

*Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2016 (Szerk: Török Á., Görög P. & Vásárhelyi B.)*

## A kőzet mechanikai tulajdonságainak és reológiai viselkedésének meghatározása furadékanyag kvarcsezemcséi alapján

Reconstruction of mechanical properties and rheological behaviour of rock using quartz fragments of drilling chips

Skultéti Ágnes

*Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, [skulteti.agi@gmail.com](mailto:skulteti.agi@gmail.com)*

M. Tóth Tivadar

*Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, [mtoth@geo.u-szeged.hu](mailto:mtoth@geo.u-szeged.hu)*

Kovács István János

*Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, [kovacs.istvan.janos@mfgi.hu](mailto:kovacs.istvan.janos@mfgi.hu)*

**ÖSSZEFOGLALÁS:** A kőzet mechanikai tulajdonságainak és reológiai viselkedésének megismerése sok esetben (repedezett rezervoárok, rétegrepesztés) alapvető jelentőségű. Egy kőzettestben a mechanikai paraméterek meghatározása általában fúrómagok, valamint geofizikai, illetve szeizmikus szelvények elemzése alapján történik. Azonban fúrómagok nem mindig állnak rendelkezésre a fúrásból, a lyukgeofizikai szelvények többnyire indirekt információt szolgáltatnak a kőzet mechanikai tulajdonságairól, míg a szeizmikus szelvények felbontása nem mindig van összhangban a vizsgálandó szerkezetekkel. Furadékanyag azonban többnyire folytonosan rendelkezésre áll a fúrásokból. A furadékanyag kvarcsezemcséinek részletes elemzése során értékes információhoz juthatunk a kőzet reológiai és mechanikai viselkedéséről. A furadékanyag kvarcsezemcséinek mikroszerkezeti elemzése a fúrás mentén a képlékeny nyírési zónák, míg a kvarc kristályrácsában lévő víz (OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O) mennyiségének a meghatározása a gyengeségi zónák lokalizálását teszi lehetővé, melyek együtt meghatározzák a kőzettest mechanikai állapotát. A kőzetoszlopban a képlékenyen deformált kőzetövek gyengeségi zónákként funkcionálnak, potenciális töréses öveknek tekinthetők.

*Kulcsszavak:* furadékanyag, kvarc, víz, gyengeségi zóna, képlékeny és töréses deformáció

**ABSTRACT:** In case of fractured reservoirs and hydraulic fracturing, the recognition of mechanical properties and rheological behaviour of rocks are of crucial importance. The determination of mechanical parameters in a rock body is usually done by the investigation of bore cores, geophysical well logs and seismic sections. Nevertheless, bore cores are not always available from the borehole, the well logs mostly provide only indirect information about the mechanical properties of the rock, while the scale of the seismic sections is not always in correlation with the studied structures. However, drilling chips are constantly available from the boreholes. During the detailed analysis of quartz fragments valuable information about rheological and mechanical behaviour of the rock can be obtained. Along the borehole the microstructural analysis of quartz fragments enables the alignment of ductile shear zones, while the determination of water content (OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O) in the quartz lattice facilitates the localization of softened regions. These structural data define the mechanical condition of the rock body. In a rock column, sections which suffered ductile deformation behave as softened regions and considered as potential fracture zones.

*Keywords:* drilling chips, quartz, water, softened region, ductile and brittle deformation

## 1 BEVEZETÉS

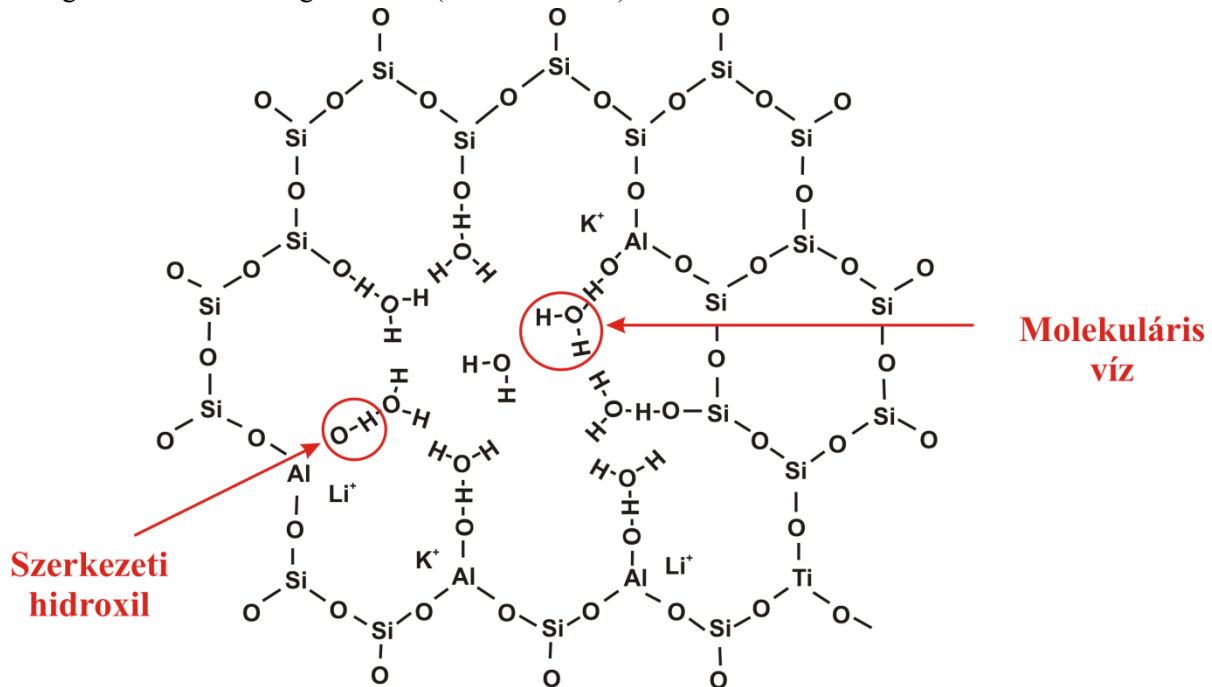
Számos helyen a kőzet mechanikai tulajdonságainak és képlékeny viselkedésének átfogó ismerete kiemelkedő fontosságú. Magyarországon a nem-konvencionális szénhidrogén vagyon kiaknázásának (Badics et al. 2011) és a geotermikus energiatermelés EGS technológia szerinti megvalósításának (Breede et al. 2013) alapfeltétele a rétegrepszítés alkalmazása. A rétegrepszítés a kis természetes áteresztőképességű, tömör kőzetekből álló rezervoárok hozamnövelő célú kezelése (Bereczki et al. 2005). A rétegrepszítés során a kőzetben létrejövő lokalizált repedésrendszer kiterjedése és geometriája többek közt függ a kőzet ásványos összetételétől és mechanikai paramétereitől. A repedések terjedésének fontos tényezője az inhomogén közeg, az eltérő kőzetzfizikai paraméterek és a lokális geológiai szerkezetek növelik a repedésrendszer komplexitását és egyben a repedések elvégződését is okozzák, általában a képlékenyebb, kevésbé repeszthető kőzetek gátat szabnak a repedések vertikális terjedésének (Bada et al. 2004).

