

A repedezettség hatása a mélyfúrás-geofizikai mérésekre

ZILAHY-SEBESS LÁSZLÓ^{1,2,*}

¹Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145, Budapest, Kolombusz u. 17–23.

²Geo-Log Kft., 1142, Budapest, Rákospatak utca 79/b

*E-mail: zilahi@elgi.hu

A kristályos, repedezett kőzetek fizikai tulajdonságainak vizsgálatát fontossá teszi az, hogy a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló, Bataapáti környékén végzett földtani kutatás egyik objektuma – a mórági gránit – is a repedezett, másodlagos porozitású kőzetek közé tartozik. Emiatt a kőzetek repedésrendszerének jobb megértése, hatékonyabb jellemzése különös környezetvédelmi jelentőséget is kap. Az 1996 óta folyó kutatások során nagy mennyiségű mélyfúrás-geofizikai mérést és kőzetminta-vizsgálatot végeztek ezen a területen. Ez általánosságban is egyedülálló lehetőség a repedezett kőzetek kutatásában, mert a szénhidrogén-kutatások során az ilyen típusú kőzetekkel csak nagy mélységekben lehet találkozni, és ott is csak a felső bontott, potenciálisan tároló zóna vizsgálata érdekes az olajipar számára. A bataapáti kutatások előtt a földtani szerkezetkutató fúrásokban a geofizikai paraméterek vizsgálata általában háttérbe szorult a fűrómagvizsgálatokkal szemben.

A repedezett alaphegységi típusú tároló szerkezeteket, amelyek a szénhidrogén-kutatásban egyre fontosabbak, a felszín közeli kemény kőzetek mállási kérgében megfigyelhető jelenségek analógiája alapján modellezhetjük.

A kristályos, szeizmikusan kemény kőzetek legfontosabb tulajdonsága a repedezettség, amely közvetlenül befolyásolja mind a kőzetmechanikai, mind a hidrogeológiai tulajdonságokat.

A másodlagos porozitású kőzetek pórustere szabálytalanabb, ezért nem is jellemezhető viszonylag olyan egyszerűen, mint az elsődleges, szemcseközi porozitású üledékes kőzeteké. Valószínűleg ezért ismerjük kevésbé a repedezett kőzetek porozitás- és vízáteresztő-képességi viszonyait, mint az üledékes kőzetekéit.

A tanulmányban elsősorban a repedésrendszer tulajdonságainak az akusztikus és elektromos mérésparaméterekre gyakorolt hatásáról lesz szó. A repedésrendszer fő jellemzőit, illetve a geomechanikai jellemzőket az akusztikus lyukfal „televízer”-mérésből, akusztikus hullámkép méréséből, illetve fűrómagvizsgálatokból kaptuk.

Zilahi-Sebess, L.: The effect of fracturing on results of well logging

The actuality of the topic is given by the main target of geological investigations at Bataapáti on the area designed for disposing low and intermediate level radioactive waste, i.e. by the Mórág granite which is also a fractured rock with secondary porosity. Because of that, a better understanding of fracture systems and a more effective characterisation of the rock itself has a great importance also in the environmental protection. During the investigations since 1996, many well logging measurements and core analyses were carried out in this area. It has been an excellent opportunity to learn more about fractured rocks in general too, because in the hydrocarbon exploration such kind of rocks occur only in great depths in the basements and the oil industry is interested only in their altered crust, which might be a possible reservoir.

Before the Bataapáti project, at the previous structural geological borehole investigations, the geophysical parameters were outweighed by core analysis.

It has to be noted that fractured reservoirs increasingly significant in hydrocarbon exploration can be better understood by the help of the results of recent investigations made on altered zones of near-surface crystalline rocks.

The most important feature of the seismically hard crystalline rocks is the fracture porosity because it directly affects both the hydrogeological and geomechanical properties of the rock. The pore space of rocks with secondary porosity is more irregular and that is why it cannot be so easily characterized than that of the clastic sedimentary rocks with primary intergranular porosity. Probably, because the accumulated knowledge on the porosity and permeability in case of fractured rocks with secondary porosity is less than that in case of sedimentary rocks.

In this paper we discuss the influence of fracture properties of fractured rocks on the physical parameters – first of all on specific electrical resistivity and sonic wave propagation. The main features of fracture systems and geomechanical properties were obtained from BHTV measurements, measurements of full acoustic waveform and from core samples.

Beérkezett: 2010. június 14.; *elfogadva:* 2010. augusztus 19.

1. Bevezetés

Az 1992-ben indított Nemzeti Projekt keretén belül folyó, bátaapáti kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló földtani kutatás során végzett nagy mennyiségű mélyfúrás-geofizikai mérés és kőzetminta-vizsgálat egyedülálló lehetőséget biztosított a kristályos alaphegységi kőzetek értelmezési módszertanának kidolgozására.

Az RHK KHT megbízásából 1996 és 2006 közt 64 fúrást mélyítették kb. 8000 m hosszban, ezekből 20 db 250 m-nél mélyebb, azaz fúrásoként legalább kétszáz méter hosszban gránitot harántolt. Ennek jelentőségét elsősorban az adja, hogy ezeknek a fúrásoknak nagy része a felszíni mállástól nem érintett, üde kőzetben haladt. Kicsit másként fogalmazva, egyrészt ez azt jelenti, hogy nem csak a mállási kéreg különböző fokozatait lehetett tanulmányozni, mint a kristályos alaphegységet ért olajipari fúrások nagy részénél, másrészt jóval több különböző geofizikai mérést végeztek a fúrásokban, mint a bontatlan alaphegységi kőzeteket ért szerkezetkutató fúrásokban szokás. A radioaktív hulladék elhelyezésére irányuló kutatások során alkalmazott akusztikus lyukfal televíziós-mérésekből kapott repedéssűrűség és a hagyományos mérések összehasonlítása alkalmat adott olyan összefüggések tanulmányozására is, amelyre eddig legfeljebb elméleti úton és a szakirodalom alapján lehetett következtetni.

A másodlagos porozitású és ezen belül a repedezett kőzetek pórusterének szerkezetéről, a mérhető fizikai paraméterekre gyakorolt hatásáról, valamint azok és a mechanikai, illetve hidrogeológiai tulajdonságok közti kapcsolatokról jóval kevesebb ismerettel rendelkezünk, mint az elsődleges porozitású üledékes kőzetek esetében.

Amíg az elsődleges szemcseközi porozitású kőzetek porozitása és permeabilitása közti összefüggés jól modellezhető, és viszonylag nagy térfogatra ki is terjeszthető, a repedezett kőzetek esetében ez sokkal bizonytalanabb, és a kiterjeszhetőség sem olyan magától értetődő, mint a rétegzett közegek esetében. A repedezett kőzetekre általában nagyfokú inhomogenitás a jellemző, ezért pusztán a repedés kimutatásával nem tudjuk olyan jól jellemezni ezeket a porozitással és egyéb fizikai paraméterekkel a fúrás egy adott szakaszán, mint az elsődleges porozitású üledékes kőzeteket. Az üledékes kőzetekben a mélyfúrásban mért adatokat általában aránylag nagy távolságra extrapolálhatjuk. Gyakran még fél méter vastagságú rétegek is korrelálhatóak akár kilométeres távolságokra, de még a horizontálisan erősen inhomogén folyóvízi üledékekben is extrapolálhatunk néhányszor tíz méterre. A repedezett kőzetekben ezzel szemben semmi biztosítékunk sincs az extrapolálhatóságra még néhány méteres távolságban sem. Ennek az ellentmondásnak a feloldása a repedezett kőzetek értelmezésének legfontosabb feladata. Ahhoz azonban, hogy az egyes mérésgegrében tapasztalható mélységi trendeket kőzetmechanikai és hidrogeológiai szempontból helyesen tudjuk értelmezni, előbb a lokális kőzetmodellt szükséges megértenünk, ami több módszer együttes értelmezését kívánja meg. Ebben a

tanulmányban ezért az általános gyakorlattal ellentétben a módszerek egymás közti kapcsolatának fontosságát, az azokból a repedésrendszerre levonható következtetéseket állítjuk a középpontba. Más szavakkal ez a repedezettség az egyes fizikai paraméterekre gyakorolt hatásának vizsgálatát jelenti. Ez a vizsgálat elsősorban empirikus, hiszen mélyfúrás-geofizikai és magminta-vizsgálati anyagokon alapul, de nem nélkülözheti az elvi megfontolásokat sem.

2. A repedezett kőzet statisztikai modelljének elemei

A tisztán geometriai statisztikai repedezettségi modell a *repedéssűrűség-eloszlással*, a *repedés-nyílásszélesség eloszlásával*, a *repedésirány-eloszlással*, a *dőléseloszlással*, valamint a *repedéshosszúsággal* jellemezhető. A *repedéssűrűség* definíció szerint adott hosszra (többnyire 1 m-re) eső repedések száma. A valódi repedések számát nem tudjuk pontosan meghatározni az eszközök véges felbontása miatt, ezért helyette az adott eszközzel mérhető *látszólagos repedésszámról* beszélhetünk. A repedéssűrűség geomechanikai jellemzőként csak kvalitatív közzetagság jellegű információnak számít, viszont a repedések osztályozásával elvileg többféle is definiálható. A *repedések irányítottsága* a kőzetek geomechanikai viselkedése szempontjából fontos paraméter. A repedések közvetlen kimutatásáról külön fejezetben esik majd szó.

A *repedéssűrűség-eloszlást* – vagy azzal ekvivalens mennyiséget – többféle módon is megkaphatjuk, „akusztikus lyukfal-televíziós” mérésből (angolul *acoustic televízió*; rövidítve BHTV), magszkennerképből vagy a fúrómagok leírásából származó töredezettségi adatokból.

A repedések *irány szerinti eloszlását* és a *dőléseloszlását* mélyfúrás-geofizikai oldalról BHTV¹⁾ felvételek alapján vizsgálták. A MÁFI IMAGEO magszkenner²⁾ (Maros, Palotás 2000) berendezés hasonló adatrendszerét a BHTV alapján orientálják, így az irány szerinti eloszlás szempontjából nem független a két adatrendszer. (Ezzel szemben olyan értelemben független, hogy a magszkenner-értékelésben a statisztikai súlypont inkább a zárt és kitöltött repedéseken van, míg a BHTV repedéseloszlásban kizárólag olyan repedések szerepelnek, amelyek mechanikai tulajdonságaikban biztosan különböznek a környezetüktől, és nem szerepelnek közöttük az 1 mm alatti hajszálrepedések.) A repedések irányeloszlása és dőléseloszlása egyaránt fúrólukirányba eső látszólagos eloszlások, mivel ugyanakkora térbeli repedéssűrűség esetén a fúrólukra merőleges repedések látszólagos repedéssűrűsége a legnagyobb. Ezt lehet részben helyrehozni a Terzaghi-korrektúrával³⁾ (Terzaghi 1965) amely természetesen csak nagyobb számú repedés esetén működik jól.

A repedés-nyílásszélességről és annak eloszlásáról közvetlen mérés adatunk nincs, mivel még a repedéskimutató eszközökkel is csak kvalitatív információt lehet szerezni. Ennek a BHTV esetén a felbontóképesség szab korlátot. A lyuktelevíziós képeken ugyan meg lehet különböztetni vékony és vastag repedéseket, ám ezek nem a repedés tényle-

ges vastagságát mutatják, mert a műszer 1 MHz-es adófrekvenciája valójában maximum 1 mm körüli felbontást tesz lehetővé, a menetemelkedés 4 mm két mélységpont között, így az 1 mm-es felbontás is csak vonalas alakzatokra érvényes. Ennek ellenére a jóval vékonyabb repedések nagy része is kimutatható az amplitúdóképen⁴⁾, mert a repedés körül annak létrejöttével kapcsolatosan mindig van egy keskeny tönkremeneteli zóna, ahonnan a reflexió gyengébb. A tényleges zavart zóna – már a vékony repedések többségénél is – a műszer felbontásánál szélesebbnek mutatkozik. A reflexióidő-képen⁵⁾ viszont a felbontás mérete alatti repedések egyáltalán nem látszanak, még ha nyitottak lennének is (1. ábra). A vastagabb repedések esetében az előbbieket értelmében általában várható, hogy a BHTV amplitúdóképen is vastagabbnak mutatkoznak. Ilyen értelemben ez olyan információ, amely éppen a mag kivétele miatt a fűrőmagon nem jól vagy egyáltalán nem vizsgálható, míg a BHTV-kép alapján relatív rangsor állítható fel. Főleg a nagyobb repedések esetében a magvizsgálatok erre nem adnak információt, hiszen ha a repedések nyitottak, szétválik a mag, és emiatt a nyílászélesség a legtöbb esetben megállapíthatatlan. Közvetett kvalitatív információnak számítható a vezetőképesség – porozitás, illetve a vezetőképesség – akusztikus Δt közötti összefüggés is.

A repedéshosszúságról még a nyílászélességéhez hasonló közvetett információt sem lehet szerezni, egyszerűen fel-

tételezzük, hogy a nyílászélességgel egyenesen arányos. Más méréseket is hasonló logika alapján terjeszthetünk ki a fűrás körüli térbe. Az indikáció vertikális mérete nagy valószínűséggel arányos a horizontális mérettel. Ez a feltételezés – habár kvalitatív jellegű – *a priori* ismeretek híján mégsem helyettesíthető mással, mert rétegmentes közegben a fűrási információk csak vonal menti mintavételt jelentenek. A repedések relatív nyílászélességére az egyes fizikai paraméterek egymáshoz való viszonyából következtethetünk. Ilyen paraméterek az elektromos ellenállás és az akusztikus paraméterek.

3. A repedezett kőzetek szonikus tulajdonságai

Akusztikus szempontból a repedezett kőzetek szeizmikusan kemény formációk, vagyis az alapkőzetben a transzverzális hullám terjedési sebessége meghaladja a fűrőfolyadékban terjedő longitudinális hullám sebességét.

