

**A VILLÁNYI-TERMÁLKARSZT HIDROGEOLOGIAI
VIZSGÁLATA: REGIONÁLIS FELSZÍNALATTI ÁRAMLÁSI
RENDSZEREK ÉS BARLANGI SZUBMIKRONOS FOLYAMATOK
ÖSSZEFÜGGÉSEI**

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

CSONDOR KATALIN

Okleveles geológus

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar,
Környezettudományi Doktori Iskola, Környezeti Földtudomány Doktori
Program

Témavezető: Dr. Erőss Anita, tudományos munkatárs, Általános és
Alkalmazott Földtani Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem



A Környezeti Földtudományi Doktori Program vezetője: Dr. Szalai Zoltán,
egyetemi docens

A Környezettudományi Doktori Iskola vezetője: Dr. Turányi Tamás,
egyetemi tanár

Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék
Természettudományi Kar
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Budapest
2021

1. Bevezetés és célkitűzések

A felszínalatti víz, mint földtani hatótényező szerepe már évtizedek óta ismert (TÓTH 1999), mely a karsztosodási folyamatok vizsgálatánál sem elhanyagolható, hiszen a karsztos jelenségek úgy mint, források, barlangok és egész karsztrendszerek a felszínalatti víz munkájához kapcsolódó jelenségekként értelmezhetők. Így ezek kialakulásánál, jellemzőik megértésénél elengedhetetlen a hidrogeológiai kutatás, az áramlási rendszerek feltérképezése. Ennek nyomán az elmúlt évtizedekben jelentős változáson esett át mind a nemzetközi, mind a hazai karszt- és barlangkutatás, mivel előtérbe került a karsztrendszerek hidrogeológiai szempontú vizsgálata és ezek genetikai osztályozása is a felszínalatti vizek áramlási rendszereinek figyelembevétele alapján történik (KLIMCHOUK 2007; MÁDL-SZŐNYI és mtsi. 2017; MÁDLNÉ SZŐNYI 2020).

A fedetlen és csatlakozó fedett karbonátos területek peremén kialakuló hipogén karsztok hidrogeológiai szempontú kutatására hazánk földtani adottságai kiváló lehetőséget biztosítanak. Dolgozatom fő fókuszában a Villányi-termálkarszt és az itt található hipogén barlangok állnak. A lokális léptékben zajló karsztosodási és barlangképződési folyamatok megértése érdekében elsőként regionális léptékű, mért adatokon alapuló medencehidraulikai adatfeldolgozást készítettem, melynek fő célja a regionális felszínalatti vízáramlási rendszerek feltérképezése volt. Az áramlási rendszerek mintázatának, a regionális áramlási irányok meghatározásával a Villányi-hegység déli előterébe érkező, és a barlangokat kialakító fluidumok eredete, hajtóereje azonosítható. Mivel a hipogén karsztok kialakulásánál alapvető szerepe van a fedő üledékeknek és az üledékes mélymedencének, a hidraulika mellett a vízkémiai tulajdonságok, mint természetes nyomjelzők segítségével is vizsgáltam ezen területek szerepét. A lokális léptékű vizsgálatok keretében a térség egyetlen természetesen megcsapolódó, langyos vízü forrásának, a kistapolcai forrásnak a folyamatos észlelésével a hideg karsztvizek és a feláramló termálvizek aktív keveredésének korábbi munkák által feltételezett jelenlétét vizsgáltam. A karsztvízszintet elérő Beremendi-kristálybarlangban zajló recens

folyamatokat egy in-situ kísérlettel és folyamatos monitoring segítségével tártam fel. A térség barlangjainak hidrogeológiai szempontú felméréseivel a feláramló termálvizek hatásait, annak legmagasabb szintjét határoztam meg.

A Villányi-termálkarszt dolgozatban bemutatott, medenceléptékű, a hidraulikai folytonosságra épülő hidrogeológiai szemlélet szerinti vizsgálata, az aktuálisan zajló folyamatainak megértése a levezetett általános következtetésekkel a hipogén karsztos kutatások fejlődését segíti, nemzetközi érdeklődésre is számot tartva.