A kőzet mechanikai tulajdonságainak meghatározására többféle általánosan használt módszer létezik: fúrómagok vizsgálata, geofizikai, illetve szeizmikus szelvények elemzése. Fúrómagok nem minden esetben állnak rendelkezésre a fúrásból, és az általuk szolgáltatott információ többnyire nem folytonos. A geofizikai szelvények a képződmény képlékeny viselkedéséről nem nyújtanak információt, míg a kőzet egyéb mechanikai tulajdonságaira többnyire indirekt módon következtethetünk belőlük. A szeizmikus szelvények léptéke és felbontása nem mindig van összhangban a vizsgálandó szerkezetekkel. A furadékhanyag azonban folytonosan rendelkezésre áll a fúrásból, így kiváló lehetőséget biztosít a kőzet mechanikai állapotának és képlékeny viselkedésének megismerésére. A furadékhanyag rendszerint  $\mu\text{m}$ -es,  $\text{mm}$ -es nagyságrendű ásvány és kőzetszemcséket tartalmaz.

A kvarc ( $\text{SiO}_2$ ) a földkéreg második leggyakoribb kőzetalkotó ásványa, kristályrácsában minden egyes szilícium atomot tetraéderesen négy oxigén atom vesz körül és minden oxigén atom kettő szilícium atomhoz kapcsolódik (Kats 1962). Emellett azonban eltérő mennyiségben különböző nyomelemek (pl. Al, Ti, Ge, Na, K, Li, B) (Müller et al. 2003) szintén megjelennek a kvarc kristályszerkezetében. Habár a kvarc „névlegesen vízmentes ásvány” (NAM) kristályrácsában a hidrogén („víz”) mind szerkezeti hidroxil, mind molekuláris víz formájában ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) megtalálható (Stadler & Konzett 2012; Stenina 2004). A kvarc kristályrácsában jelenlévő „víz” mennyisége jelentősen befolyásolja annak töréses és képlékeny viselkedését (Kronenberg & Wolf 1990). A szerkezeti hidroxil többnyire rácshibákban (ponthibák), valamint szemcsehatárok mentén kötődik meg a kvarc szerkezetében, míg a molekuláris víz szabadon fluidum (nano-) zárványok formájában van jelen (*1. ábra*) (Zhou et al. 2008).

A kvarc széleskörű nyomás és hőmérséklet viszonyok között stabil, ellenálló ásvány, kristályszerkezetét eltérő nyomás és hőmérséklet viszonyok között különböző deformációs mechanizmusok alakítják (Passchier & Trouw 2005). Az alacsony hőmérsékletű és sekély földkéregbeli mélységből származó kvarcban a töréses deformáció dominál, míg ez nagyobb mélységben kb.  $200\text{ }^\circ\text{C}$ -on képlékeny deformációba megy át (Wintsch & Yi 2002). A kvarc kristályszerkezete a képlékeny fejlődése során rá ható nyomásnak és hőmérsékletnek megfelelően torzul, vagyis deformálódik. Eltérő körülmények között a kvarc képlékeny deformációjában különböző mechanizmusok a meghatározók, melyek eltérő mikroszerkezeti megjelenésű kvarcszemcséket eredményeznek (unduláló kioltású, alszemcsés, rekrisztallizált) (Hirth & Tullis 1992). Így minden egyes kvarcszemcse mikroszerkezeti megjelenésében információt hordoz az őt ért deformációs mechanizmusokról (Vernon 2004).

A kvarc kristályrácsában jelenlévő „víz” jelentős mértékben csökkenti annak mechanikai erősségét, ellenálló képességét (hydrolytic weakening) (Griggs & Blacic 1965), elősegítve a kvarc egyre alacsonyabb hőmérsékleten végbemenő (akár 200-300 °C) képlékeny deformációját (Mervyn 1975). A kvarc mechanikai tulajdonságai és víztartalma számos kőzet (pl. gránit, riolit, gneisz, homokkő) reológiai viselkedését meghatározza (Doukhan 1995).



**1. ábra.** A szerkezeti hidroxil és a molekuláris víz pozíciója a kvarc kristályrácsában (Müller et al. 2003) (*Position of hydroxyl defect and molecular water in quartz lattice*)

Munkánk során a Mecsekalja zóna kristályos aljzatának gneisz képződményeit harántoló Szentlőrinc-1 (Sztl-1) fúrás furadékanyagának kvarcsemcséit elemeztük. Célunk a kidolgozott, kőzetek mechanikai és reológiai tulajdonságainak furadékanyag kvarcsemcséi alapján történő meghatározására irányuló módszer bemutatása a Sztl-1 fúrás példáján.

## 2 MINTÁK

A vizsgált terület Magyarország Dél-Dunántúli régiójában, a Mecsek hegység előterében elterülő Mecsekalja-zóna részét képezi. A vizsgálatainkhoz felhasznált minták a diszlokációs övben geotermikus céllal mélyített Szentlőrinc-1 (Sztl-1) mélyfúrásból származnak, melynek talpmélysége 1820 m. A fúrás 1600-1820 m-es szakaszából 5 méterenként áll rendelkezésünkre műgyantába ágyazott furadékanyag minta.