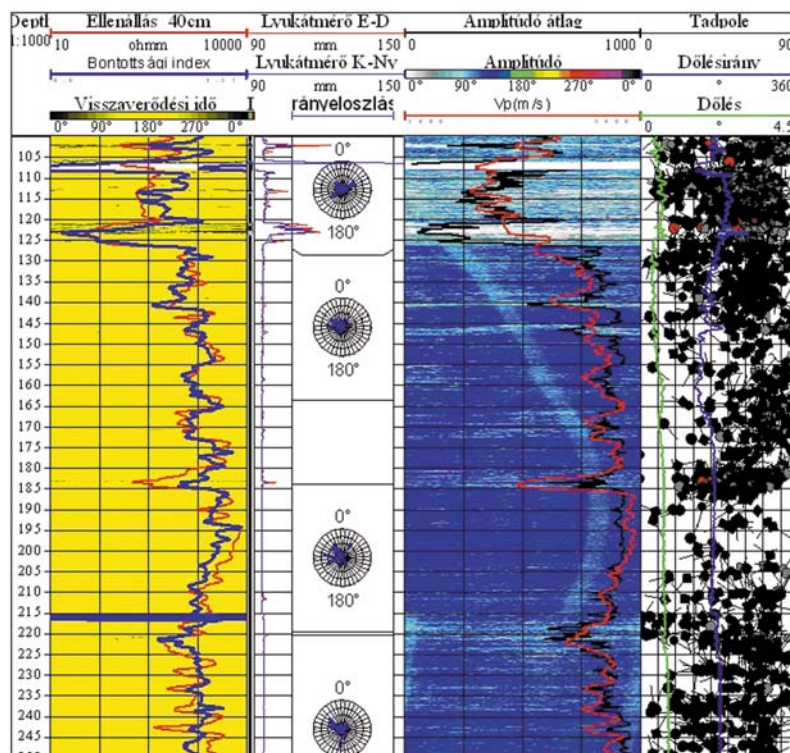
Első közelítésben feltételezhető, hogy a kőzetmátrixra jellemző akusztikus hullámterjedési idő konstans, vagyis a hullámterjedési idő alapvetően a kőzet mechanikai állagától függ, annak kémiai összetételétől csak kis mértékben függ. (Ez a feltételezés a nagy sebességek tartományában természetesen nem igaz, mert ott a petrológiai jellemzőkkel kapcsolatos szilárdságtani jellemzőbeli különbségekből adódó változatosságot regisztráljuk, vagyis az akusztikus paraméterek a természetes gamma-méréshez hasonlóan a kőzet



Geo-Log Környezetvédelmi és Geofizikai Kft.

1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23. Tel./Fax: 363-5643

Üveghuta, Üh-45



1. ábra BHTV kép tadpole feldolgozással valamint mért és származtatott mélyfűrás-geofizikai mérésgörbékkel. Az ábrára több helyen is hivatkozunk a cikkben

Figure 1 BHTV-image with tadpole evaluation and measured and calculated logs. This figure is referenced several times in this paper

anyagával kapcsolatos információt adnak. Figyelembe kell venni azonban, hogy az üde kőzetek paraméterei nagyjából egy 50 $\mu\text{s/m}$ széles tartományban változnak, ami körülbelül 10% porozitásváltozásnak felel meg. A gyakorlatban egy fúráson belül a kőzet anyagából eredő teljes változás tartománya maximálisan ennek az egyharmada, még metamorf kőzetek esetében is!⁶⁾

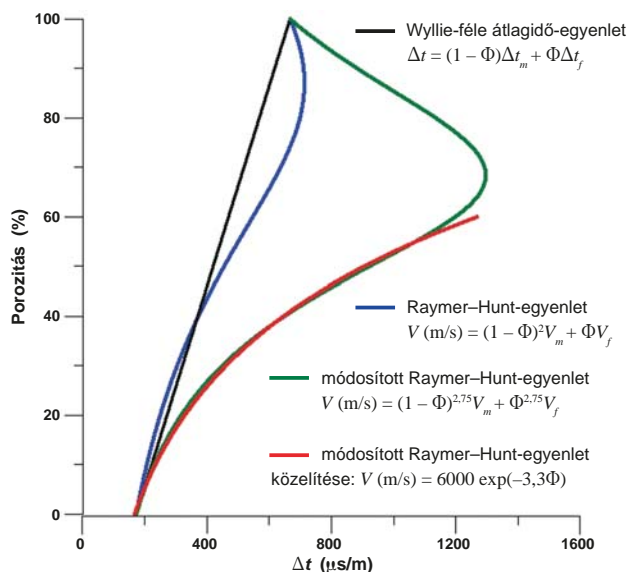
Az akusztikus hullámcsomagfajták, a longitudinális, a transzverzális és a Stoneley-hullámok terjedési sebességeinek egymáshoz való viszonya, nagymértékben a kőzetváznyíró erőkkel szembeni ellenállásától függ.

A zárt mikrorepedezettség pusztán mennyiségi növekedése, ha az egyes repedések mérete változatlan, elvileg a repedés darabszámával egyenesen arányosan növeli a hullámterjedési időt. Ez azonban nem egyezik a megfigyelésekkel. A hullámterjedésre hatással levő mikrorepedéseknek egymással valamilyen kapcsolatban kell lenniük,⁷⁾ míg a diszkrét, egymással kapcsolatban nem lévő mikrorepedések a legrövidebb idejű úthosszára teljesen hatástalanok is lehetnek, mert az energiaterjedés útvonalából kieshetnek. Bár a terjedési időt nem csökkentik, azonban ez utóbbiak is a terjedő hullám energiájának egy részét abszorbeálhatják. Ilyen jelenség csak akusztikus hullámképfelvételén tapasztalható.

Az akusztikus hullámterjedés szempontjából meg kell különböztetni a mátrixra jellemző Δt -t kevésbé befolyásoló agyagásványosodást a Δt -t jelentősen megnövelő agyagásványos bontástól. Ez utóbbi feltehetően alacsony hőmérsékleten jött létre, és jelentős mennyiségű, reverzibilisen eltávolítható kötött vizet tartalmaz. Ennek a víznek nagy része nem az adszorpciósan kötött víz, hanem szubkapilláris víz, amelyet lényegében a totalporozitáshoz számíthatunk. A mérések alapján következtethető, hogy még 30%-os kloritosodás⁸⁾ esetén is csak elhanyagolható mértékben csökken az akusztikus hullámterjedési sebesség. A sebességcsökkenés közvetlen oka a mechanikai fellazulás és az azzal kapcsolatos pórustérképződés. Látszólag tehát a sebességmérés közelebbi kapcsolatban van a porozitásméréssel a kis porozitású kristályos kőzetek esetében⁹⁾, mint a többi porozitáskövető módszer. Ez azonban kicsit megtévesztő, mert az alacsony hőmérsékleten létrejött agyagásványosodáshoz kapcsolódó, kötött vízzel kitöltött porozitást is a totalporozitáshoz számítjuk. Bár ez a pórustér mindhárom porozitáskövető módszerre jelentős hatással van, nem kapcsolódik hozzá permeabilitás. A kristályrácsban hidrogént tartalmazó ásványok látszólagos neutronporozitása viszont valóban csak látszólagos, és nem számítható a totalporozitáshoz, ha csak a neutronporozitásra van számottevő hatással. A hidrotermás elváltozásoknál sincs feltétlenül bármilyen valódi porozitás, noha a keletkező ásványok jelentős OH- és kristályvíztartalma miatt a neutronporozitás nagy lehet.

4. Szonikus tulajdonságok vizsgálata más fizikai tulajdonságokkal összefüggésben

Az akusztikus terjedési sebesség modellezéséhez a reálisan számba jöhető porozitástartományban az üde, felszíni hatá-



2. ábra A Raymer-Hunt-egyenlet, a Wyllie-féle átlagidő-egyenlet és a módosított Raymer-egyenlet összehasonlítása

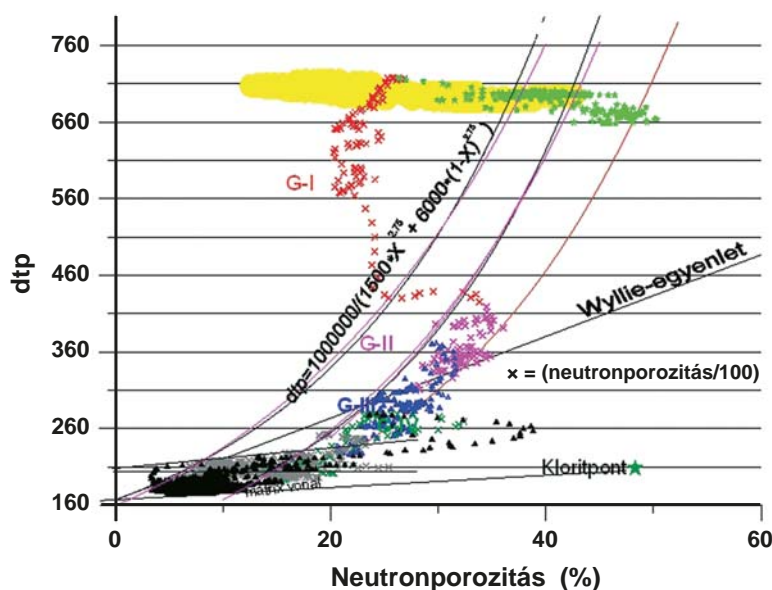
Figure 2 Comparison of the Raymer-Hunt equation, the Wyllie equation and the modified Raymer equation

soktól mentes, kis hézagterefogatú kőzetekre, nagy sebességnél a Raymer-Hunt-összefüggés közel hasonló akusztikus hullámterjedési sebességet ad, mint a Wyllie-egyenlet, ezért az elektromos tulajdonságok és a szonikus hullámterjedési sajátságok közti összefüggés szempontjából mindegy, hogy melyik összefüggést vesszük figyelembe. A Raymer-Hunt-összefüggés (2. ábra) repedezett kőzetekben valamivel kisebb terjedési időket ad:

$$V \text{ (m/s)} = (1 - \Phi)^2 V_m + \Phi V_f, \quad (1)$$

ahol V_m a mátrix, V_f pedig a kitöltő folyadék szonikus hullámsebessége, Φ a folyadékkal kitöltött porozitás.

Feltételezve, hogy az eredetileg 0,1% porozitást képviselő, átlagosan 10 μm vastag mikrorepedések a fellazulás következtében 50-szeresre tágulnak, akkor 5% porozitás mellett 0,5 mm vastag repedéseket kapunk. Ekkor a Wyllie- (átlagidő-) egyenlet alapján az akusztikus sebesség várhatóan 700–800 m/s-ot csökken, amely az eredetileg 5500 m/s-nak feltételezett sebesség 1/8-a körüli érték. A mérések alapján azonban a sebességcsökkenés ennél jóval nagyobb. Abban, hogy a fellazult repedezett kőzetekben mérhető, az átlagidő-egyenlet alapján a vártnál jóval nagyobb sebességcsökkenés jöjjön létre, a kőzet anyagának bontottsága is szerepet játszik, ami főként agyagásványosodást jelent. A nagyobb vastagságú repedéseknél jelentős sebességcsökkentő tényező a repedések kétdimenziós jellegéből adódó geometriai effektus, amely összességében inkább a Raymer-Hunt-egyenlet használatát indokolja. A geometriai effektus magyarázataként feltehető, hogy az akusztikus hullámterjedési sebesség nagysága elsősorban a kőzetmátrixban megtehető úthossz átlagos nagyságától függ, és csak a kis porozitásoknál van



3. ábra | Neutronporozitás– Δt keresztábrák a módosított Raymer-egyenlet exponenciális közelítésének feltüntetésével
Figure 3 | Neutron porosity – Δt crossplot with the exponential approximation of the modified Raymer equation

lineáris összefüggés a porozitás és a Δt_p közt (3. ábra). A kérdés az, vajon létezik-e az ilyen repedések geometriájával összefüggő effektus, vagy a kémiai értelemben vett agyagásványosodás is jelentős szerepet játszik a sebesség csökkenésben.

A neutronporozitás– Δt keresztábrák (3. ábra) kis Δt -vel jellemezhető (nagy sebesség-) tartományában a pontfelhő alsó határához húzott egyenes egyfajta mátrixvonalnak tekinthető, amelynek egyenlete a konkrét esetben a következő:

$$\Delta t (\mu\text{s}) = 172,5 (\mu\text{s}) + 0,8 \cdot \Phi_N (\%), \quad (2)$$

ahol Δt az akusztikus hullámterjedési idő és Φ_N a neutronporozitás.

Ez a burkoló egyenes azoknak a pontoknak a halmaza, ahol adott neutronporozitás mellett az akusztikus Δt minimális. Feltételezzük, hogy a burkoló egyenesen levő pontok esetében a Δt növekedése kizárólag a kőzetmátrix neutronporozitás-növekedésével kapcsolatos, elvileg nincs köze a valódi porozitáshoz.

Az üde grániton belül a kloritosodás maximális mértéke a Φ_N – Δt keresztábrák szerint nem lehet több, mint 30%, az ahhoz tartozó maximális Δt is csak 184 $\mu\text{s}/\text{m}$, vagyis 5440 m/s. Ebből az összetételből származó maximális különbség mindössze 360 m/s-nak adódik, vagyis az ingadozás mértéke $\pm 3,2\%$ az 5620 m/s középérték körül van. Ezt figyelembe véve 5600 m/s-nak megfelelő 178 $\mu\text{s}/\text{m}$ -nek véve a mátrix Δt értékét, a számított porozitás hibája $\pm 1,14\%$ -nak adódik, ami csak kis porozitásoknál jelentős.

Másmilyen típusú kristályos¹⁰⁾, de szintén kétkomponenses mátrixú kőzetben ez a keresztábrák hasonlóan alakulna, csak az egyenlet lenne más. A „klorit”-komponens Δt -jét

annak az elméleti neutronporozitását (47,5%) a burkoló egyenes egyenletébe behelyettesítve lehet megkapni¹¹⁾. Ez 210,5 $\mu\text{s}/\text{m}$, 4750 m/s, ami lényegében megegyezik a bodai aleurolit V_p sebesség értékével, amely egy argillitkőzet, viszont geomechanikai szempontból nagyon hasonló a gránit-hoz. Ebből következtetve agyagásványok jelenléte csak akkor befolyásolja számottevően az akusztikus terjedési sebességet, ha azok szárítással is eltávolítható szubkapilláris és kapilláris vizeket tartalmaznak.

Fontos megemlíteni, hogy amíg az elméleti neutronporozitás egy rögzített érték, amely kapcsolatban van a sztöchiometriai képlettel, a Δt nem lehet ilyen kapcsolatban az anyagi minőséggel, csak ha a kőzet repedezésmentes.

A kiértékelő görbesereg általános egyenlete, amelyet a továbbiakban módosított Raymer-egyenletnek nevezünk, a következő:

$$\Delta t (\mu\text{s}/\text{m}) = 1/\{V_m [1 - (\Phi + \Phi_m)/(100 - \Phi_m)]^{2,75} + V_f [(\Phi - \Phi_m)/(100 - \Phi_m)]^{2,75}\}, \quad (3)$$

ahol Φ_m a mátrix neutronporozitása.

A $\Phi_m = 0\%$ paraméterű görbe fejezi ki a teljes porozitás (Φ) és a Δt közötti kapcsolatot. Mivel a Φ porozitást kifejezve kétértékű a függvény, ezért ahelyett ennek exponenciális közelítését a

$$\Delta t = 172 (\mu\text{s}/\text{m}) e^{0,03378 \cdot \Phi}; r^2 = 0,998 \quad (4)$$

regresszióval célszerű használni, amiből

$$\Phi_i (\%) = 29,6 (\mu\text{s}/\text{m}) \cdot \ln(\Delta t (\mu\text{s}/\text{m})) - 152,35, \quad (5)$$

ahol Φ , a totálporozitás, Δt az 1 m-re eső akusztikus hullámterjedési idő (2. ábra).

