső felülettel fordítottan arányosnak tekinthető, miközben valójában a fajlagos felület nő (a csökkenő pórusméret miatt). Kis ellenállásoknál és konstans porozitásnál az ellenállás az effektív belső felület növekedésével nő, ami a pórusméret növekedése miatt áll elő, miközben a valóságos belső felület (a pórus belső felülete az ásványszemcsék határán) erőteljesen csökken. Maximális effektív belső felülete az aleuritoknak van. Az ellenállás határértékét elvileg a porozitás és a szabadon mozgó pórusvíz ellenállása szabja meg. A nagy ellenállások tartományában az ellenállás, konstans hézagterefogat és fajlagos felület mellett, az áramút tekervényességével (tortuozitás) egyenesen arányos, ezért — ellentétben a kis ellenállásoknál fennálló egyenes arányossággal — az ellenállás a permeabilitással fordítottan arányos. Emiatt, az elektromos ellenállás, így a vezetőképesség is a szivárgási tényező kétértékű függvénye.

A permeabilitás és a porozitás között — ha minden paraméter rögzített — első közelítésben négyzetes kapcsolat tételezhető fel, mert a porozitás növekedésével a pórusok összekötöttsége is növekszik, ami csökkenti a tortuozitást.

Ugyanannál az ellenállásértéknél — modellfeltevésünk szerint — nagyobb porozitáshoz nagyobb szivárgási tényező is tartozik. A nagyobb hézagterefogatnak az egyedi pórusok vagy a hézagok változatlan geometriai paraméterei mellett önmagában is az átteresztőképesség növekedéséhez kell vezetnie. Porozitásnövekedés mellett konstans ellenállás csak akkor jöhet létre, ha a póruskitöltő elektrolit ellenállásnövekedése ellensúlyozza a nagyobb pórustérfogatból eredő nagyobb mennyiségű elektrolit ellenállás-csökkentő hatását. A póruskitöltő elektrolit össz-vezetőképessége csak akkor csökkenhet a szabadon mozgó fluidum változatlan fajlagos elektromos ellenállása mellett, ha benne a kis vezetőképességű szabadpórus folyadék aránya megnő, míg az adszorpciósan kötött iondús elektrolit lecsökken. Az alacsony ellenállású, adszorpciósan kötött víz mennyiségének a fajlagos felülettel való arányosságából következik, hogy változatlan nagyságú porozitás mellett ez csak akkor jöhet létre, ha a pórusfelület kevésbé tagolt, amely részint nagyobb átlagos pórusméret esetében, részint pedig az agyagásványok adta bolyhozódás hiányában simább pórusfelület esetén áll elő. Mindebből következik, hogy a rögzített ellenállás melletti nagyobb porozitásnak szükségszerűen nagyobb átlagos pórusméretet kell jelentenie, vagyis az átteresztőképességnek a porozitásnövekedéssel a

lineárisnál erősebben kell nőnie. Változatlan porozitás mellett a nagyobb pórusok önmagukban is nagyobb átteresztőképességet, kisebb fajlagos felületet és ezzel nagyobb ellenállást jelentenek.

Összességében leszögezhető, hogy a szivárgási tényező a kis ellenállások tartományában az ellenállással egyenesen arányosan nő, míg egy maximum elérése után a nagy ellenállások tartományában erősen csökken. Önmagában, ha a többi fizikai paraméter rögzített, a nagyobb porozitáshoz nagyobb átteresztőképesség tartozik.

A permeabilitás a szivárgási tényezővel közel azonos természetű kőzetjellemző, annyi különbséggel, hogy a szivárgási tényező függ a folyadék tulajdonságaitól is. A geofizikai mérések alapján a kőzetek vízátteresztőképességére tett becslést eredendően permeabilitás jellegűnek kell tekinteni, hiszen a póruskitöltő folyadéknak a szivárgási tényezőt befolyásoló tulajdonságait — a viszkozitást és a folyadék sűrűségét — nem méri közvetlenül. Szivárgási tényező becslésről annyiban lehet beszélni, amennyiben az eredetileg permeabilitás jellegű geofizikai mérésekből származtatott adatsort szivárgási tényező adatokra kalibrálják. Minthogy hidrodinamikai becslés a vizsgált fúrásokban szivárgási tényező formájában áll rendelkezésünkre, ezért — a különbségek figyelembevételével — annak becslését kíséreltük meg.

A fenti megfontolásokat figyelembe véve a szivárgási tényezőt a következő alakú próbafüggvénnyel becsüljük (1. ábra):

$$K = \Phi^2 \cdot \rho \cdot C_1 \cdot \exp(-\rho / C_2) \quad (7)$$

ahol

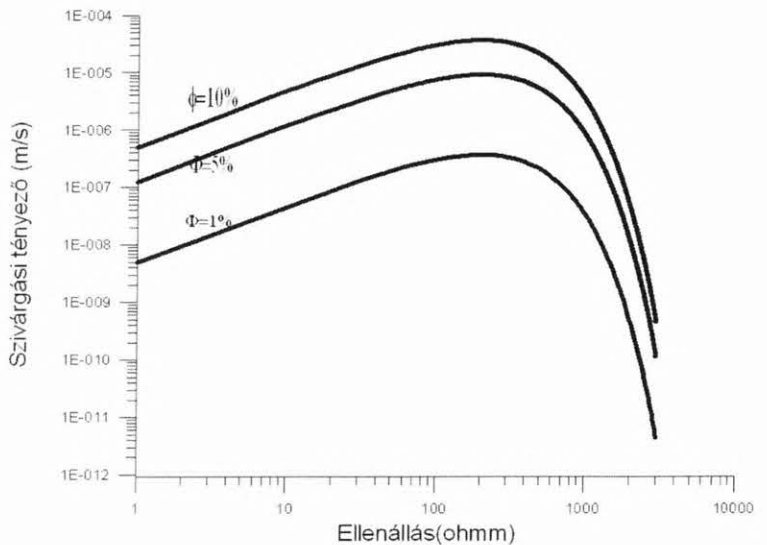
Φ — porozitás [dimenzió nélküli],

ρ — a fajlagos elektromos ellenállás [Ωm],

C_1 — konstans [m/s)/ Ωm],

C_2 — konstans [Ωm].

A próbafüggvény két függvény szorzatából tevődik össze: egyik a porozitásfüggést kifejező $K_1 = a \cdot \Phi^2$ alakú, a

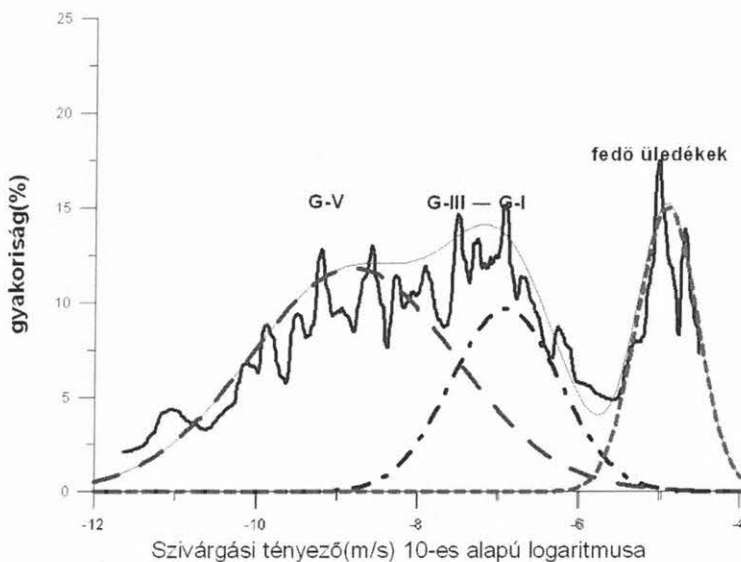


1. ábra. Szivárgási tényező becslés elvi összefüggése ellenállás és porozitás alapján

Fig. 1. Hypothetical function for estimation of filtration coefficient based on relation between resistivity and porosity

másik a szivárgási tényező—ellenállás függvénykapcsolat kétértékűségét kifejező $K_2 = \rho b \cdot \exp(-\rho / C_2)$ alakú tag. Az a és b konstansok szorzata a C_1 konstans.