## 3 MÓDSZEREK

### 3.1 Petrográfiai elemzés

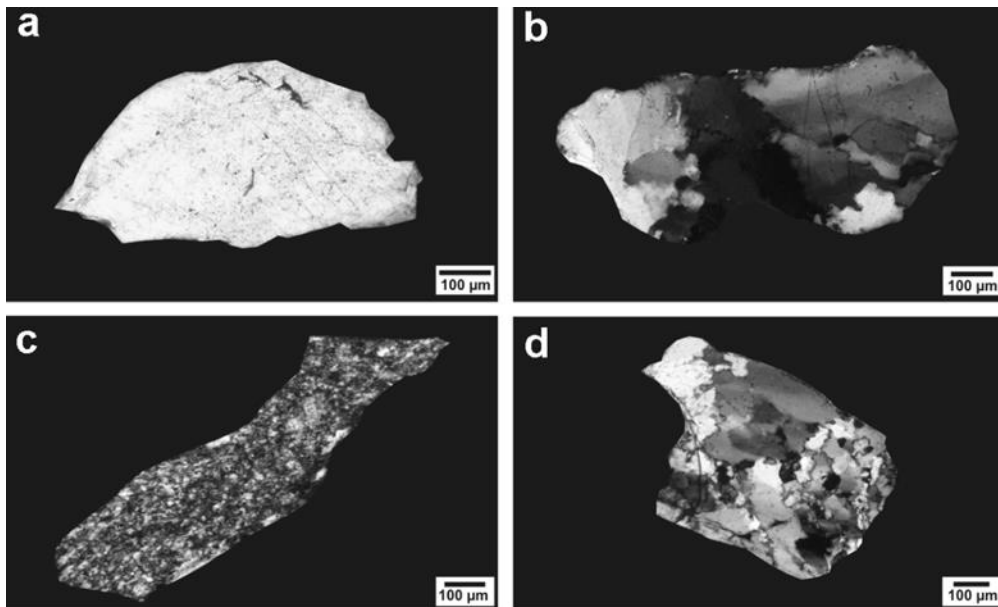
A furadékanyagban megtalálható ásvány és kőzetsemcsék részletes elemzése alapján a kőzet petrográfiai jellemzése. A vizsgált mintán belül a kvarcsemcsék mennyiségi arányának meghatározása. A kidolgozott módszer megbízható alkalmazása szempontjából fontos, hogy a vizsgált kőzettípusban a kvarc a fő kőzetalkotó ásványok jelentős részét adja.

### 3.2 Mikroszerkezeti elemzések

A furadékanyag kvarcsemcséinek részletes mikroszerkezeti elemzése során kapott eredmények a vizsgált fúrás mentén képlékeny nyírási zónák lokalizálását teszik lehetővé.

#### 3.2.1 Optikai polarizációs mikroszkópia

A mikroszerkezeti vizsgálatok keretein belül a vizsgált fúrás mentén 25, illetve az ez alapján feltételezett intenzíven deformált zónákban 5 méterenként elemeztük a rendelkezésünkre álló furadékanyag minták kvarcsemcséit. A mikroszkópos vizsgálatok során mintánként 100 db véletlenszerűen kiválasztott (JMicroVision: point counting módszerrel) kvarcsemcsé mikroszerkezetét elemeztünk és azt néztük, hogy az eltérő mikroszerkezeti megjelenésű szemcsék milyen arányban jelennek meg az egyes mélység intervallumokban. A vizsgált mintákban a mikroszerkezetét tekintve unduláló kioltású (típus0: T0) (2a ábra), alszemcsés (típus1: T1) (2b ábra), illetve rekrisztallizált (típus2: T2) (2c ábra) kvarcsemcsék mellett általában többségben vannak az olyan kvarcsemcsék, melyek mikroszerkezetüket tekintve nem homogének, hanem a T0-T1-T2 típusok különböző arányú kombinációjából állnak (2d ábra) (Skultéti et al. 2014).



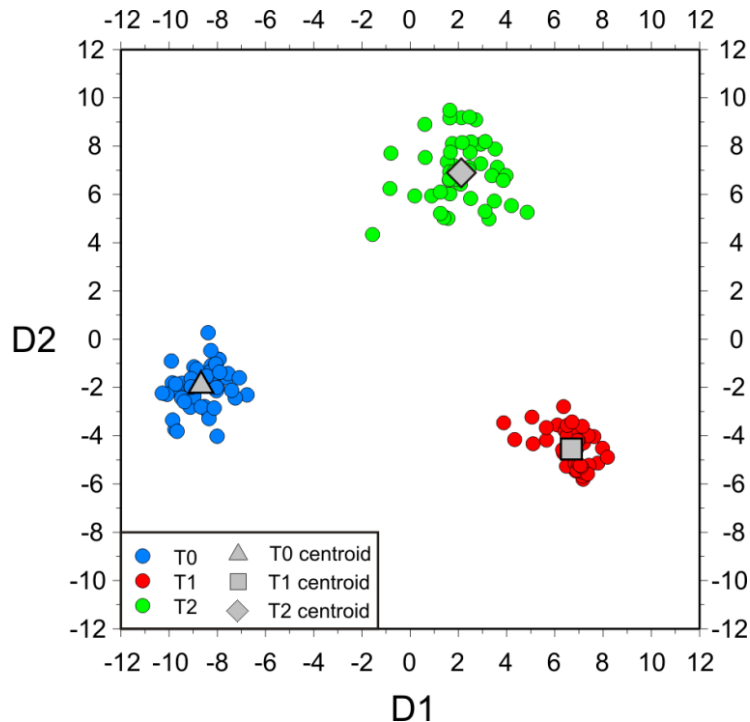
**2. ábra.** Kvarcsemcsék mikroszerkezeti csoportjai az elemzett mintákban:

- (a) unduláló kioltású (típus0: T0), (b) alszemcsés (típus1: T1),  
(c) rekrisztallizált (típus2: T2), vegyes mikroszerkezetű (T0-T1-T2)  
(Microstructural groups of quartz fragments in the studied samples:  
(a) quartz grain with undulose extinction, (b) with subgrains,  
(c) recrystallized, (d) transitional)