2. Alkalmazott módszerek

A regionális medence léptékű feldolgozás során különböző medencehidraulikai és vízgékémiai módszereket alkalmaztam a Villányi-hegység és tágabb környezetének felszínalatti vízáramlási irányainak meghatározásához. A mért adatokon alapuló **hidraulikai feldolgozás** keretén belül a rendelkezésre álló adatokból nyomás-eleváció profilokat, tomografikus potenciál térképeket és hidraulikus keresztzelvényeket készítettem az áramlási irányok meghatározásához. Ezek kiegészítéseként hidrosztratigráfiai tagolást készítettem a területen megjelenő formációkra. **Vízgékémiai** mintázások során a helyszínen rögzítettem a vizek terepi paramétereit: hőmérséklet, pH, fajlagos elektromos vezetőképesség, oldottoxigéntartalom, redox potenciál. Az általános vízgékémiai paraméterek (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) meghatározása az ELTE Általános és Alkalmazott Földtani és Természetföldrajzi Tanszékének laboratóriumában történt, míg a nyomelemkémiai vizsgálatok a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, illetve a Nemzeti Népegészségügyi Központ laboratóriumaiban készültek a hatályos magyar szabványok alapján. A radionuklidok közül a ^{226}Ra és a $^{234}\text{U}+^{238}\text{U}$ aktivitáskoncentráció értékeket az ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékének Müller-Surbeck laboratóriumában határoztam meg alfa-spektrometriás módszerrel, míg a ^{222}Rn aktivitáskoncentrációját folyadékszcintillációs módszerrel mértem az

ELTE TTK Atomfizikai Tanszékén. A stabilizotópos vizsgálatok GR LWIA-24d típusú üreglecsengéses lézer analizátor segítségével kerültek elemzésre az ELKH CSFK Földtani és Geokémiai Intézetében.

A Villányi-hegységben zajló barlangképződési folyamatok megértését célzó in situ kísérlet során a barlangi víz fiziko-kémiai paramétereire, illetve a víz összetételére irányuló méréseket végeztem, emellett pedig vizsgáltam a kísérletbe bevont mészkő lemezek felületén végbemenő változásokat és kiválásokat. A **folyamatos monitoringhoz** kapcsolódóan a vízszintet, fajlagos elektromos vezetőképességet, illetve a hőmérsékletet Dataqua típusú data loggerrel rögzítettem. Az **in situ kísérlet** keretén belül a mészkő lemezek felületét a kísérlet előtt és után FEI Quanta 3D típusú, nagyfelbontású kétsugaras pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam meg az ELTE Központi Kutató és Műszer Centrumában.

3. Eredmények, az értekezés tézisei

Doktori kutatásom során a Villányi-hegység és déli előterében a barlangképződési folyamatok megismerése volt a célom, melyhez a felszínalatti víz földtani hatótényező szerepét alapul véve hidrogeológiai megközelítést alkalmaztam. Ezen cél eléréséhez regionális, medence léptékű hidraulikai és vízkémiai feldolgozást, illetve lokális léptékű vizsgálatokat végeztem a fluidumok áramlási irányának, eredetének, tulajdonságainak feltérképezésére. Különös figyelmet fordítottam a Villányi-termálkarszt recens barlangképződési folyamataira, melyet egy, a Beremendi-kristálybarlangban kialakított in situ kísérlettel vizsgáltam. A kutatásom legfőbb eredményeit az alábbi tézisekben foglalom össze:

1. A vizsgálati területen, így a Villányi-hegységben, a hozzá kapcsolódó Dráva-medencei területeken és a Mecsek előterében megjelenő földtani képződményekre irodalmi adatok alapján

formáció szintű hidrosztratigráfiai egységeket határoztam meg és alkalmaztam a medence léptékű regionális felszínalatti vízáramlási rendszerek megértéséhez. Összesen 54 formációt 17 hidrosztratigráfiai egységbe soroltam, majd elkészítettem a területre vonatkozó egyszerűsített hidrosztratigráfiai besorolást, mely szerint 6 csoportba kategorizáltam a formációkat.