A próbafüggvény alapján négy fúrás porozitás és az elektromos ellenállás adataiból számított szivárgási tényező görbéről pszeudohisztogram készült (2. ábra). Az ábrázolt pszeudohisztogram annyiban különbözik a hisztogramtól, hogy ez az empirikus eloszlás differenciahányados függvénye, ellentétben a valódi hisztogrammal, amelynél, rögzített felosztást alkalmaznak. A pszeudohisztogram esetében a dy/dx mennyiségnél elvileg a dy rögzített és a relatív statisztikus ingadozás csökkentése céljából sok mintavételi közt jelent, de a számítás lépésköze a mintavételi köz, vagyis az ilyen hisztogram gyakorlati szempontból folyamatos függvény, melynek alakja kevésbé függ a számítás lépésközének megválasztásától. A hisztogramnak több csúcsa van, amelyek a mállási kéreg különböző szintjeit és a fedő üledékeket is képviselik.



2. ábra. Számított szivárgási tényező pszeudohisztogramja.

Jelmagyarázat: vastag folyamatos vonal — összes képződmény pszeudohisztogramja; vékony folyamatos vonal — összes képződmény közelítése három módusú eloszlással; szaggatott vonalak — az egyes képződmények eloszlásai külön-külön normális eloszlásokkal megjelenítve

Fig. 2. Pseudo histogram of calculated filtration coefficient.

Legend: thick continuous line — pseudo histogram of all formations; thin continuous line — approximation for the pseudohistogram by a trimodal distribution created from three Gaussian distribution; dashed lines — distribution of formations independently represented by Gaussian distributions

A mélyfúrás-geofizikai elektromos ellenállás és akusztikus mérések alapján felállított szivárgási tényező becslő függvény konstansai első lépésben csak valószínű próbaértékek, ezért az összefüggést hidrodinamikai adatokra kell kalibrálni, azonban nem mindegy milyen adatrendszer választunk.

A fúrásban mért szivárgási tényező meghatározások közül a geofizikai mérésekkel való összevetésre legalkalmasabb mérésorozat kiválasztásánál a szempont az volt, hogy a mért szivárgási tényezők minél kisebb térfogatra vonatkozzanak, mivel tényleges összefüggés a geofizikai paraméterek és a szivárgási tényező közt csak a homogénhez közelálló modell esetén várható. Kristályos kőzetek tömb-

jei közt a hidraulikai kommunikációt erősen befolyásolja a nagy áteresztőképességű repedésrendszerek megléte vagy nem megléte. Ugyanaz a vetőhöz kapcsolódó repedésrendszer lehet összeköttes két gyenge permeabilitású tömb közt, de el is szigetelheti azokat egymástól, ha a repedések elagyagosodtak, miközben a felszíni geofizikával mérhető paraméterek ugyanazok. Ez természetes, hiszen az erős permeabilitású vízvezető útvonalak közelítőleg kétdimenziós szerkezetek, vagyis egyik méretükben biztosan a felbontóképesség alá esnek. Ebből következik, hogy direkt módon a geofizikai mérésekkel magukat a háromdimenziós tömböket lehet csak jellemezni. Bár a permeabilitásnak csak kis részét adják a tömbök, a jelentőségük mégis nagy, mivel hosszabb időtávlatban az oldatok migrációja rajtuk megy keresztül. Figyelembe kell venni, hogy a nyilvánvaló nagy vetőzónák akár adnak vizet, akár impermeábilisak, elagyagosodottak, egy hulladékártoló megépítése során mindenképpen impermeábilisak lesznek. Ezeket a zónákat,

ha vízádók, elcementezik, hiszen olyan, feltehetőleg nagy mennyiségű vizet adó beáramlási lehetőség nem maradhat, ami veszélyeztetné a már megépült tárolót. A közettömbök egészét viszont nem lehet tökéletesen impregnálni, következőképpen a működő tároló időszakában maguknak a tömböknek a szivárgási tényezője fogja megszabni egy esetleges szennyeződés esetén az elérési időket egy adott pontig.

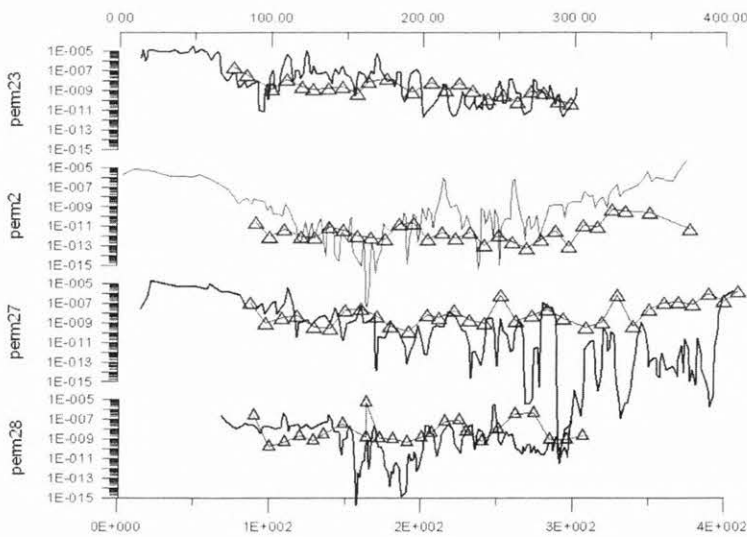
A fenti megfontolások alapján a mélyfúrás-geofizikai vizsgálatokkal való összevethetőség szempontjából legmegfelelőbb adatrendszernek a gyorsesztek adatrendszerét találtuk, mivel a termelési mérések közül ezek jellemzik leginkább a fúróluk környezetét. A 3. ábrán a kiválasztott négy fúrás szivárgási tényezői láthatók a mélység függvényében, a gyorsesztek mérési pontokat háromszögek jelzik, a próbafüggvény alapján mélyfúrás-geofizikai mérésekből számított szivárgási tényezőkkel (folyamatos görbék). A görbék egymásra tolva, vagyis a próbafüggvények skáláját átkalibrálva kapjuk meg az arányosságot a két mennyiség közt.

A fúrásban mért termelési adatok alapján kapott szivárgási tényezőkről pszeudohisztogram készült (4. ábra), amely azért eltérő alakú a geofizikai adatokból kapottól, mert a mállási kéregről illetve, a fedőüledékekről nincsenek gyorsesztek adatok. A szivárgási adatok eloszlása megközelítőleg lognormális eloszlást követ, ami a repedezett kőzetek esetében várható is. Az eloszlás módusa, vagyis a leggyakoribb értéke 10^{-9} m/s körül van.

A geofizikai mérésekből számított és a gyorsesztekből származó szivárgási tényező hisztogramját egymásra rajzolva, a skálákat összeillesztve (5. ábra) kapjuk meg az 1. ábrán ábrázolt (7) egyenlet C_1 , valamint C_2 paraméterét ($C_1 = 0,5$; $C_2 = 200$). Az így kalibrált szivárgási tényező becslő képlet a következő:

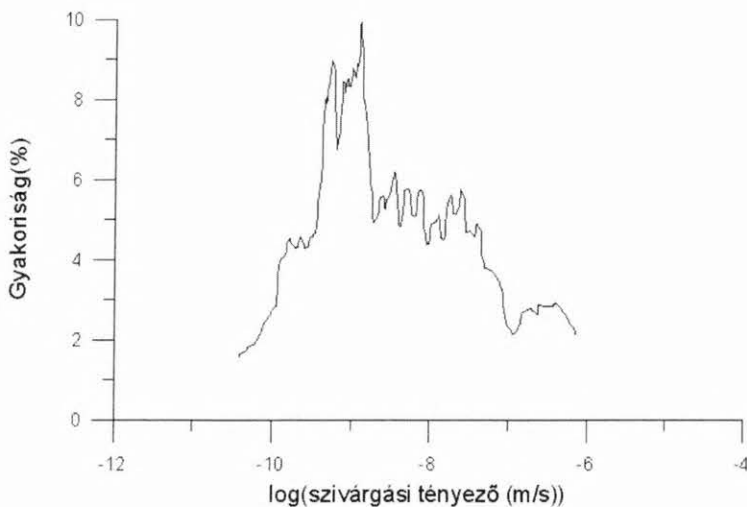
$$K = (\Phi - 0,05)^2 \cdot \rho \cdot 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-\rho/200) \quad (8)$$

ahol a hézagterfogatból 0,05-t levontunk, ami a szokásos 5%-os vágás érték, mert ennél kisebb porozitáshoz nem feltételezünk permeabilitást.