#### 3.2.2 Raman spektroszkópia

A Raman spektroszkópia segítségével a kvarc megbízhatóan azonosítható a három legintenzívebb fő csúcsa alapján, melyek 128, 206 és 464  $\text{cm}^{-1}$ -nél helyezkednek el a Raman spektrumban. Az általunk alkalmazott műszer beállítások megegyeznek a Skultéti et al. (2014) által leírtakkal, a Raman spektrumok kiértékelése Seasolve PeakFit 4.12 szoftverrel történt. A spektrumot leíró fontosabb változók, spektrális tulajdonságok: a centrum, az amplitudó, a félértékszélesség (FWHM), valamint a görbe alatti terület. A kvarc kristályrácsának nyomás- és hőmérsékletváltozás hatására bekövetkező

torzulása (képlékeny deformáció) következtében csökken a kristályrácsban belüli rendezettség, ami nagyban befolyásolja a Raman spektrumot. A kvarc Raman spektrumának változása nyomon követhető a spektrumot leíró változók módosulásával. (Ostroumov et al. 2002). A statisztikai vizsgálatok keretein belül végrehajtott diszkriminancia analízis eredményeként kapott diszkriminancia függvények (D1, D2) szerint a mikroszkópos tulajdonságaik alapján elkülönített kvarcsejtszemből felvett spektrumok spektrális tulajdonságai szintén szignifikáns eltérést mutatnak. Az eltérő mikroszerkezetű kvarcsejtszemből felvett Raman spektrum bizonyos spektrális tulajdonságai alapján is jól elkülönülnek egymástól (3. ábra). A T0 és T1 típus közti különbséget leíró legfontosabb spektrális tulajdonság a 128 és 206  $\text{cm}^{-1}$  csúcs görbe alatti területe, míg az T1 és a T2 típus közti különbség leginkább a 128, 206, 464  $\text{cm}^{-1}$  csúcsok pozíciójával jellemezhető (Skultéti et al. 2014).



**3. ábra.** Az eltérő mikroszerkezetű kvarcsejtszemből (T0, T1, T2) elkülönítése Raman spektroszkópia alkalmazásával a D1, D2 diszkriminancia függvények alapján  
(*Separation of quartz grains with different microstructure (T0, T1, T2) using Raman spectroscopy on the basis of D1, D2 discriminant functions*)

### 3.3 Víztartalom meghatározása

A kvarcsejtszemből kristályrácsában lévő víz mennyisége befolyásolhatja annak képlékeny és töréses viselkedését, lehetővé teszi a gyengeségi zónák lokalizálását a fúrás mentén. A vizsgált fúrás mentén (1605, 1620, 1635, 1660 m) meghatároztuk a kvarcsejtszemből víztartalmát ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) Fourier-transzformációs infravörös spektrometria (FTIR) alkalmazásával. A kvarcsejtszemből szerkezeti hidroxil és molekuláris víz tartalmának megbízható meghatározása érdekében minden mintában lehetőleg minél több kvarcsejtszemből szükséges elvégezni a mérést.

### 3.4 Geofizikai szelvények elemzése

A geofizikai szelvények elemzése a vizsgált fúrásban a töréses deformáció által intenzíven igénybevett övek, töréses nyírás zónák mélységi pozíciójának becslését teszi lehetővé. Elsőként a fúrásból rendelkezésre álló, indirekt töréslokalizálásra alkalmas geofizikai szelvények lettek elkülönítve:

sűrűség (DEL), természetes gamma (GR), ellenállás (R), természetes potenciál (SP) és lyukbőség (CL) szelvény.

A vizsgált geofizikai szelvények önmagukban is nyújtanak némi információt a képződményben a fúrás tengelye mentén megjelenő megnövekedett porozitású, permeabilitású töréses zónák mélységi pozíciójáról. Azonban amennyiben ezen szelvényeket együtt vizsgáljuk átfogóbb és megbízhatóbb képet kaphatunk a töréses zónák megjelenési helyéről. Az elemzett geofizikai szelvények kombinációjának vizsgálata során elsőként a töréses és ép fúrásszakaszokat legmarkánsabban elkülönítő szelvény kiválasztására került sor. Ennek alapján elkülönítettünk a fúráson belül egy néhány 10 méteres töréses, illetve kb. ugyanekkora vastagságú ép kőzetszakaszt. Ezt követően diszkriminancia analízist hajtottunk végre a töréses és ép kőzeteket tartalmazó fúrásszakaszokat reprezentáló geofizikai adatokra. A statisztikai vizsgálat célja, létrehozni a geofizikai változók olyan lineáris kombinációját, mely alapján a töréses és ép fúrásszakaszok a legjobban elkülönülnek egymástól.

## 4 EREDMÉNYEK

### 4.1 Furadékanyag petrográfiai jellemzése

A furadékanyag általában  $\mu\text{m}$ -es, mm-es nagyságrendű közettörmelék, melyet 80:20% arányban ásvány- és kőzetszemcsék alkotnak, többnyire az önálló kvarc szemcse töredékek dominálnak.

A vizsgált furadékanyag mintákban a kvarc mellett, illetve a kőzetszemcsék részeként megjelenő ásványok többnyire a muszkovit, biotit, kálföldpát, plagioklász (Skultéti et al. 2015).

