

KARSZTVIZEK GEOKÉMIAI JELLEMZÉSE KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A RADIONUKLIDOKRA A BÜKK KÖRNYEZETÉBEN

GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF KARST WATERS IN THE BÜKK REGION (HUNGARY) BASED ON RADIONUCLIDES

ERŐSS ANITA¹ – CSONDOR KATALIN¹ – HEINZ SURBECK² – MÁDLNÉ SZÓNYI JUDIT¹ – HORVÁTH ÁKOS³ – LÉNÁRT LÁSZLÓ⁴

¹ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c,
anita.ross@geology.elte.hu

²ETH Zürich, Svájc

³ELTE TTK Fizikai Intézet, Atomfizikai Tanszék

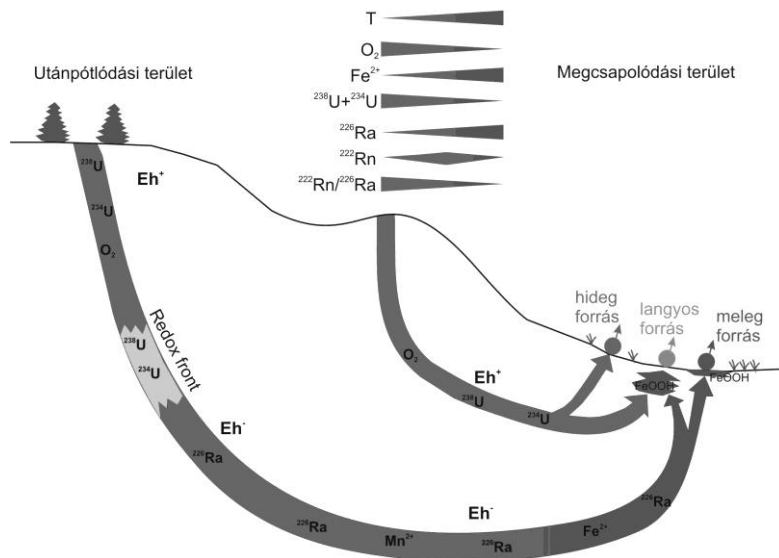
⁴Miskolci Egyetem, Környezetgazdálkodási Intézet, Hidrogeológiai-
Mérnökgeológiai Tanszék

Abstract: The Bükk region in the northeastern part of Hungary is one of the largest karst areas of the country, where the water supply relies mainly on karst water resources. Moreover, this area is famous for its thermal springs and wells, all around the foothills of the Bükk Mountains, which are used for both balneological and heating purposes. Therefore protection and sustainable use of these resources is an important issue, which requires good understanding on the hydrogeological functioning of the karst system. The aim of the present study is to characterize the distribution of the ²³⁸U decay series radionuclides, uranium, radium and radon in the cold, lukewarm and thermal karst waters in the Bükk region. Since these natural radionuclides are ubiquitous in groundwater, they are efficient natural tracers of karst waters and their mixing processes, based on their different geochemical behaviour, which causes fractionation along flow paths. This is a novel approach to characterize fluids and understand their mixing in regional discharge zones of carbonate aquifers, where different order flow systems convey waters with different temperature, composition and redox-state to the discharge zone. With the application of radionuclides as natural tracers the better understanding of the relationship of cold and thermal karst waters, i.e. the functioning of the karst system is expected. During this study 31 samples were collected and analysed for radionuclides and basic chemical composition.

Bevezetés

A 238-as urán bomlási sor elemei közül a ²³⁸U és ²³⁴U, a ²²⁶Ra és annak leányeleme a ²²²Rn jellemzően előfordul felszín alatti vizekben (HOEHN 1998, SWARZENSKI 2007). Ezek a radionuklidok jól alkalmazhatók a felszín alatti vizek és keveredési folyamataik jellemzésére (EISENLOHR – SURBECK 1995, HOEHN 1998, GAINON et al. 2007, SWARZENSKI 2007, ERŐSS et al. 2012). Ez annak köszönhető, hogy mivel ugyanannak a bomlási sornak az elemei, egymástól függenek, de eltérő a geokémiai viselkedésük. A radon gáz halmazállapotának köszönhetően mobilis. Lokális karszt-

rendszerekben felezési ideje a beszivárgás átfutási idejével összemérhető, tehát jelenléte rövid és/vagy gyors áramlási útvonalról nyújt információt (EISENLOHR – SURBECK 1995). A rádium redukív és savas közegben, az urán pedig oxidatív körülmények között mobilis (BOURDON et al. 2003). A felszín alatti víz áramlásának és a kőzetvázalattal való kölcsönhatásának eredményeképpen ezek az izotópok frakcionáción mennek keresztül az áramlási pálya mentén a redox viszonyok megváltozásának köszönhetően (1. ábra). Mindezek alapján a radionuklidok leginkább regionális megcsapolódási területeken alkalmazhatók a felszínre lépő vizek jellemzésére és keveredésének azonosítására, hiszen ott a különböző rendű áramlási rendszerek különböző redox-állapotú vizeket szállítanak a megcsapolódási zónához (ERŐSS et al. 2012, MÁDL-SZÓNYI – ERŐSS 2013).



