

MÉSZKŐ TERÜLETEK REPEDÉSRENDSZERÉNEK MODELLEZÉSI LEHETŐSÉGEI

M. TÓTH TIVADAR⁵⁵

FRACTURE NETWORK MODELLING IN KARST LANDSCAPES

Abstract: Evolution of karst landscapes is fundamentally determined by hydrological behaviour of the rock body. As matrix porosity of limestone and dolomite is negligible, understanding of the fracture network is essential both from structural and hydrogeological points of view. In the paper a short review is given about the most important parameters of a fracture system as well as the widely used modelling approaches are concluded. Finally, we briefly present a newly developed fractal geometry based DFN software.

BEVEZETÉS

Karszt területek földrajzi képét, geomorfológiai fejlődését, környezeti érzékenységét jelentős mértékben a kőzet hidrogeológiai jellemzői határozzák meg. Mivel a mészkő mátrix porozitása többnyire elhanyagolható, a felszín alatti vízrendszer túlnyomórészt a kőzettest törésrendszeréhez kapcsolódik. A karsztvíz áramlási képe meghatározó a karszt folyamatok sebessége, a kialakuló karsztformák, például a barlangok helyzete és mérete szempontjából (*Riggs, A. C. et al.* 1994, *Kaufmann, G.* 2003a), de a repedezett tárolótér dinamikus változása hatással van a mindenkori karsztvíz víz alatti alakulására is (*Kaufmann, G.* 2003b). A mészkő területek nagyfokú környezetérzékenysége szempontjából szintén meghatározó a töréshálózat hidraulikai viselkedése (*Stephenson, K. M. et al.* 2006).

Amint a szerkezeti mozgásoknak köszönhetően törések, törésrendszerek alakulnak ki a kőzetben, az új folytonossági hiányok áramlási pályaként és tárolási térfogatként jelentkeznek a kéregbeli fluidumok számára. Törvényszerű, hogy a repedéseken keresztül áramló víz reakcióba lép a mellékkőzettel, s a lezajló víz-kőzet kölcsönhatások minden esetben részben oldódásos, részben precipitációs folyamatok. Míg szilikátos kőzetek esetén rendszerint a repedések cementációja a leglényegesebb folyamat, karbonátos mellékkőzet esetén meghatározó lehet az oldódás. E kettősség természetesen alapvető a töréses rezervoár működési mechanizmusának megértése szempontjából is. Míg oldásos esetben pozitív visszacsatolású rendszerrel van dolgunk, ahol a „működő” árampályák egyre meghatározóbbak lesznek (*Kaufmann, G.* 2003a); ott, ahol a cementáció a döntő folyamat, negatív visszacsatolású a rendszer, s a működő pályák elzáródnak, az áramló fluidum új utakat keres

⁵⁵ Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék. 6722 Szeged, Egyetem u. 2. E-mail: mtoth@geo.u-szeged.hu

(O'Brien, G. S. et al. 2003). Mészki területek vizsgálata során mindezek alapján lényeges szempont a kőzet repedésrendszerének részletes elemzése, matematikai alapú modellezése. A továbbiakban ennek szerkezetföldtani, geometriai alapjait, valamint a töréshálózat szimuláció lehetőségeit tekintjük át.