### 4.2 Mikroszerkezeti elemzések eredménye: optikai polarizációs mikroszkópia és Raman spektroszkópia

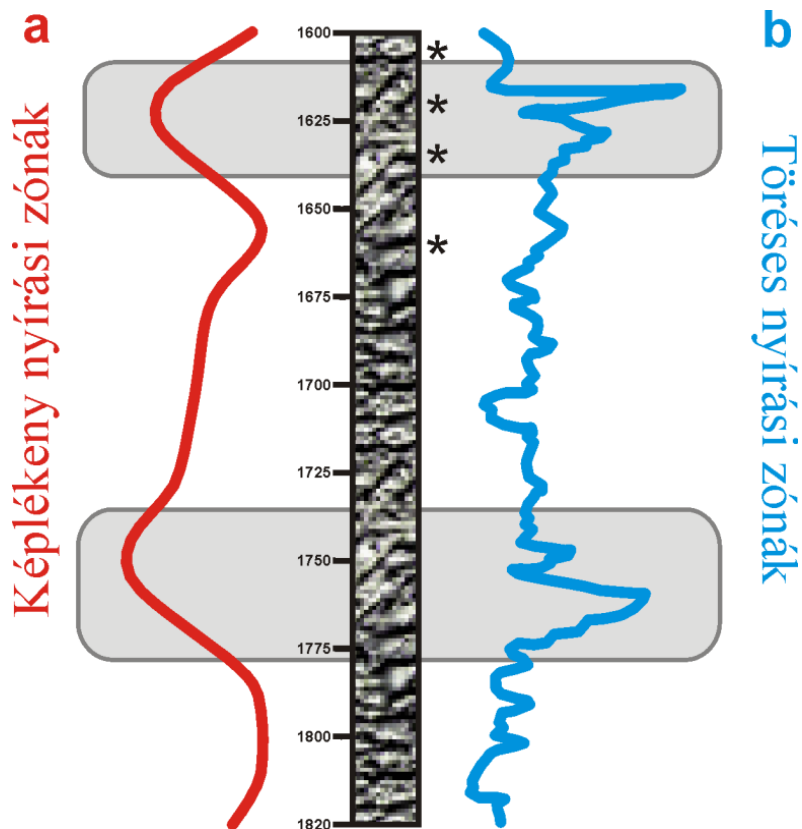
A legintenzívebb képlékeny deformációt szenvedett rekrisztallizált, illetve a dominánsan rekrisztallizált mikroszerkezeti megjelenésű kvarc szemcsék aránya a vizsgált fúrásszakaszon belül két maximumot mutat 1610-1635 és 1750-1765 m között. Ezen mélység intervallumoktól távolodva mindkét irányban fokozatosan csökken a rekrisztallizált szemcsék mennyiségi aránya és egyre nagyobb mennyiségben jelennek meg alszemcsés, illetve unduláló kioltású szemcsék, szemcsedomének. Az elemzett minták alapján, a vizsgált fúrásszakasz mentén 1610-1635 és 1750-1765 m körül feltételezhető képlékeny nyírási zónák jelenléte (*4a ábra*) (Skultéti et al. 2015).

### 4.3 A kvarc szemcsék víztartalma

A mikroszerkezeti vizsgálatok eredményeként kijelölt képlékeny nyírási zónák mentén a kvarc szemcsék kristályrácsában lévő szerkezeti hidroxil és molekuláris víz mennyisége egyaránt a nyírási zóna peremétől annak középpontja felé csökken. Tehát míg a nyírási zóna peremi részén a kvarc szemcsék kristályrácsukban nagyobb mennyiségű vizet tartalmaznak, addig a magzónában a kvarc szemcsék víztartalma lecsökken (*1. táblázat*).

### 4.4 Geofizikai szelvények elemzése

Az elemzett geofizikai szelvények alapján végzett átfogó törés lokalizáció keretei között végrehajtott diszkriminancia analízis eredményeként azon geofizikai változó, mely alapján legjobban elkülöníthetők egymástól a töréses és ép kőzetszakaszok a fúrás mentén a sűrűség, míg emellett a természetes gamma, az ellenállás és a természetes potenciál csupán kisebb súllyal szerepel (Skultéti et al. 2015).



**4. ábra.** A képlékeny (a) és a töréses (b) nyírási zónák pozíciója a Sztl-1 fúrás vizsgált szakaszában, a csillagok a kvarcsezemcsék víztartalmának mérési pontjait jelölik (1605, 1620, 1635, 1660 m)  
*(Position of ductile and brittle shear zones in the studied section of Sztl-1 well, the stars indicate the measure points of water content of quartz grains)*

**1. táblázat.** A kvarcsezemcsék víztartalma a nyírási zóna mentén a perem- és a mag zónában  
*(Water content of quartz grains along the shear zone at the rim and core zone)*

Minta helye	Mélység (m)	Thomas et al. (2009) szerkezeti hidroxil (OH) (súly% ppm)	Kats (1962) molekuláris víz (H <sub>2</sub> O) (súly% ppm)
Perem zóna	1605	2,8 ± 20%	784 ± 20%
Mag zóna	1620	0,8 ± 20%	384 ± 20%
Mag zóna	1635	1,1 ± 20%	357 ± 20%
Perem zóna	1635	2,0 ± 20%	1060 ± 20%

A vizsgált geofizikai szelvények alapján 1605-1615 méterig egy megnövekedett ellenállású és sűrűségű, magas agyagtartalmú keskeny kőzetzóna figyelhető meg, melyet mindkét oldalon (1580-1605 m és 1615-1635 m) csökkenő ellenállású, sűrűségű és alacsonyabb agyagtartalmú kőzet övek fognak közre. Kisebb mértékű csökkenő ellenállással és sűrűséggel valamint megnövekedett lyukbőséggel jellemezhető fúrásszakaszok jelennek meg 1650, 1680 és 1705 méter körül. 1750-1765 méter között egy erőteljesen lecsökkent ellenállású és sűrűségű, valamint megnövekedett lyukbőséggű kőzetzóna található. Az elemzett geofizikai szelvények alapján végzett átfogó törés lokalizáció keretei között végrehajtott diszkriminancia analízis eredményeként kapott kompozit szelvény két nagyobb törészónát jelöl ki 1580-1635 m között, illetve 1750-1765 m között (*4b ábra*) (Skultéti et al. 2015).

## 5 DISZKUSSZIÓ

### *5.1 A nyírási zónák általános geometriája*

Egy adott kőzetoszlop mechanikai tulajdonságait jelentős mértékben meghatározzák a kőzet által korábban elszenvedett deformációs események, vagyis a képződmény deformációtörténete. A deformáció eloszlása a kőzetekben általában nem homogén, hanem többnyire sík zónákban koncentrálódik. Ilyen deformációt lokalizáló szerkezeteknek tekinthetők a vetők és a nyírási zónák. A nyírási zónák olyan táblás megjelenésű deformációs szerkezetek, melyekben a deformáció jelentősen nagyobb, mint a környező kőzetekben (Fossen 2010), így ezen kőzetszakaszok mechanikai szempontból speciális tulajdonságokkal bírnak, a kőzetoszlopban gyengeségi zónákként funkcionálhatnak. A nyírási zónák lehetnek képlékenyek, törésesek (vető), vagy a kettő közti átmenetet feltáró szerkezetek.

