

**FELSZÍNALATTI VÍZÁRAMLÁSOK MINTÁZATA  
FEDETLEN ÉS KAPCSOLÓDÓ FEDETT  
KARBONÁTOS VÍZTARTÓ RENDSZEREKBE  
A BUDAI-TERMÁLKARSZT  
TÁGABB KÖRNYEZETÉNEK PÉLDÁJÁN**

MTA Doktori értekezés tézisei

Mádlné Szőnyi Judit

Budapest, 2019

# 1 BEVEZETÉS

Pályám kezdetétől a medence méretekben kialakuló felszínalatti vízáramlások elméletének és gyakorlatának megértése foglalkoztatott. A vízföldtan az utóbbi évtizedekben túlnőtt korábbi, víztartókban gondolkodó keretein. Emiatt szükségessé vált az új, medenceléptékű megközelítéshez illeszkedő fogalmak és módszertan bevezetése (Zhang 2018). Ez a mai hidrogeológia egyik legnagyobb kihívása (Bredenhoeft 2018). Témaválasztásomat a karbonátos, karsztos víztartó rendszerek iránt megnyilvánuló érdeklődésem és a Budai-termáلكarsztra vonatkozó, koncepciós vízáramlási modellek – Schafarzík (1926, 1928), Vendel és Kisházi (1964), Kovács és Müller (1980), Alföldi (1965, 1981) – új szemléletű felülvizsgálata motiválták.

# 2 CÉLKITŰZÉS

Dolgozatom célkitűzése, hogy rámutassak a medencehidraulikai megközelítés alkalmazási lehetőségeire, folyamatára és módszereire a fedetlen és csatlakozó fedett vastag karbonátos víztartó rendszerek sajátos hidrogeológiai környezetében, továbbá ennek alapján elvégezzem az értékelést a Budai-termáلكarszt tágabb környezetére. Munkámban a következő kérdésekre keresek választ:

- 1) Melyek azok az elméleti megfontolások, fogalmak, amelyek a vastag fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartók vízáramlási rendszereinek medencehidraulikai kutatásához szükségesek?
- 2) Milyen megközelítések, munkafolyamat és módszertan alkalmazható a karbonátos víztartó rendszerek sajátos hidrogeológiai környezetében, különös tekintettel a kutakban mért adatok feldolgozásán nyugvó medencehidraulikai módszerekre?
- 3) Milyen mintázattal jellemezhetők a munkaterületként vizsgált Budai-termáلكarszt és tágabb környezete vízáramlási rendszerei, különös tekintettel az alábbi kérdések megválaszolására?

- Milyen vízáramlásokat előidéző hajtóerők mutathatók ki az áramlási tér különböző részein?
- Hogyan jellemezhető a stacioner vízáramlási kép (utánpótlódási és megcsapolódási területek földrajzi helyzete) és melyek az áramlási kép értékelésének korlátai?
- Milyen hatást gyakorolnak a regionális léptékű hidrosztratigráfiai viszonyok és szerkezetek az áramlási képre és a hőmérséklet eloszlásra?
- Hogyan jellemezhetők a felszínalatti vízáramlási rendszerekben előforduló vízkomponensek?
- Hol húzóddhat a Budai-termáلكarszt hidraulikai határa?
- Mi a budapesti megcsapolódási területek vizeinek korábban felismert elkülönülésének oka a medencehidraulikai eredmények tükrében?

4) Mi a medencehidraulikai feldolgozás jelentősége a geotermikus potenciálértékelésben és a vízáramlásokhoz kapcsolódó jelenségek tudományos és gyakorlati célú megértése szempontjából?

5) Kiterjeszthetők-e az eredmények a világ egyéb területein található hasonló környezetekre?

### 3 KUTATÁSI HÁTTÉR, PROJEKTEK

A COST-620 karsztsérülékenységi munkacsoportban szerzett tapasztalataim nyomán felismertem, hogy a karsztkutatásban általánosan alkalmazott megközelítések a vastag karbonátos víztartó rendszerekre nem használhatók. Így karsztsérülékenységi tárgyú PhD dolgozatom (Mádlné Szőnyi 1997) lezárását követően azzal kezdtem foglalkozni, hogy a medencehidraulikai megközelítés elve és gyakorlata miként alkalmazható a Budai-termálkarszt, mint mintaterület példáján (Goldscheider és mtsi. 2010). Elsőként a Shell-ELTE K+F projekt<sup>1</sup> keretében a Budai-termálkarszt megcsapolódási területeit és hipogén karsztosodási folyamatait elemeztük (Erőss 2011a; Erőss és mtsi. 2012a,b). A kutatást 2012-től interdiszciplináris OTKA pályázat (101356 NK) keretében folytattuk 'Hipogén karsztosodási folyamatok tanulmányozása, különös tekintettel a mikrobák szerepére' témakörben (Mádlné Szőnyi 2017). Ezzel párhuzamosan K+F programot indítottunk a MOL Nyrt. támogatásával 'Karbonátos és csatlakozó üledékes medenceterületek fluidumdinamikai összefüggéseinek vizsgálata a szénhidrogén kutatás hatékonyságának javítása érdekében a Paleogén-medencében' címmel (Mádlné Szőnyi és mtsi. 2013). Az utóbbi két projekt, melynek témavezetője voltam, adja dolgozatom kutatási háttérét. A kutatómunkát az ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékén dolgozó hidrogeológus munkatársaimmal<sup>2</sup>, PhD<sup>3</sup>, MSc és TDK hallgatóimmal egyedi projekteken keresztül végeztük. Ezen felül hazai és külföldi geológus, geofizikus, karszthidrológus, mikrobiológus, vegyész, atomfizikus és meteorológus kollégákkal működünk együtt a kutatás interdiszciplináris részében.