3. ábra. Mélyfúrás-geofizikai mérésekből számított és fúrásban mért szivárgási tényezők. *Jelmagyarázat:* Δ vékony vonalon — szivárgási tényező gyorsteszték alapján; folyamatos görbök — mélyfúrás-geofizikai mérésekből számított szivárgási tényezők

Fig. 3. Filtration coefficients calculated from well logs and from borehole hydrodynamic tests. *Legend:* Δ on thin line — seepage factor from short time hydrodynamical test; continuous thick line — seepage factors based on well logging



4. ábra. Gyorstesztékkel mért szivárgási tényezők logaritmusának pszeudohistogramja

Fig. 4. Pseudo histogram of logarithm of filtration coefficient based on short time hydrodynamic tests

A gyorstesztékből származó szivárgási tényezőkre kalibrált mélyfúrás-geofizikai szivárgási tényező összefüggés alkalmazása felszíni mérésekre

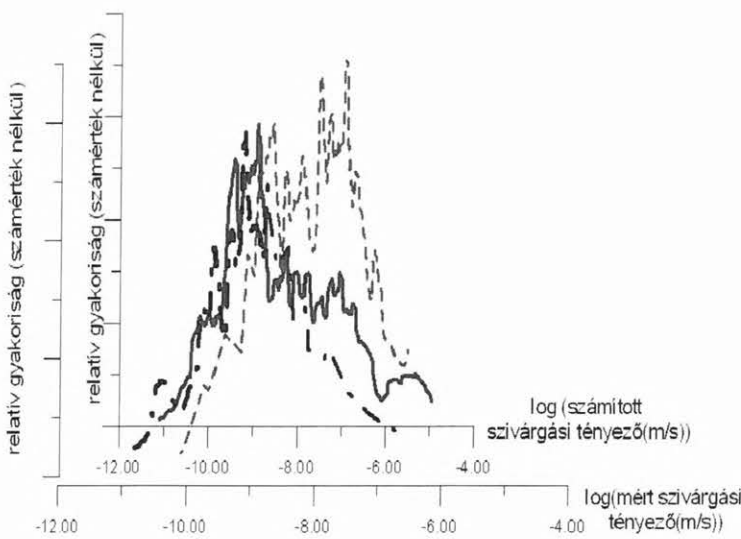
Homogén eloszlású repedésrendszert feltételezve a mélyfúrás-geofizikai mérések és a gyorsteszték alapján felállított (8) egyenletet a felszíni mérésekre alkalmazva, a porozitást a szeizmikus sebességből származtatjuk, míg az elektromos ellenállást analógnak tekintjük a mélyfúrás-geofizikai elektromos ellenállás méréssel. Ezt a következő feltételek mellett lehet megtenni:

1. A felszínről mért szeizmikus sebességek hasonló viszonyban állnak a kőzetre jellemző valódi hullámterjedési sebességekkel, mint a mélyfúrás-geofizikai akusztikus sebességek.
 - 1/a. A mért mélyfúrás-geofizikai akusztikus és a felszínről mért szeizmikus sebesség közt lineáris kapcsolat van és a sebességek statisztikai értelemben egyforma nagyságúak.
 - 1/b. A különböző frekvenciákon történő mérésekből adódó különböző sebességszórás elhanyagoljuk.
 - 1/c. A kőzet a szeizmikus mérések felbontásának nagyságrendjében homogén.
2. A felszíni elektromos ellenállás mérésekből származtatott intervallumra jellemző mérési adatok arányosak a mélyfúrás-geofizikai ellenállás-mérés adott intervallumra jellemző átlagával (a kettő közti lineáris kapcsolat előnyös).

A szeizmikus sebesség és a mélyfúrás-geofizikai akusztikus sebesség közti elvi azonosság igazolása és az arányossági tényező meghatározása

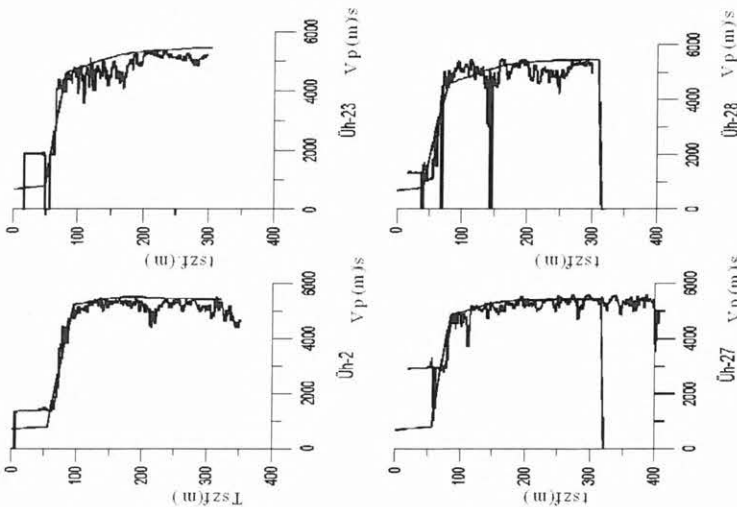
Az összehasonlításához az akusztikus mérést és a 3D szeizmikus mérésekből a fúrás helyére érvényes sebességmenetet egymásra rajzolva ábráztuk (6. ábra). Amelyik fúrásban a mélységmenetek egyeznek, ott a szeizmikus felbontás szempontjából a kőzet homogén. Ahol eltérés tapasztalható a mélységmenetben is, ott a szeizmikus felbontás nagyságrendjénél kisebb inhomogenitást feltételezhetünk.

Az akusztikus mérések mélységmenete az Üh-2, Üh-23 és az Üh-27 fúrások esetében megegyezik a szeizmikus sebesség mélységmenetével, viszont az átlagsebesség valamivel kisebb annál. Az akusztikus sebességgörbe alulról érintgeti a szeizmikus sebességgörbét, ami elvileg nem egyszerűen az alacsonyabb átlagra utalhat, hanem arra is, hogy az akusztikus sebesség csak lefelé tér el a valódi kőzetsebességet képviselő szeizmikus sebességtől. Ez azt jelentené, hogy a lefelé való eltérések oka a kőzet fúrás körüli fellazulása, vagyis valamennyi negatív akusztikus sebességanomália eredete a fúrás hatására fellazult kőzetekben keresendő. Vitathatatlan, hogy ilyen jelenségek vannak, azonban ezzel nehéz lenne megmagyarázni az akusztikus sebesség jó korrelációját az elektromos ellenállásgörbével. (A látszólagos elektromos ellenállásra a kőzet egyszerű fellazulása kavernásodás nélkül alig van hatással, mert a fajlagos felület nem változik.) Sokkal valószínűbb, hogy kismértékű szisztematikus, körülbelül 2%-nyi eltérés van a két mérés közt a szeizmikus sebesség javára, ami feltehetőleg a mérőfrekvenciák különbségéből származik. (Ezt megerősítette a VSP idő-mélység függvény összevetése a kumulatív akusztikus idővel is az Üh-2 és az Üh-22 fúráson.) Ez valójában olyan kis eltérés, hogy az akusztikus mérés esetében egy mélységponton az első beérkezés kijelölési hibája ennél nagyobb is (kb. $\pm 3\%$) lehet.