A képlékeny nyírási zónákra jellemző, hogy a középső magasabb deformációs fokú mag zónát alacsonyabb deformációs fokú kár zónák fogják közre, vagyis a deformáció intenzitása a nyírási zóna középpontjától távolodva csökken (Wibberley et al. 2008). A képlékeny nyírási zónákban a deformáció következtében az egyes kvarcsemcsékben jellegzetes mikroszerkezetek alakulnak ki, melyek tükrözik a nyomás-hőmérséklet viszonyokat (Passchier & Trouw 2005).

### *5.2 A Szentlőrinc-1 mélyfúrás képződményeinek képlékeny deformációja*

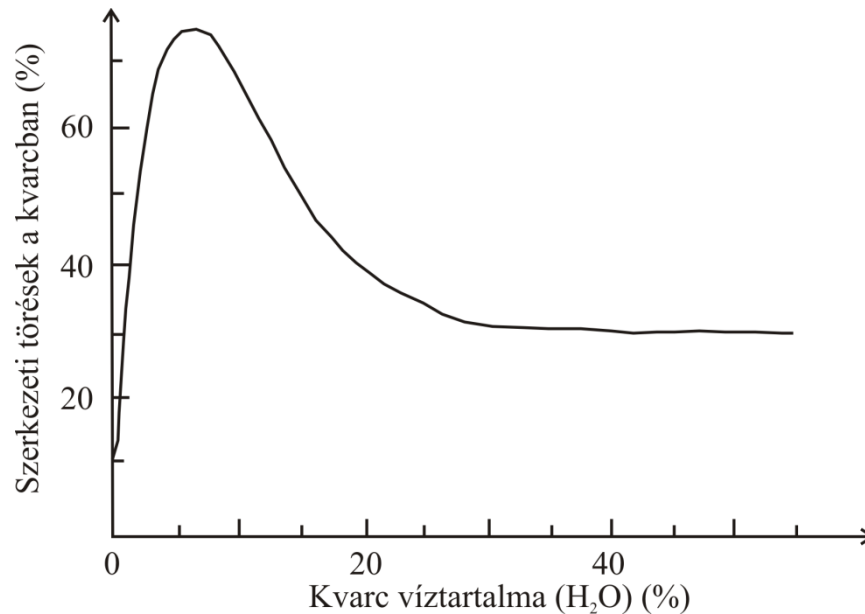
Az eltérő mikroszerkezeti megjelenésű, unduláló kioltású, alszemcsés, illetve rekrisztallizált kvarcsemcséket a hőmérséklet növekedésével és a feszültség csökkenésével a dinamikus rekrisztallizáció különböző mechanizmusai hozták létre (Hirth & Tullis 1992; Passchier & Trouw 2005; Skultéti et al. 2014). A képlékeny deformáció mértéke a hőmérséklet növekedésével és a feszültség csökkenésével nő. Így feltételezhető, hogy rekrisztallizált kvarcsemcsék az intenzív képlékeny deformációs zónákat, míg az alszemcsés és unduláló kioltású kvarcsemcsék a kisebb mértékű képlékeny deformációt szenvedett zónákat jelölik. Tehát a képlékeny nyírási öv intenzíven deformált mag zónájában a rekrisztallizált kvarcsemcsék dominálnak, míg ettől távolodva az enyhébb deformációt szenvedett kár zónákban fokozatosan az alszemcsés, majd unduláló kioltású kvarcsemcsék jelennek meg nagyobb mennyiségben. Ennek megfelelően az általunk elemzett minták alapján, a vizsgált fúrásszakasz mentén 1610-1635 és 1750 m körül feltételezhető képlékeny nyírási zónák jelenléte (Skultéti et al. 2015).

A képlékeny nyírási övek magzónájában az intenzív képlékeny deformáció következtében a rekrisztallizált kvarcsemcsék mikroszerkezetüket tekintve nagyon finomszemcsésék. Ennek következtében a kvarc kristályrácsában jelenlevő szerkezeti hidroxil, és molekuláris vizeket (OH, H<sub>2</sub>O), valamint a szemcsehatárok mentén diffundáló vizeket megkötő szerkezetek degradálódnak, így a legtöbb „víz”, ami a képlékeny deformáció előtt jelen volt a kvarc kristályrácsában az eltávozik a rendszerből (Zhou et al. 2008). Tehát ahol a kvarc korábban intenzív képlékeny deformációt szenvedett (a nyírási zónában és ahhoz közel) ott a kvarcsemcsék víztartalma lecsökken, részben dehidratálódnak, míg a nyírási zónától távolabb, ahol a kvarc által elszenvedett deformáció mértéke kisebb volt, ott a kvarcsemcsék OH<sup>-</sup> és H<sub>2</sub>O tartalma megőrződött.



### 5.3 A Szentlőrinc-1 mélyfúrás képződményeinek töréses deformációja

A kvarcon végrehajtott töréstesztek alapján a töréses folyamat abban az esetben a legintenzívebb, ha a kvarc kristályrácsa kis mennyiségű vizet tartalmaz (5. ábra) (Kornev & Razvorotneva 1998). Így a töréses deformációnak, töréses nyírási zónák kialakulásának inkább kedveznek a korábban intenzív képlékeny deformáció során részben dehidratálódott kvarcsemcséket tartalmazó kőzetszakaszok, mint a magasabb víztartalmú kőzetek.