### 4 AZ EREDMÉNYEK TÁRGYALÁSI STRUKTÚRÁJA

Jelen munkám több eleme társszerzőkkel írt publikációkban már napvilágot látott<sup>4</sup>. Dolgozatom magvát képezi a javasolt fogalomhasználat, a módszerfejlesztés és a medenceléptékű értékelés adaptálása a vizsgált hidrogeológiai környezethez. Ezeket a megállapításokat *módszertani téziseimben* foglalom össze (5.1.1-5.1.2-5.1.3 tézisek). A *Budai-termálkarsztra vonatkozó eredmények* képezik téziseim második csoportját (5.2.1-5.2.2-5.2.3-5.2.4 tézisek). Ezek a dolgozatban bemutatott munkafolyamat elvégzése eredményeképpen

<sup>1</sup> PhD hallgató Erőss A.

<sup>2</sup> Zentainé Czauner B., Erőss A., Szkolnikovics-Simon Sz.

<sup>3</sup> Tóth Á. Havril T. Pulay E. Kovácsné Bodor P. Iván V. (Természetföldrajzi Tanszékkel megosztva) Szijártó M. (Geofizikai és Űrtudományi Tanszékkel megosztva).

<sup>4</sup> Ezeket a tézisekben jelzem.

születtek, melyek a medenceléptékű feldolgozást tekintve teljesen újak<sup>5</sup>. Ezek mellé illesztettem a már publikált részeredményeket<sup>6</sup>, melyeket együtt értelmeztem és diszkutáltam a megcsapolódási területre vonatkozó korábbi – szakirodalomban elérhető – statisztikai és izotóphidrológiai eredményekkel. Végetül téziseim utolsó csoportjában munkám *tudományos és gyakorlati jelentőségére* mutatok rá (5.3.1-5.3.2-5.3.3 tézisek).

## 5 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

### 5.1 Módszertani tézisek

**5.1.1 Medencehidraulikai fogalomhasználat vastag karbonátos víztartó rendszerekben:** A „hidrogeológiai rendszerszemlélet” értelmében egy-egy víztartó határain túlmutató összefüggések határozzák meg a felszínalatti vizek folyamatait regionális és lokális szinten egyaránt (Mádl-Szőnyi 2008). Ennek vizsgálatára a hagyományos „hidrosztratigráfiai” értékeléshez képest a „medencehidraulikai” vagy „medenceléptékű” megközelítést vezettem be. A medenceléptéket olyan víztartó rendszerekre értelmezem, melyek horizontális kiterjedése 10-100 km nagyságrendű, vastagsága több száz métertől néhány kilométerig terjedhet, a kapcsolódó fedő képződmények vastagsága pedig több száz méter, akár kilométer. A hidraulikus folytonosság fogalmát (Tóth 1995) használom a rendszeren belüli hidraulikus elkülönülés vagy összefüggés értékelésére (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2015). Víztartó/vízgyűjtő léptékben a karsztot és a fedő rétegeket hagyományosan elkülönítik, medencehidraulikai megközelítéssel azonban egységként kezelem (Mádl-Szőnyi és mtsi. 2017a,b), azaz kapcsolatukat a fedővel és a fedetlen víztartókkal posteriori bizonyítékok (hidraulikai, kémiai, hőmérsékleti stb. adatok) alapján értékelem. A torlasztó vetők és a regionális vízfogó képződmények elkülönülést, kompartmentalizációt okozó hatását potenciál- illetve nyomásanomáliák alapján elemzem (Czauner és Mádl-Szőnyi 2013; Erhardt és mtsi. 2017; Mádl-Szőnyi és mtsi. 2017a).

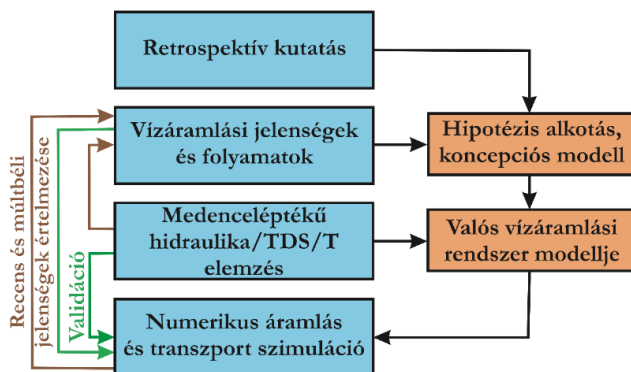
**5.1.2 Megközelítés és munkafolyamat:** A felszínalatti vízáramlási rendszerek és az általuk okozott jelenségek medenceléptékű kutatására munkafolyamatot dolgoztam ki a vizsgált hidrogeológiai környezetre, ami bemutatja az alkalmazható módszercsoportokat és azok egymásra épülését (1. ábra).

A munkafolyamat rávilágít a hipotézisalkotás és a megfelelő koncepciók modell jelentőségére. Új elemként vezetem be a „valós vízáramlási rendszermodell” fogalmát, ami a hipotézismodell valós hidrogeológiai helyzetre történő fejlesztését jelenti. Jelentősége, hogy ez biztosítja a medenceléptékű numerikus áramlás és hőtranszport szimuláció hátterét, egyúttal hozzájárul a modell „nem hagyományos” validációjához (Orsek és mtsi. 1994). Újdonsága, hogy bekapcsolja a felszínalatti vízáramlási rendszerek által előidézett

<sup>5</sup> A hidraulikai és összes oldottanyag tartalom térképeket módszertani célból publikáltuk a Mádl-Szőnyi és mtsi. (2017a) tanulmányban, de azokat az adatfeldolgozás szintjén újraértékeltem e munka keretein belül.