1. ábra: A redox viszonyok változása és a radionuklidok előfordulása a felszín alatti vízáramlási rendszerekben (GAINON 2008 után módosítva)

Figure 1: The change of redox conditions and the distribution of radionuclides in the groundwater flow systems (modified after GAINON 2008)

A regionális áramlási rendszerekből megcsapolódó vizekre a magasabb hőmérséklet és oldott anyag tartalom mellett jellemző, hogy redukívak (TÓTH 1999), emiatt tartalmazhatnak rádiumot, de urán tartalmuk elhanyagolható. Radon sem fordul elő bennük a hosszú áramlási idő miatt. Más a helyzet, ha a megcsapolódási zónában lokális radonforrás található. A lokális áramlási rendszerből megcsapolódó vizek oxigénben gazdagok, emiatt rádium tartalmuk alacsony, viszont uránt és a rövidebb áramlási idő miatt

radont is tartalmaznak. Itt a radon forrászonája a talaj. Emellett alacsonyabb hőmérséklet és kisebb oldott anyag tartalom jellemzi ezeket (TÓTH 1999). Tehát olyan kétkomponensű keveredési rendszerek esetében, ahol a különböző redox viszonyokkal jellemezhető vizek a keveredési szélső tagok, a radionuklidok sikerrel alkalmazhatóak a komponensek azonosítására (ERŐSS et al. 2012).

A radionuklidok természetes nyomjelzőként történő alkalmazása hatékony módszernek bizonyult a budapesti termálvizek jellemzésére a Budai-termálkarszt regionális megcsapolódási zónájában (ERŐSS et al. 2012). Segítségükkel a korábbi egységes koncepcionális modellt két differenciált modellre lehetett felosztani, melynek értelmében a Rózsadomb előterében kétkomponensű keveredési rendszert sikerült azonosítani, valamint a keveredési szélső tagok hőmérséklete és összetétele is meghatározható volt. A Gellért-hegy előterében viszont keveredési szélső tagok nem voltak kimutathatók radionuklidok segítségével. Ez alapján a Gellért-hegyi megcsapolódási zónában uralkodóan a termálvizek lépnek a felszínre, mely felismerés új eredménnyel szolgált a területre érvényes barlangképződési modellek tekintetében is (ERŐSS et al. 2012).

A radionuklidok alkalmazása új módszert jelent a természetes megcsapolódással rendelkező, termálvizes karsztrezervoárok kutatásában. A Bükk környéke, mint hazánk egyik legnagyobb karsztterülete a radionuklidok egy újabb hazai teszterületét képviseli, ahol a hideg és meleg karsztvizek kapcsolatrendszerének, keveredésének jellemzésére alkalmazzuk ezeket a természetes nyomjelzőket. A területen korábban radonra már történtek átfogó vizsgálatok (SOMOGYI – LÉNÁRT 1986, LÉNÁRT et al. 1989, HAKL et al. 1993), de a 238-as urán bomlási sor felszín alatti vizekben mobilis elemeit, az uránt, a rádiumot és a radont együtt még nem vizsgálták. Célunk tehát egy átfogó képet adni a Bükk térségi karsztvizekben található radionuklidok eloszlásáról. Ennek érdekében a területről vízmintákat gyűjtöttünk, az átfogó geokémiai jellemzés érdekében a radionuklid tartalom mellett a vízminták főelem összetételét is meghatároztuk. Jelen tanulmányban 31 vízminta elemzésén alapuló előzetes eredményeket mutatjuk be.