Megjegyezzük, hogy ez az egyenlet helyes eredményt ad a víztelített löszre és a pleisztocén homokokra is, ezért általánosabb érvényűnek mondható, mint az a kitűzött feladattól következik. Ennek valószínű oka, hogy akár a repedettségről van szó, akár a Pannon-üledékekről, mindegyik esetben a mátrix cementáltságáról van szó, és ez hozható kapcsolatba az akusztikus hullámterjedési idővel. A közös pont valójában a közetmátrixban átlagosan megtehető úthossz, amely annál nagyobb, minél cementáltabb a kőzet. A kőzet cementáltsága viszont a porozítással fordítottan arányos a laza üledékes kőzetekben. A repedetett kőzetek esetében viszont feltehető, hogy a közetmátrixban átlagosan megtehető úthossz fordítottan arányos a repedéssűrűség valamilyen egynél magasabb hatványával.

A repedéssűrűség és a totálporozitás (Φ) egyenletes vastagságú repedések esetén természetesen egyenesen arányosak egymással. Kis porozítások esetén ezt a feltételezést igazolja a radioaktív porozításkövetőkből számított porozitás és az BHTV-kép alapján megállapítható repedéssűrűség közti jó korreláció.

A Δt – legalábbis a kőzetmagmintákon mért geomechanikai paraméterek és a mélyfúrás-geofizikai mérésekből számított paraméterek összehasonlítása alapján – függ a nyomástól is. A kiértékelő táblázatokban (Western Atlas 1985) megadott agyagásványokra vonatkozó Δt értékek irreálisan nagyok (212 msec/ft vagy 695 msec/m), gyanúsan közeli értékek a víz fajlagos akusztikus hullámterjedési idejéhez. Sokkal valószínűbb, hogy a teljesen száraz állapotú agyagásványokra jellemző terjedési sebesség – a csillámokhoz (6000 m/s) hasonlóan – nagy érték. A keresztábrán alsó burkoló egyeneséből kiindulva ez 4700–4800 m/s körüli érték. Ezt igazolja a tiszta argillitkőzetben felvett ke-

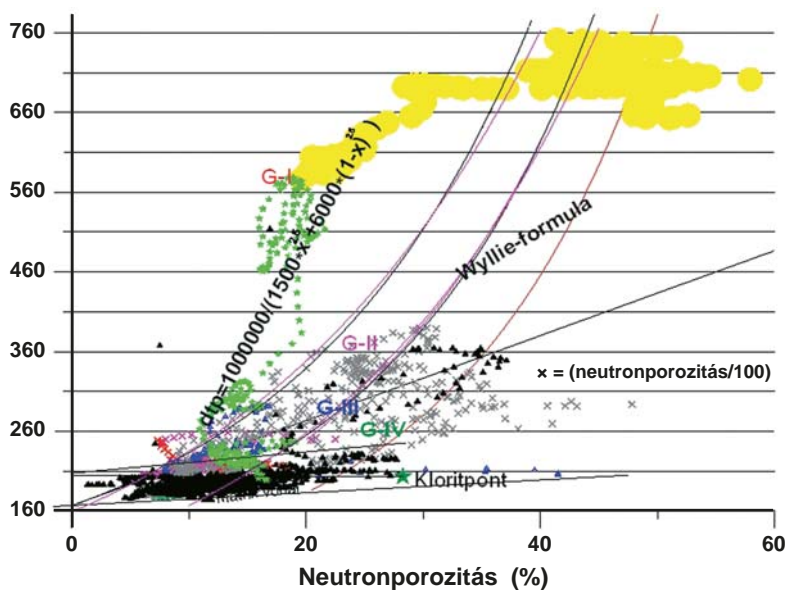
resztábrán is (5. ábra), ahol az adott neutronporozitáshoz tartozó legkisebb Δt értékek ennek az értéknek a közelébe esnek.

A keresztábrák alapján tehát a rétegszilikátok jelenléte az akusztikus tulajdonságok szempontjából nem jelent túl nagy változást, amit az üveghutai gránitra (3. és 4. ábra) és a bodai aleurolitra (5. ábra) vonatkozó keresztábrák is alátámasztanak. Ennek alapján a nagy sebességváltozásnak mindenképpen a redukálható víz nagyobb mennyiségéhez kell kapcsolódnia.

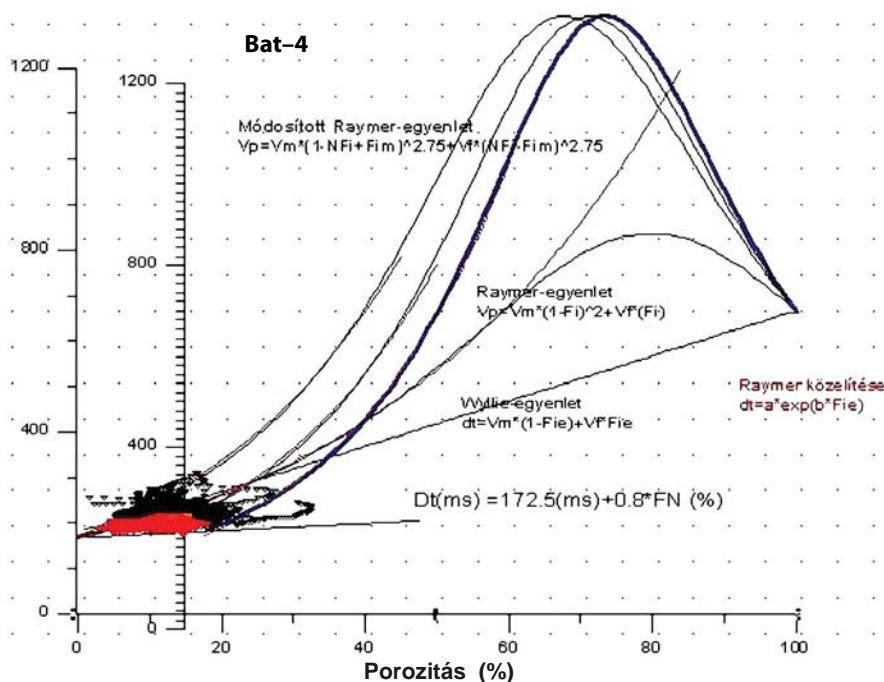
Ez a redukálható víz magában foglalja a kötött víz egy részét is, de nem tartozik hozzá a felülethez közvetlenül kapcsolódó, a külső Helmholtz-réteg kationjait hidratburokban magában foglaló réteg.

A 4. ábrán az Üh-4 fúrásban felvett keresztábrán a kisebb neutronporozításokhoz is tartozhat nagy Δt , ami egyértelműen a repedettség hatására utal. Külön figyelmet érdemel, hogy a minimális neutronporozítású és Δt -jú pontból kiinduló görbére is sok pont esik, amely egyrészt a fúrás kőzeteinek erősebb tektonizáltságát jelzi, másrészt pedig megerősíti azt az elképzelést, hogy a nyitott repedésrendszer jelenléte az, ami az átlagidő-egyenletnél, sőt a Raymer-egyenletnél is jobban növeli a terjedési időt a porozitás függvényében.

Összefoglalva, a Δt -ből számított porozitást elvileg azonosíthatjuk magával a kötött vizeket is tartalmazó totálporozítással, mivel a mátrix összetételére csak kevésbé érzékeny és az anyagi összetétel megállapítását pedig a neutronporozitás-sűrűség keresztábrán alapján végezzük el. A keresztábrán pontjainak elhelyezkedéséből megállapítható, hogy a gránitban és valószínűleg más repedésporozítású kristályos kőzetben is a Raymer-Hunt-egyenlet jobban közelíti a tényleges porozitás- Δt összefüggést, mint a Wyllie-féle átlagidő-egyenlet. A konkrét esetben azonban meg kell



4. ábra | Üh-4 fúrás: neutronporozitás- Δt keresztábrán a módosított Raymer-egyenlet exponenciális közelítésének feltüntetésével
 Figure 4 | Üh-4 borehole: neutron porosity – Δt crossplot with the exponential approximation of the modified Raymer equation



5. ábra A neutronporozitás – akusztikus Δt összefüggés konszolidált argillitben Jelmagyarázat: MR – módosított Raymer-egyenlet, R – Raymer egyenlet, W – Wyllie-formula, M – kőzetmátrix-vonal, A(%) – neutronporozitás vagy mészkövekivalens porozitás, $\Delta t \sim$ fajlagos akusztikus hullámterjedési idő. A második Δt tengely tartozik a ponthalmazhoz, az 5. és 6. ábrán is látható függvénygörbékhez pedig a balra lévő, vagyis a maximális Δt kb. 30–40 $\mu\text{s}/\text{m}$ -rel tér el a gránitra jellemző értéktől

Figure 5 Relation between neutron porosity and acoustic Δt in consolidated argillitic rock. Legend: MR – Modified Raymer equation, R – Raymer equation, W – Wyllie equation, M – rock matrix line, A(%) – neutron porosity or limestone equivalent porosity, Δt – characteristic acoustic travel time. The second Δt axis belongs to the point cluster, whereas the left one belongs to the curves of Figures 5 and 6, hence, the maximum Δt differs from that of granite with about 30–40 $\mu\text{s}/\text{m}$

állapítani, hogy a Raymer-egyenlet is csak akkor írja le jól a Δt porozitásfüggését az egész porozitástartományban, ha a Φ porozitás és az $(1 - \Phi)$ kitevője egyaránt 2,75. A 0% totálporozitásnak megfelelő pontot a keresztábrán az aktuális mátrixporozitás pontja jelöli ki.

A bátaapáti gránitban történt mérések összehasonlítása igazolja azt a feltételezést, hogy a száraz, csak redukálhatatlan hidrogént tartalmazó mátrixanyagára jellemző akusztikus hullámterjedési idő a porozitáshatáshoz csak kis mértékben függ annak kémiai, ásványos összetételétől. Az, amit mátrixhatásként értelmezünk, valójában nagyrészt nem mátrixhatás, hanem abban az ahhoz kapcsolódó redukálható vizek hatása is benne van. Önmagában tehát az agyagásványok hatása a terjedési sebességre kicsi. Az agyagásványosodás önmagában csak viszonylag kis mértékben befolyásolja az akusztikus terjedési sebességet, ezzel szemben az agyagosodás az, ahol valóban nagymértékben csökken a fajlagos akusztikus hullámterjedési sebesség, és hozzá képest viszonylag kismértékben nő a neutronporozitás. Az agyagosodás az akusztikus hullámterjedés szempontjából azt jelenti, hogy redukálható víztelítettséget is feltételezünk a kőzetben. A vizsgált mérésanyagok alapján megállapítottam, hogy nem szükségszerűen jön létre nagymértékű, az egész kőzettér fogatot érintő agyagásványosodás a repedezettség hatására. Ahhoz, hogy a kismértékű repedezettség észrevehető anomáliát okozzon az agyagásványosodással,

illetve később az agyagosodással, jelentős mennyiségű pórustérfogatnak kell létrejönnie. Arra, hogy ez a pórustérfogat valóban létezik, bizonyíték a radioaktív mérésekből számított porozitás és a BHTV-repedezettség jó korrelációja. A V_p (longitudinális hullámsebesség) legkisebb értékeinél a tektonikai zónákban általában a természetes gamma kis értékei¹²⁾ és a neutronporozitás nagy értékei a jellemzőek, ami arra utal, hogy a kőzet nagyrészt impermeábilis, mert a pórustérfogat nagyrészt tapadó vízzel van kitöltve.

5. A repedezett kőzetek fajlagos elektromos ellenállása

5.1. A repedezett kőzetek fajlagos elektromos ellenállásának kvalitatív leírása

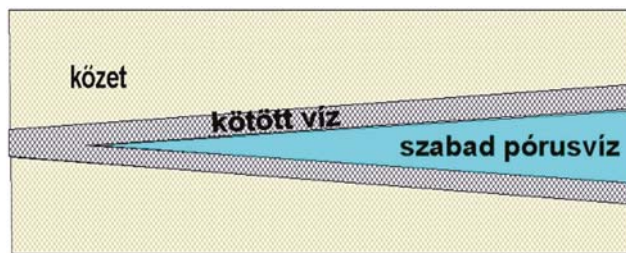
A kőzetek elektromos ellenállása repedezett kőzetekben a repedezettséget és az agyagásványos bontást mutatja ki. Ez alól kivételt csak a vezető, illetve félvezető ércásványokat tartalmazó kőzetek jelentik, ugyanis a kőzetalkotó ásványok általában szigetelők, ami azt jelenti, hogy elektromos ellenállásuk 10^6 ohmm-nél is nagyobb, sőt inkább a 10^9 – 10^{11} ohmm tartományba esik (Egerer-Kertész 1993). Ezzel szemben még az üde, bontatlan kristályos kőzetek fajlagos elektromos ellenállása is gyakorta jóval alacsonyabb ennél,

pár ezer ohmm. Általában még a legnagyobb fajlagos ellenállású kőzetek ellenállása sem nagyobb pár százezer ohmm-nél. Ennek az ellentmondásnak a feloldása a mikrorepedezettség vezetőképességet növelő hatásában rejlik.

A mikrorepedéseket általában kötött víz tölti ki. Elektromos szempontból tehát a bontatlan (üde) mátrixot szigetelőnek, vagyis végtelen ellenállásúként kezelhetjük, így az elektromos vezetőképesség, ha az agyagásványos bontástól eltekintünk, lényegében csak a porozitás nagyságának, a pórusok térbeli eloszlásának és a póruskitöltő folyadék vezetőképességének függvénye.

A póruskitöltő folyadék eredő elektromos ellenállása állandó fajlagos szabadfolyadék-vezetőképesség mellett is az átlagos repedésméret függvénye, mert a kőzetek belső felületén nagy ionkoncentrációjú, adszorpciósan kötött vízréteg alakul ki.