TÖRÉSRENDSZEREK SZERKEZETFÖLDTANI JELLEMZŐI

Az adott deformációs esemény hatására kialakuló törések rendszerint törésrendszereket definiálnak. Az összetartozó egyedi repedések széles skála intervallumon jelenhetnek meg a szubmikroszkópos méretűtől a több százméteres nagyságúakig, melyek egyes jellegzetességei összevethetők a különböző mérettartományokban (összefoglalva pl. Korvin, G. 1992). Ezáltal a törések, mikrotörések felszíni feltárásokban, barlangokban, fűromagokon rögzíthető szerkezetföldtani adatai fontos információt szolgáltathatnak a nagyléptékű szerkezetekről, vetőkről, vetőzónákról is. A törések kvalitatív jellemzői, mérhető paramétereinek (méret, térbeli sűrűség) értékei alapvetően függenek az adott deformált kőzettípus petrográfiai tulajdonságaitól; az ásványos összetételtől, szemcseméret eloszlástól, szerkezettől, korábbi irányítottságtól. Emellett, természetesen, döntő súlya van azon fizikai viszonyoknak, amelyek között az alakváltozás végbemegy; a feszültségtér primer jelentőségét számottevően módosítják a környezeti nyomás, a hőmérséklet és a kőzetben tárolódó fluidum tartalom is. A végeredményként előálló törésrendszer, mint egyedi törésekből álló geometriai objektum mindezen hatások eredőjeként jön létre. Így, bár a Coulomb kritérium értelmében bizonyítható a genetikai kapcsolat a feszültségtér és a repedésrendszer geometriája között, utóbbi alapján az előbbi nem vezethető le egyértelműen. Ezért a legtöbb modellező rendszer nem az adott feszültségtérben történő töréshálózat kialakulásának folyamatát, hanem a kialakult komplex geometria rekonstrukcióját célozza.

TÖRÉSHÁLÓZATOK GEOMETRIAI ELEMEI

A törések és töréshálózatok értelmezésében a leíró jellegű szerkezetföldtani és mikrotektonikai jellegzetességek mellett fontos szerep jut a kvantitatív paramétereknek is. Az egyedi repedések véges kiterjedésű, rendszerint bonyolult módon és többszörösen meghajlított kétdimenziós felületekként értelmezhetők, melyek azonban a legtöbb esetben síklapokkal megfelelően közelíthetők. Alakjuk a legtöbb homogén összetételű kőzetben, például a gránitban körhöz közeli, míg jól fejlett rétegzettségű, padossággal jellemzett üledékes kőzetekben, így a karbonátos kőzetekben eltérő mértékű anizotrópia is kialakulhat. Esetünkben mind a törések parametrizálása, mind a későbbi szimuláció során a kör reprezentációt követjük. Ennek megfelelően az egyedi töréseket egyértelműen leíró geometriai paraméterek a kör középpontjának térbeli helyzete, a kör sugara és irányítottsága (dőlés, csapás). Törésrendszerek esetén mindez a középpontok térbeli sűrűségét leíró függvényként,

valamint a sugárra és a dőlés-csapás érték párokra jellemző eloszlás függvényekként értelmezhető. A törésrendszer hidraulikai jellemzése feltételezi az egyedi törések pozitív térfogatát, ezért a vastagság nélküli körlapokat adott nyitottságú lapos korongokkal („parallel plate model”, **Witherspoon, P. A. et al.** 1980) helyettesítjük.

A repedéshálózat parametrizálása és szimulációja során előforduló jelölések az alábbiak:

repedés (fracture): f (indexben); hosszúság (sugár) a 3D-ban: L ; hosszúság nyoma 2D síkon: l ; nyitottság: a ; fraktál dimenzió: D ; dőlés: α ; hosszúság eloszlás paraméterei: E, F ; nyitottság függvény paraméterei: A, B ; porozitás: Φ ; cella oldalhossza: r .

Sugár (hosszúság)

A töréses elemek egyik legfontosabb, fluidum vezetés-tárolás szempontjából is alapvető tulajdonsága a repedések hossza, illetve 3 dimenzióban – a korong modellt alkalmazva – azok átmérője. Számos szerző foglalkozott adott generációba tartozó törések méreteloszlásának leírásával. Általános egyetértés van abban a tekintetben, hogy a hosszúság adatok valamely nem szimmetrikus eloszlással közelíthetők megfelelően, azaz – a Griffith-féle törésterjedési modellnek megfelelően – a kisméretű törések száma jelentősen meghaladja a nagy töréseket. A leggyakrabban alkalmazott modell szerint (pl. **Yielding, G. et al.** 1992) a legjobban az

$$N(L)=F*L^{-E} \quad (1)$$

képlettel adott, hatványfüggvény típusú eloszlás írja le a repedésméretetek viselkedését.