<sup>6</sup> Tézisekben jelölve hivatkozással.

recens és múltbeli jelenségeket a hidrogeológiai munkafolyamatba és egyúttal lehetővé teszi az eredmények visszacsatolását föld- és környezettudományi jelenségek, folyamatok megértéséhez.



1. ábra Folyamatábra a felszínalatti vízáramlási rendszerek és az általuk okozott jelenségek medenciléptékű kutatásához. Alkalmazott módszercsoportok, azok kapcsolatai és egymásra épülése. (TDS: összes oldottanyag tartalom; T: hőmérséklet)

**5.1.3 Módszerek:** A medenciléptékű megközelítés keretében alkalmazható módszerek (1. ábra) egy részét adaptáltam a vizsgált hidrogeológiai környezethez: medenciléptékű hidraulikai elemzés; összes oldottanyag, kémiai, valamint hőmérséklet adatok feldolgozása; medenciléptékű numerikus modellezés; más részüket továbbfejlesztettem: i) retrospektív kutatás valamint vízáramlási rendszerek által előidézett jelenségek és folyamatok elemzése; ii) nyomás-eleváció  $p(z)$  profilok; iii) tomografikus folyadékpotenciál térképek.

i) A források paramétereikben megmutatkozó medenciléptékű trendeket elemzem és arra használok, hogy értékeljem a forrásokat létrehozó vízáramlási rendszereket, ugyanis a források az áramlási rendszerek természetes végpontjai (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2015). Felismertem, hogy a szivárgások, a források környezetében tapasztalható kémiai és biológiai kiválások és az epigén és hipogén karsztosodási jelenségek is felhasználhatók a kialakulásukat előidéző vízáramlási rendszerek kutatására (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2017; Mádl-Szőnyi és mtsi. 2017b).

ii) A  $p(z)$  profil, mint módszer használatában következetes nevezéktant vezettem be a vertikális nyomásgradiensek lehetséges értékeire (hidrosztatikus, szub- és szuperhidrosztatikus), valamint a nyomásrezsimekre (hidrosztatikusközele, alulnyomás és túlnyomás). Megállapítottam, hogy a medencében előforduló maximum és minimum vízszintértékek átlagvízszinttől való eltéréseiből határozható meg az a  $\Delta p_{hk}$  tartomány, melyen belül a nyomások hidrosztatikusközeleliek. Az ezen kívül eső nyomásokat tekintem alul- ill. túlnyomásosnak.

iii) A hagyományos megközelítéstől eltérően a fedő sziliciklasztos és a karbonátos képződményeket összefüggéseikben vizsgálom a tomografikus folyadékpotenciál

térképeken, amelyeket egy adott elevációtartományban mért hidraulikus emelkedési magasságértékekből szerkeszttek (Mádl-Szőnyi és mtsi. 2017a).

## 5.2 A Budai-termálkarsztra vonatkozó eredmények

### 5.2.1 Hajtóerők, utánpótlódási és megcsapolódási területek földrajzi elhelyezkedése, hőmérséklet és vízkémiai jellemzők:

i) A feldolgozással bizonyítottam a vízszintkülönbségek domináns hajtóerő szerepét, és rámutattam a vízáramlások korábban nem ismert vertikális komponensére, ami a felső néhány száz méterben az áramlások hierarchizáltságát előidézi (Mádl-Szőnyi és mtsi. 2017a). A domborzatilag vezérelt áramlások mellett numerikus szimulációval kimutattunk a késő-miocéntől a termikus hajtóerő máig csökkenő befolyását (Havríl és mtsi. 2016; Szijártó és mtsi. 2019b).

ii) Potenciáldómok alapján azonosítottam a Budai-termálkarszt utánpótlódási területeit: lokális:  $h = 240$  mBf – Pilis, Budai-hegység; regionális:  $h = 140$  mBf – Dorog, Bicske, Budakeszi-Páty, Tétényi-plató és a tőle Ny-ra eső területek; intermedier:  $h = 120$  mBf – Budapest Ny; Gödöllői-dombság potenciáldómja:  $h = 160$  mBf). Kimutattam, hogy a lokális hideg források  $z > 120$  mBf-en csapolódnak meg. A Duna-völgyében lehatároltam Visegrád és a Csepel-sziget között az intermedier és regionális megcsapolódás területeit,  $z = 100$ - $120$  mBf között. A Dunához közelebb fakadó regionális termálforrások elkülönülését a magasabb szinten fakadó intermedier áramlások langyos forrásaitól retrospektív kutatással és statisztikailag is igazoltuk (Mádl-Szőnyi és Tóth 2015).

iii) Felismertem az advektív hőtranszport hűtő hatását a karbonátos víztartó (HCS1-2 VV) felszínközeli helyzetével egybeeső utánpótlódási területeken  $z < (-1000)$  mBf szintben,  $20$ - $30$  °C hőmérséklettel. Emellett ezeken a területeken modellezéssel bizonyítottuk, hogy a felhajtóerő „ujjszerű” hőfeláramlást eredményez  $40$  °C-os hőmérsékletekkel (Szijártó és mtsi. 2019b). Pest alól a Duna-menti megcsapolódás felé irányuló és a felszín felé elkeskenyedő advektív hőfeláramlást mutattunk ki áramlás és hőtranszport modellezéssel. Felismertem, hogy kialakulásában a vízfeláramlás mellett a regionális vízfogó (HCS3-VF) képződménynek is szerepe van, ami ÉK-DNy-i irányú  $60$ - $80$  °C-os pozitív anomáliát okoz Budapest alatt.

iv) Feltártam a Budapesttől Ny-ra található utánpótlódási területeken a felszín alá jutó – és a karbonátos víztartókban DK-K-i, ÉK-É-i irányban a HCS1-2 VV-ben tovább mozgó – karsztvíz (édesvíz) térbeli elterjedését, ami jelzi az aktív vízcserét a felszínről származó meteorikus vizekkel (Vác, Szentendre, Pest D, Veresegyház, Pest potenciál „süllyedék” és Csepel É mentén húzódik). Az édesvíz lencse körül brakkvizet mutattam ki Aszód, Galgamácsa vonaláig, délen pedig a Tóalmás-vonalig.