Az adszorpciós kettős réteg kialakulása az ásványok felületén jelen lévő lekötetlen vegyértékekből és a víz poláros tulajdonságaiból adódik. Ez főleg az agyagásványokra jellemző, ám kisebb mértékben mindenhol jelen van. A kőzetfelületeken mindig található rácshiba eredetű felületi töltések. Az agyagásványok a kristályrácsban található Si–Al helyettesítések miatt negatív töltésűek, ezért a külső felületükön nagy mennyiségű kationt kötnek meg. A negatív töltések és a közvetlenül a felülethez legközelebbi, ahhoz kapcsolódó kationok alkotják a Helmholtz-féle kettős réteget. A Helmholtz-féle kettős réteg azonban csak durva közelítés, mert a kationokat polarizált vízmolekulákból álló szolvátburok veszi körül. A szolvátburokkal körülvett kationokból álló réteg a Dual Water modell (Clavier et al. 1977)

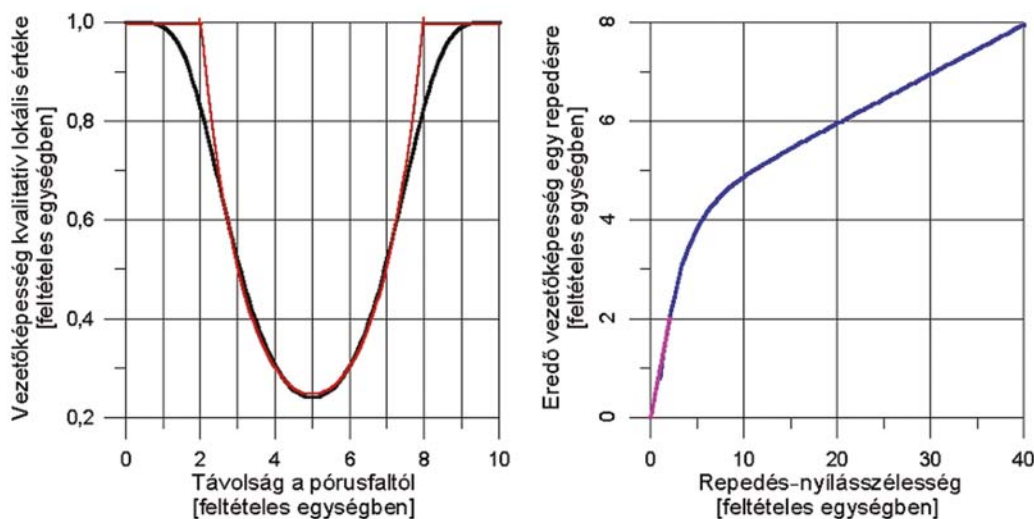


6. ábra A repedésvastagság hatása a kötött víz mennyiségére

Figure 6 The effect of fracture aperture on the quantity of bound water

Stern-rétege. Az ionatmoszférával övezett kationok jóval nagyobb helyet foglalhatnak el, mintha csak a nélkül lennének jelen. Ezért egy rétegben nem tudják kiegyenlíteni az ásványok felületi – az agyagásványok esetében negatív – töltését. Ennek elektromos kiegyenlítése miatt kapcsolódik kifelé a Dual Water modellben feltételezett Gouy–Chapmann-réteg, amely a tényleges adszorpciósan kötött réteg. A Stern-réteget és a Gouy–Chapmann-réteget együtt nevezik adszorpciósan kötött kettős rétegnek.

A többletkationok nagy koncentrációja miatt az adszorpciósan kötött víz vezetőképessége jóval (egy-két nagyságrenddel) nagyobb, mint a szabad vízé. Ennek következtében a kőzet eredő elektromos vezetőképességét az adszorpciós kettős réteg határozza meg (Dual Water modell, Clavier et al. 1977). Az adszorpciós kettős réteg vastagságát, ha szabad folyadék is van jelen, a felületi töltéssűrűség és a szabad folyadék ionkoncentrációjának aránya, valamint a hőmérsékletből eredő ionmozgékonyaságbeli különbségek szabják



7. ábra A vezetőképesség változása állandó repedés sűrűség és változó porozitás mellett. Jelmagyarázat: A(a) – a pórusfaltól mért távolság (relatív egység), B(b) – vezetőképesség (relatív egység), C(a) – repedés szélesség (relatív egység), D(b) – effective vezetőképesség egy repedésre (relatív egység) X tengely: 1 feltételes egység $\approx 0,005\text{--}0,1 \mu\text{m}$ (a szorosan vett adszorpciós réteg $0,01 \mu\text{m}$ alatti vastagságú), Y tengely: 1 feltételes egység \approx az adszorpciós réteg (maximális) vezetőképessége. A 6a ábrán a pórus vagy repedésfalától való távolsággal a vezetőképesség folyamatosan változik (fekete vonal), ennek közelítő modellje, hogy a vezetőképesség az adszorpciós rétegen belül állandó (piros vonal)

Figure 7 Conductivity vs porosity with constant fracture density and varying porosity. Legend: A(a) – distance from the porus wall (relative units), B(b) – qualitative conductivity (relative units), C(a) – fracture aperture (relative units) D(b) – effective conductivity for one fissure (relative units). 1 relative unit on X axis $\approx 0.005\text{--}0.1 \mu\text{m}$ (the thickness of the adsorption layer is under $0.01 \mu\text{m}$). On Fig. 6a the conductivity changes with distance from the fissurewall continuously (black line), the red line is an approximation of the black line, i.e. conductivity considered to be constant inside the adsorption layer

meg. Az adszorpciós kettős réteg vastagsága tehát, ha minden egyéb fizikai paramétert rögzítünk, állandónak tekinthető. Az adszorpciósan kötött réteg összterfoga 0,1 mikron vastagságúnak feltételezett agyagpikkelyek esetén körülbelül 10–15% porozitásnak felel meg.

A szubkapilláris vizek az egyes agyagásványhalmazok közt már nem igazán számíthatók magához az anyaghoz, mivel ezek mennyisége az anyag állagától, tömörödöttségétől is függ, tehát a litológiai számításoknál célszerű a porozitáshoz számolni.

Az elektromos ellenállást kialakító másik tényező az elektromos vezetés úthossza, amelyet az áramút tekervényessége, a *tortuozitás* határoz meg.

Állandó porozitás mellett, ha a repedések mérete jóval nagyobb, mint a kötött vízréteg vastagsága, akkor minél nagyobb a repedések száma, annál nagyobb a fajlagos felület, és annál nagyobb a vezetőképesség.

Ha a kötött vízréteg vastagsága egy nagyságrendbe esik a repedések nyílásszélességével (mikrorepedések), akkor a tortuozitásváltozások hatása dominál inkább (6. ábra).

Az utólagos, nem vezető ásványkiválások (kalcit, kvarc) az eredetileg egységes vezető síkként leírható repedést tekervényes póruscatorna-rendszerre változtatják. A repedések felszínén található mikroegyenletlenségek miatt az ezekkel összemérhető kis repedés-nyílásszélességek tartományában a nyílásméret-csökkenés lényegében hasonló eredményre kell vezessen, mint a mineralizáció esetében, vagyis a tortuozitás erőteljes növekedésére. A döntően csak mikrorepedéseket tartalmazó kőzetben az elektromos ellenállás erősen nő az átlagos nyílásszélesség kis csökkenésénél is. A kristályos kőzetekben a mélységgel növekvő rétegerheléses nyomás hatására a mikrorepedések nyílásszélessége csökkenhet, így emiatt nő a tortuozitás és ezzel a fajlagos elektromos ellenállás.

5.2. A repedezett kőzetek fajlagos elektromos vezetőképességének kvantitatív modellje

A szemcseközi porozitású kőzetekhez hasonlóan a repedezett kőzetekben is ugyanazokkal a fizikai jelenségekkel kell számolni, vagyis érvényes kell legyen a Dual Water modell. Egy repedés falától távolodva a távolsággal fordítottan arányosan változik a vezetőképesség (7. ábra).

A Dual Water modellben feltételezett, pórusfalhoz közeli redukálhatatlan kötöttvíz-réteget a modellszámításban konstans vezetőképességűnek lehet feltételezni¹³⁾, és csak azon kívül csökken a többlet-ion-koncentráció exponenciális függvény szerint. Az alábbi képlettel írható le a 7.a ábrán piros görbével jelzett vezetőképesség-változás egy repedésen belül:

$$\sigma = \sigma_2, \text{ ha } x < x_a \text{ és } x > D - x_a, \\ \sigma = (\sigma_2 - \sigma_1) \{ a \exp[-(x - x_a)/b] + a \exp[-(D - x_a - x)/b] \}, \text{ ha } x_a < x < D - x_a, \quad (6)$$

ahol σ_2 a kötöttvíz-réteg vezetőképessége, σ_1 a szabadon mozgó víz vezetőképessége, x a repedés falától mért távolság, x_a a kötöttvíz-réteg vastagsága, D a repedés vastagsága.

Ez a feltételezés egyenértékű azzal is, hogy a kis repedésvastagságoknál a redukálhatatlan kötöttvíz-réteg összemérhető a repedésvastagsággal, és a redukálhatatlan réteg valószínűségi eloszlása egy feltételezett átlagértékkel jelenik meg.

A pórusfaltól távoli szabad víz vezetőképességét szintén konstansnak lehet venni a modellszámítás során.

Egy repedés elektromos vezetőképessége, ha a repedést vékony lemezként modellezzük, a felületi adszorpciós kettős réteget is figyelembe véve, a repedésvastagság függvényében a 7.a. ábrán látható függvény integráljával számítható,

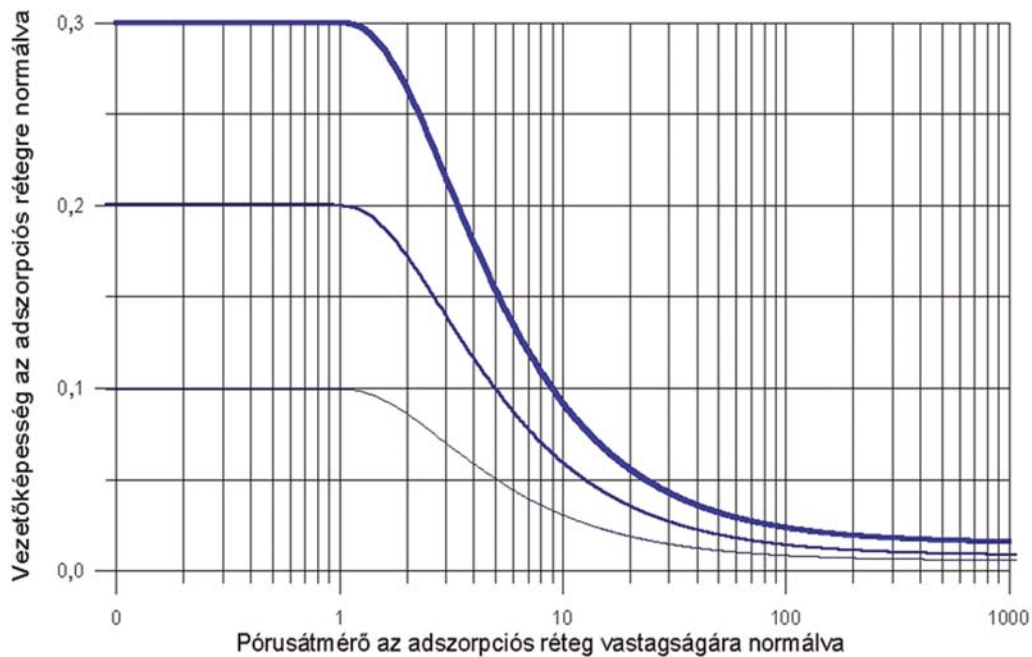
$$\sigma_e = 2(\sigma_2 - \sigma_1) \int_{x_a}^{D/2} a \exp[-(x_a - x_d - x)/b] + \sigma_0 2x_d, \text{ ha } D > 2x_d, \quad (7)$$

ahol σ_e egy repedés eredő elektromos vezetése, és a 7.b ábra szerint alakul. A modellezési görbe szerint a vékony repedéseknél jóval erősebb a vezetőképesség vastagságfüggése, mint a vastagabbaknál, vagyis a tortuozitás hatásának feltételezése nélkül is egy repedést tekintve a vezetőképesség–vastagság függés két jól elkülöníthető szakaszra bomlik. A vékony repedések szakaszán a vastagság összemérhető az adszorpciós kettős réteggel – melynek feltételezett vezetőképessége egy-két nagyságrenddel nagyobb, mint a szabad vízé –, míg a második szakaszon az adszorpciós kettős réteg hatása elhanyagolható. Az ábrázolt függvény monoton növekvő, mert egy repedésről van szó, és ezért a nyílásszélességgel együtt nő a porozitás is. A tapasztalattal összhangban van, hogy a feltételezhetően főleg nagy nyílásszélességű repedéseket tartalmazó, mechanikailag bontott kőzetekben csak mérsékelt vezetőképességbeli különbségeket jelez előre a repedés-nyílásszélesség változásával. Más szóval ez azt jelenti, hogy a sok nyitott repedést tartalmazó, de szeizmikus szempontból egybefüggő nyíróhullám-terjedésre alkalmas közeg és a hasonló belső fajlagos felülettel rendelkező reziduális törmelék közt az elektromos vezetés szempontjából alig van különbség. (Az utóbbira jellemző akusztikus hullámterjedési sebesség jóval kisebb, mint az üde, bontatlan kőzeté.) Ha az adszorpciós kötött réteg és a szabad folyadék határán ugrásszerű átmenetet tételezünk fel, akkor a vezetőképesség állandó porozitás mellett:

$$\sigma = \Phi \left[\frac{f_a - 2d_a}{f_a} \sigma_1 + \left(1 - \frac{f_a - 2d_a}{f_a} \right) \sigma_2 \right] / f(t), \quad (8)$$

ahol f_a a repedés vastagsága, d_a az adszorpciós kötött réteg vastagsága, σ_1 a szabad folyadék vezetőképessége, σ_2 a kötött folyadék vezetőképessége, $f(t)$ tortuozitással arányos mennyiség.

Az $f(t)$ mennyiséget első közelítésben az $f(t) \sim f_a / (f_a - 2d_a)$ kifejezéssel arányosnak lehet tekinteni, vagyis a repedés nyílásszélességének növekedésével csökken a tortuozitás. Az adszorpciós réteg vastagsága alatti nyílásszélességű repedések esetén a kisebb nyílásméretőjűnek a nagyobb tortuozitás miatt egyben nagyobb a várható elektromos ellenállása is.

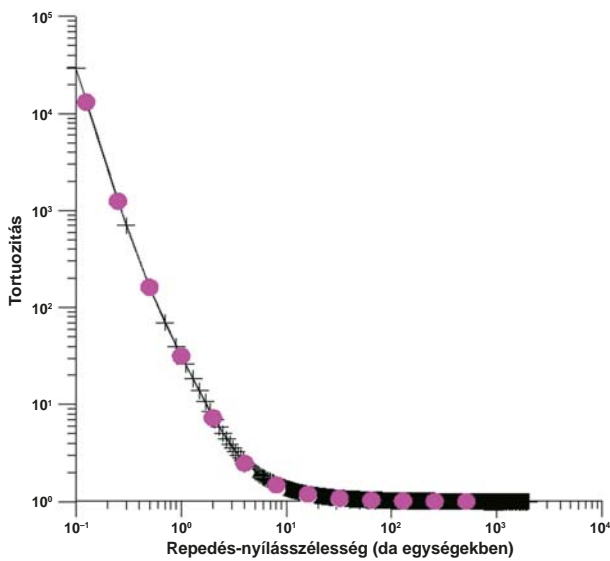


8. ábra | Vezetőképesség az átlagos pórusátmérő (repedésvastagság) függvényében konstans porozitás mellett. Jelmagyarázat: A görbék a hozzájuk tartozó porozitásban különböznek. A – repedés-nyílásszélesség feltételes egységeiben, a feltételes egység az adszorpciós kötött vízréteg vastagsága, B – pórus- (hézag-) térfogat.)