Nyitottság

A repedések nyitottsága a szimulációs munka második felében válik lényegessé, amikor a repedéseket reprezentáló körlapok térbeli elhelyezése után a generált hálózatot hidraulikai paraméterek (porozitás, permeabilitás tenzor) becslésére kívánjuk felhasználni. A nyitottság megfelelő definiálása számos problémával terhelt. Az eredeti deformációs folyamat hatásán túl a repedés nyitottságát – akár pontról pontra eltérő mértékben – befolyásolhatják a víz-közet kölcsönhatás folyamatok eredményei akár a nyitottság növekedése (oldódás), akár annak csökkenése (cementáció) irányában. Valamely repedezett tároló adott irányú töréseinek kinyílása vagy bezáródása alapvetően a megfelelő mélységben uralkodó recens feszültségtér tulajdonságaitól függ, így a nyitottság felszíni mérésekkel nem meghatározható. A fluidumnak a repedésben történő mozgását mindezek mellett alapvetően meghatározza a felület (repedésfal) érdessége is, így végső célunk, az áramlás modellezése szempontjából az egyedi repedésre vonatkozó hatásos nyitottság becslése meglehetősen problematikus. A mérés nagyfokú bizonytalansága ellenére a repedéshálózatok modellezésével foglalkozó szakirodalom egybehangzó megállapítása alapján a nyitottság – a hosszúsághoz hasonlóan – hatvány függvény eloszlást kö-

vet. A repedések hossza és fizikai nyitottsága között statisztikai értelemben szoros lineáris kapcsolat tételezhető fel, amint azt az elméleti megfontolások és a tapasztalati (**Gudmundsson, A.** 2000) eredmények is igazolják. Azaz

$$a=A*L+B. \quad (2)$$

Bár B értéke elméletileg nulla, hiszen a „kiterjedés nélküli repedés” nyitottságára utal, mivel (2) paramétereit rendszerint mérési adatokból lineáris regresszióval határozzuk meg, előfordulhat $B \neq 0$ érték is. A maximális nyitottság és a hosszúság arányaként definiált arány (azaz a regressziós egyenes meredeksége) számos különböző közettípusra litoklázisok esetén $2 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}$ körül, míg nyírási repedésekre $3 \cdot 10^{-3}$ és $3 \cdot 10^{-2}$ körül alakul (**Vermilye, J. M. – Scholz, C. H.** 1995). Ezt karbonátos kőzetek esetén jelentős mértékben módosíthatja a posztdeformációs oldódás hatása.

Irány

Adott generációhoz tartozó törés rendszerek rendszerint jól definiált irányokat jelölnek ki. Míg a szisztematikus litoklázisok megközelítőleg párhuzamos lefutásúak, a vetők rendszerint két markáns iránnyal jellemezhető konjugált, esetleg bonyolultabb Riedel rendszereket alkotnak. A repedéseket jelképező korongok térbeli helyzetét meghatározó paraméterek a dőlésszög és a csapásirány, melyek együttes eloszlását számos szerző kétváltozós Fisher eloszlásfüggvénnyel tartja közelíthetőnek. A továbbiakban a tapasztalatunk szerint nagy hibával közelítő elméleti eloszlásfüggvények alkalmazása helyett az eredeti, mért adatok alapján korrigált adatbázist használjuk a szimuláció során.

Térbeli sűrűség

Míg a korábban tárgyalt kvantitatív paraméterek definíciója lényegében egyértelmű, törésrendszerek térbeli sűrűségének megadására számos, különböző elméleti megfontolású meghatározás ismert. Részletes mérésekkel számos szerző igazolta, hogy szerkezetfejlődéstől és a litológiától lényegében függetlenül a törésrendszerek geometriája fraktál-szerű geometriai objektumként kezelhető (pl. **Barton, C. C. – Larsen, E.** 1985). Azaz a repedéseket jelképező korongoknak általában nem csak a méretét (átmérő, nyitottság), hanem térbeli helyzetét is a választott mérettartomány függvényében vizsgálhatjuk.