5. ábra. Mért és számított szivárgási tényező hisztogramok összehasonlítása. *Jelmagyarázat:* Folyamatos vonal — szivárgási tényező gyorsteszték alapján; szaggatott vonal — szivárgási tényező a mállási kéregben mélyfúrás-geofizikai adatok alapján; pontozott vonal — szivárgási tényező az üde gránitban mélyfúrás-geofizikai adatok alapján

Fig. 5. Comparison of pseudohistograms of measured and calculated filtration coefficient. *Legend:* continuous thick line — seepage factors based on short time hydrodynamical tests; dashed line — seepage factors based on well logging data in altered zone; dashed line with dots — seepage factors based on well logging data in fresh granite



6. ábra. 3D szeizmikus sebesség és akusztikus sebesség menetek összehasonlítása a fúrások helyén. *Jelmagyarázat:* vastag vonal — mélyfúrás-geofizikai V_p sebességgörbe; vékony vonal — szeizmikus sebesség a fúrás helyén

Fig. 6. Comparison of 3D seismic velocity curves at the site of boreholes and sonic well logs. *Legend:* thick line — V_p velocity from well logging; thin line — V_p velocity from seismic 3D measurement at the site of borehole

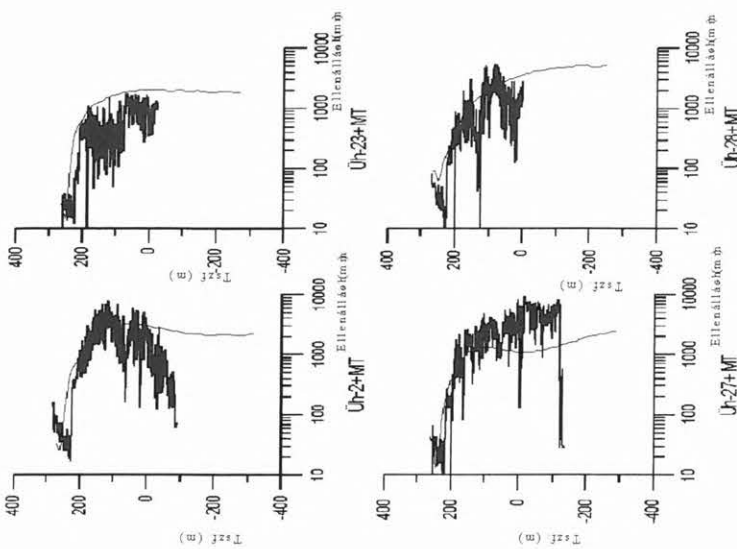
Az Üh-28 fúrás esetében a két mérés görbe menete nem azonos, bár az átlaguk közel megegyezik. Ez arra utal, hogy az Üh-28 fúrás környezetében olyan horizontálisan kisléptékű inhomogenitások vannak, amelyeket csak a mélyfúrás-geofizikai akusztikus mérés érzékel, a szeizmikus mérés nem.

Összességében megállapítható tehát, hogy a felbontáson kívül a szeizmikus sebességmérés nem különbözik lényegesen a mélyfúrás-geofizikai akusztikus méréstől, így a porozitászámításra ugyanaz a képlet használható, mint az utóbbira. Meg kell említeni azonban, hogy a mélyfúrás-geofizikai akusztikus V_p sebességből számított porozitás a kristályos kőzetek fellazult mállási kérgében általában nagyobb, mint a radioaktív mérések alapján számított porozitás. A fúrásokban végzett akusztikus lyukfalleképező (acoustic borehole televiwer) mérésekből származó kőzetpedés-sűrűség görbék és az üde kőzetben végzett mélyfúrás-geofizikai mérések összevetése alapján a porozitás nagy része nem lehet effektív porozitás, hanem a kimutatható repedésekhez kapcsolódó impermeabilis mikroporozitás, illetve a repedések körüli vékony agyagásványosodott zóna szubkapilláris⁷ vízzel kitöltött térfogata [ZILAH-SEBESS et al. 2005]. A szivárgási tényező becslésnél a hidrogeológiai adatokra való kalibrálás miatt nem lényeges, hogy a számolt porozitás értékek a mállási kérgen kívül csak arányosak lehetnek az effektív porozitással, de nem azonosak vele.

A felszíni elektromos és a mélyfúrás-geofizikai elektromos ellenállás közti elvi azonosság igazolása és az arányossági tényező meghatározása

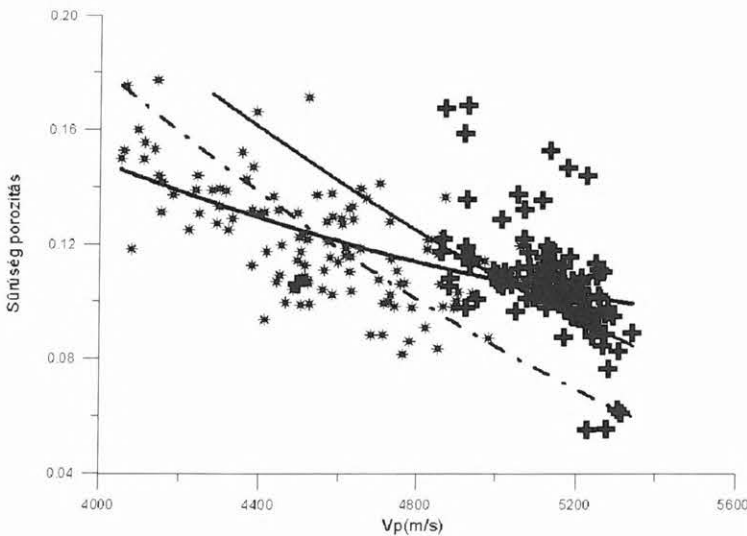
A téma keretében felszíni elektromos mérés-ként az ELGI által mért magnetotellurikus mérést (MT) használtuk. A felszíni MT mérésekből származó elektromos ellenállás görbék átlagosan ugyanolyan nagyságú ellenállást mutatnak, mint a mélyfúrás-geofizikai fajlagos elektromos ellenállások (7. ábra). Ez a megállapítás jóval kevésbé triviális, mint a sebességek összehasonlítása esetében. Az elektromos ellenállások esetében ugyanis az átlagértékek azonossága nem igazán szerepelt az elvárások közt, mert a mélyfúrás-geofizikai ellenállásmérés az 1000 Ω m feletti tartományban akár még átlagában is nagyságrenddel kisebb lehet a valódi ellenállásnál. Az Üh-2 fúrás esetében például 100–180 m tszf. között még a korrigálatlan mérés is 3000–8000 Ω m között van, miközben az MT ellenállás átlaga ugyanitt nem haladja meg a 3000 Ω m-t. Nagyon valószínű, hogy az Üh-2 fúrásban a gránitnak ez a több 10 000 Ω m valódi ellenállású tömbje horizontálisan nem számít végtelen kiterjedésűnek az MT mérés számára, viszont ahhoz elég nagy, hogy az MT ellenállás görbe menete visszatükrözze a mélyfúrás-geofizikai

⁷ Szubkapilláris víz: olyan tapadóvíz, amely a kapilláris vízmozgást megengedő mérettartomány alatti porozitást tölti ki és nem tartozik a 105 °C alatti hőmérsékleteken lényegében mozdíthatatlan, adszorpciósan kötött vízhez (az adszorpciósan kötött víz-reteg vastagsága kb. 70–80 Å).