Földtani háttér

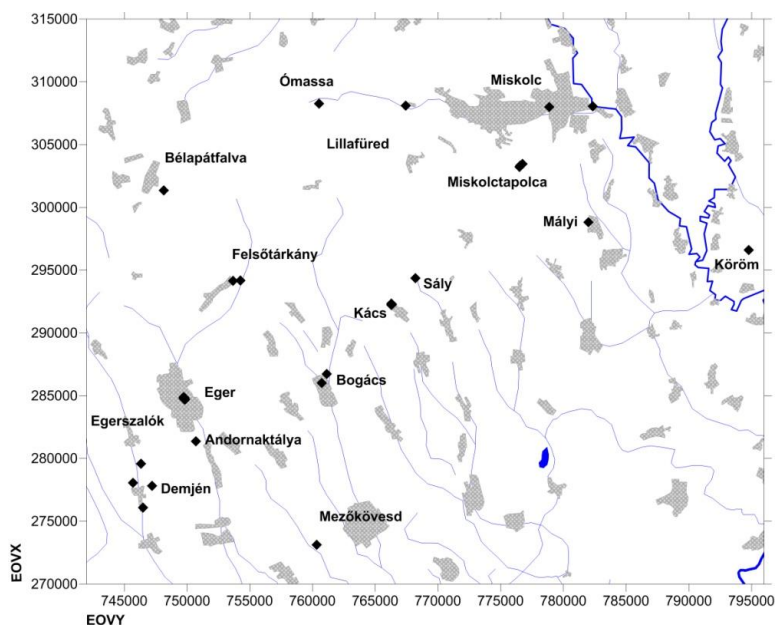
A Bükk szerkezeti alapvetően három nagyobb részre osztható. Ezek a Nagyfennsík parautochton egység, a Szarvaskői takaró és a Kisfennsík takaró (CSONTOS 1999). Felépítő képződményei nagyrészt paleozoikumi illetve mezozoikumi eredetűek. Sekélytengeri kifejlődés jellemző a paleozoikum végén ill. a mezozoikum elején, karbonátplatform a középső-triászban,

medencefáciesek a késő-triászban, majd mélytengeri, sziliciklasztos-karbonátos üledékképződés a jurában (PELIKÁN 2005). A képződmények legjelentősebb metamorfózisa és deformációja a középső-krétában zajlott. Az eocén végén a terület a Paleogén Medence részévé vált, jellemző üledékei elsősorban a hegység peremi területein fordulnak elő.

A parautochton főként triász és jura korú karbonátos képződményekből áll. Az összlet azonban nem egységesen karbonátos kőzetanyagú, vulkáni sorozat közbetelplése jellemzi. A Szarvaskői takarót különböző palák és mafikus kőzetek alkotják, míg a Kisfennsíki takaróban a triász korú karbonátok a jellemzőek. A karsztvizek szempontjából legjelentősebbek a középső triász platform karbonátok (PELIKÁN 2005).

Alkalmazott analitikai módszerek, mintavétel

A vízmintákat 2014 februárjában és márciusában gyűjtöttük. A mintavételi helyszínek a 2. ábrán láthatók. A terepen rögzítettük a vizek pH-ját, hőmérsékletét, fajlagos elektromos vezetőképességét, oldott oxigén tartalmát valamint a redoxpotenciál értékét. Mintavétel történt általános vízkémiai elemzésre (főelemek), rádiumra, uránra, valamint a vízben oldott gázok tekintetében radonra.



2. ábra: Mintavételi helyszínek a Bükk térségében
Figure 2: Sampling points in the Bükk region

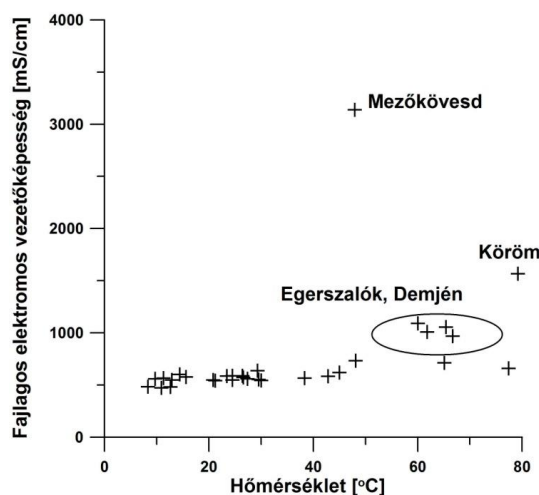
A vízben oldott radon mérése folyadék szcintillációs módszerrel történt az ELTE TTK Atomfizikai Tanszékének laboratóriumában. A főelemek (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) meghatározását az ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékének laboratóriumában végeztük el. A Ca^{2+} és Mg^{2+} ionok komplexometriás titrálással, a HCO_3^- ionok savbázis titrálással kerültek kimutatásra. A Na^+ és K^+ ionok esetében lángfotometriás módszert használtunk, míg a SO_4^{2-} tartalmat spektrofotométerrel határoztuk meg.

A vizek rádium és urán tartalmát Nucfilm-diszkek segítségével, alfa-spektroszkópiás módszerrel (SURBECK 2000) Heinz Surbeck professzor mérte Svájcban.