A TÖRÉSHÁLÓZAT MODELLEZÉS ELVE ÉS GYAKORLATA

A repedéshálózat szimuláció lehetőségei

A megoldandó problémák, a rendelkezésre álló adatok és technikai háttér függvényében az elmúlt évtizedekben számos repedéshálózat modellező módszer, algoritmus, és ezeket támogató szoftver fejlődött ki (összefoglalva **Long, J. C. S.** 1996). Az eljárások egy része determinisztikus algoritmust követ, s célja a 3D po-

rozitás és permeabilitás tér generalása. Más módszerek az egyedi törések hálózataként felépülő törésrendszer sztochasztikus alapú rekonstrukcióját célozzák. Bár egyes esetekben célszerű lehet a bizonyítottan hidraulikailag aktív törések térbeli helyzetének explicit definiálása, rendszerint célravezetőbb kizárólag a geometriai adatok alapján meghatározott törésmintázat szimulációja. Amint azt korábban láttuk, a töréshálózatokat a jellemző szerkezeti adatok (törés generációk, kinematikus indikátorok, repedéskitöltő ásványok, stb.) mellett geometriai típusú változókkal is jellemezhetjük. A modellező munkában leggyakrabban használt numerikus adatok a törések mérete (2D metszeten a hossza), nyitottsága, orientációja, és az adott térrészbe eső törések száma (a középpontok fraktál dimenziója).

Mindezek alapján a töréshálózat modellező algoritmusoknak három fő típusát különböztethetjük meg.

Az „ekvivalens folytonos modellek” esetén nincsenek egyedi törések. A vizsgált mérettartományban a mért hidraulikai tulajdonságok (effektív porozitás, effektív permeabilitás) adott térfogat fölött kumulatíván írják le számos törés együttes szerepét. Az ilyen formán lényegében a porózus közetekkel analóg módon kezelt repedezett közettestek mért hidraulikai paramétereinek térbeli változását egyes modellek determinisztikus, mások sztochasztikus módszerekkel elemzik.

Számos vizsgálat mutat arra, hogy repedezett közetek hidraulikai viselkedése nem írható le kontinuum modellel. A töréshálózatot egyedi törések halmazából felépítő „DFN (*discrete fracture network*) modellek” célja ennek a problémának a kiküszöbölése. A módszercsalád számos eljárásának közös kiinduló hipotézise az, hogy repedezett közettestekben történő fluidum áramlás megadható az egyedi törések geometriai jellemzésével. Adott input paraméter halmaz esetén tetszőleges számú eltérő, azonosan valószínű mintázat generálása lehetséges, melyek együttes értékelése alapján a törés mintázat alapvető tulajdonságai, az összefüggő alrendszerek mérete, iránya, térbeli helyzete, stb. bizonytalanságukkal együtt meghatározható. A repedéshálózatot mindezek az eljárások a modellezett térben az eredetivel (mérttel) azonos orientáció és méret eloszlású korong (sokszög) sereggel reprezentálják. A DFN modelleknek három alaptípusa ismert (**Long, J. C. S.** 1996). Legegyszerűbb esetben azt tételezzük fel, hogy valamely törés térbeli helyzete nincs hatással a rendszer többi törésének pozíciójára. Ezekben a modellekben a törés középpontok egyenletes eloszlást követnek. Más eljárások valamely sztochasztikus folyamat (pl. Poisson pont folyamat) alapján jelölik ki a repedéseket reprezentáló korongok középpontjait a térben. A módszerek harmadik csoportja figyelembe veszi a törésmintázatok általánosan megfigyelt skálainvarianciáját is, és így ezek fraktál geometria alapú modellek.

Hidraulikai szempontból a DFN modellek esetén a fluidum áramlást a töréshálózat geometriája irányítja, s az áramlás az egyedi repedések mentén történik. Az áramlási egyenletek megoldása az olykor több millió törésből álló hálózatokon komoly, olykor alig megoldható informatikai jellegű kihívást jelent. Ez utóbbi probléma hívta életre a két korábban tárgyalt módszer család (ekvivalens folytonos, illetve DFN modellek) előnyeit egyesítő „hibrid modelleket”. Ezek az eljárások a

töréshálózatot valamely DFN modell alapján szimulálják, majd valamely térfogat fölött a modellezett töréshálózat alapján származtatják az áramlást meghatározó hidraulikai paramétereket, és azok térbeli eloszlását.