7. ábra. Magnetotellurikus (MT) mérésekből származtatható elektromos ellenállás és mélyfúrás-geofizikai ellenállás menete. *Jelmagyarázat:* vastag vonal — mélyfúrás-geofizikai fajlagos elektromos ellenállás görbe; vékony vonal — fajlagos elektromos ellenállás magnetotellurikus (MT) mérésekből a fúrás helyén

Fig. 7. Comparison of resistivity curves from magnetotelluric measurement (MT) and electric resistivity well logs. *Legend:* thick line — specific electrical resistivity from well logging; thin line — specific electrical resistivity from magnetotelluric (MT) measurement at the site of borehole



8. ábra. A szeizmikus sebességből és sűrűségből számított porozitás összefüggése. *Jelmagyarázat:* csillag — $V_p/V_s > 1,8$; kereszt — $V_p/V_s > 1,8$; vastag vonal — az összes adatra illesztett empirikus függvény

Fig. 8. Relation between porosity calculated from density and sonic velocity. *Legend:* asterisk — $V_p/V_s > 1,8$; cross — $V_p/V_s > 1,8$; thick line — fitted curve

ellenállásgörbe menetét, amiből viszont következik, hogy az Üh-2 alján a csökkent ellenállású zónának horizontálisan is kiterjedtnek kell lennie. Az átlagos mélyfúrás-geofizikai ellenállás menettől csak az Üh-27 fúrás helyén tér el az MT ellenállásgörbe, miközben az átlagértéke is jóval alacsonyabb. Ez egyértelműen valamilyen, a fúrás közelében található olyan elektromos inhomogenitásra utal, amelyet nem tudott kimutatni a 3D szeizmika a fúrás közelében. Összességében tekintetbe véve, hogy a szivárgási tényező

direkt termelési adatokból történő meghatározásnál a nagyságrendi pontosság elegendő, a felszíni geofizikai mérésekből származó ellenállást a mélyfúrás-geofizikai ellenállásméréssel analógnak lehet tekinteni, és így a gyorsesztekből származó szivárgási tényezőkre kalibrált mélyfúrás-geofizikai összefüggést alkalmazni lehet a felszíni mérésekre.

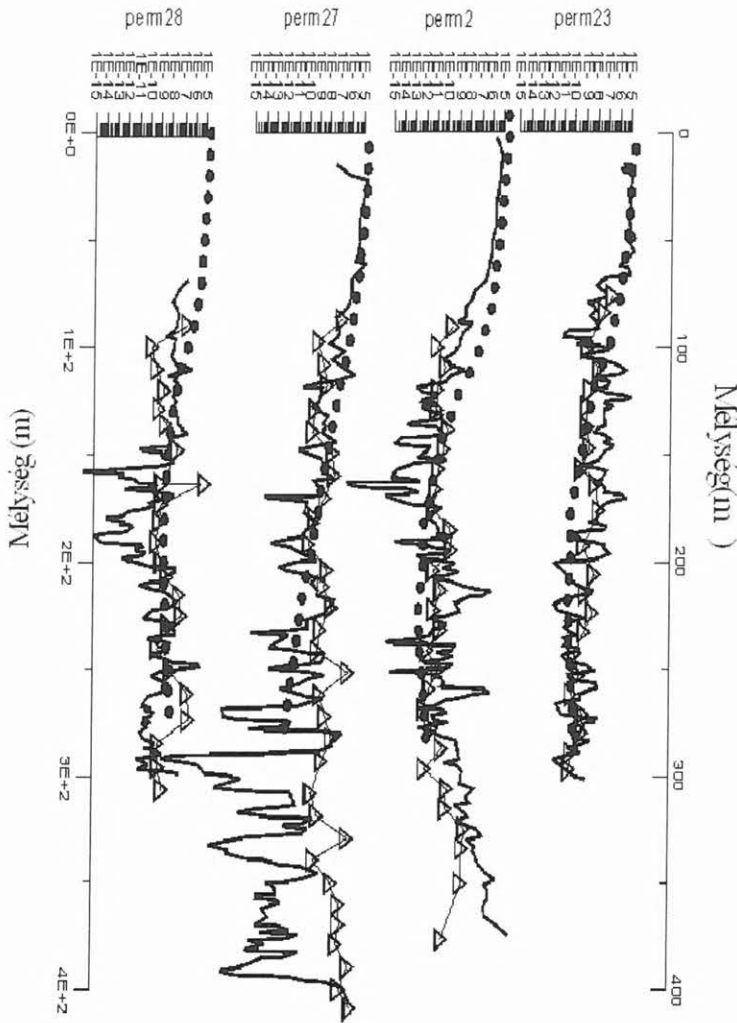
A szeizmikus sebesség porozításra kalibrálása

A szeizmikus sebességet a mátrixra jellemző terjedési sebesség ismeretében lehet közvetlenül is porozításra vagy indirekt módon egy másik porozitáskövető módszerre is kalibrálni. A gránitban a porozitáskövető módszerek közül főleg a sűrűségmérés jön számításba, mert a neutronporozitásnak nincs felszíni megfelelője. A 8. ábrán látható, hogy a két különböző jellel jelölt két mélységszakaszon az eltérő mátrixsűrűség miatt a porozitás kalibráció is más. A szeizmikus sebességben jóval kisebb az eltérés a különböző granitoidfajták közt, ezért ha egységes mátrixfüggetlen kalibrációt választunk a szeizmikus sebesség porozitássá alakításához, nem követhetünk el nagy hibát. A szeizmikus sebesség porozításra kalibrálását a következő, a 8. ábra adataira illesztett empirikus függvény szerint végeztük el (8. ábra, vastag görbe):

$$\Phi = 0,57 - 1,55 \cdot 10^{-4} \cdot V_p - 1,26 \cdot 10^{-8} \cdot V_p^2 \quad (9)$$

A megadott szivárgási tényezőt becsülő (8) képletet a felszíni 3D szeizmikus mérésekre és elektromos ellenállásmérésekre alkalmazva, az Üh-23, Üh-2, Üh-28 fúrások esetében a gyorsesztekből kapott szivárgási tényező görbével helyenként még jobb az egyezés, mint a mélyfúrás-geofizikai adatokból becsült szivárgási tényező görbével (9. ábra). Ebből arra lehet következtetni, hogy a gyorsesztek eleve nagyobb térfogat átlagos szivárgási tényezőjét képviselik, ezért az egymáshoz közeli pontok eredménye kevésbé független, mint a mélyfúrás-geofizikai becslés esetében. Az is megállapítható, hogy a felszíni geofizikai adatokból becsült szivárgási tényező görbe jóval nagyobb térfogatra vonatkozik, mint a gyorseszt információk. Az Üh-27 fúrás esetében megállapítható, hogy a felszíni mérések alapján becsült szivárgási tényező görbe inkább a mélyfúrás-geofizikai becslés átlagos menetét követi, vagyis a mélység felé egyre csökken a permeabilitás és 200 m-nél nagyobb mélységben egyre növekszik az eltérés a gyorsesztek adataiból alkotott görbétől. Valószínűnek tartjuk, hogy az eltérés oka egy, a fúrás környezetében létező nagyobb permeabilitás anizotrópia, amely azonban nincs hatással a szeizmikus sebességre. Közvetetten inhomogenitásra utaló jelenség, hogy a felszínről mért elektromos ellenállás görbe lefutása nincs összhangban sem a szeizmikus sebesség görbével, sem a mélyfúrás-geofizikai ellenállás-görbével (vö. 6. és 7. ábra). Mivel a nagyobb szivárgási

szivárgási tényezők



9. ábra. Felszíni mérésekből számított és fúrásban mért szivárgási tényezők mélységmenetének összehasonlítása. *Jelmagyarázat:* pontsor — szivárgási tényező felszíni mérések alapján; háromszögek a vékony vonalon — szivárgási tényező hidraulikai tesztek alapján; folyamatos vastag vonal — szivárgási tényező mélyfúrás-geofizikai mérések alapján

Fig. 9. Comparison of filtration coefficient from surface geophysical measurement, calculated from well logs and filtration coefficient from hydrodynamical tests. *Legend:* dots — seepage factor from surface geophysics; triangles on thin line — seepage factor from hydrodynamical tests; continuous thick line — seepage factor from well logging

tényezőhöz nem tartozik kisebb sebesség, sem a felszíni szeizmikus mérés, sem a mélyfúrás-geofizikai akusztikus mérés szerint a repedezettség nem lehet a modellfeltételeknek megfelelően homogén eloszlású.