Eredmények

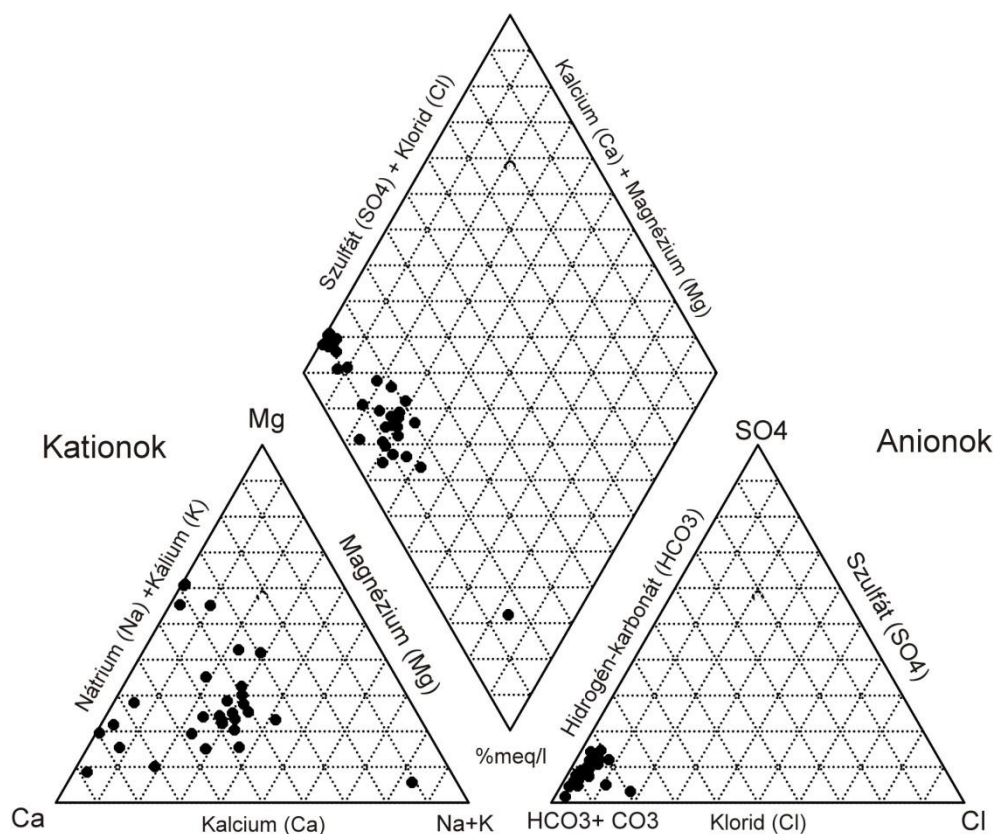
Általános vízkémiai jellemzés

A vízminták két alapvető, terepen is rögzíthető paraméterét, a hőmérsékletet és a vizek oldott anyag tartalmáról információt hordozó fajlagos elektromos vezetőképességet tekintve (3. ábra) a mezőkövesdi termálkút tűnik ki a minták közül 3140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ értékkel. Ezt követik a demjéni, egerszalóki és körömi termálkutak, melyek fajlagos elektromos vezetőképessége meghaladja az 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ értéket. A minták többsége esetében azonban 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alatti értékeket mértünk, mely hozzávetőlegesen 500-600 mg/l alatti összes oldott anyag tartalmat jelent. Feltűnő azonban, hogy ez az érték széles hőmérsékleti spektrumban (8-77°C) jellemzi a mintákat.



3. ábra: A minták terepen rögzített fajlagos elektromos vezetőképessége a hőmérséklet függvényében
Figure 3: Specific electrical conductivity versus temperature plot (parameters measured in the field)

A Piper diagram alapján (4. ábra) a vizek közel azonos vízkémiai fácieset mutatnak: a minták zöménél a $\text{HCO}_3, \text{Cl} + \text{SO}_4$ anionfácies és a $\text{Ca} + \text{Mg}, \text{Na} + \text{K}$ kationfácies dominál. Egy jelentősen eltérő minta van, ez a körömi termálkútból származik, ahol kationfáciesben van különbség: ez a minta a $\text{Na} + \text{K}, \text{Ca} + \text{Mg}$ fáciesbe esik. Alapvetően a kationok tekintetében jellemzi a mintákat változatosság, a minták többsége mindegyik fő kationt tartalmazza (Ca , Mg , $\text{Na} + \text{K}$), a minták egyharmadánál inkább kalciumos típus, ill. néhány esetben magnéziumos típus figyelhető meg. A körömi minta esetében egyértelműen látható a $\text{Na} + \text{K}$ dominancia. Anionok tekintetében minden minta a hidrogénkarbonátos típus határain belül mozog.