2. A medence léptékű hidraulikai feldolgozással meghatároztam a kutatási területre jellemző áramlási irányokat, rezsím területeket és fluidumok áramlásának fő hajtó erőit. Ennek során 48 nyomás-eleváció profilt készítettem el, melyek segítségével meghatároztam a fluidumok vertikális áramlási irányát, így 14 beáramlási-, 9 kiáramlási- és 25 átáramlási területet azonosítottam. A nyomás-eleváció profilok eredményét 6 tomografikus potenciáltérképpel, 2 különbség térképpel és 2 hidraulikus keresztzelvénnyel egészítettem ki. Ezek alapján megállapítottam, hogy a terület sekély régióiban ($z=-500$ mBf-ig) a topográfia által vezérelt gravitációs áramlási rendszerek jelenléte jellemző, ahol főként hidrosztatikushoz közeli nyomásállapotok uralkodnak, tehát jellemzően átáramlási területek jelennek meg. A felszínalatti vizek regionális áramlási iránya ebben a zónában É-D-i, mely követi a topográfiát. A mélyebb területeken ($z=-1500 - -2500$ mBf) túlnyomást tudtam azonosítani a terület Dráva-medencéhez tartozó részein, melynek jelenlétét az egész kutatási területen feltételezem. A túlnyomás hatására felfelé irányuló vertikális vízmozgás a jellemző, és a regionális áramlási irányok ebben a mélységben függetlenek a topográfiától és a medenceperemek felé, zömében ÉK felé mutatnak. A gravitációsan vezérelt áramlási rendszerek és a túlnyomásos áramlási rendszerek átmeneti zónája -1500 és -2000 mBf eleváció körülre tehető, ahol a túlnyomás teljesen eltűnik.

3. A regionális léptékű hidraulikai feldolgozás, az áramlási

viszonyok meghatározása a térség természeti erőforrásainak kiaknázásával kapcsolatos, gyakorlati vonatkozású eredményeket is hozott. A gravitációsan vezérelt áramlási rendszerek és az alatta elhelyezkedő túlnyomásos rendszerek határánál (-1500 mBf és -2000 mBf között) potenciál minimum zónákat tudtam azonosítani, melyek kedvező környezetek a szénhidrogének csapdázódásának, egyúttal kijelölhető segítségükkel a szénhidrogének előfordulásának legfelső határa. Az áramlási- és nyomásviszonyok alapján a termálvizek geotermikus célú hasznosítása szempontjából potenciális területeket is kijelöltem, melyek a terület azon részeire jellemzőek, ahol átáramlási viszonyok uralkodnak, hidrosztatikus nyomásviszonyokkal.

4. A mért adatokon alapuló hidraulikai feldolgozás eredményeit kiegészítve vízkémiai és hőmérsékleti adatokkal igazoltam, hogy a Villányi-hegység déli előterében, Harkánynál megjelenő magasabb hőmérsékletű vizek egy része a Dráva-medence felől érkezik.
5. A mért adatokon alapuló regionális hidraulikai feldolgozás alapján a Villányi-hegység déli előterébe -500 mBf elevációig a Mecsek és a Villányi-hegység felől, ÉD-i áramlással érkeznek fluidumok. A regionális feldolgozást lokális léptékű hidraulikai és vízgeokémiai feldolgozásokkal kiegészítve megállapítottam, hogy a Dráva-medencétől távolodva csökken a medencéből érkező fluidumok hatása. A Villányi-hegység déli előterében sekély mélységben jelen levő vagy természetesen megcsapolódó vizek (pl. Kistapolca, Beremend) magasabb hőmérsékletüket akkor is elérhetik, ha a Mecsek- vagy a Villányi-hegységet tekintjük beszívargási területnek. Ezt a feltételezést numerikus szimulációval, illetve vízkémiai és izotópos adatokkal is megerősítettem. Mindezek alapján elkészítettem a Villányi-hegység déli előterének DNy-ÉK – ÉNy-DK irányú

koncepcionális vízföldtani szelvényét, melyen megjelennek a felszínalatti vízhez köthető jelenségek is, úgy mint a források, barlangok.