Figure 8 | Conductivity as a function of the average pore diameter (fracture aperture) under constant porosity. Legend: The curves differ from each other in their porosity, A – fracture aperture in relative units, 1 relative unit is the thickness of the adsorption layer, B – pore volume

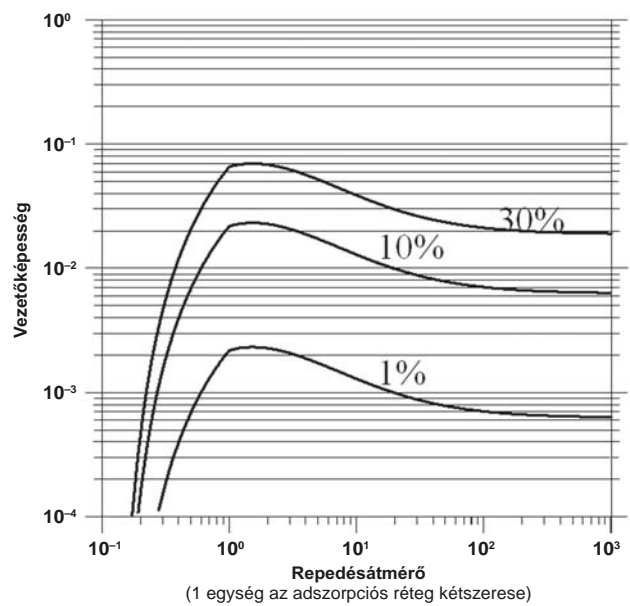
A 8. ábrán a vezetőképességet a repedésvastagság (f_a) függvényében – a d_a , σ_1 , σ_2 , $f(t)$ mennyiségeket konstansnak véve – ábrázoltuk, a görbék paramétere a porozitás.

Látható, hogy egy bizonyos pórusátmérő felett rögzített porozitásnál a vezetőképesség konstanshoz tart, amelyet a szabad víz vezetőképessége határoz meg. Az adszorpciós



9. ábra | Az áramút tekervényessége a repedés-nyílásszélesség függvényében

Figure 9 | Tortuosity versus fracture aperture



10. ábra | Vezetőképesség a repedésátmérő függvényében konstans porozitás mellett a tortuozitás hatását figyelembevéve. Jelmagyarázat: A görbék a hozzájuk tartozó porozitásban különböznek, A – repedésnyílásszélesség feltételes egységeiben, a feltételes egység az adszorpciós kötött vízréteg vastagsága, B – pórus- (hézag-) térfogat

Figure 10 | Conductivity vs. fracture aperture with constant porosity and considering the effect of tortuosity too. Legend: The curves differ each other in their porosity, A – fracture aperture in relative units, 1 relative unit is the thickness of the adsorption layer, B – pore volume

réteg kétszeresénél kisebb átmérők esetében az egyszerűsített modell szerint a kitöltő folyadék ekvivalens ellenállása konstansnak adódik, azaz az áramút hosszának növekedését (tortuozitás) csak konstansként vesszük figyelembe. Feltehető azonban, hogy kis repedésvastagságok esetén r repedés nem írható le egyszerűen egy vezető síkkal, hanem az egyenetlenségek miatt valójában egy bonyolult, tekervényes áramútrendszerré változik. Ebben az esetben feltehető, hogy a tortuozitás valamilyen hatványfüggvény szerint növekedik a repedésvastagság csökkenésével.

$$f(t) \sim [(x_a + x_d)/x_a]^n; \quad n = 2, \quad (9)$$

ahol n a tortuozitást jellemző kitevő.

Ezzel feltételezzük, hogy a tortuozitás a végtelenhez tart, miközben a repedés-nyílásszélesség tart a 0-hoz (9. ábra)

Ezt a vezetőképeség képletébe helyettesítve kapjuk, hogy a vezetőképeség az adszorpciós réteg kétszeresénél kisebb repedésvastagságok esetén tart a végtelenhez, ami ebben az esetben a repedésmentes kőzetek szigetelő mivoltára utal (10. ábra).

6. A repedéssűrűség összevetése mért és számított fizikai paraméterekkel

A lyukfalleképező eszközök indikációit többféle módon lehet kvantitatívan is összehasonlítani a többi mélyfúrás-geofizikai módszerrel. Ehhez azonban a képet mélység szerinti

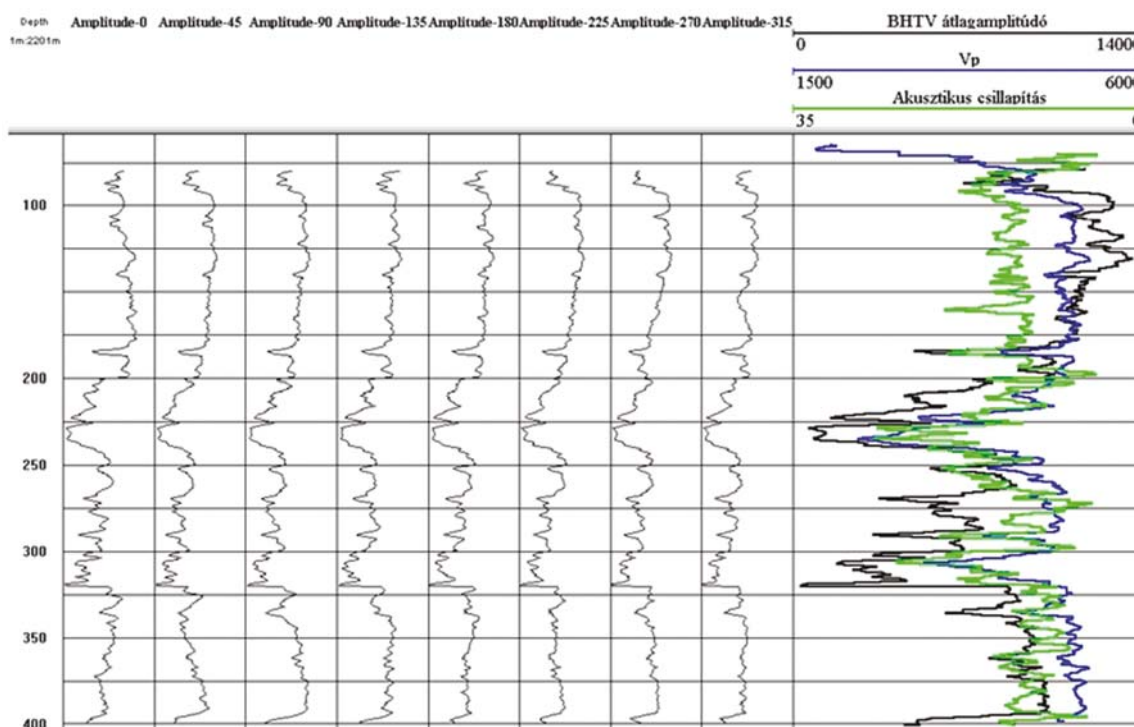
görbévé kell átalakítani. Az akusztikus BHTV esetében az első kézenfekvő lehetőség, hogy az egyes alkotók mentén felvett, a lyukfalkép elemeit alkotó amplitudógörbéket összeadjuk, átlagoljuk, majd az akusztikus sebességekkel összehasonlítjuk (11. ábra).

Az amplitudóátlag és az akusztikus hullámterjedési sebesség V_p egymásra fektetett görbéi jól korrelálnak egymással (1. ábra), ahol háttérként az amplitudóképet használtuk.

Az összehasonlítás másik lehetősége, hogy a repedésindikációkból repedéssűrűséget képzünk. A repedéssűrűség-szelvényt a BHTV *tadpole*-kép összes repedésindikációja alapján állítjuk elő úgy, hogy az 1 m-re eső repedészámot ábrázoljuk a mélység függvényében. A BHTV repedéssűrűség ugyanakkor az RQD¹⁴⁾-t mint a repedezettséggel arányos mennyiség és a karotázisparaméterek kapcsolatát is vizsgáltuk. A repedéssűrűséget a repedések kategóriái szerint több változatban is el lehet készíteni (12. ábra)¹⁵⁾. Az ábrán a repedéssűrűség-szelvények közül a teljes szinuszt adó, vagyis körbefutó repedések és az elektromos ellenállásgörbe a leginkább hasonló lefutásúak.

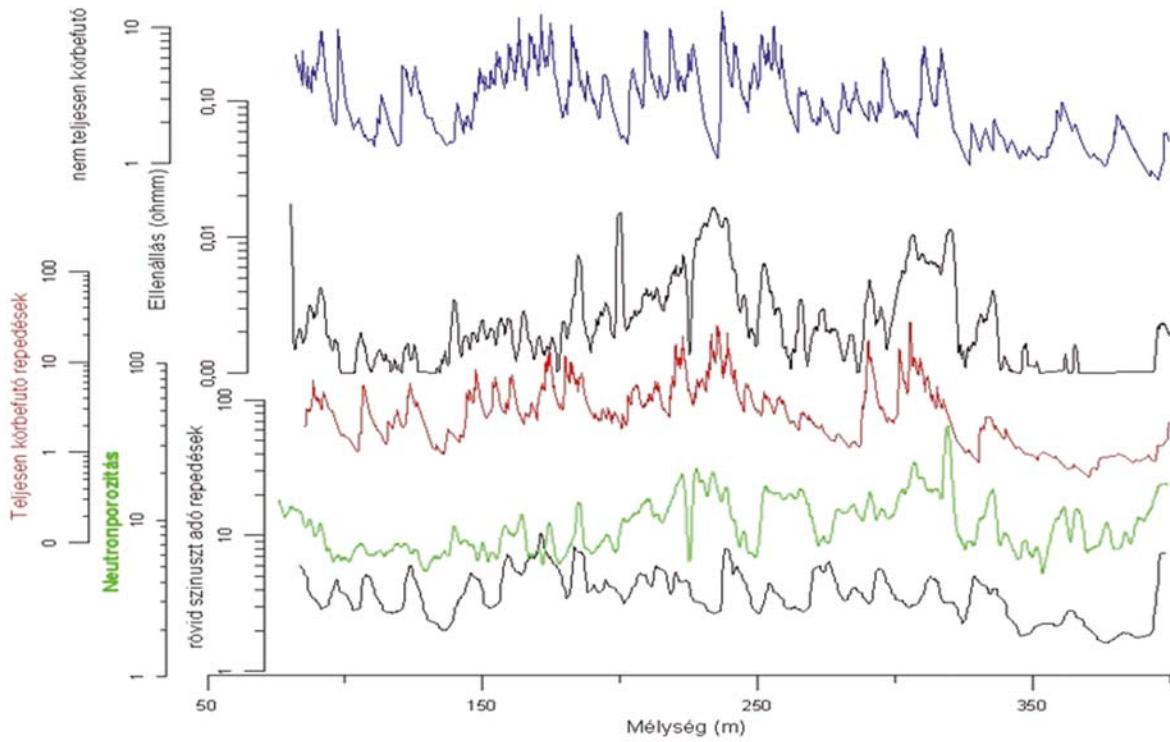
Azok az üledékes kőzetek, amelyekben BHTV-vel lehet mérni, gyakorlatilag a repedezett kőzet kategóriájába tartoznak. A különbséget az jelenti, hogy az eredeti rétegzettség is jelentkezik a lyukfalleképező módszereknél, vagyis olyanok, mintha irányított szövetük lenne. Ezzel a jelenséggel például a gránithoz hasonlóan szeizmikusan kemény¹⁶⁾ Bodai Aleurolit Formációban számolni kell.

Az összehasonlításnál elsősorban a kőzet porozitásával valamilyen formában összefüggő fizikai paramétereket, il-

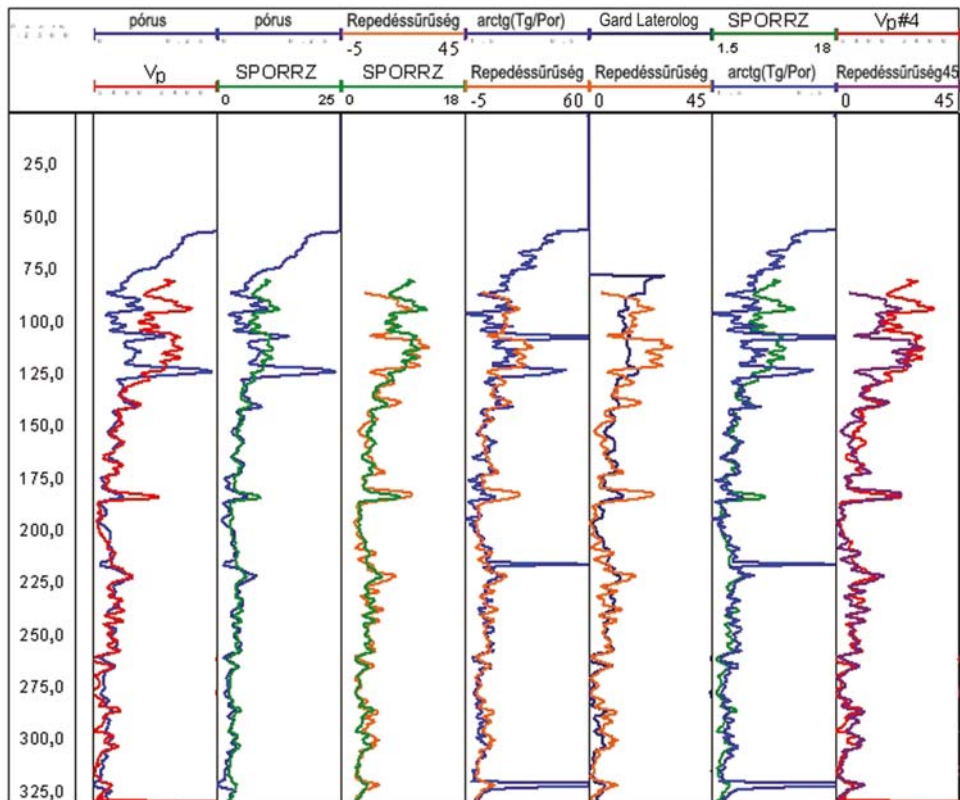


11. ábra | Különböző azimutirányú BHTV amplitudógörbék és az átlagamplitudó összehasonlítása az akusztikus sebességgel és csillapítással

Figure 11 | Amplitude curves of BHTV belonging to different directions and the average amplitude compared to the acoustic velocity and attenuation



12. ábra | Különböző kategóriájú repedéssűrűség-szelvények és hagyományos mérések összehasonlítása
Figure 12 | Comparison of fracture density curves of different categories with conventional well log measurement curves



13. ábra | BHTV repedéssűrűség-szelvények és különböző mért és számított porozitáskövető görbék összehasonlítása
Figure 13 | Correlation of fracture density with some measured and calculated porosity follower logs

letve az azokból származó mennyiség és a repedéssűrűség összefüggését vizsgáltuk. A teljesség kedvéért a repedezettség fizikai paramétereire nemcsak a többi paraméter repedéssűrűséggel való, hanem azok egymás közötti kapcsolatait is elemezzük. Tekintetbe véve, hogy a tényleges repedéstér fogat az üde, bontatlan, szabad szemmel porozitásmentes gránitban elhanyagolható (1% körüli) kell legyen, a nukleáris porozitáskövető módszerekből keresztldiagramon felvett paraméterek alapján számolt porozitások túl nagyok, gyakran 10% feletti.