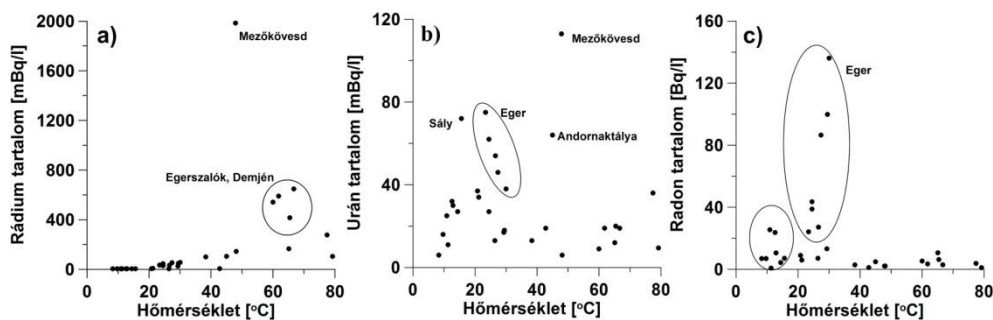


4. ábra: A vízminták áttekintő kémiai jellemzése Piper diagramon
 Figure 4: General geochemical characterization of the water samples on Piper diagram

A minták radionuklid tartalma

A fajlagos elektromos vezetőképességnél tapasztaltakhoz hasonlóan, a mezőkovesdi termálkút rádium és urán tartalma a legmagasabb: 1985 mBq/l ill.

113 mBq/l (5a,b. ábra). A rádium tartalom tekintetében a minták nagy része 200 mBq/l alatti aktivitás koncentrációt mutat. A mezőkövesdi kút mellett az egerszalóki és demjéni kutak mért értékei haladják meg ezt az értéket, rádium aktivitás koncentrációjuk 400-700 mBq/l tartományba esik (5a. ábra). Az urán tartalom a mezőkövesdi kút kivételével igen nagy szórást mutat. Általánosságban elmondható, hogy a minták urán tartalma alacsony, 40 mBq/l alatti, melyhez széles hőmérsékleti tartomány (8-79°C) párosul. Az egri, sályi és andornaktályai kutak esetében mértünk 40-80 mBq/l közötti értékeket (5b. ábra). Radontartalom tekintetében az egri kutak és források radon tartalma kiugró (24-136 Bq/l), illetve néhány hideg forrás (Felsőtárkány Szikla-forrás, Barátréti Vízmű) esetében tapasztalhatunk még 20 Bq/l fölötti értékeket. A minták többségét alacsony (<10 Bq/l) radon aktivitás koncentráció jellemzi (5c. ábra).

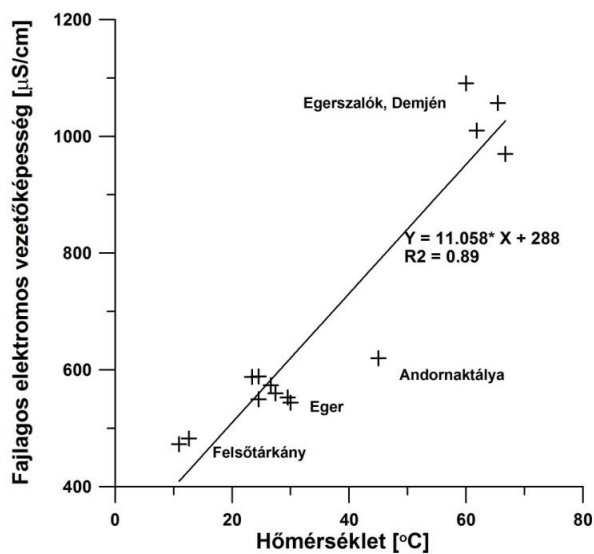


5. ábra: a: A minták rádium tartalma a hőmérséklet függvényében; b: A minták urán tartalma a hőmérséklet függvényében; c: A minták radon tartalma a hőmérséklet függvényében.
Figure 5: a: Radium versus temperature plot; b: Uranium versus temperature plot; c: Radon versus temperature plot

Az Eger környéki terület jellemzése

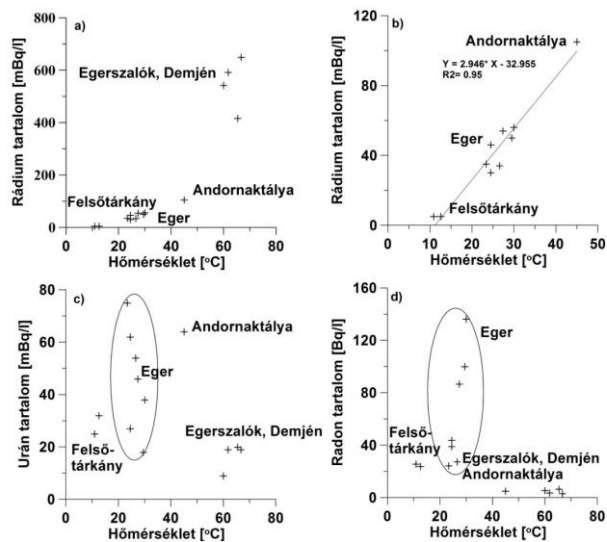
Tekintettel arra, hogy Eger városa híres a radontartalmú forrásairól (WESZELSZKY 1917 in SCHRETER 1923), ezt a területet részletesebben is elemezzük radionuklidok szempontjából. A Bükk délnyugati része hidrogeológiai szempontból is elkülönül, mert a karsztos víztartóként funkcionáló triász karbonátok ebben a térségben fedett helyzetben vannak (PELIKÁN 2005).