6. A kutatási területen található nagyobb barlangok hidrogeológiai szempontú felmérésével azonosítottam a barlangokban megjelenő olyan formákat, melyek a termálvízzel való kontaktus nyomait őrzik és azonosítottam a felszín felől szivárgó hideg vizek epigén hatásait. A felmérés eredményeként meghatároztam azt a zónát, ahol az epigén és hipogén jegyek találkoznak, ezzel kijelöltem a termálvíz hatásának egykori legmagasabb szintjét.
7. A lokális feldolgozások keretében két helyen idősoros adatgyűjtést és elemzést végeztem, melyek eredménye alapján a két lokális terület - Kistapolca és Beremend - között igazoltam a hidraulikai kapcsolatot. Emellett az adatok elemzésével megállapítottam, hogy ezek a rendszerek nincsenek közvetlen kapcsolatban az egyes csapadékesemények hatására közvetlenül beszivárgó lokális vizekkel, csak dinamikus választ adnak a megemelkedő vízszinttel a csapadékeseményekre.
8. A Beremendi-kristálybarlangban végzett in situ kísérlettel beazonosítottam a barlangban aktuálisan zajló folyamatokat és megállapításokat tettem a különböző közegekben zajló folyamatokra:
 - a. A barlangi levegőben mikrobiológiai folyamatok jelenlétét mutattam ki. A kísérlet alatt fonalas baktériumok mellett megjelentek komplexebb spóra és baktérium sejt telepek is a lemezek felületén.
 - b. A levegő-víz határon mikrobiológiai folyamatokat, oldódást és karbonát kiválást tapasztaltam. A mikrobiológiai folyamatok a levegőben elhelyezkedő lemez részekén voltak markánsan kimutathatók, míg az oldódás a víz alatti részekén

jelent meg. A levegő-víz határ legerőteljesebb folyamatát a karbonát kiválás képviselte, mely a kísérlet előrehaladtával egyre nagyobb mértékű és változatosabb formájú kiválásokat eredményezett. Ezen a határfelületen kimutattam az oldási- és kiválási folyamatok időbeni váltakozását.

c. A víz alatti részen karbonát kiválást és oldódási folyamatokat azonosítottam.

Az *in situ* kísérlettel kimutattam, hogy a barlangban mikrobiológiai és fizikai-kémiai folyamatok egyidőben zajlanak, de egymástól elkülönülten, más közegekben.

9. A Beremendi-kristálybarlang vizében folyamatosan mért paraméterek (hőmérséklet, fajlagos elektromos vezetőképesség) stabilitása, a stabil izotópos adatok csapadékhoz közeli értéke, és az *in situ* kísérlet eredménye alapján megállapítottam, hogy a barlangban a hipogén barlangképződés már nem egy aktív folyamat, a térségben a hipogén barlangképződés tehát nem azonosítható. Emellett megállapítottam, hogy az enyhe oldódási folyamatok mellett párhuzamosan a barlangban karbonát kiválás is zajlik, azaz a karbonát egyensúly tolódik kiválás vagy oldódás irányába mikroskálán zajló, lokális folyamatok hatására.
10. A Beremendi-kristálybarlangban elvégzett *in situ* kísérlettel komplexen, a barlang minden közegét vizsgáltam, mely nem csak a Villányi-termáلكarszt esetében egyedülálló, hanem hazánkban is. Az *in situ* kísérlet tapasztalatai és eredményei hasznos információt szolgáltatnak és alapját képezhetik más, hasonló kísérletek sikeres megtervezésének és lebonyolításának. Tapasztalataim alapján kijelenthető, hogy az ilyen jellegű kísérletbe bevont mészkő lemezek vizsgálatára a FIB-SEM mikroszkóp alkalmas, melyet elsőként alkalmaztam ilyen céllal hazánkban.