A BHTV-mérésből származtatott repedéssűrűség és a nukleáris mérésekből számított porozitás (a neutronporozitásból, valamint a sűrűségből számított eredő porozitás) a felszíni hatásoktól nem érintett, üde gránitban ennek ellenére jól korrelálnak egymással (13. ábra). Figyelembe véve, hogy a neutronporozitás korrelációja a sűrűséggel valódi pórusterfogatra utal, vagyis a kis repedéstér fogathoz viszonylag jelentős a mátrixporozitást növelő hatást kell feltételeznünk. Ebből következik, hogy ahol jó a görbék közti illeszkedés, ott feltehetőleg csak olyan vízmolekulákkal kitöltött póruster létezik, amely a repedésrendszerhez valamilyen formában kapcsolható. A tényleges repedésporozitással együtt ez a póruster tekinthető a teljes vagy totálporozitásnak, amely egyaránt magában foglalja a kötött vizet és a szabad póruszvizet is. Az így létrejött porozitás nagy részét a keskeny repedések esetében feltehetően kötött víz tölti ki, mivel ez főleg a repedésekkel kapcsolatos agyagosodáshoz tartozik, a tényleges repedéstér fogat csak kis része a teljes pórusternek. Lényegében ennek a megnövekedéséhez, a mikrorepedezettséghez és az azzal kapcsolatos agyagos elváltozásokhoz köthető a sebesség nagyobb arányú lecsökkenése is a bontott zónákban. A különböző mért és számított görbék az üde gránitban csak kevéssé térnek el egymástól.

A V_p görbe menete 125 m-nél kisebb mélységben tér el jelentősen a számított porozitásától. Ezért ha a teljes harántolt gránit anyagú intervallumot kívánjuk leírni egyetlen egyenlettel, akkor a két paraméter közti összefüggés nem lehet lineáris, vagyis nem érvényes a Wyllie-egyenlet (13. ábra, bal szélső oszlop). Alternatív megoldásként a mállási kéregre az üde gránittól eltérő paraméterekkel lehet még felírni az átlagidő-egyenletet (125 m-nél kisebb mélységek). A módosított Raymer-egyenlettel számolt totálporozitás-görbe (SPORRZ) is csak 125 m mélységig fektethető jól a radioaktív mérésekből számított effektív porozitással.

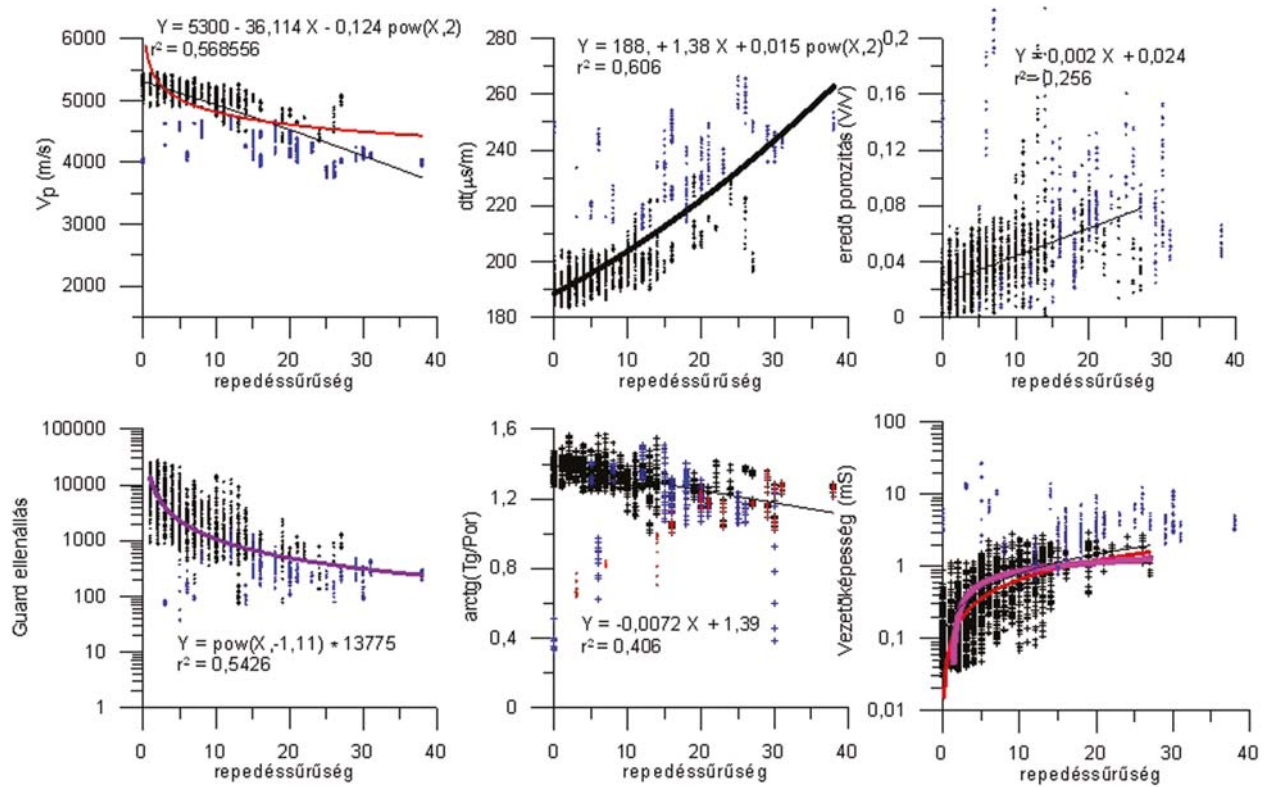
Hasonlóan alakul egymáshoz képest a repedéssűrűség és az akusztikus porozitás viszonya is, azonban még a mállási zóna alsó részében is jó illeszkedés van a görbék közt (13. ábra, balról 3. oszlop). Mindez arra utal, hogy a mállási kéregben a kimutatható repedéssűrűség jobban felerősödik, mint amely a számított effektív porozitásból adódna. Ebből következik, hogy a repedéssűrűség és a V_p görbe (13. ábra, jobb szélső oszlop) illeszkedése is sokkal jobb, mint a porozitás- V_p páré.

Az elektromos ellenállásgörbe (Guard Laterolog) menete a mállási kéregben jóval közelebb áll a kémiai bontottsági index ($\arctg(Tg/Por)$, ahol Tg a természetes gamma, Por a neutronporozitás)¹⁷⁾ görbe menetéhez (ennek kis értékei je-

lentik a nagyobb agyagoságot), mint a repedéssűrűségéhez (Zilahi-Sebess 2004). Az elektromos ellenállás és a bontottsági index közt általánosságban jobb a kapcsolat, mint az ellenállás és a repedéssűrűség, vagy az ellenállás és a V_p közt. Ez megfelel az elektromos vezetőképesség repedésfelületekkel arányos jellegének. Visszautalva megint az 1. ábrára, ezt tükrözi az elektromos ellenállás és a bontottsági index közti jó korreláció is. A mállási kéregben, ahol zömében szélesebb repedések is vannak, viszonylag sok kis vezetőképességű póruskitöltő fluidum is jelen van. A kémiai bontottsági index jó korrelációja az ellenállással éppen abból származik, hogy a vezetőképességet a mállási kéregben ugyanúgy a felületek agyagásványos elváltozása hozza létre, mint a neutronporozitás növekedése és a radioaktív anyagtartalom közti kapcsolatot.

Az egész vizsgált tartományban (üde gránit és mállási kéreg) a jó kapcsolatok lényegében lineáris jellegű vagy azzá transzformálható kapcsolatot jelentenek. Ilyennek tartom az akusztikus sebesség és a repedéssűrűség közti kapcsolatot. Ennek fizikai tartalma, hogy a hullámterjedési sebesség nagysága elsősorban a közetmátrixban megtehető úthossz átlagos nagyságától függ, és csak a kis porozitásoknál van lineáris összefüggés a porozitás és a V_p közt. A bontott zónákban a sebesség lecsökkenése nagyobb arányú, mint amely a repedéssűrűség alapján várható, ami feltehetően a nyitott repedésekkel kapcsolatos. A nyitott repedések és az agyaggal kitöltött repedések közös tulajdonsága a szilárd mátrix folytonosságának a megszakadása, illetve az abban folyamatosan megtehető út lerövidülése. Az elektromos ellenállás és a V_p közti kapcsolat a mállási kéregben különbözik az üde gránitban tapasztalhatóétól. Felvetődik a kérdés, hogy lehet-e a fajlagos akusztikus hullámterjedési idő egyszerre arányos a repedéssűrűséggel és a totálporozitással is. Ez nem lenne lehetséges anélkül, hogy a repedéssűrűség ne lenne arányos a totálporozitással. Amint ez nem így van, vagyis a repedések átlagos vastagsága eltérő egymástól, két szakaszon két különböző összefüggés lesz érvényes a repedéssűrűség és a repedések által képviselt térfogat közt. (Lényeges, hogy amit repedéssűrűségként kezelünk, az valójában csak a mérőeszközünkkel kimutatható mérettartományba eső repedések sűrűsége.)

A keresztldiagramok (14. ábra) alapján megállapított regressziós koeficiens szerint is a legszorosabb összefüggés az akusztikus dt , illetve az abból számított V_p terjedési sebesség és a repedéssűrűség közt van. Majdnem ugyanilyen jó, bár ellentett korreláció tapasztalható a repedéssűrűség és az elektromos ellenállás közt, illetve annak reciproka, a vezetőképesség és a repedéssűrűség közt. A legrosszabb regressziós összefüggés a neutronporozitásból és sűrűségből számított eredő porozitás és a repedéssűrűség közt van, ám ez is határozottan felismerhető. Meg kell említeni, hogy a keresztldiagramok szerinti korrelációt nagyban befolyásolja az információszerezés módja is. Ez közelebbbről azt jelenti, hogy a korrelációt befolyásolja a szelvények vertikális felbontóképessége is. Ezt figyelembe véve feltételezhető, hogy a valóságos összefüggések szorosabbak, mint amelyek regressziókoeficiensből adódnának. Például a repedés-



14. ábra A repedéssűrűség és néhány mért, illetve számított fizikai paraméter keresztábrája (A kék szín a mállási kéreg pontjait jelöli)

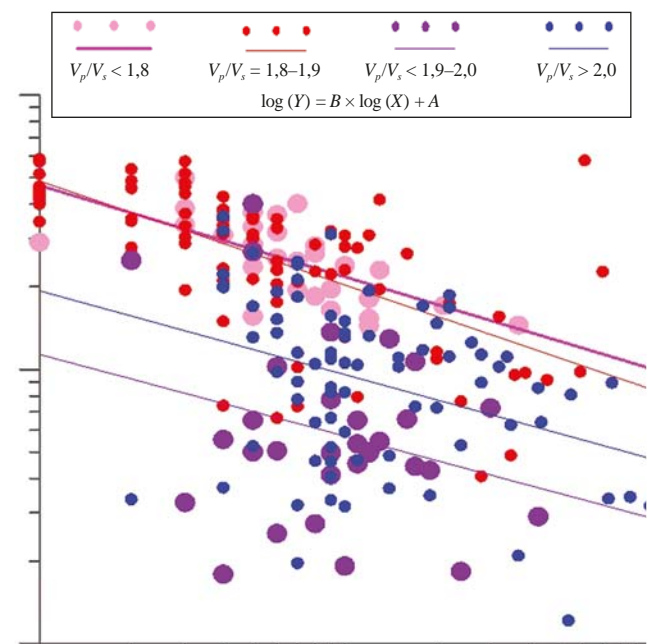
Figure 14 Crossplots of fracture density with some measured and calculated physical parameters (The points of altered zone are indicated with blue colour)

sűrűség-szelvény eleve 1 méteres átlagokból álló pontokból áll, ami egyben a mintavételi sűrűséget is jelenti. Ehhez a legközelebb az akusztikus szonda átlagolása áll, habár a mintavételi sűrűség 10 cm-es, ami 10 cm-enkénti 2 m-es átlagokat jelent, amelyek elvileg is különbözhetnek egymástól egy méteren belül, amíg 1 m-re csak egyetlen repedéssűrűség-adatunk van. További, a szórást növelő hibaforrás lehet, ha bármelyik szelvénynek van valamikora saját zaj jellegű hibája is. Az eredő (totál)porozitás-repedéssűrűség összefüggésnél jobb regressziókoeficiensű a kémiai bontottsági index – repedéssűrűség összefüggés. Ennek legfőbb oka, hogy a sűrűség-szelvényből számított porozitás relatív bizonytalansága nagyobb, mint a természetes gammáé, ami kihat a regresszióra is.

7. A repedezettségi jellemzők hatása a V_p/V_s elektromos vezetőképesség kapcsolatára

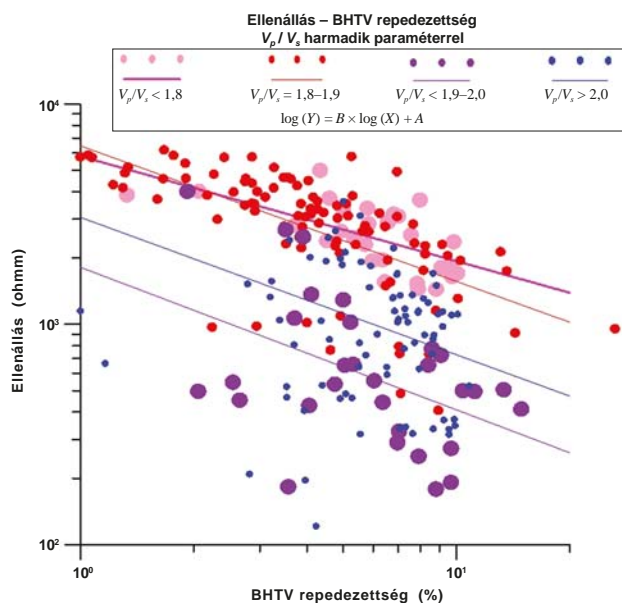
Változatlan repedéssűrűség és vékony repedések esetében a repedés-nyílásszélesség növekedésének hatására a nyíróhullám-sebességnek le kell csökkennie, ami miatt a V_p/V_s aránynak meg kell nőnie, miközben az elektromos vezetőképességnek meg kell nőnie. Ez utóbbi az elektromos vezetőképességi modell következménye (7. ábra).