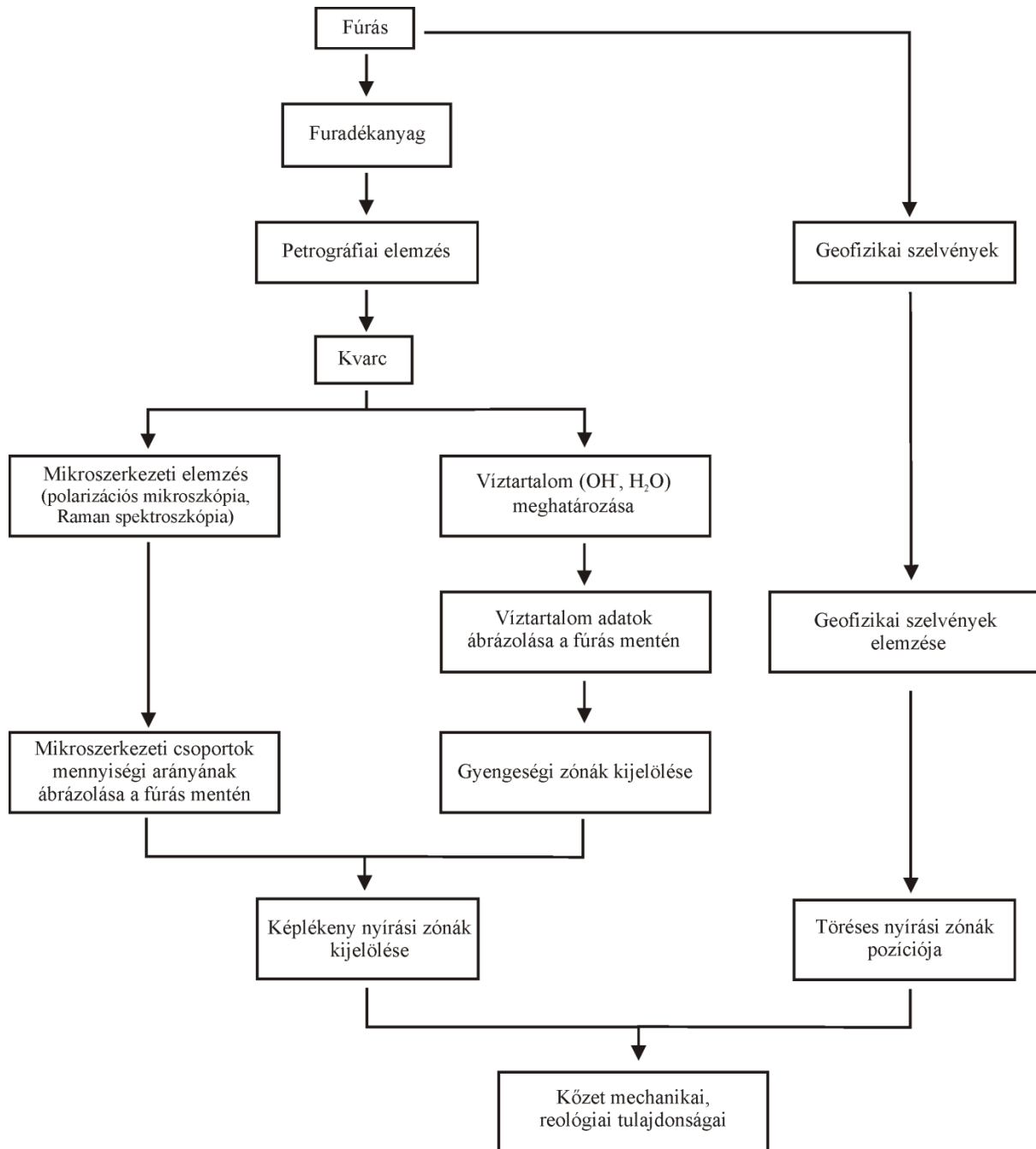
**5. ábra.** A kvarcban létrejövő szerkezeti törések mennyisége a víztartalom függvényében (Kornev & Razvorotneva 1998) (*Amount of structural fractures in quartz as a function of water content*)

Az indirekt töréslokalizálásra alkalmas lyukgeofizikai szelvények részletes elemzése alapján a vizsgált fúrás mentén két nagyobb törészóna jelölhető ki 1580-1635 m között, illetve 1750-1765 m között (Skultéti et al. 2015). Ezen töréses övek mélységi pozícióját összevetve a vizsgált fúrás mentén kijelölt képlékeny nyírási zónák mélységi pozíciójával, azok egybeesnek, közel azonos mélységintervallumban találhatóak a vizsgált fúrás mentén.

Ezzel igazolható az az elképzelés, mely szerint a képlékeny deformáció során a nyírási öv magzónájában intenzív deformációt szenvedett kvarcsemcsék részleges dehidratációja következtében a kőzet ezen szakaszai kedvezhettek a töréses nyírási zónák kialakulásának. Tehát a korábban képlékeny deformációt szenvedett kőzetövek a kőzetalkotó ásványok (pl. kvarc) részleges dehidratációja miatt várhatóan inkább fognak töréses módon reaktiválódni, mint a környező kőzet. A kőzetoszlopban a képlékenyen deformált kőzetövek, képlékeny nyírási zónák gyengeségi zónáknak, potenciális töréses nyírási zónáknak tekinthetők.

## 6 KONKLÚZIÓ ÉS ÖSSZEFOGLALÁS

Amennyiben célunk fúrások alapján egy adott kőzettest mechanikai és reológiai tulajdonságainak megismerése, azonban a vizsgált fúrásból csupán furadékanyag áll rendelkezésre a fent bemutatott módszer kiválóan alkalmazható (6. ábra).



**6. ábra.** A kőzet mechanikai és reológiai tulajdonságainak becslésére kidolgozott módszer lépései  
(Steps of estimating the mechanical and rheological parameters of rocks)

A kőzetek mechanikai és reológiai tulajdonságainak furadékanyag kvarcsemmcséi alapján történő meghatározására irányuló módszer lépései:

1. A furadékanyag petrográfiai elemzése a vizsgált fúrás mentén, kvarcsemmcsék mennyiségi arányának meghatározása (fontos, hogy a kvarc a vizsgálni kívánt kőzetben a kőzetalkotó ásványok jelentős részét adja)
2. A furadékanyag kvarcsemmcséinek mikroszerkezeti elemzése egyenközű beosztás szerint
  - 2.1 Minden vizsgált mintából a reprezentativitás érdekében 100 db véletlenszerűen kiválasztott (JMicovision: point counting módszerrel) kvarcsemmcsét optikai polarizációs mikroszkópos elemzésnek vetünk alá és besoroljuk a létrehozott mikroszerkezeti csoportok valamelyikébe (esetünkben T0, T1, T2, vegyes T0-T1-T2)