A Bükk délnyugati részéről származó minták esetében egyértelmű lineáris kapcsolat látszik a vízminták hőmérséklete és fajlagos elektromos vezetőképessége között: a növekvő hőmérsékletre növekvő oldott anyag tartalom párosul (6. ábra).



6. ábra: A Bükk délnyugati részéről származó vízminták fajlagos elektromos vezetőképessége a hőmérséklet függvényében.

Figure 6: Specific electrical conductivity versus temperature plot of the samples from the SW-Bükk region



7. ábra: a: Az Eger környéki minták rádium tartalma a hőmérséklet függvényében; b: Az Eger környéki minták rádium tartalma a hőmérséklet függvényében, az egerszalóki és demjéni kutak elhagyásával; c: Az Eger környéki minták urán tartalma a hőmérséklet függvényében; d: Az Eger környéki minták radon tartalma a hőmérséklet függvényében.

Figure 7: a: Radium versus temperature plot; b: Radium versus temperature plot without the samples from Egerszalók and Demjén; c: Uranium versus temperature plot; d: Radon versus temperature plot of the waters in Eger region

Az egerszalóki-demjéni kutak rádium aktivitás koncentrációja (400-650 mBq/l) többszörösen meghaladja a térség többi kútjában, forrásában mért rádiumtartalmat (5-105 mBq/l) (7a. ábra). Az egerszalóki-demjéni kutak elhagyásával erős lineáris kapcsolat ($R^2=0,95$) fedezhető fel a rádium tartalom és a hőmérséklet között: növekvő hőmérséklettel növekvő rádium tartalom párosul (7b. ábra). Az egri források és kutak urán tartalma széles tartományban változik (18-75 mBq/l), hőmérséklettől függetlenül (7c. ábra). Ugyanez figyelhető meg a források radontartalma esetében (7d. ábra). A felsőtárkányi hideg vizek radon tartalma a termálkutakéhoz (<10 Bq/l) képest magasabb értéket (25 Bq/l) mutat.

Következtetések, eredmények értelmezése

A hőmérséklettől független, alacsony (< 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) fajlagos elektromos vezetőképesség értékek, mely a minták többségét jellemzi, mély, de viszonylag rövid áramlási útvonalra utalhat, ahol a nagy behatolási mélységgel jelentős hőtartalomra tesznek szert a vizek, de nem áll rendelkezésre elegendő idő jelentősebb gazdagodásra oldott anyag tartalom tekintetében. Ennek oka az utánpótlódási és megcsapolódási területek közelségében ill. jelentős (kb. 500-600 m) magasságkülönbségében keresendő. Az alacsony oldott anyag tartalom és az azonos vízkémiai fácies, dominánsan hidrogénkarbonátos anionfáciessel, homogén, karbonátos víztartóra is utalhat, illetve jelezheti, hogy nincs egyéb fluidumhozzájárulás, keveredés az áramlási pálya mentén egyéb, nem-karsztos víztartók fluidumaival. A mezőkövesdi és az Egerszalók-Demjén környéki termálkutak szénhidrogén kutatáshoz kapcsolódnak. A magasabb oldott anyag tartalom és a magas rádium tartalom ezen kutak esetében kapcsolódhat a magas sótartalmú, erősen reduktív rezervoár-fluidumokhoz. Irodalmi adatok alapján szénhidrogén telepek rezervoár fluidumai gyakran jellemezhetők magas rádiumtartalommal (COLLINS 1975, PETERSON et al. 2013).

Az Eger környéki terület hidrogeológiai viszonyait leíró modellek szerint (SCHRÉTER 1923, AUJESZKY – SCHEUER 1979, IZÁPY – SÁRVÁRY 1991, LÉNÁRT 2008, 2011, GONDÁRNÉ SŐREGI et al. 2011) a Bükk-hegység délnyugati területén a fedetlen triász és eocén karbonátos területeken beszivárgó csapadékvíz egy része lokális/intermedier áramlási pályákon hideg források formájában csapolódik meg, másik része a mélybe szivárogva felmelegszik, és egyrészt az egri langyos forrásokon, másrészt mesterségesen termálkutakon keresztül kerül újra a felszínre, a megtett út és a mélység függvényében eltérő oldott anyag tartalommal ill. hőmérséklettel. Ezt a modellt támasztja alá az általunk megfigyelt lineáris kapcsolat a hő-

mérséklet és a fajlagos elektromos vezetőképesség ill. a rádium tartalom között (6. és 7b. ábra).