Ezeket az elvi modellekből eredő következtetéseket a BHTV-mérésnek köszönhetően közvetlenül gyakorlati szel-



15. ábra Fajlagos elketromos ellenállás az RQD magtőredezettségi jellemző függvényében

Figure 15 Resistivity versus RQD

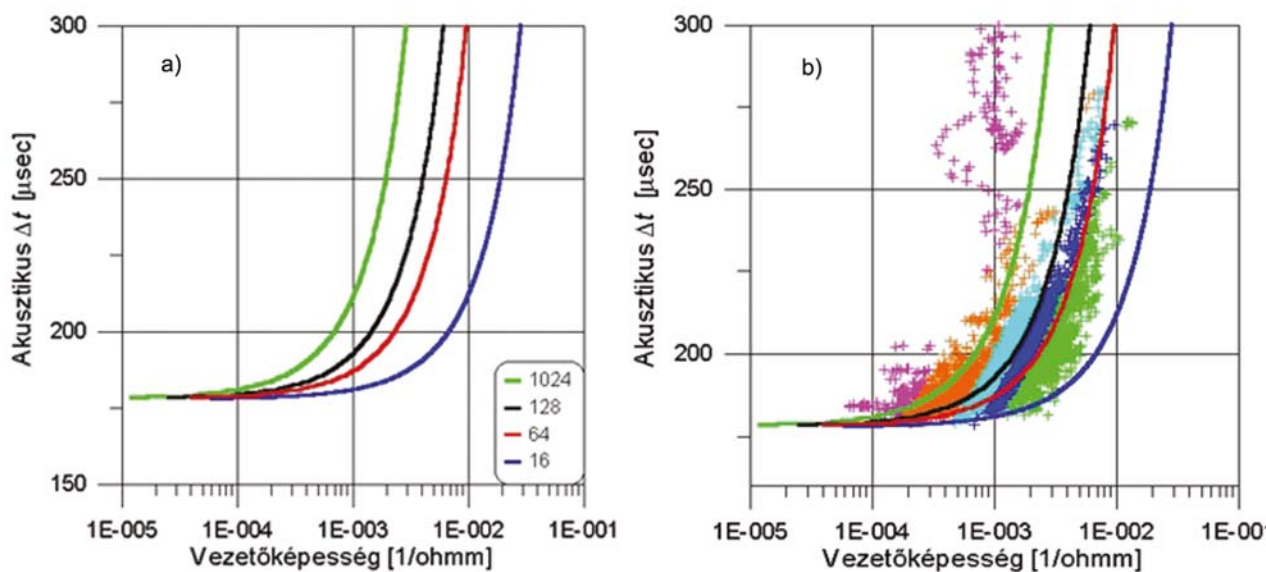


16. ábra Fajlagos elektromos ellenállás a BHTV-vel megállapított repedeztűrűség függvényében

Figure 16 Resistivity versus fracture density from BHTV evaluation

vény példájával, illetve keresztábrával lehet alátámasztani. A keresztábrák az elektromos vezetőképességet az RQD (ahol RQD egy speciális közettagoltsági mérték) tagoltsági értékek, illetve a BHTV-ből származó repedeztűrűség függvényében ábrázoltam (15. és 16. ábra). A harmadik paraméter a V_p/V_s arány, amelyet színkóddal jelenítettem meg. Ahol a V_p/V_s érték nagyobb ugyanannál a repedeztűrűségi, illetve közettagoltsági értéknél, nagyobb az elektromos vezetőképesség is.

A 15. és 16. ábra alapján a lényeg, hogy a kisebb V_p/V_s -ek kisebb vezetőképességhez, vagyis nagyobb ellenállásokhoz tartoznak. A repedeztűrűség és a V_p/V_s arány közt kvalitatíven elvileg egyenes arányos, bár nemlineáris kapcsolat tételezhető fel. Az ábrán látható elektromos ellenállásbeli nagy változást a repedeztűrűség nagy változása okozza, ami a 3. ábra és a 17. ábra modellgörméit igazolja, ugyanakkor viszont felhívja a figyelmet a V_s (nyíróhullám-)sebesség megmérésének fontosságára is. A vékony, összességében csak kis porozitást képviselő repedéseknel a rögzített V_p/V_s arány a repedések repedeztűrűségétől független, azonos minőségüket (a repedések egyedi geometriai paraméterei azonosnak tekinthetők) jelenti, amiből következően a vezetőképesség a repedeztűrűségtől rögzített vsatagság mellett csak lineárisan függ¹⁸⁾. Ez az eredmény igazolja azt a feltevést, hogy önmagában sem a BHTV-vel kiértékelt repedeztűrűség, sem a magtoredeztség nem hozható közvetlen kapcsolatba az egyéb fizikai paraméterekkel. Ezzel szemben az ismeretük nélkül az elektromos ellenállás és az akusztikus sebesség viszonyára – lényegében a hidrogeológiai viselkedésre – tett megfontolások (repedésvastagság, vízáteresztő-képesség) nem lennének jól alátámaszthatóak. Visszaülva a 13. ábrára a repedeztűrűség jó kapcsolatát a fizikai paraméterekkel a 125 m alatti szakaszon – elsősorban az akusztikus és az ebből számított akusztikus porozitással – a feltehetően az észlelt repedeztűrűség és a totálporozitás közti jó korreláció biztosítja. Ezeket a megfontolásokat támasztja alá a karotázsmérésekből empirikus képlettel becsült szivárgásitényező-értékek (Zilahi-Sebess et al. 2004, 2007) jó korrelációja a rövid idejű hidraulikai tesztek (gyorsteszt) (Molnár et al 2000) kapott szivárgásitényező-értékekkel.



17. ábra A vezetőképesség és az akusztikus Δt elvi összefüggése. A görbék paramétere a repedeztűrűség. A b) ábrán a színek a Δt /vezetőképesség konstans értékek közti tartományait jelentik.

Figure 17 Principle correlation of conductivity and acoustic Δt . The parameter of the curves is the fissure aperture. On panel b) colours indicate zones between constant average values of Δt /conductivity

8. Az elektromos ellenállás és a szonikus hullámterjedési sebesség kapcsolatára alapozott lokális kőzetmodell

Az elektromos ellenállás – porozitás- és repedés-nyílászélességfüggő – modelljéből, valamint az akusztikus Δt porozitásfüggéséből kiindulva kapjuk meg a két módszer kollektív modelljét, amelyet paraméteres görbeseregként ábrázoltam.

A vezetőképesség és az akusztikus hullámterjedési idő közti modellösszefüggés a 17.a ábrán látható. A modellösszefüggést paraméteres görbeseregként ábrázoltam úgy, hogy a Δt esetében a mátrixra jellemző, 1 m-re vonatkoztatott terjedési időt konstansnak és kizárólag a porozitás nagyságától függőnek tekintjük (3. ábra). Ha a Δt -t a Wyllie-féle átlagidő-egyenlet szerint számoljuk, akkor az ábrázolás a vezetőképesség–porozitás összefüggésnek csak a kis Δt -k (nagy sebességek) esetén felel meg pontosan. A neutronporozitás– Δt keresztidiagramnál megállapítottak szerint a kisebb sebességeknél egyértelműen a Raymer-egyenlethez közeleli a valóságos összefüggés. Mivel a vezetőképesség elsősorban a belső felülettől függ, a porozitás függvényében csak paraméteres görbeseregként ábrázolható, mert a különböző repedésvastagságokhoz ugyanannál a porozitásnál különböző nagyságú belső felületek tartoznak.

A görbék modellparamétere a repedésvastagság. Ugyanannál a fajlagos akusztikus hullámterjedési időnél a legnagyobb repedésvastagság mellett áll elő a legkisebb fajlagos vezetőképesség. A mátrixra konstans fajlagos akusztikus hullám terjedési időt feltételezve, ebben a modellben a hullámterjedési idő kizárólag a porozitástól függ. A modell-repedésvastagságot ekvivalens repedésvastagságnak lehet tekinteni, amely ebben a formában csak az elektromos vezetőképesség– Δt viszonyoknak a magyarázatához elegendő.

Az $\dot{U}h$ -22 fúrás elektromos vezetőképesség– Δt keresztidiagramjára feltéve a modell-görbesereget látható, hogy az jól illeszkedik a pontokra (17.b ábra).

Figyelem bevéve, hogy a jól vezető adszorpciós kötött réteggel összemérhető mikrorepedések elhanyagolható mértékű porozitást képviselnek csak, hatásuk az akusztikus hullámterjedésre szintén kismértékű. Ha a Δt első közelítésben csak a hézagterfogatától függ, annak geometriájától is elhanyagolható a függése. Ezzel szemben a vezetőképesség hézagterfogat-függése a vékony – csak iondús kötött vizet tartalmazó – repedéseknél jóval erősebb, mivel annak fajlagos vezetőképessége jóval nagyobb, mint a szabad vízé, és még a tortuozitás is erősebben nő a repedésnyílászélesség csökkenésével.

A vastag repedések esetén a modell szerint (17. ábra) a helyzet fordított kell legyen, vagyis az akusztikus sebesség nagymértékben változhat, miközben a vezetőképesség csak gyengén változik, hiszen a nagy vastagságú repedéseket nagyrészt a kis vezetőképességű szabad víz tölti ki.

Látható, hogy bonyolult modellmegfontolások nélkül is a mért értékekből alkotott koordinátájú pontok elhelyezkedése lényegében az elvi összefüggést követi. A valóságos modell természetesen ennél jóval bonyolultabb, hiszen az ilyen

viszonylag egyszerű kép felvázolásához számos tényezőt konstansnak kell tekinteni, mint például a hőmérsékletnek az ionmozgékonyosságra és ezáltal a vezetőképességre gyakorolt hatását, a szabad folyadék sósságát, a különböző felületek kationcsere-kapacitásbeli különbözőségét, az akusztikus tulajdonságoknál a frekvencia szerinti diszperziót.

Ezenkívül a durva egyszerűsítések közé tartozik, hogy a kristályos kőzetek esetében a porozitásnövekedés egyedüli okaként a repedés-nyílászélesség növekedését vettük figyelembe.

Az egyszerűsített modell használatát főleg azzal lehet indokolni, hogy a rögzített paraméterek valójában csak igen lassan változnak a mélység függvényében, vagyis egy több száz méteres mélységszakaszon is valóban konstansként kezelhetők.

A fenti modellmegfontolásokból következik, hogy az elektromos vezetőképesség – akusztikus terjedési idő kapcsolat alapján következtetni lehet a repedések nyitott vagy zárt állapotára is. Természetesen ilyen csak az átlagra vonatkoztatva lehet állítani, és akkor is figyelembe kell venni az ekvivalenciákat, mivel a repedések nyitott vagy zárt állapota a módszerek szempontjából nem feltétlenül esik egybe a hidrogeológiai szempontú nyitott vagy zárt állapottal. A repedések zártsága hidrogeológiai szempontból azt jelenti, hogy a repedések csak kötött vizet tartalmaznak. Figyelembe véve, hogy a jól vezető adszorpciós kötött réteggel összemérhető mikrorepedések csak elhanyagolható mértékű porozitást képviselnek, hatásuk az akusztikus hullámterjedésre szintén kismértékű, legalábbis nem nagyobb, mint amely az osztérfogatuk alapján várható.

A repedések zártsága az akusztikus módszer szempontjából valójában azt jelenti, hogy az effektív érintkező felület nagy, ezért a hullámterjedés szempontjából csak kis akadályt képeznek. A repedések nyílászélességének növekedése erőteljes mértékben csökkenti a repedések effektív érintkező felületeit, ami a kőzetváz hullámterjedési szempontból jelentős folytonossági hiányához vezet. A repedések akusztikus szempontú zártsága esetében a mikrorepedezettség jelentős hányadát olyan határfelületekként foghatjuk fel, amelyek nem csökkentik a hullám terjedési sebességét. Ennek értelmében a mikrorepedezettségnek az a része, ahol már kötöttvíz-tartalom nincs – az effektív érintkező felület –, nem vesz részt az elektromos vezetésben sem.

Ezt az állapotot csak nagy nyomás alatt, a kötöttvíz-film kiszorításával, illetve cementációval lehetne elérni. Feltételezem, hogy a már egyszer létrejött repedésből kis mélységekben a kötött víz nem távozik el, csupán a növekvő nyomás hatására, ezért a tortuozitás növekedése sem jöhet létre pusztán a repedések vastagságának a nyomás hatására való csökkenése miatt. A tortuozitás növekedés jelensége a vékony repedéseknél logikailag biztosan létezik, más-különbén a gránit ellenállása nem lehetne több ezer ohmm, más szóval a vékonyabb repedéseket eleve kisebb hosszúságúnak kell feltételezni. Az utólagos repedéskitöltések következtében előálló cementáció az eleve vékony repedéseknél biztosan megnöveli a tortuozitást, ezért a mélységgel való konszolidációs trend eredete szerint fellazulás,

vagyis az ellenállásnövekedési trend csak formájában hasonlít az üledékek tömörödésénél előálló hasonló trendhez.

Az elektromos ellenállás tehát csak abban az esetben hozható közvetlen kapcsolatba a geomechanikai paraméterekkel, ha az akusztikus hullámterjedés mintájára a repedésrendszer térfogatával hasonló a kapcsolata. Ezt támasztja alá, hogy az akusztikus nyíróhullám-sebességből és sűrűségből előállított nyírási modulus (fekete görbe) a 100 m-nél nagyobb mélységekben jól korrelál a fajlagos elektromos ellenállás logaritmusával (kék görbe), míg e felett a mállási kéreg felső részében egyértelműen eltér egymástól (18. ábra). Miközben a nyitott repedéseknél a közet nyírófeszültséggel szembeni ellenállása erősen lecsökken, az elektromos ellenállást ez jóval kisebb mértékben érinti, mivel a fajlagos felület csak kevésbé nő meg a vékony repedésekéhez képest. Az elektromos ellenállás addig lehet csak arányos a repedések térfogatával, amíg igaz az, hogy a felülettel arányos vezetőképesség egybeesik a térfogattal arányossal. Ez a mállási kéregben természetesen nem áll fenn, mivel a kötött vizen kívül szabadon mozgó fluidum is van jelen, s emiatt az ellenállás-csökkenés a nyitott repedéseknél kisebb, mint amelyre a teljes porozitásnövekedésből következtetni lehetne.