- 2.2 Minden egyes mikroszerkezeti csoportból minimum 5 kvarcsezemcsén Raman spektroszkópos elemzést hajtunk végre, hogy egzakt módon igazoljuk az adott mikroszerkezeti csoportba sorolhatóságát
- 2.3 A legintenzívebb képlékeny deformációt szenvedett rekrisztallizált, illetve a dominánsan rekrisztallizált mikroszerkezeti megjelenésű (T2) kvarcsezemcsék mennyiségi arányának ábrázolása a fúrás mentén
3. A vizsgált fúrás mentén a kvarcsezemcsék OH<sup>-</sup> és H<sub>2</sub>O tartalmának meghatározása FTIR segítségével mintánként ideálisan 5-5 szemcsében. Az így kapott adatok ábrázolása a fúrás mentén a mélység függvényében
4. A vizsgált fúrás mentén a direkt-indirekt töréslokalizálásra alkalmas geofizikai szelvények kiválogatása, majd elvégezzük ezen szelvények optikai, statisztikai (diszkriminancia analízis) értelmezését

A kidolgozott módszer alkalmazása során a 2. lépés végrehajtásának eredményeként a vizsgált kőzetoszlop mentén a képlékeny nyírási zónák mélységi pozíciójára következtethetünk, a 3. lépés a vizsgált kőzetoszlop mentén a gyengeségi zónák lokalizálását, míg a 4. lépés a töréses nyírási zónák mélységi pozíciójának becslését teszi lehetővé, melyek együtt meghatározzák a kőzettest mechanikai állapotát.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönjük a Mannvit Kft-nek és Ádám Lászlónak a rendelkezésünkre bocsátott mintákat, valamint a PannErgy Zrt-nek és a GeoLog Kft-nek a geofizikai adatokat. A kutatást támogatta: a Bolyai Posztdoktori Kutatói ösztöndíj Kovács István részére és az MFGI 9.2. számú állami projektje keretében végzett módszertani fejlesztések, és BSZKI Fizikai és Kémiai Osztály.

## IRODALOMJEGYZÉK

- Bada G., Windhoffer G., Szafián P., Dövényi P. 2004. Feszültségtér Európában és a Pannon medence Térségében: Adatok, Modellek és Geodinamikai Alkalmazások. ELTE Geofizikai Tanszék
- Badics B., Uhrin A., Vető I., Bartha A., Sajgó Cs. 2011. Medenceközponti földgáz-előfordulás elemzése a Makói-árokban. *Földtani Közlöny*, **141** (1), 23-40.
- Bereczki L., Csabafi R., Cserkés-Nagy Á., Fancsik T., Kerékgyártó T., Kovács A. Cs., Kun É., Markos G., Nádor A., Szócs T., Zilahi-Sebess L. 2015. A rétegrepesztés környezeti hatásainak vizsgálata. *MFGI Tanulmány*, 1-104.
- Breede K., Dzebisashvili K., Liu X., Falcone G. 2013. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future. *Geothermal Energy*, 1 (4)
- Doukhan J. C. 1995. Lattice Defects and Mechanical Behaviour of Quartz SiO<sub>2</sub>. *J. Phys. III.*, 5 (11), 1809-1832.
- Fossen H. 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press, New York, 1-481.
- Griggs D. T., Blacic J. D. 1965. Quartz: anomalous weakness of synthetic crystals. *Science*, **147**, 292-295.
- Hirth G., Tullis J. 1992. Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, **14**, 145-159.
- Kats A. 1962. Hydrogen in alpha-quartz. *Phillips Res. Rep.*, **17** (1-31), 133-279.

- Kornev V. M., Razvorotneva L. I. 1998. Comparative estimates of the strength of dry and wet quartz in grinding. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 39 (1), 121-125.
- Kronenberg A. K., Wolf G. H. 1990. Fourier transform infrared spectroscopy determinations of intragranular water content in quartz-bearing rocks: implications for hydrolytic weakening in the laboratory and within the earth. *Tectonophysics*, 172, 255-271.
- Mervyn E. J. 1975. Water weakening of quartz, and its application to natural rock deformation. *Jl geol. Soc. Lond.*, 131, 429-432.
- Müller A., Wiedenbeck M., van den Kerkhof A. M., Kronz A., Simon K. 2003. Trace elements in quartz — a combined electron microprobe, secondary ion mass spectrometry, laser-ablation ICP-MS, and cathodoluminescence study. *Eur J Mineral.* 15 (4) 747–763.
- Ostroumov M., Faulques E., Lounejeva E. 2002. Raman spectroscopy of natural silica in Chicxulub impactite, Mexico. *C. R. Geoscience*, 334, 21-26.
- Passchier C. W., Trouw R. A. J. 2005. *Microtectonics*. Springer, 1-371.
- Skultéti Á., M. Tóth T., Fintor K., Schubert F. 2014. Deformation history reconstruction using single quartz grain Raman microspectroscopy data. *Journal of Raman Spectroscopy*, 45 (4), 314-321.
- Skultéti Á., M. Tóth T. 2015. Localisation of ductile and brittle shear zones along the Szentlőrinc-1 well in the Mecsekaljja Zone using quartz microstructural and well-log data. *Acta Geod Geophys*, In press: DOI 10.1007/s40328-015-0127-3
- Stadler R., Konzett J. 2012. OH defects in quartz in the system quartz–albite–water and granite–water between 5 and 25 kbar. *Phys Chem Minerals*, 39, 817–827.
- Stenina N. G. 2004. Water related defects in quartz. *B. Geosci*, 79, 251-268.
- Thomas S-M., Koch-Müller M., Reichart P., Rhede D., Thomas R., Wirth R., Matsyuk S. 2009. IR calibrations for water determination in olivine, r-GeO<sub>2</sub>, and SiO<sub>2</sub> polymorphs. *Phys Chem Minerals*, 36, 489–509.
- Vernon R. H. 2004. *A practical guide to Rock Microstructure*. Cambridge University Press, 1-650.
- Wibberley C. A. J., Yielding G., Di Toro G. 2008. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. In: C. A. J. Wibberley, W. Kurz, J. Imber, R. E. Holdsworth, C. Collettini (szerk.) *The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties. Special Publication 299, London: Geological Society*, 5–33.
- Wintsch R. P., Yi K. 2002. Dissolution and replacement creep: a significant deformation mechanism in mid-crustal rocks. *Journal of Structural Geology*, 24, 1179-93.
- Zhou Y. He C., Yang X. 2008. Water contents and deformation mechanism in ductile shear zone of middle crust along Red River fault in southwestern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51 (10), 1141-1425.