KLEB – SCHEUER (1983), *DEÁK – SCHEUER* (2009) valamint *GONDÁRNÉ SŐREGI* et al. (2011) szerint az egri források vize keverék, mert hideg víz utánpótlódást is kap az Egertől keletre lévő felszíni karbonátos kibúvások felől a vetők mentén feláramló termálvizek mellett. *DEÁK – SCHEUER* (2009) trícium adatok alapján a környező talajvizekkel való keveredést is valószínűsíti. A radionuklidok alapján kétkomponensű keveredés, azaz oxidatív hideg (lokális/intermedier áramlási rendszer) és reduktív termálvizek (regionális áramlási rendszer) keveredése nem igazolható, mely a fentebb leírt, egyszerű áramlási képet támasztja alá. Az urán adatok alapján azonban oxidatív viszonyokkal jellemezhető vizek jelenléte nem zárható ki a források és kutak esetében (7c. ábra). A keveredés egyértelmű bizonyítéka lenne, ha a forrásokban vas-oxihidroxid kiválást találnánk, mely a vízből a rádium adszorpciójával radonforrásként is szolgálhatna, ahogy ezt a budapesti termálvizek esetében tapasztaltuk (*ERŐSS* et al. 2012). Azonban vas-oxihidroxid kiválás nem tapasztalható az egri források esetében, egyedül *SCHRÉTER* (1923) számol be arról, hogy földrengések hatására a sárgás-vörös iszap feltörését tapasztalták a férfuszoda forrásánál (mai Strand I. sz. nagymedencéje).

KLEB – SCHEUER (1983) szerint vulkanikus kőzetek (porfirit) rádiumtartalma tehető felelőssé az egri források radontartalmáért. Jelen tanulmány a környékbeli szénhidrogén telepek formációfluidumának rádiumtartalmát is lehetséges forrásként valószínűsíti.

Összefoglalás

A karsztos rezervoárok kutatásában új módszernek számító radionuklidok, mint természetes nyomjelzők Budapest után másodízben kerültek alkalmazásra hazánkban a Bükk térségében. A források és kutak vizének urán, rádium és radon tartalmára irányuló mérésekkel a hideg és meleg karsztvizek kapcsolatrendszerének, keveredésének jellemzése a célunk.

A bemutatott eredmények a területen végzett átfogó vízmintavételek első, előzetes eredményeit képviselik. A területet általánosságban jellemzi, hogy az oldott anyag tartalom a hőmérséklet növekedésétől független, mely rövid, mély áramlási pályára utal, ami az utánpótlódási és megcsapolódási területek közelségével, és jelentős magasságkülönbséggel magyarázható. A rádium elemzések alapján az egyes termálkutak esetében tapasztalt magasabb oldott anyag- és rádium-tartalom a környékbeli szénhidrogén-rezervoár fluidumokkal való kapcsolatot valószínűsíti. Az egri források esetében egy-

értelmű, kétkomponensű keveredés nem azonosítható a radionuklidok segítségével, mely a korábbi, egyszerű áramképet támasztja alá.

Munkánkkal a bükki karsztos rezervoár hidrogeológiai ismeretességéhez járultunk hozzá, mely a vízkészletek fenntartható hasznosításának alapfeltétele.

Köszönetnyilvánítás

A bükki kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatás eredményei a konvergencia régióban a „KÚTFŐ - a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának felszín alatti vizekhez kapcsolódó nemzetközi kutatási potenciáljának fejlesztése célzott alapvető feladatok támogatása által” című, TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0049 számú projekthez kapcsolódóan hasznosulnak.

IRODALOM

- AUJESZKY, G. – SCHEUER, GY. (1979): A Ny-bükki karsztforrások foglaltsainak vízföldtani tapasztalatai – Hidrológiai Közöny, 59(2) pp. 63–77.
- BOURDON, B. – HENDERSON, G. M. – LUNDSTROM, C. C. – TURNER, S. P. (eds.) (2003): Uranium-series Geochemistry. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy and Geochemistry Vol. 52, 656 p.
- COLLINS, A. G. (1975): Geochemistry of oilfield waters. Elsevier, 496 p.
- CSONTOS L. (1999): A Bükk hegység szerkezetének főbb vonásai. – Földtani Közöny, 129 pp. 95–131.
- DEÁK J. – SCHEUER, GY. (2009): Az egi vizek eredete természetes nyomjelzők alapján. – A Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, Bányászat, 77. pp. 39–46.
- EISENLOHR, L. – SURBECK, H. (1995): Radon as a natural tracer to study transport processes in a karst system. An example in the Swiss Jura. – C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes. 321(2a) pp. 761–767.
- ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., GOLDSCHIEDER, N., CSOMA, A. É. (2012): Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary – Journal of Hydrology 426-427 pp. 124–137.