### 5.2.2 A fedő-függő víztartók és karbonátos víztartó összefüggései, valamint anomáliák az áramlási térben:

i) Bizonyítottam, hogy a  $p(z)$  profilokon a nyomáseltérések és a vertikális nyomásgradiensek értékelése lehetővé teszi a korábban tisztán „hidrosztratigráfiai” alapon elkülönített fedő-függő víztartók hidraulikai kapcsolatának elemzését.

ii) A vízáramlási térben a tomografikus potenciáltérképeken és a  $p(z)$  profilokon potenciál- illetve nyomásanomáliákat mutattam ki. Megállapítottam a hidrosztatikusközeli potenciálértékeket:  $h = 100-160$  mBf. A  $h = 80-100$  mBf hidraulikus emelkedési magasságoknak megfelelő nyomásokat átmeneti alulnyomásként, a  $h < 80$  mBf értékeket valódi alulnyomásként értékeltem, míg a  $h > 160$  mBf potenciálértékeket túlnyomásos rezsimnek minősítettem. Feltártam az anomáliákat előidéző lehetséges okokat: az oligocén HCS3 VF (200-1000 m vastag) jelenléte, amely geológiai időskálán vertikális utánpótlódás hiányt okoz; szerkezeti elkülönülés: ÉK-i peremvető, Szada-vető, Tóalmás-vonal; a Gödöllői-dombság kiemelkedése és a vele járó eróziós dekompakció (Mádl-Szőnyi és mtsi. 2015); a felhajtóerő hatása, amely alulnyomást és túlnyomást is okozhat (Szijártó és mtsi. 2019a).

### 5.2.3 Felszínalatti vízkomponensek, a Budai-termáلكarszt hidraulikai határa és a központi és déli rendszer elkülönülése:

i) A Budai-termáلكarszt rendszerben beszivárgásból származó meteorikus eredetű karsztkomponenst, továbbá medencekomponenst különítettem el. Utóbbiról megállapítottam, hogy dominánsan tengeri eredetű, diagenetikus átalakuláson átesett NaCl-os pórúsfliuidum, némi evaporit beoldódással. A hidrotermális komponenst „hosszú felszínalatti tartózkodási idejű” és víz-kőzet kölcsönhatáson átesett meteorikus eredetű vízből és a hozzá adódó medencekomponensből származtatom (Mádl-Szőnyi és mtsi. 2018).

ii) Megállapítottam, hogy a Budai-termáلكarszt hidraulikai határát D-DK-en a Tóalmás-vonal és a Szada-vető együttes hatása, K-en a Gödöllői-dombság felszínalatti vízválasztója, Ny-on pedig a Dorog-Bicske-vonal menti potenciálmaximumok határozzák meg.

iii) Feltártam a központi és a déli rendszer hidraulikai elkülönülését előidéző okokat, a Pest alatt a fedőképződményekben felismert „potenciálsüllyedéket” és a karbonátos víztartóban kimutatott NY-K-i felszínalatti vízválasztót. Az elkülönülés egyik következményeként bizonyítottam, hogy a korábbi szerzők által említett és modellezéssel is kimutatott ún. „alááramlás” csak a központi rendszerben valósul meg a Gödöllői-dombság gerincéig. A főnti medencehidraulikai elkülönülés alapján a két rendszer vizei között már korábban ismert különbségek (Alföldi és mtsi. 1968; Erőss 2010; Erőss és mtsi. 2012a) a hidrotermális komponenst tekintve megmagyarázhatók.

### 5.2.4 A budapesti megcsapolódási területek és a kapcsolódó áramlási rendszerek:

Rámutattam az északi, központi és déli megcsapolódási területek, valamint a feltárt áramlási rendszerek közötti összefüggésekre izotóphidrológiai és statisztikai szakirodalmi eredmények figyelembe vételével.

i) Feltártam, hogy az északi forráscsoport tagjai a feldolgozás alapján intermedier áramlások kiáramlásai, melyek utánpótlódásukat nagy valószínűséggel a Dorog környéki  $h = 120$  mBf potenciáldóm felől kapják. A központi rendszerre hidraulikailag és numerikus szimulációval is megerősítettem egy intermedier és egy regionális kiáramlás jelenlétét. Az előbbihez utánpótlódási területként a Budapesten és tőle közvetlenül Ny-ra található  $h = 120$  mBf ekvipotenciállal körülhatárolt nagy kiterjedésű „potenciálhát” köthető. A központi regionális termálforrások és a pesti mély kutak utánpótlódását a Dorog környéki  $h = 140$  mBf potenciálmaximummal hoztam összefüggésbe. A hidraulikai, TDS feldolgozás és modellezés alapján kimutattuk, hogy ehhez a regionális ághoz kelet felől a karbonátos víztartóból és a fedő képződményekből érkező vizek hozzákeverednek. A központi rendszer Rózsadomb előterében kutakkal feltárt termálvizes tagjainál az eredmények megerősítik a keveredést a központi langyos komponens és az „alááramló” regionális komponens között.

ii) A déli rendszerben Duna felé irányuló vízáramlást mutattam ki a Zsámbéki-medencétől, ami a Gellért-hegy előterében, a numerikus szimuláció alapján intermedier áramlasként csapolódik meg. Felismertem a Duna alatti átáramlás következtében az Északkeleti-peremvető és a Duna között kialakuló regionális megcsapolódást. A regionális utánpótlódási területeket zárt potenciálmaximumok ( $h = 140$  mBf) alapján határoltam le: Bicske környéke, Budakeszi-Páty és a Tétényi-plató környezete. Rámutattam, hogy a Csepel II. kút a regionális áramláshoz köthető és a Tétényi-plató irányából a fedő képződményeken keresztül is kaphat vízutánpótlást. A Széchenyi-hegynél lokális utánpótlódási területet mutattam ki, melynek megcsapolódása a Kis-Gellért-hegy környezetében feltételezhető.