A felszíni mérések alapján számított szivárgási tényezők alapján felállítottuk a vizsgált terület háromdimenziós tömbszivárgási tényező modelljét. A megnevezéssel azt kívánjuk hangsúlyozni, hogy ez a fajta becslés a felszíni mérések kis felbontóképessége miatt csak nagyobb térfogatok átlagára jellemző. A 3D szivárgási tényező eloszlása alapján fel lehet állítani egy hidrogeológiai szempontú tömbfelosztást. Ennek érzékeltetésére több mélység szintben izovonalas formában ábrázoltuk a számított szivárgási tényezőt (10. ábra). Az ábrán a szivárgási tényező eloszlása

látható öt különböző szintben. Az egyes szintek ötven méterenként következnek egymás után: 0 m tszf., 50 m tszf., 100 m tszf., 150 m tszf., 200 m tszf.

Megállapítható, hogy a legnagyobb kiterjedésű kis szivárgási tényezőjű blokkok a 0 m tszf. (10. bal felső és 11. ábra) és 50 m tszf. (10. középső felső és 12. ábra) szintekben vannak. Az ábrákon még ezekben a szintekben is különböző szivárgási tényezővel jellemezhető blokkokra különül el a kőzet. A kompakt (az ábrákon sötét színű) blokkokat jóval nagyobb szivárgási tényezőjű zónák választják el egymástól. A 100 m tszf. szintben a számított szivárgási tényező eloszlás gyakorlatilag ugyanaz, de az értékek magasabbak, mint lejjebb (10. ábra jobb szélső és 13. ábra).

A 150 m tszf. szintben a kép jelentősen változik az alatta levőkhöz képest és az átlagos szivárgási tényező is jóval magasabb. A sötéttel jelzett gyengébb vízáteresztő-képességű területek sávokká zsugorodtak össze ebben a szintben (10. ábra bal alsó térkép).

A 200 m tszf. szint a mállási kéreg felső szintjét képviseli átlagosan 10^{-5} m/s szivárgási tényezővel, vagyis ez a szint gyakorlati szempontból vízáteresztő (10. ábra jobb alsó térkép).

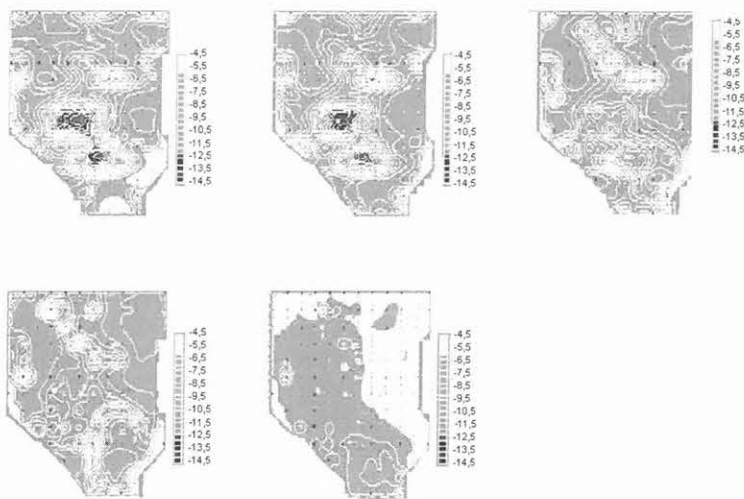
Összességében megállapítható, hogy a kis szivárgási tényezőjű blokkok mérete a mélység növekedésével növekszik, tektonikai szempontból viszont nem változik a méretük. A látszólagos méretcsökkenés oka, hogy a nagyobb szivárgási tényezőjű térképi foltok területe nő a felszínhez közeledve. Ez arra utal, hogy nagy valószínűséggel, ahogy a nagyobb blokkok száma nem változik, úgy a geometriai méretük sem. Ebből következik, hogy valószínűleg ugyanaz a blokk kisebb mélységben nagyobb vastagságban bontódik a belseje felé az azt határoló tektonikai zónák mentén.

A hét fúráson átmenő felszíni mérések alapján számított szivárgási tényezőkből alkotott É–D irányú metszetről (14. ábra) leolvasható, hogy 150–100 m tszf. alatti szinttől kezdődően lefelé, oldalirányban egymástól megnövekedett szivárgási tényezőjű sávokkal elválasztott, nagyon alacsony permeabilitású blokkokra tagolódik a vizsgált összlet. A mállási kéreg alatt az eredményül kapott metszet szerint elsősorban vertikális irányú vízmozgás lehetséges. A 150 m tszf. feletti magasságtól felfelé nemcsak az átlagos, hanem horizontális permeabilitás is jelentősen megnő, amiből arra következtethetünk, hogy ha van vízforgalom, annak jelentős része a mállási kéregben mehet végbe.

Ez az értékelés nem jelenti azt, hogy a 150 m alatti szinten nem lehetségesek kvázi horizontális, mechanikailag gyengült zónák, azonban ezek, ha vannak is, nem mutathatók ki egyértelműen a felszínről. Ettől függetlenül nagyon valószínű, hogy a mállási kéreg alatt egy kvázi horizontális zóna nem képviselhet nagy szivárgási tényezőt az agyagásványosodás, illetve a repedésnyitottságra kedvezőtlen irány miatt.

A kristályos aljzatbeli kőzetek hidrogeológiai jellegű szerkezeti földtani modellje (egy valószínű hidrogeológiai modell)

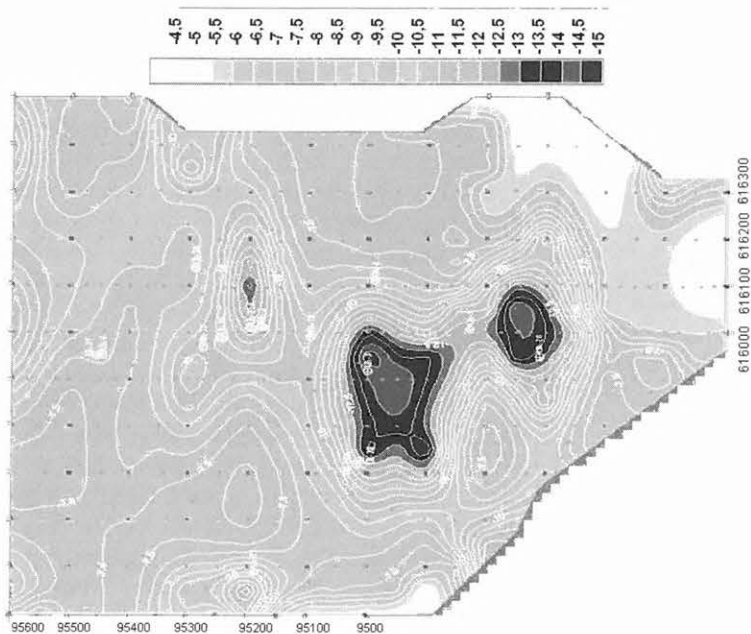
A gránit összlet 50–150 m átmérőjű blokkokból áll, melyeket fellazult zónák vesznek körbe. Ezeknek a fellazult zónáknak a szivárgási tényezője, ha mechanikusan alkalmazzuk a felállított összefüggésünket, nagy lenne, azonban ezeknek a zónáknak jó része torlasztó zóna. Felmerül a kérdés: lehetséges-e, hogy ezek egyik irányban torlasztók, a zónával párhuzamosan pedig jól vezetnek. Nagyon valószínűnek tartjuk, hogy a tektonikus zónák jó része elagyagosodott. Ez az elagyagosodás a legnagyobb mértékű valószínűsíthetően az egykor legpermeábilisabb zónákban lehet, mivel az agyagásvány-képződéshez vízforgalom szükséges, akármilyen formában is. A már elagyagosodott zóna közelében viszont bármilyen kismértékű elmozdulás friss repedezettséget hoz létre, vagyis a tektonikus zóna agyagosodott magját két oldalról egy-egy gyengébben repedezett zóna kíséri. Az elagyagosodott mag miatt az egyik permeábilis térrészből a másikba nem lehetséges az áramlás, viszont a kvázi vertikális törésszerű övek két oldalán vertikális irányú vízmozgás lehetséges. Erre a modellre utaló bizonyítéknak tekintjük, hogy a HPF⁸ mérésekkel kimutatható beáramlások rendre a tektonikus zónák szélére esnek. A leírt modell megegyezik az aljzati olajtárolókról szerzett termelési tapasztalattal is. Az aljzati tárolókban minden egyes rög egy-egy külön nyomásrendszerrel rendelkező hidraulikai egység, közöttük kommunikáció csak a mállási kérgen keresztül lehetséges. Emiatt a nyomásrendszerük csak akkor van szinkronban, ha lassú termelés folyik, míg gyors behatásra szétesik a nyomásrendszer. Ezen azt értjük, hogy a talpnyomás-idő görbék erősen el fognak térni egymástól, mert a túl gyors behatásnál, az egyes térrészek között a blokkok közti rossz permeabilitás miatt, a nyomás nem tud elég gyorsan kiegyenlítődni. Ez a jelenség kevés kivétellel nem jelentkezik direkt módon az elektromos ellenállás és a szeizmikus sebesség viszonyában még a mélyfúrás-geofizikai szelvényeken sem. Ennek magyarázata, hogy még az elagyagosodott zónákban sem elég alacsony az ellenállás ahhoz, hogy a megadott képlet szerint alacsony, zárókőzetnek megfelelő szivárgási tényezőt kapjunk kis ellenállás mellett. Ez amiatt lehetséges, hogy még a közvetlen tektonikai érintkezési zónában sem található a gyengült repedezett zónán belül olyan térrész, ahol a sonda homogén teret tudna mérni, következésképpen az akusztikus és az