- GAINON, F.* (2008): Les isotopes radioactifs de la série de l'uranium-238 (^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{234}U et ^{238}U) dans les eaux thermales de Suisse: sites d'Yverdon-les-Bains, Moiry, Loèche-les-Bains, Saxon, Val d'Illeiez, Bad Ragaz, Delémont, Lavey-les-Bains, Brigerbad et Combioula – Thèse CHYN, 109 p.
- GAINON, F. – SURBECK, H. – ZWAHLEN, F.* (2007): Natural radionuclides in groundwater as pollutants and as useful tracer – In: Bullen T. D., Wang Y. (Eds.): Water-rock Interaction: Proceedings of the 12th International Symposium on Water-Rock Interaction, Kunming, China, 31 July - 5 August 2007, Taylor and Francis, London, 1 pp. 735–738.
- GONDÁRNÉ SÓREGI, K. – GONDÁR, K. – KÖNCZÖL, NÁNDORNÉ, KUN, É. – SZÉKVÖLGYI, K. – ZACHAR, J.* (2011): Az Egri gyógyforrások hidrogeológiai viszonyai. – Magyar Hidrológiai Társaság XXIX. Országos Vándorgyűlés Tanulmánykötet, 2011, Eger, 8 p.
- HAKL, J. – LÉNÁRT, L. – HUNYADI, I.* (1993): Radon measurements in Caves and Springs located in the area of the Bükk National Park. Newest Results in Research, Protection and Use of Caves of Bükk Mountains. Miskolci Egyetem, I pp. 5–13.
- HOEHN, E.* (1998): Radionuclides in groundwaters: contaminants and tracers – In: Herbert, M. – Kovar, K. (Eds.): Groundwater Quality: Remediation and Protection. IAHS Publ. No. 250 pp. 3–9.
- IZÁPY, G. – SÁRVÁRY, I.* (1991): Kiemelt jelentőségű karsztos termásvíz-előfordulások vízföldtani vizsgálata, Egri és Egerkörnyéki termásvizek vizsgálata. – Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóintézet, 7611/1/2085 B, Budapest, 29p.
- KLEB, B. – SCHEUER, GY.* (1983): Az egri gyógyfürdők vízföldtana. – In: Sugár I. (szerk.) Eger gyógyvizei és fürdői, Heves megyei Tanács, pp. 11–78.
- LÉNÁRT, L.* (2008): Hideg, langyos és meleg karsztvíz-zónák a Bükkben és környezetében. – Mineral waters in the Carpathian Basin 5th International Scientific Conference, Csíkszereda, pp. 41–50.
- LÉNÁRT, L.* (2011): Hol van termálkarsztvíz a Bükk térségében? – Miskolci Egyetem, Multidiszciplináris Tudományok, 1(1) pp. 291–298.
- LÉNÁRT, L. – SOMOGY, GY. – HAKL, J. – HUNYADI, I.* (1989): Radon Mapping in Caves of Eastern Bükk Region. – Proceedings of the X. International Congress of Speleology 13-20. August 1989, Budapest, Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat, pp. 620–622.
- MÁDL-SZŐNYI, J. – ERŐSS, A.* (2013): Effects of regional groundwater flow on deep carbonate systems focusing on discharge zones. – Proceedings of the International Symposium on Regional Groundwater Flow: Theory,

Applications and Future development. 21-23 June Xi'an, China. China Geological Survey, Commission of Regional Groundwater Flow, IAH, pp. 71–75.

PELIKÁN, P. (2005): A Bükk hegység földtana. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 284 p.

PETERSON, R. N. – VISO, R. F. – MACDONALD, I. R. – JOYE, S. B. (2013): On the utility of radium isotopes as tracers of hydrocarbon discharge. – *Marine Chemistry*, 156 pp. 98–107.

SCHRÉTER, Z. (1923): Az egeri langyos vizű források. – A Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve, XXV(4) pp. 1–25.

SOMOGYI, GY. – LÉNÁRT, L. (1986): Time-integrated radon measurements in spring and well waters by track technique.– *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 12(1-6) pp. 731–734.

SURBECK, H. (2000): Alpha spectrometry sample preparation using selectively adsorbing thin films. – *Appl. Rad. Isot.* 53 pp. 97–100.

SWARZENSKI, P. W. (2007): U/Th series radionuclides as coastal groundwater tracers. – *Chem. Rev.* 107 pp. 663–674.

TÓTH, J. (1999): Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. – *Hydrogeology Journal*, 7(1) pp. 1–14.

WESZELSZKY, GY. (1917): Az ásványos vizek radioaktivitásáról. – *Magyar Chemiai Folyóirat*, XXIII(116): 1p.