## 5.3 Az eredmények tudományos és gyakorlati és jelentősége

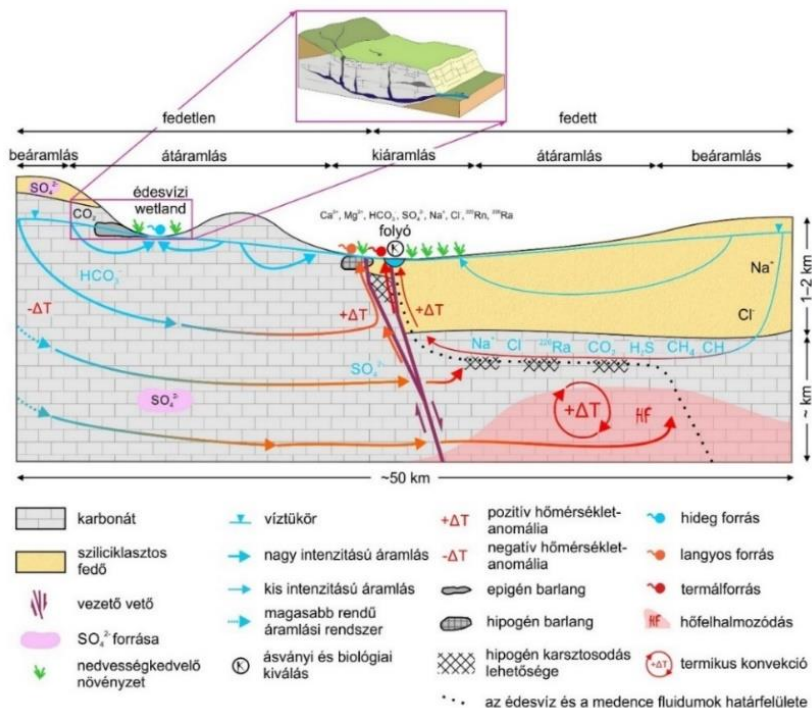
### 5.3.1. Vastag karbonátos víztartó rendszerek új hipotézismodellje és kiterjesztése:

i) A medencehidraulikai megközelítés eredményeképpen új hipotézismodellt alkottunk (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2015) (2. ábra). Ebben bemutattuk, hogy a fedett és a nyílt karsztos, félig fedett karbonátos víztartó részek között a hidraulikus vezetőképességben és a beszívárgás mennyiségében jelentkező különbség tehető felelőssé az aszimmetrikus áramlási képért, melyet a központi rendszerre vonatkozóan igazolni tudtam (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2015; Mádl-Szőnyi és mtsi. 2017a).

A modellben rámutattam a karsztvíz mellett a medencefluidum (NaCl-os pórusfluidum) jelenlétére és az átszívárgásra a fedő képződményekből (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2015; Mádl-Szőnyi és mtsi. 2015). Összefoglaltam az áramlások vastag karbonátos rendszerekre kimutatott sajátosságait: az áramlási rendszerek sziliklasztos rendszerekhez képest kisebb mértékű tagoltsága, a különböző rendszerekhez kapcsolható források, a hőfelhalmozódás, a hidraulikus és termális hajtóerők kölcsönhatása, illetve kiválások, valamint epigén és hipogén karsztosodási jegyek (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2015; Havril és mtsi. 2016; Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2017; Szijártó és mtsi. 2019a,b).

ii) A hipotézismodell kiterjesztheségét bizonyítja, hogy a világon több helyen, Kínában, Malagában, Mexikóban és Csehországban is használták már (Wang és mtsi. 2016; Andreo

és mtsi. 2016; Pérez-Quezadas és mtsi. 2017; Yang és mtsi. 2019; Sracek és mtsi. 2019), de számos további olyan helyet találhatunk, ahol a hidrogeológiai környezet alapján várhatóan alkalmazható.



2. ábra Vastag fedetlen, ill. részben fedett és csatlakozó sziliciklasztos képződményekkel fedett karbonátos vízadó rendszer vízáramlási hipotézismoddellje a kapcsolódó jelenségekkel együtt (Mádl-Szönyi és Tóth Á. 2015 után módosítva). A sekély karsztok lokális vízáramlási rendszerekként illeszthetők be a medenceléptékű modellbe (Goldscheider és Drew 2014 nyomán)

### 5.3.2 Tudományos jelentőség, biogeokémiai kiválás és hipogén karsztosodás:

Példákon keresztül rámutattam, hogy a Budai-termálkarsztra vonatkozó medencehidraulikai eredmények visszacsatolásaként a kiválási és hipogén karsztosodási folyamatok a vízáramlási, hő- és oldottanyag transzport folyamatokhoz kapcsolva értelmezhetők (1. ábra).