4. Felhasznált irodalom

- KLIMCHOUK, AB. (2007). HYPOGENE SPELEOGENESIS: HYDROGEOLOGICAL AND MORPHOGENETIC PERSPECTIVE. *Special Paper No. 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM*
- MÁDL-SZÖNYI, J, ERŐSS, A, TÓTH, Á. (2017). Fluid flow systems and hypogene karst of the Transdanubian Range, Hungary—with special emphasis on Buda Thermal Karst *Hypogene karst regions and caves of the world* (pp. 267-278): Springer
- MÁDLNÉ SZÖNYI, J. (2020). *Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben, a Budai-termáلكarszt tágabb környezetének példáján.* ELTE.
- TÓTH, J. (1999). GROUNDWATER AS A GEOLOGIC AGENT: AN OVERVIEW OF THE CAUSES, PROCESSES, AND MANIFESTATIONS. *Hydrogeology journal*, 7(1), 1-14.

5. Doktori kutatáshoz kapcsolódó publikációk

- CSONDOR K., CZAUNER B., CSOBAJI L., GYŐRI O., ERŐSS A. (2020) Characterization of the regional groundwater flow systems in south Transdanubia (Hungary) to understand karst evolution and development of hydrocarbon and geothermal resources. *Hydrogeology Journal* 28 : 8 pp. 2803-2820. , 18 p.
- ERŐSS A., CSONDOR K., CZUPPON GY., DEZSŐ J., MÜLLER I. (2020) Groundwater flow system understanding of the lukewarm springs in Kistapolca (South Hungary) and its relevance to hypogene cave formation. *Environmental Earth Sciences* 79: 6, Paper:132, 15 p.

6. Egyéb publikációk

- CSONDOR K., BAJÁK P., SURBECK H., IZSÁK B., HORVÁTH Á., VARGHA M., ERŐSS A. (2021) Parti szűrésű vízbázisok természetes radioaktivitása nuklidspecifikus mérések tapasztalatai alapján. *Hidrológiai Közlöny*, 101. évf. 2. szám, pp. 44-54.
- CSONDOR K., BAJÁK P., SURBECK H., IZSÁK B., HORVÁTH Á., VARGHA M., ERŐSS A. (2020) Transient nature of riverbank filtered drinking water supply systems - A new challenge of natural radioactivity assessment. *Journal of Environmental Radioactivity* 211 Paper: 106072.

- KOVÁCS-BODOR P, CSONDOR K, ERŐSS A, SZIEBERTH D, FREILER-NAGY Á, HORVÁTH Á, BIHARI Á, MÁDL-SZŐNYI J (2019) Natural radioactivity of thermal springs and related precipitates in Gellért Hill area, Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity* 201: 32–42.
- ERŐSS A., CSONDOR K., IZSÁK B., VARGHA M., HORVÁTH Á., PÁNDICS T. (2018) Uranium in groundwater - The importance of hydraulic regime and groundwater flow system's understanding. *Journal of Environmental Radioactivity*, 195 pp. 90-96.
- CSONDOR K., ERŐSS A., HORVÁTH Á., SZIEBERTH D. (2017) Természetes nyomjelzők alkalmazása a Molnár János-barlangban. *Karsztfeljlődés* 22 pp. 35-45.
- CSONDOR K., ERŐSS A., HORVÁTH Á., SZIEBERTH D. (2017) Radon as a natural tracer for underwater cave exploration. *Journal of Environmental Radioactivity* 173, pp. 51-57.
- ERŐSS A., SURBECK H., CSONDOR K., HORVÁTH Á., MÁDL-SZŐNYI J., LÉNÁRT L. (2015) Radionuclides in the waters of the Bükk region, Hungary. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303: 3 pp.2529-2533.
- ERŐSS A., CSONDOR K., SURBECK H., MÁDL-SZŐNYI J., HORVÁTH Á., LÉNÁRT L. (2014): Karsztvizek geokémiai jellemzése különös tekintettel a radionuklidokra a Bükk környezetében. *Karsztfeljlődés* 19 pp.77-89.