A REPSIM programcsomag

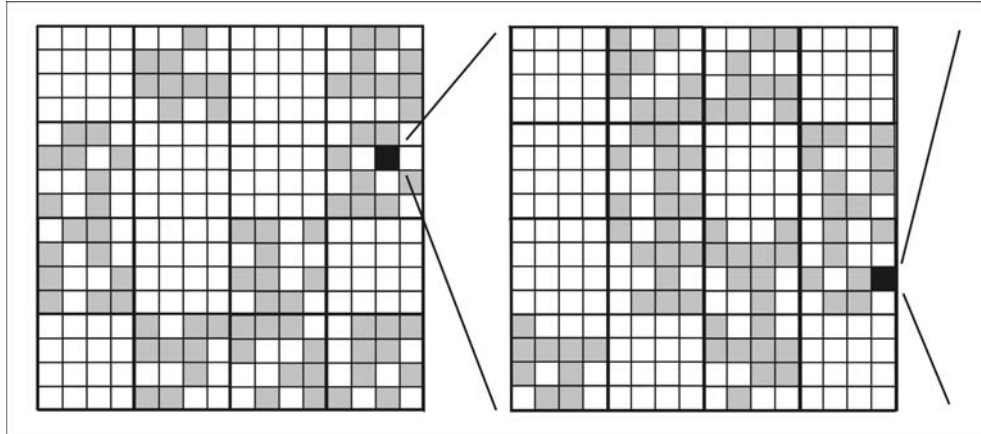
Amint azt korábban láttuk, a vonatkozó szakirodalomban egyetértés van abban, hogy a töréshálózatok fraktál geometriai elemekkel leírhatók abban az értelemben, hogy a törések méreteloszlása hatványeloszlást követ (pl. **Min, K. B. et al.** 2004), illetve adott méret fölötti törések térbeli eloszlása lényegében litológiától és szerkezeti helyzettől függetlenül skálainvariáns mintázatot alkot a térben (pl. **Barton, C. C. – Larsen, E.** 1985). Mindezek, és az előző fejezetekben írtak alapján célunk volt egy olyan töréshálózat modellező szoftver rendszer kifejlesztése, amely fraktál geometriai alapú DFN elven alapuló hibrid modellt épít. Az elkészült programcsomag a REPSIM nevet kapta.

3D töréshálózat generálása

A törések szimuláció során használt geometriai alapparamétereit a korábbiakban részletesen tárgyaltak alapján a törések hossza, nyitottsága, orientációja (dőlése és csapása), valamint a törésközéppontok fraktál dimenziója adják. Mindezekkel egyetértésben a töréseket reprezentáló korong sereg generálása az alábbi rekurzív algoritmus alapján történt (*1. ábra*):

1. A vizsgált térrész felosztása maximális méretű, homogén paraméter halmazú, kocka alakú egységcellákra (generátor elemek);
2. Az i . lépésben kapott cellák éleinek felosztása r ($\in \mathbb{N}$) részre, s így r^3 számú azonos méretű új kocka generálása;
3. Az adott generátor elemekben érvényes „box-counting” dimenzió (**Barton, C. C. – Larsen, E.** 1985) alapján ($N(r)=r^{-D}$) a repedés középpontot tartalmazó kisebb kockák véletlenszerű kiválasztása;
4. A 2. és 3. lépés rekurzív ismétlése;
5. Adott küszöbérték elérésekor a repedést tartalmazó kockák középpontja, mint repedés középpontok kiválasztása („*fracture seeds*”);
6. A megfelelő eloszlásokból véletlenszerűen választott paraméterekkel (hosszúság, irány) a repedés középpontok körül repedés (korong) generálása.

Az 1-4. lépés ismétlésével amint a cellák mérete csökken, a repedés középpontot tartalmazó kockák száma nő. Az algoritmus rekurzív jellege, és az alkalmazott box-dimenzió miatt a kialakuló pontsereg a mérttel megegyező dimenziójú (D_3) fraktál objektum lesz. A végeredményként kapott töréshálózat teljesíti a kezdeti feltételeket, miszerint paraméterei megegyeznek a mért paraméterek eloszlásával. Az algoritmus statisztikus abban az értelemben, hogy alkalmazásával tetszőleges számú, azonosan valószínű realizáció hozható létre.