i) Feltártuk a budapesti termálforrások környezetében általánosan elterjedt biofilm elemakkumulációs, mikrobiológiai,  $^{226}\text{Ra}$  felhalmozásban és ebből következően a termálforrások magas  $^{222}\text{Rn}$  aktivitás koncentrációjában betöltött szerepét (Erőss 2010; Erőss és mtsi. 2012b; Borsodi és mtsi. 2012, 2018; Enyedi és mtsi. 2019). Felismertem, hogy bár a biofilm a hidrotermális komponensből válik ki, de a benne felhalmozott elemek és a rádium az elvégzett feldolgozás alapján a medencekomponensből származtatható. A termálforrások körül kialakult biofilmet kémiai és biológiai eredetű összetevőinek együttes

jelenléte miatt biogeokémiai kiválásnak minősítettük (Dobosy és mtsi. 2016). A különböző helyszíneken mintázott biogeokémiai kiválások hasonló eredete ellenére megállapítottuk, hogy a vízminták terepi paramétereiben, ionösszetételében és  $^{226}\text{Ra}$  aktivitás koncentrációjában megnyilvánuló lokális különbségek nem hozhatók közvetlen összefüggésbe a környezetükben kialakuló biogeokémiai kiválások összetételével és  $^{226}\text{Ra}$  aktivitás koncentrációjával (Kovács-Bodor és mtsi 2019).

ii) Felismertünk a fedett víztartóban egy, az áramlási rendszerek vertikális szuperponálódásából adódó határfelületet, amely egyúttal eltérő szalinitású fluidumok „keveredési zónája” és potenciális hipogén karsztosodási zóna (Mádl-Szőnyi és Tóth Á. 2015; Mylorie és Mylorie 2007; Sanz és mtsi. 2011). A Budai-termálkarszton ismert vertikális járatrendszerek kioldásáért és a benne kialakuló kiválásokért a – numerikus modellezéssel bizonyított – konvekciós cellákban fel- majd leáramló víz tehető felelőssé (Plummer és mtsi. 1978), mely folyamat geológiai időskálán a késő-miocén óta csökkenő jelentőségű (Havril és mtsi. 2016; Szijártó és mtsi. 2019b). Ráműtattunk, hogy a déli rendszernél a szarmata evaporit oldódás hozzájárulhat (hidraulikailag bizonyíthatóan) a dolomit oldódásához és a hipogén karsztosodáshoz (Bischoff és mtsi. 1994; Erőss és mtsi. 2011b; Mádlné Szőnyi és mtsi. 2018).

**5.3.3 Gyakorlati alkalmazás a geotermikus potenciálértékelésben:** A medencehidraulikai feldolgozásra alapozva értékelési sémát dolgoztam ki, mely a geotermikus készletek zárt és nyitott jellegét, termelhetőségét és az injektálás hidraulikai lehetőségeit elemzi (3. ábra). A jelenleg érvényes törvényi szabályozás<sup>7</sup> mesterséges, 2500 m-es felső mélységhatárral definiálja a zárt geotermikus rendszereket. A javasolt megközelítés a hidrosztatikusközeli, alulnyomásos és túlnyomásos rezsimek elkülönítésén alapul és ezáltal tudományos háttérrel nyújt a zárt és a nyitott geotermikus tározók lehatárolásához (Mádlné Szőnyi 2019 in press).

| NYOMÁSREZSIM                                  |                        |                              |                                         |                                 |
|-----------------------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| ÁLULNYOMÁS                                    | HIDROSZTATIKUSKÖZELI   |                              |                                         | TÚLNYOMÁS                       |
| NYOMÁSELTÉRÉS                                 |                        |                              |                                         |                                 |
| NEGATÍV                                       | ~ NEGATÍV              | 0                            | ~ POZITÍV                               | POZITÍV                         |
| KÉSZLETVISZONYOK — GEOTERMIKUS KÖVETKEZMÉNYEK |                        |                              |                                         |                                 |
| ZÁRT <sup>1</sup><br>NEM TERMELHETŐ           | NYITOTT,<br>TERMELHETŐ |                              |                                         | ZÁRT <sup>2</sup><br>TERMELHETŐ |
| NYELŐ KÚT ENERGIABEFEKTETÉS NÉLKÜL            |                        | KISNYOMÁSÚ<br>VISSZASAJTOLÁS | NAGYNYOMÁSÚ VISSZASAJTOLÁS<br>SZÜKSÉGES |                                 |

3. ábra A regionális nyomásrezsim és a nyomáseltérés értékelése a geotermikus készletek termelhetősége és a visszasajtolás szempontjából. Zárt<sup>1</sup>: alulnyomás és utánpótlódás hiány miatt nem alkalmas termelésre, zárt<sup>2</sup>: túlnyomás miatt nem utánpótlódó, ezért csak visszasajtolás mellett termelhető