10. ábra. Szivárgási tényező eloszlás vízszintes metszetekben felszíni geofizikai mérések szerint, mélyfúrás-geofizikai mérésekre és gyorsesztekre kalibrálva. *Jelmagyarázat:* Az ábra melletti színskála szerint a világos színek — viszonylag nagyobb szivárgási tényezők; a sötét változatai — kisebb szivárgási tényezők; a számok a paletta mellett és az izovonalakon — a szivárgási tényező értékek 10-es alapú logaritmusai

Fig. 10. Distribution of filtration coefficient based on surface geophysics on horizontal cutting planes calibrated to borehole measurements.

Legend: according to the palette beside the figure light colours — relatively higher seepage factor; dark colours — relatively low seepage factor; figures beside the palette and on isolines — logarithm(10) of seepage factor



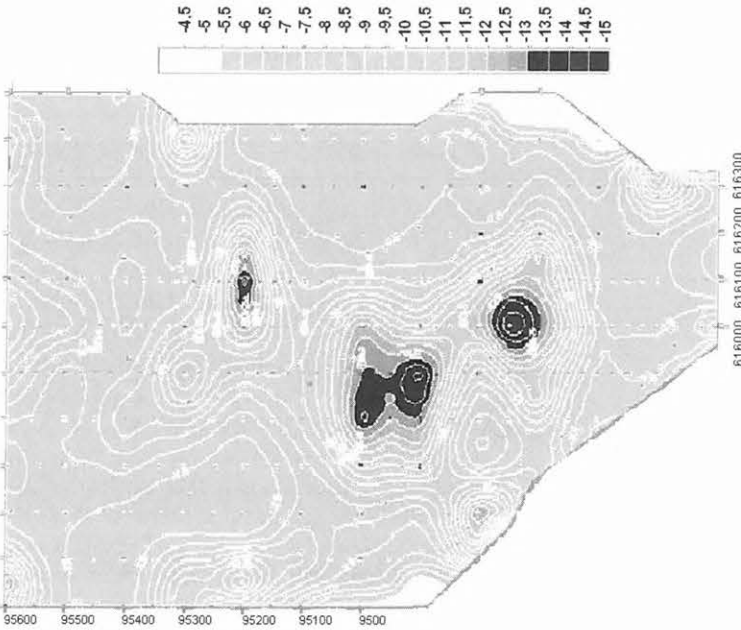
11. ábra. Szivárgási tényező becslés felszíni geofizikai mérések alapján 100 m tengerszint feletti magassági metszetben. *Jelmagyarázat:* ld. a 10. ábránál

Fig. 11. Estimated filtration coefficient based on surface geophysics on horizontal cutting plane at 100 m above sea level. *Legend:* see Fig. 10

8 HPF — Heat Pulse Flowmeter, hőimpulzusos áramlásmérés; nagyérzékenységű (néhány dl/min) két irányba kibocsátott hőimpulzus beérkezési időkülönbségének mérésén alapuló áramlásmérés.

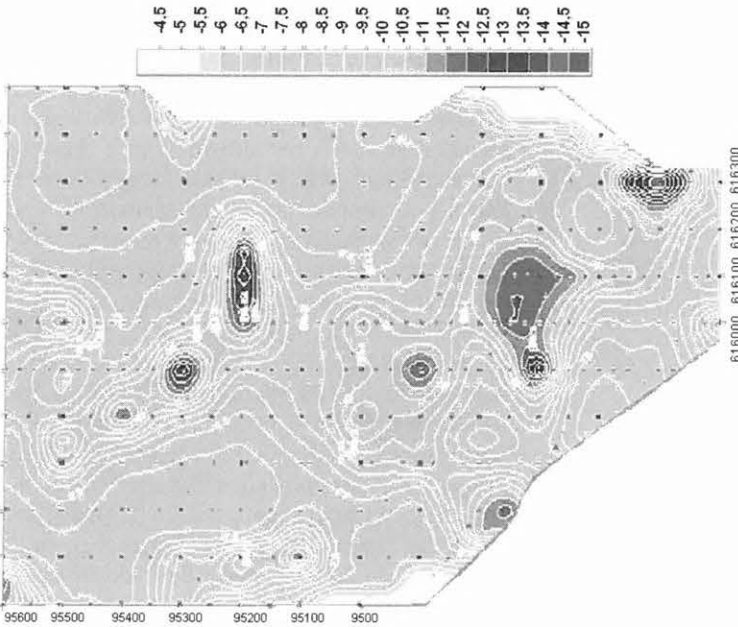
Szivárgási tényező becslés szeizmikusan kemény ($V_s > 1500$ m/s) üledékes formációban

Az Üveghutai területre kifejlesztett szivárgási tényező becslő algoritmust kipróbáltuk a Nyugati-Mecsekben szeizmikusan kemény konszolidált üledékekben, illetve az azokat fedő jóval kisebb állékonyságú üledékekben is. A 15. ábrán a relatív szivárgási tényező-eloszlás egyszerű becslésének eredményét mutatjuk be a ME-101 szeizmikus szelvény mentén. Az ábrán látható, a kivágat aljával közel párhuzamos vonalak a különböző formációk határát jelentik. A meredek szögben álló szürke vonalakkal a szeizmikus értelmezés szerint különböző tektonikai elemeket jelöltük. A szürkeskála az Üveghutaitól eltérő földtani környezet miatt csak relatív értékeket jelöl. (Erre a területre nem kalibráltunk). A világos árnyalatok a nagyobb, a sötét változatai a kisebb szivárgási tényezőt jelentik. A medencekitöltő üledékek a becsült szivárgási tényező alapján jól elkülönülnek a fekü pretercier kőzetektől. Megállapíthatjuk továbbá azt is, hogy a kiemelkedő rögök tetején vékonyabb az átmeneti zóna, mint a metszet D-i oldalán levő kis medencében, ami arra utal, hogy a kiemelkedés viszonylag nem régi, ezért még nem volt elég idő a nagyobb mértékű bontódáshoz.