Az előzőeket támasztja alá a 18. ábra alsó részén a BHTV repedéssűrűség- és az RQD (megtöredezettség-) görbék egymásra fektetése is. A két görbe a kisebb mélységekben tér el egymástól jelentősebben. A kisebb mélységekben a feltehetően nagyobb nyílásszélességű repedéseket az akusztikus lyukfal-televízer nagyobb százalékban képes érzékelni. Ezért bár a töredezett zónák ugyanott találhatók, mint

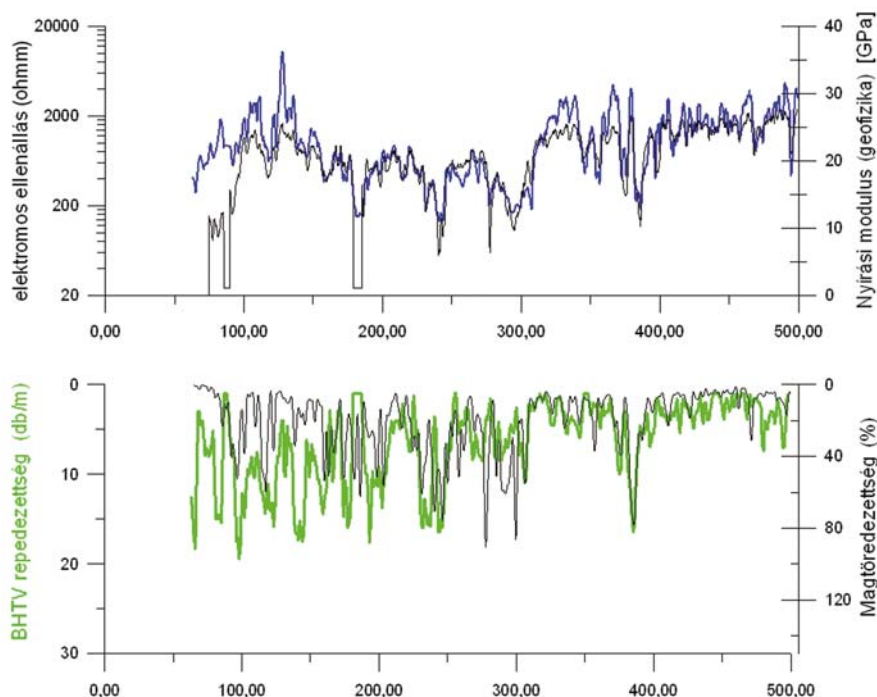
ami a megtöredezettségből következik, van egy másodlagos hatás is, amelyet a BHTV kimutat.

Ez lényegében a repedések össztérfogatának a mélységgel való trendszerű csökkenését jelenti, amely egyébként a 13. ábra valamennyi görbéjén is látható. A kiemelés során történő relaxáció miatt ez a másodlagos hatás a kivett magtagoltságát kifejező RQD-ban nem mutatkozik.

9. Konklúziók, összefoglalás

A repedezettség a legnagyobb mértékben a póruskitöltő fluidumokra és a póruster geometriára érzékeny mérésekre van hatással. A repedezettség hatása az üde közetben, ahol csak vékony, feltételezhetően kizárólag kötött vizet tartalmazó mikrorepedések vannak, megközelítőleg minden mérési módra egymással jól korrelálható fizikai paramétereloszlásokat eredményez.

Az agyagásványosodás önmagában csak viszonylag kis mértékben befolyásolja az akusztikus terjedési sebességet, ezzel szemben az agyagosodás az, ahol valóban nagy mértékben csökken a fajlagos akusztikus hullámterjedési sebesség, és hozzá képest viszonylag kis mértékben nő a neutronporozitás. Az agyagosodás az akusztikus hullámterjedés szempontjából azt jelenti, hogy redukálható víztelítettséget is feltételezünk a közetben. A vizsgált mérésanyagok alapján megállapítottam, hogy nem szükségszerűen jön létre nagymértékű, az egész közettérfogatot érintő agyagásványosodás a repedezettség hatására. Ahhoz, hogy a kismértékű repedezettség észrevehető anomáliát okozzon, az agyagásványosodással, illetve később az agyagosodással jelentős mennyiségű pórusterfogatnak kell létrejönnie. Az, hogy ez a



18. ábra | Az elektromos ellenállás és a számított nyírási modulus korrelációja

Figure 18 | Correlation of resistivity and shear modulus

pórustérfogat valóban létezik is, arra bizonyíték a radioaktív mérésekből számított porozitás és a BHTV-repedettség jó korrelációja.

A V_p legkisebb értékeinél a tektonikai zónákban általában a természetes gamma kis és a neutronporozitás nagy értékei a jellemzőek, ami arra utal, hogy a kőzet nagyrészt impermeabilis, mert a pórustérfogat nagyrészt tapadó vízzel van kitöltve.

A repedettség, miután kis térfogatot érint, elvileg nem lehetne hatással a nukleáris porozitáskövető módszerekre, a korrelációs vizsgálat azonban ennek az ellenkezőjét bizonyította. Ebből következik, hogy a repedettséghez tartoznia kell egy olyan tönkremeneteli zónának, amely úgy csökkenti a sűrűséget és növeli a neutronporozitást, mintha valóban pórustérfogat-növekedés lenne. Ennek a folyamatnak megfelel egy olyan agyagásványosodás, ahol az eredeti kőzethez képest a neutronporozitás a sűrűségcsökkenéssel arányosan nő meg, vagyis a hidrogén jó része magába a kristályrácsba épül be OH formájában úgy, hogy közben az új ásvány sűrűsége kisebb, mint amelyből keletkezett. A hidrogén más része viszont az alacsony hőmérsékleten redukálhatatlan interlayer és adszorpciós vizek része. A jelenséggel egyszerre meg lehet magyarázni a mikrorepedettség erős elektromos ellenállásának és akusztikus hullámterjedési sebességének csökkentő hatását, valamint a BHTV amplitudóképpel kimutatható részletgazdag repedésképet is. Ennél fontosabb azonban, hogy magyarázatot ad az akusztikus sebesség- és az ellenállásmérések szoros korrelációjára is, mivel ez az elektromos és a mechanikai paraméterek közti viszonylag szoros összefüggésre utal. A vékony repedéseket tartalmazó kőzetben az elektromos vezetőképesség szoros összefüggése a repedésekkel bizonyos körülmények között lehetőséget biztosít az RMR (rock mass rating) csupán elektromos ellenállás alapján történő becsülésére is.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét nyilvánítja Balla Zoltánnak, az üveg-hutai kutatások korábbi vezetőjének, hogy lehetőséget biztosított a kutatómunkában való részvételre, ami nagyban hozzájárult a mélyfúrás-geofizikai értelmezés fejlesztéséhez. Továbbá köszönettel tartozom Szongoth Gábornak és Kasza Zoltánnak (Geo-Log Kft.) a mérések kiváló minőségéért, amely alkalmassá tette az eredményeket, hogy módszertani vizsgálatokra használhassam azokat. Továbbá köszönettel tartozom az RHK Kht. képviselőjének, aki engedélyezte, hogy ez a cikk a *Magyar Geofizika* című szakmai lapban is megjelenhessen.

Jegyzetek

- ¹⁾ Az akusztikus lyukfal-televívezer a lyukfal akusztikus nyalábbal történő letapogatásából képet előállító eszköz.
- ²⁾ Az ImaGeo magszkenner a fúrómag külső felületéről digitális fényképet készítő automata berendezés.
- ³⁾ Eredetileg a Terzaghi-korrekción: $S = (\cos \alpha)^{-1} \sum_{i=1}^n (1/\cos \alpha_i)$, és a statisztikai súlyok összege $\sum S = 1$, ahol α_i az i -edik repedés

dőlésszöge és n a kiértékelt repedések darabszáma. Mivel a repedések száma véges, és az észlelt nagyon meredek repedések száma különösen kicsi, ez a korrekció túl nagy statisztikai súlyt adhat akár egyetlen repedésnek is, miközben nem tudjuk a valószínűségi gyakoriságot. Ezért a gyakorlatban a Terzaghi-korrekción ott alkalmazzák, ahol a nagy dőlésszögű repedésekre maximálják a korrekció mértékét. Ennek magfüggvénye: $\cos \alpha + f(\alpha)$, amelynek 75° -nál kisebb dőlésszögekre gyakorlatilag meg kell egyeznie $1/\cos \alpha$ -val, de 90° -nál sem ad egy megadott korlátnál (7) nagyobb szorzót.

- ⁴⁾ Az amplitudókép a BHTV eszköznél a lyukfalról visszavert akusztikus hullám amplitudókból előállított kép.
- ⁵⁾ A reflexió-időkép a BHTV eszköznél a lyukfalról visszavert akusztikus hullámmal terjedési időkből előállított képe.
- ⁶⁾ Az abszolút mérési hiba az időmérésnél konstansnak tekinthető, mert többnyire ciklusugrásból ered, ám emiatt a sebesség-meghatározás hibája a sebességgel arányosan nő. Egy félperiódus hossza 20 kHz frekvencia mellett 25 μ s, ami 5000 m/s közetsebesség mellett 2 m szondahosszat feltételezve 300 m/s sebességmeghatározási hibát jelent. Ez más szavakkal azt jelenti, hogy a Δt szempontjából a közzétani különbségekből eredő meghatározási hiba a mérési hiba nagysága körüli, tehát a geomechanikai tulajdonságok vizsgálatánál elhanyagolható.
- ⁷⁾ A hullámterjedési út hosszát befolyásoló módon összekötött.
- ⁸⁾ A kloritot a mélyfúrás-geofizikai szakirodalomban általában az agyagásványok közé sorolják (Serra 1984).
- ⁹⁾ Meg kell említeni azonban, hogy kis porozitások esetében ez valóban csak a látszat, mivel a Δt meghatározása esetében a hullámkép 4 μ s-os mintavételi köze valójában alig kisebb, mint amely a mátrix kloritosodása miatti sebességkülönbségek figyelembe nem vételéből adódó $\pm 5,6$ μ s-os hiba.
- ¹⁰⁾ Itt a kristályos kőzet olyan szeizmikusan kemény kőzet, amelyben az effektív porozitás jellemzően repedésporozitás.
- ¹¹⁾ A Western Atlas kiértékelő segédletben a klorit hidrogénindexe 0,32-nek van megadva, míg a kaolinité 0,37, azonban a sztöchiometriai képletből egyaránt 0,36 adódik a kloritra és a kaolinitre is. A kaolinit neutronporozitása 47%, és nincs olyan ok, amely miatt ne lenne legalább egyenlő a két ásvány neutronporozitása is. A vastartalom miatt várhatóan a klorit neutronporozitásának kellene nagyobbak lennie.
- ¹²⁾ A granitoid kőzetekben a természetes gamma kis értékei kapcsolódnak az agyagosodáshoz. A tektonikai zónákban előforduló nagyobb természetes gamma-értékek általában mozgó vizekből kicsapódó uránok miatt alakulhatnak ki.
- ¹³⁾ Állandó hőmérsékleten és a szabadon mozgó folyadék állandó ionkoncentrációja mellett.
- ¹⁴⁾ A fúrából kivett kőzetmagminta tagoltságát jellemző mennyiség, definíció szerint az RQD (%) a 10 cm-nél hosszabb kőzetmagminta-darabok összhosszúsága a vizsgált szakaszon belül / a vizsgált szakasz hosszúsága hányados szorozva 100-zal. A 10 cm-nél hosszabb, de nem kemény állagú magdarabokat nem számolják az ép maghosszúsághoz (Deere 1964).
- ¹⁵⁾ A repedések kategorizálása a képen látható hosszúságuk, látzólagos vastagságuk, a BHTV-képen nyitott, illetve zárt állapotuk szerint történhet.
- ¹⁶⁾ Mélyfúrás-geofizikai szeizmikusan kemény kőzet az, ahol a V_p nyíróhullám-sebesség meghaladja az 1500 m/s-t, vagyis a hullámkép-felvétel a nyíróhullám beérkezése kimutatható. Ez a gyakorlatban legalább 3000 m/s V_p kompressziósebességnek felel meg. A talajmechanikában már 800 m/s V_s sebességtől konszolidáltak számít a kőzet.
- ¹⁷⁾ A gránit agyagásványos bontottságakor a radioaktivitás csökkenése és a neutronporozitás növekedése egymással összefügg-

gő folyamat, ezért a kettő hányadosa jellemző a bontás mértékére. Bontási indexnek azonban mégsem a hányadost, hanem a $P = \arctg(\text{természetes gamma/neutronporozitás})$ mennyiséget lehet célszerűbben használni. A P függvénnyel azt fejezzük ki, hogy a neutronporozitás – természetes gamma keresztmetszet minden pontját egy látószöggel (vagyis egy irányvektorral) jellemezzük elkerülve, hogy a bontatlan kőzet különböző bontottsági indexeket kapjon a változatos természetes gamma-szintből eredő különböző hányadosok miatt. A bontatlan kőzet neutronporozitása kicsi (5% alatti), ezért az

azt képviselő pontok a keresztmetszeten gyakorlatilag mind azonos irányban látszanak. A bontás mértékének a szögelfordulást tettük meg. Minél kisebb a számított szög, annál bontottabbnak számít a kőzet.

¹⁸⁾ A repedéssűrűségtől való lineáris függés a vezetőképesség csököttség modelljével (a vezetőképesség lineárisan nő a porozitással), illetve az ezzel analóg, párhuzamos, egyforma vastagságú repedésekből álló, elektromosan párhuzamos kapcsolásúnak feltételezett repedésrendszer várható vezetőképességével is összhangban van.

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
- Deere D. U., 1964: Technical description of rock cores. Rock Mechanics Engineering Geology 1, 16–22
- Egerer F., Kertész P., 1993: Bevezetés a közetfizikába (első kiadás). Akadémiai Kiadó, Budapest
- Maros Gy., Palotás K., 2000: Evaluation of planar features in boreholes Üveghuta Üh-22 and Üh-23 near Üveghuta with COREDUMP software. (Az üveghutai Üh-22 és Üh-23 fúrásban észlelt sikszerű jelenségek értékelése COREDUMP szoftverrel). Annual Report of the Geological Institute of Hungary 1999, 315–340
- Molnár P., Bradley J. G., Enachescu C., Wozniwicz J., 2000: Single-Borehole Hydrogeological testing in the carboniferous granites, at Üveghuta, in South-West Hungary (Egyedi pakkeres kútvizsgálatok az üveghutai telephely mélyfúrásaiban). Annual Report of the Geological Institute of Hungary 1999, 407–426
- Serra O., 1984: Fundamentals of well-log interpretation. The acquisition of logging data. Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo
- Terzaghi R. D., 1965: Sources of error in joint surveys. Géotechnique 15, 287–306
- Western Atlas, 1985: Log Interpretation Charts. Western Atlas, Houston, USA
- Zilahi-Sebess L., 2004: Mélyfúrás-geofizikai módszerfejlesztés. A mélyfúrás-geofizikai mérések közzétett értelmezhetőségének vizsgálata. Report on the fulfilment of the task of the 2004 year – manuscript. Budapest, 2004, MGSZ adattár
- Zilahi-Sebess L., Fancsik T., Guthy T., Hegedűs E., Török I., Kovács A. Cs., 2004: Radioaktív hulladék elhelyezéssel kapcsolatos geofizikai kutatások (Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján). Budapest, 2004, MGSZ adattár
- Zilahi-Sebess L., Fancsik T., Török I., Kovács A. Cs., 2007: Szivárgási tényező becslés lehetőségei geofizikai mérések alapján. Magyar Geofizika 48/3, 99–111