<sup>7</sup> 1993. évi XLVIII. törvény a bányászatról.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- Alföldi L. (1965) Budapest hévízkutatói kérdései. Vízügyi Közlemények. 3.sz, pp. 304-324.
- Alföldi L. (1981) A budapesti geotermikus áramlási rendszer modellje. Hidrológiai Közöny 9. pp. 1-7.
- Alföldi L., Béltéky L., Böcker T., Horváth J., Korim K., Liebe P., Rémi R. (1968) Budapest Hévízei. VITUKI, Budapest, 365 p.
- Andreo B., Gil-Márquez J. M., Mudarra M., Linares L., Carrasco F. (2016) Hypothesis on the hydrogeological context of wetland areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaén provinces, Southern Spain) Environmental Earth Sciences 75: 759. doi:10.1007/s12665-016-5545-1.
- Bischoff J. L., Julia R., Shanks W. C., Rosenbauer R. J. (1994) Karstification without carbonic acid; bedrock dissolution by gypsum-driven dedolomitization. Geology 22 pp. 995–998.
- Bredehoeft J.D. (2018) The Toth Revolution. Groundwater, 56(1), pp. 157-159.
- Erőss A. (2010) Characterization of fluids and evaluation of their effects on karst development at the Rózsadomb and Gellért Hill, Buda Thermal Karst, Hungary. PhD Dissertation. ELTE Physical and Applied Geology. Budapest, Hungary (in English) 171 p.
- Goldscheider N., Mádl-Szőnyi J., Erőss A., Schill E. (2010) Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. Hydrogeology Journal 18: pp. 1303-1318.
- Goldscheider N., Drew D. (szerk.) (2014) Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis, London, 264 p.
- Kovács J., Müller P. (1980) A budai-hegyek hévizes tevékenységének kialakulása és nyomai. Karszt és Barlang, 2. pp. 93-98.
- Mádlné Szőnyi J. (1997) Vízartó rendszerek sérülékenységi vizsgálata. Elmélet és gyakorlat. Eötvös Loránd Tudományegyetem PhD Dolgozat, Budapest.
- Mádlné Szőnyi J., Czauner B., Erőss A., Simon Sz. (2013) Karbonátos és csatlakozó üledékes medenceterületek fluidumdinamikai összefüggéseinek vizsgálata a szénhidrogén kutatás hatékonyságának javítása érdekében a Paleogén-medencében. Zárójelentés. Készült: a MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyilvánosan Működő Részvénytársaság megbízásából és számára. ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest. 200 oldal és mellékletek.
- Myroie J. R., Myroie J. E. (2007) Development of the carbonate island karst model. J. Caves Karst Stud. 69 pp. 59–75.
- Oreskes N., Shrader-Frechette K., Belitz K. (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. Science, 263 (5147), pp. 641-646.
- Pérez-Quezadas J., Cortés-Silva A., Salas-Ortega M. del R., Araguás-Araguás L., Morales-Puente P., Carrillo-Chávez A. (2017) Evidencias hidrogeoquímicas e isotópicas sobre

- el origen del agua subterránea en la cuenca hidrográfica Río Actopan, Estado de Veracruz. *Rev. Mex. Cienc. Geol* Vol. 34 No.1 México abr. 2017
- Plummer L. N., Wigley T. M. L., Parkhurst D. L. (1978) Kinetics of calcite dissolution in CO<sub>2</sub>-water systems at 5 °C to 60 °C and 0.0 to 1.0 atm CO<sub>2</sub>. *Am. J. Sci.* 278 (2) pp. 179–216.
- Sanz E., Ayora C., Carrera J. (2011) Calcite dissolution by mixing waters: geochemical modeling and flow-through experiments. *Geologica Acta*, Vol. 9, N° 1, March 2011, pp. 67-77 DOI: 10.1344/105.000001652 Available online at [www.geologica-acta.com](http://www.geologica-acta.com) (Letöltés: 2019.08.16.)
- Schafarzik F. (1926) A Szent Gellért hegy geológiai múltja és jelene. *Term. Tud. Közlöny* 58. 836. pp. 460-472.
- Schafarzik F. (1928) Budapest székesfőváros ásványvízforrásainak geológiai jellemzése és grafikus feltüntetése. *Hidrológiai Közlöny*. 4-6. (1924-26).
- Sracek O., Geršl M., Faimon J., Bábek O. (2019) The geochemistry and origin of fluids in the carbonate structure of the Hranice Karst with the world's deepest flooded cave of the Hranická Abyss, Czech Republic *Applied Geochemistry*, Volume 100, January 2019, pp. 203-212.
- Tóth J. (1995) Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeol Journal* 3(4) pp. 4–16.
- Yang P., Dan L., Groves C., Xie S. (2019) Geochemistry and genesis of geothermal well water from a carbonate–evaporite aquifer in Chongqing, SW China, *Environmental Earth Sciences*, January 2019 78: 33. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8004-3>
- Vendel M., Kisházi P. (1964) Összefüggések melegforrások és karsztvizek között a Dunántúli-középhegységben megfigyelt viszonyok alapján. *MTA Műszaki Tudományok Közleményei*, Budapest.
- Wang J., Jin M., Lu G., Zhang D., Kang F., Jia B. (2016) Investigation of discharge-area groundwaters for recharge source characterization on different scales: The case of Jinan in northern China. *Hydrogeology Journal*, 24 (7), pp. 1723-1737.
- Zhang R. (2018) The current status and further development of the theory of regional groundwater flow. Abstract 45. IAH Congress, 2018.09.9-14, Daejeon, Korea.