1. ábra A töréspontok kiválasztásának rekurzív algoritmus (i., i+1. lépés)
 Figure 1 Recursive algorithm for choosing fracture seeds (steps i and i+1)

Összefüggő törésrendszerek

A szimulált töréshálózat igen fontos tulajdonsága az összefüggő alrendszer mérete, azok térbeli helyzete. Ennek meghatározása egy megfelelően optimalizált, módszeres próbálgatáson alapuló algoritmust megvalósító alprogrammal történik. Igazolható, hogy a repedésrendszer összefüggőségének mértéke alapvetően az E-D- α paraméterek függvénye.

Porozitás

A repedezett porozitás a töréseket reprezentáló lapos henger szeletek térfogata és a befoglaló cella térfogata arányként értelmezhető, azaz

$$\Phi = \frac{Vf}{V}. \quad (3)$$

Kocka alakú cella esetén $V = r^3$, míg a repedések által elfoglalt térfogat a korong sereg kockába eső részének a határozott integrálja az adott térfogaton. Ezt elég finom beosztás esetén jól közelíti a Riemann-féle alsó közelítő összeg, azaz

$$Vf = \sum_{i=1}^n \sum_j \frac{l_{ij} * a_{ij} * r}{n}, \quad (4)$$

s így a porozitás

$$\Phi = \frac{1}{n * r^2} * \sum_{i=1}^n \sum_j l_{ij} * a_{ij} \quad (5)$$

formában adódik.

A primer porozitású és a repedezett kőzetek között alapvető eltérés van az őket jellemző reprezentatív elemi térfogat („representative elementary volume” – REV) méretében. A REV definíció szerint (Bear, J. 1972) megegyezik azzal a tér-

fogattal, amely fölött a porozitás – adott bizonytalanság mellett – jellemzi a vizsgált kőzetet. A REPPOR alprogram alkalmazásával lehetőség nyílik bármely, adott paraméterekkel jellemzett kőzetest esetén a reprezentatív elemi térfogat, s így az áramlási szimuláció során figyelembeveendő minimális cellaméret becslésére, amennyiben:

$$\forall \varepsilon > 0, \exists r_0, \text{ hogy ha } r > r_0, \text{ akkor } \sigma(\Phi_r) / M(\Phi_r) < \varepsilon \quad (6)$$

esetén $REV=r_0$. Számításaink szerint célszerű választás $\varepsilon = 0.2$.

Belső permeabilitás tenzor

A töréshálózat vízvezető képességének jellemzését a REV méretű kőzetestre számított belső permeabilitás tenzorral adjuk meg. Ez a REPPER alprogramban az **Oda, M.** (1985) által definiált algoritmus, azaz lényegében a Darcy törvény és a „parallel plate model” (**Witherspoon, P. A. et al.** 1980) összevetése alapján történik.

ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK

A REPSIM programcsomagot az elmúlt években sikerrel alkalmaztuk különböző, kristályos víztartókkal kapcsolatos elméleti és gyakorlati problémák megoldása során (pl. **M. Tóth T. et al.** 2004). Karbonátos kőzetestek szimulált repedés hálózatának alkalmazására számos példa ismert az irodalomban. A karsztvíz rezervoár dinamikus fejlődését vizsgálta az oldódás hatására átalakuló repedésrendszerben törésmoделlek tesztelésével **Kaufmann, G.** és **Braun, J.** (1999, 2000), **Taylor, C. J.** és **Greene, E. A.** (2001), valamint **Kaufmann, G.** (2003b). Karszt területek geomorfológiai fejlődését, a barlangok evolúcióját, térbeli kapcsolatrendszerük törvényszerűségeit vizsgálták törésmoделlek alapján **Riggs, A. C. et al.** (1994) valamint **Randall, C. O. et al.** (2001), míg **Fleurant, C.** és **Tucker, G. E.** (2006) a felszíni karsztformák kialakulási mechanizmusát vezetik le a mélybeli modellezett repedéshálózat analízisével. Mészkövön épült gátak tönkremenetelének feltételrendszerét szimulált törésrendszerek alapján számította **Pepprah, E. A.** (2004), és kiemelkedően nagy a vízgazdálkodással, szennyezés terjedéssel kapcsolatos alkalmazások száma is.