12. ábra. Szivárgási tényező becslés felszíni geofizikai mérések alapján 50 m tengerszint feletti magassági metszetben. *Jelmagyarázat:* ld. a 10. ábránál

Fig. 12. Estimated filtration coefficient based on surface geophysics on horizontal cutting plane at 50 m above sea level. *Legend:* see Fig. 10



13. ábra. Szivárgási tényező becslés felszíni geofizikai mérések alapján 0 m tengerszint feletti magassági metszetben. *Jelmagyarázat:* ld. a 10. ábránál

Fig. 13. Estimated filtration coefficient based on surface geophysics on horizontal cutting plane at 0 m above sea level. *Legend:* see Fig. 10

elektromos mélyfúrás-geofizikai szondák mérése valójában csak a nem töredezett részen, tehát a blokkokon belül reprezentálja ugyanannak a térfogatnak a fizikai paramétereit.

Következtetések

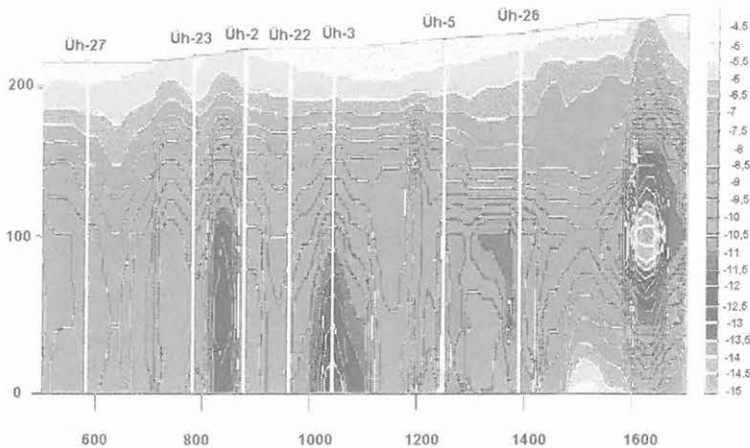
— Nem a geofizikai mérések szolgáltatotta fizikai paraméterek (sebesség, ellenállás) korrelálnak közvetlenül a hidrodinamikai mennyiségekkel (pl. szivárgási tényező), hanem az egyes mért fizikai paraméterek megfelelő modell feltételezések menti — gyakran nem lineáris — kombinációi.

— A geofizikai mérések lehetőséget teremtenek a fúrólukakban mért egyes hidrogeológiai paraméterek becslésére (esetünkben a szivárgási tényező) és azok térbeli kiterjesztésére, finomítandó a hidrológiai szivárgási modelleket.

— A felszíni geofizika alapján becsült és a fúrásban mért szivárgási tényezők közti eltérések informatívak lehetnek a földtani modellre is.

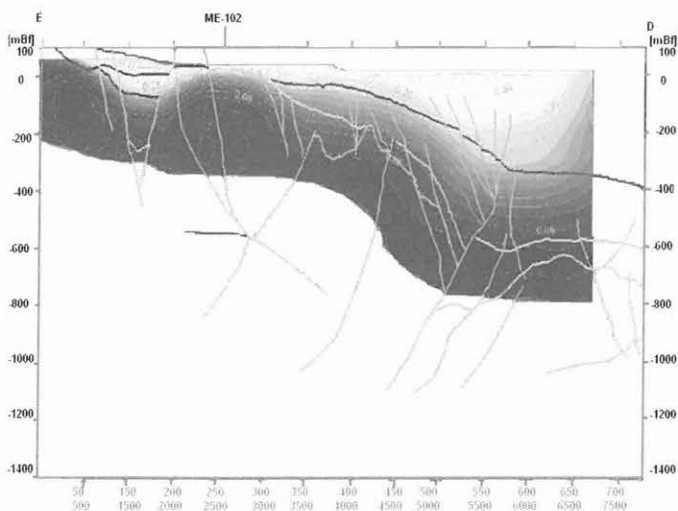
— Lehetőség nyílik a geofizika eredményeinek tágabb felhasználására és mint „roncsolásmentes” diagnosztikai eljárás jelentős szerepet tölthet be a különböző hulladéktároló-helyek kijelölése során is.

— A geofizikai mérések alapján történő szivárgási tényező becslés mindig háromdimenziós elemekre vonatkozik, amely alól még a tektonikus zónák sem kivételek, mert azok is legalább olyan vastagok kell legyenek, mint a felbontóképesség alsó határa, amiből következik, hogy a róluk megállapítható hidrodinamikai paraméterek egy nagyobb térfogat átlagát képviselik. Ez termelési szempontból helyes eredmény, de a szennyező anyag terjedése szempontjából nagy valószínűséggel gyakran



14. ábra. Szivárgási tényező becslés észak–déli irányú metszetben.
Jelmagyarázat: ld. a 10. ábránál

Fig. 14. Estimated filtration coefficient on vertical cutting directed N–S.
Legend: see Fig. 10



15. ábra. Szivárgási tényező becslés szeizmikusan kemény ($V_s > 1500$ m/s) üledékes formációban. Jelmagyarázat: világos színek — viszonylag nagyobb szivárgási tényező; a sötét változatai — viszonylag kisebb szivárgási tényező

Fig. 15. Estimation of filtration coefficient in seismically hard ($V_s > 1500$ m/s) sediment formation. Legend: light colours — relatively higher seepage factor; dark colour — relatively low seepage factor

hibás elérési időket eredményez, mert a statisztikailag elhanyagolható mennyiségű nagy átteresztőképességű repedés sok nagyságrenddel rövidebb első beérkezési időket biztosíthat a szennyező anyag megjelenése szempontjából. A tömbökre jellemző szivárgási tényező becslési eredmények a már működő hulladékártaló esetén ajánlhatók, mint hidrodinamikai paraméterek, mivel a nagyobb átteresztőképességű hasadékok feltehetőleg ak-

korra ki lesznek zárva az áramlási rendszerből, így nem kell a channelling (extrém nagy átteresztőképességű csatorna) jelenségével számolni. A channelling jelenség kifejezetten olyan nyitott hasadékokkal kapcsolatos hidrodinamikai jelenség, amelyet biztos, hogy semmilyen geofizikai módszerrel nem lehet kimutatni, lehet viszont ráutaló földtani elemeket találni geofizikai módszerekkel. A jól vezető csatorna várhatóan valamilyen összetört zónán belül, de legalább annak környezetében alakulhat ki, ezért a tektonikai elem kimutatása a kútinterferenciás eredménnyel együtt lehetővé teszi a tényleges vízvezetési útvonal durva lokalizálását.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik dr. BALLA Zoltánnak (MÁFI), hogy részt vehettek a Bataapáti környéki kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló földtani kutatásban, továbbá köszönjük a Geo-Log Kft.-nek és a Golder Associates Kft.-nek hogy mérési adataikat felhasználhattuk.

HIVATKOZÁSOK

- CLAVIER C., COATES G., DUMANOIR J. 1977: The theoretical and experimental basis for the "Dual-Water" model for the interpretation of shaly sands. Soc. Pet. Eng., AIME, Pap. No. 6859
- CSÓKÁS J. 1986: Determination of filtration coefficient of water-bearing sand layers by well logging. Geophysical Transactions **32**, 1
- DANKHÁZI Gy., ZILÁHI-SEBESS L., SZONGOTH G., BÁN I., KISS B., TÓTH J. 1990: Induced Polarization (IP) — a new type of measurement in boreholes. Transactions of the thirteenth European formation evaluation symposium, SPWLA, MGE, Budapest
- KOVÁCS Gy. 1981: Seepage hydraulics. Akadémiai Kiadó, Budapest, 730 o.
- MARES S., ZBORIL A. 1990: Logging in studying hydraulic parameters of aquifers, Transactions of the thirteenth European formation evaluation symposium, SPWLA, MGE, Budapest
- XU S., KING M. S. 1990: Pore structure mapping and permeability prediction from velocity measurements. Transactions of the thirteenth European formation evaluation symposium, SPWLA, MGE, Budapest
- ZILÁHI-SEBESS L., GUTHY T., HEGEDŰS E. 2005 Radioaktív hulladék elhelyezéssel kapcsolatos geofizikai kutatások. Töréss övek kimutathatóságának problémái. Kutatási jelentés. MGSZ adattár