7. Doktori kutatáshoz kapcsolódó konferenciaközlemények

- CSONDOR, K., CSOBAJI, L., GYŐRI, O., ZENTAI-CZAUNER, B., ERŐSS, A. (2021): A Villányi-termálkarszt áramlási rendszereinek és aktuális barlangképződési folyamatainak vizsgálata: Investigation of the flow systems and actual cave formation processes of the Villány Thermal Karst. In XVI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia = 16th Carpathian Basin Conference for Environmental Sciences (p. 36).
- CSONDOR, K., CSOBAJI, L., ZENTAI-CZAUNER, B., GYŐRI, O., ERŐSS, A. (2021): Karst evolution, hydrocarbon and geothermal resources in flow system context (South Hungary). In EGU General Assembly (2021) Paper: 14896
- ERŐSS, A., CSONDOR, K., TÓTH, Á., DEZSŐ, J., ZENTAI-CZAUNER, B., MÜLLER, I. (2019): Characterization of the regional groundwater flow system and groundwater related phenomena in the Villány thermal karst area (Hungary). In: Groundwater management and governance. Malaga, Spanyolország: Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español, (2019) (p. 558).
- ERŐSS, A., CSONDOR, K., CSOBAJI, L., ZENTAI-CZAUNER, B., GYŐRI, O., (2019): Characterization of the regional groundwater flow system in South Transdanubia (Hungary). In Geophysical Research Abstracts (p. 14194).

- CSONDOR, K., ERŐSS, A. (2019): Comprehensive hydraulic and hydrochemical interpretation of a karst area in South Hungary. In International Karstological School Classical Karst (27; 2019; Postojna) Karst Hydrogeology - research trends and applications: abstracts and guide book (p. 89).
- CSONDOR, K., ERŐSS, A. (2018): A Villányi-hegység aktuális hidrogeológiai kutatásai. In XXII. Karsztfejlesztés Konferencia összefoglaló kötet (p. 7).
- CSONDOR, K., ERŐSS, A. (2018): Comprehensive hydrogeological study of a hypogenic cave in South Hungary. In The European bi-annual conference on the Hydrogeology of Karst and Carbonate Reservoirs - Conference Proceedings. Paper: 172655.
- CSONDOR, K., TÓTH, Á., DEZSŐ, J., LEÉL-ŐSSY, Sz., ERŐSS, A. (2018): Comprehensive hydrogeological study of a hypogenic cave in South Hungary. In The European bi-annual conference on the Hydrogeology of Karst and Carbonate Reservoirs - Conference Proceedings (pp. 50–51).
- CSONDOR, K., TÓTH, Á., MÜLLER, I., ERŐSS, A. (2018): Hydrogeological characterization of the lukewarm spring lake in Kistapolca (South Hungary). In EGU General Assembly 2018. Paper: Vol. 20, EGU2018-11796.
- ERŐSS, A., CSONDOR, K. (2017): Flow system analysis of the Villány thermal karst area, Hungary. In 44th Congress of International Association of Hydrogeologists - Book of abstracts (p. 433).
- CSONDOR, K., ERŐSS, A. (2017): Flow system interpretation of the second largest karst system of Hungary – hydraulic and hydrogeochemical characterization. In Characterizing regional groundwater flow systems: Insight from practical applications and theoretical development: Symposium Agenda and Abstracts (p. 59).
- ERŐSS, A., CSONDOR, K. (2016): First results of the hydraulic and geochemical evaluation of the Villány thermal karst area. In XII. Nemzetközi Tudományos Konferencia a Kárpát-medence Ásványvizeiről. Miskolci Egyetem (2016).
- ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., CSONDOR, K., GOLDSCHIEDER, N. (2016): Characterization of thermal karst aquifers in Hungary using natural tracers. In Grundwasser - Mensch - Ökosysteme (pp. 158–159).
- CSONDOR, K., ERŐSS, A. (2016): Hydraulic and geochemical characterization of the Villány thermal karst area (Hungary). In Eurokarst, Neuchâtel, Svájc (2016).
- CSONDOR, K., ERŐSS, A. (2016): Thermal waters in the Villány region (Hungary) – hydraulic and geochemical interplay of karst and sedimentary basin. In 43rd IAH Congress (2016) Paper: 2079.