IRODALOM

- Barton, C. C. – Larsen, E.** 1985. Fractal geometry of two-dimensional fracture networks at Yucca Mountain, Southwestern Nevada. In: Stephanson, O. ed.: Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints. pp. 77-84.
- Bear, J.** 1972. Dynamics of fluid in porous media. Elsevier, Amsterdam.
- Fleurant, C. – Tucker, G. E.** 2006. A cockpit karst landscape evolution model. Earth Surface Processes and Landforms (in press).

- Kaufmann, G.** 2003a. Modelling unsaturated flow in an evolving karst aquifer. *Journal of Hydrology* 276/1-4. pp. 53-70.
- Kaufmann, G.** 2003b. A model comparison of karst aquifer evolution for different matrix-flow formulations. *Journal of Hydrology* 283/1-4. pp. 281-289.
- Kaufmann, G. – Braun, J.** 1999. Karst aquifer evolution in fractured rocks. *Water Resources Research* 35/11. pp. 3223-3238.
- Kaufmann, G. – Braun, J.** 2000. Karst aquifer evolution in fractured, porous rocks. *Water Resources Research* 36/6. pp. 1381-1392.
- Korvin, G.** 1992. *Fractal Models in the Earth Sciences*. Elsevier. pp. 396.
- Long, J. C. S.** (ed.) 1996. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Academy Press, Washington D. C. pp. 551.
- M. Tóth, T. – Hollós, Cs. – Szűcs, É. – Schubert, F.** 2004. Conceptual fracture network model of the crystalline basement of the Szeghalom Dome (Pannonian Basin, SE Hungary). *Acta Geol. Hung.* 47/1. pp. 19-34.
- Min, K. B. – Jing, L. – Stephansson, O.** 2004. Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: Method and application to the field data from Sellafeld, UK. *Hydrogeology Journal* 12/5. pp. 497-510.
- O'Brien, G. S. – Bean, C. J. – McDermott, F.** 2003. Numerical investigations of passive and reactive flow through generic single fractures with heterogeneous permeability. *Earth and Planetary Science Letters* 213/3-4. pp. 271-284.
- Oda, M.** 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Geotechnique* 35. pp. 483-495.
- Pepprah, E. S.** 2004. Void evolution in soluble rocks beneath dams under limited flow condition. *Applied Environmental Geoscience*, Eberhard Karls Universität Tübingen. p. 95.
- Randall C. O. – Weary, D. J. – Sebel, S.** 2001. Geologic Framework of the Ozarks of South-Central Missouri – Contributions to a Conceptual Model of Karst. In: **Kuniansky, E. L.** (ed.). U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Water-Resources Investigations Report 01-4011. pp. 18-24.
- Riggs, A. C. – Carr, W. J. – Kolesar, P. T. – Hoffman, R. J.** 1994. Tectonic Speleogenesis of Devils Hole, Nevada, and Implications for Hydrogeology and the Development of Long, Continuous Paleoenvironmental Records. *Quaternary Research* 42/3. pp. 241-254.
- Stephenson, K. M. – Novakowski, K. – Davis, E. – Heron, G.** 2006. Hydraulic characterization for steam enhanced remediation conducted in fractured rock. *Journal of Contaminant Hydrology* 82/3-4. pp. 220-240.
- Taylor, C. J. – Greene, E. A.** 2001. Quantitative Approaches in Characterizing Karst Aquifers. In: **Kuniansky, E. L.** (ed.). U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Water-Resources Investigations Report. pp. 164-166.
- Vermilye, J. M. – Scholz, C. H.** 1995. Relation between vein length and aperture. *Journal of Structural Geology* 17/3. pp. 423-434.
- Witherspoon, P. A. – Wang, J. S. Y. – Iwai, K. – Gale, J. E.** 1980. Validity of cubic law for fluid flow in deformable rock fracture. *Water Resources Research* 16/6. pp. 1016-1024.