## A TÉZISEKBEN SZEREPLŐ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- Borsodi A. K., Knáb M., Krett G., Makk J., Márialigeti K., Erőss A., Mádl-Szőnyi J. (2012) Biofilm bacterial communities inhabiting the cave walls of the Buda Thermal Karst System, Hungary. *Geomicrobiology Journal*, 29(7), pp. 611-627.
- Borsodi A. K., Anda D., Makk J., Krett G., Dobosy P., Büki G., Erőss A., Mádl-Szőnyi J. (2018) Biofilm forming bacteria and archaea in thermal karst springs of Gellért Hill discharge area (Hungary) *Journal of basic microbiology* 58 (11), pp. 928-937.
- Czauner B., Mádl-Szőnyi J. (2013) Regional hydraulic behavior of structural zones and sedimentological heterogeneities in an overpressured sedimentary basin. *Marine and Petroleum Geology*, 48, pp. 260-274.
- Dobosy P., Sávoly Z., Óvári M., Mádl-Szőnyi J., Záray G. (2016) Microchemical characterization of biogeochemical samples collected from the Buda Thermal Karst System, Hungary. *Microchemical Journal*, 124, pp. 116-120.
- Enyedi N. T., Anda D., Borsodi A. K., Szabó A., Pál S. E., Óvári M., Márialigeti K., Kovács-Bodor P., Mádl-Szőnyi J., Makk J. (2019) Radioactive environment adapted bacterial communities constituting the biofilms of hydrothermal spring caves (Budapest, Hungary) *Journal of Environmental Radioactivity* 203, pp. 8-17.
- Erhardt I., Ötvös V., Erőss A., Czauner B., Simon Sz., Mádl-Szőnyi J. (2017) Hydraulic evaluation of the hypogenic karst area in Budapest (Hungary). *Hydrogeology Journal*, 25(6), pp. 1871-1891.
- Erőss A., Mádl-Szőnyi J., Csoma A. É. (2011a) The effects of mixed hydrothermal and meteoric fluids on karst reservoir development, Buda Thermal Karst, Hungary. — Shell-EMR Final Report, SR.11.11449.
- Erőss A., Poros Zs., Mádl-Szőnyi J., Mindszenty A., Molnár F., Ronchi P., Csoma A. É. (2011b) Role of karstic and basinal fluids in porosity evolution in the Buda Hills, Hungary. — AAPG International Conference and Exhibition 2011: Following DaVinci's Footsteps to Future Energy Resources: Innovations from Outcrops to Assets AAPG, Paper 1071554.
- Erőss A., Mádl-Szőnyi J., Csoma A. É. (2012a) Hypogenic karst development in a hydrogeological context, Buda Thermal Karst, Budapest, Hungary. *Groundwater quality sustainability: IAH selected papers on hydrogeology*, 17, pp. 119-133.
- Erőss A., Mádl-Szőnyi J., Surbeck H., Horváth Á., Goldscheider N., Csoma A. É. (2012b) Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluid sin regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. *Journal of Hydrology*, pp. 426-427.
- Havril T., Molson J. W., Mádl-Szőnyi J. (2016) Evolution of fluid flow and heat distribution over geological time scales at the margin of unconfined and confined carbonate sequences - A numerical investigation based on the Buda Thermal Karst analogue. *Marine and Petroleum Geology*.  
[http://real.mtak.hu/80485/1/Havril\\_et\\_al\\_2016\\_BTK\\_u.pdf](http://real.mtak.hu/80485/1/Havril_et_al_2016_BTK_u.pdf) (Letöltés: 2019.08.16.)

- Kovács-Bodor P., Anda D., Jurecska L., Óvári M., Horváth Á., Makk J., Mádl-Szőnyi J. (2018) Integration of in situ experiments and numerical simulations to reveal the physicochemical circumstances of organic and inorganic precipitation at a thermal spring. *Aquatic geochemistry*, 24(3), pp. 231-255.
- Kovács-Bodor P., Csondor K., Erőss A., Szieberth D., Freiler-Nagy Á., Horváth 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, pp. 32-42.
- Mádl-Szőnyi J. (szerk.) (2008) From the artesian Paradigm to basin Hydraulics. The Contribution of József Tóth to Hungarian Hydrogeology. ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet, Budapest 106 p.
- Mádl-Szőnyi J. (2017) Hipogén karsztosodási folyamatok tanulmányozása különös tekintettel a mikrobák szerepére. OTKA kutatási zárójelentés. Online elérhető: <http://nyilvanos.otka-palyazat.hu/index.php?menuid=930&lang=HU&num=101356> (Letöltés: 2019.04.17.)
- Mádl-Szőnyi J. (2019 in press) A regionális pórusnyomás viszonyok jelentősége a termálvíz feltárásban és a készletek megújulásában. *Magyar Tudomány*.
- Mádl-Szőnyi J., Erőss A., Havril T., Poros Z., Győri O., Tóth Á., Csoma A., Mindszenty A. (2018) Fluidumok, áramlási rendszerek és ásványtani lenyomataik összefüggései a Budai Termálkarszton. *Földtani Közlöny*, 148(1), pp. 75-96.
- Mádl-Szőnyi J., Pulay E., Tóth Á., Bodor P. (2015) Regional underpressure: a factor of uncertainty in the geothermal exploration of deep carbonates, Gödöllő Region, Hungary. *Environmental Earth Sciences*, 74, pp. 7523-7538.
- Mádl-Szőnyi J., Tóth Á. (2015) Basin scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. *Hydrogeology Journal* 23 (7), pp. 1359-1380.
- Mádl-Szőnyi J., Czauner B., Iván V., Tóth Á., Simon Sz., Erőss A., Bodor P. (2017a) Confined Carbonates – Regional scale hydraulic interaction or isolation? marine and Petroleum Geology. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.006> (Letöltés: 2019.08.16.)
- Mádl-Szőnyi J., Erőss A., Tóth Á., (2017b) Fluid Flow Systems and Hypogene Karst of the Transdanubian Range, Hungary — With Special Emphasis on Buda Thermal Karst. In: A. Klimchouk, A. N. Palmer, J. De Waele, A. S. Auler and P. Audra (szerk.) *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Springer International Publishing, Cham, pp. 267-278.
- Mádl-Szőnyi J., Tóth Á. (2017) Topographically Driven Fluid Flow at the Boundary of Confined and Unconfined Sub-basins of Carbonates: Basic Pattern and Evaluation Approach on the Example of Buda Thermal Karst. In: P. Renard, C. Bertrand (szerk.) *EuroKarst 2016*, Neuchâtel, *Advances in Karst Science*, DOI 10.1007/978-3-319-45465-8\_10.

- Szijártó M., Galsa A., Tóth Á., Mádl-Szőnyi J. (2019a) Numerical investigation of the combined effect of forced and free thermal convection in synthetic groundwater basins. Journal of Hydrology. Vol. 572. pp. 364-379.
- Szijártó M., Galsa A., Tóth Á., Lenkey L., Mádl-Szőnyi J. (2019b) Numerical investigation of the interaction of different driving forces on groundwater flow and temperature pattern in a theoretical basin and in the Buda Thermal Karst, Hungary. Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU2019-5830, 2019.