

Szemelvények az elmúlt két évtized ELTE-n végzett, medenceléptékű hidrogeológiai kutatásaiból

CZAUNER Brigitta, MÁDLNÉ SZŐNYI Judit

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

Short overview of basin-scale hydrogeological research conducted at ELTE in the last two decades

Abstract

The research and educational activity of the hydrogeological group (József & Erzsébet Tóth Endowed Hydrogeology Chair) of the Department of Physical and Applied Geology of the Eötvös Loránd University (ELTE, Budapest, Hungary) focuses on the basin-scale system approach of groundwater flow and the related natural phenomena based on the theory of hydraulic continuity. The paper presents this approach with its historical background as compared to the earlier aquifer-based artesian paradigm. The background of basin-scale hydrogeological research approach and methodology under continuous development is shortly explained, while less emphasis is placed on technical minutiae. Among the methods, basin hydraulics are fundamental as these provide the “real groundwater flow system model” based on the basin-scale analysis and interpretation of measured hydraulic data from wells. Accordingly, the basin-scale and particularly the basin hydraulics’ results of our research history are reviewed, but the related phenomena investigated by other methods are also mentioned. Our studies covered most areas of Hungary and revealed everywhere the hydraulic continuity of the rock framework and the existence of gravity-driven regional groundwater flow systems irrespectively of the topography and rock type (i.e., siliciclastic or carbonate). The pressure regime in these flow systems is near to hydrostatic, while the flow field is regionally unconfined and recharged from rainwater. In the deeper sub-basins, the gravitational regime is underlain by an overpressured regime (e.g., in the Duna–Tisza Interfluve, Derecske Trough, Békés Basin, Battonya High, Dráva Basin) or underpressured regime (e.g., in the Hungarian Paleogene Basin). Both anomalous pressure regimes are confined with non-renewable resources (overpressured) or with limited recharge (underpressured). This complex hydraulic situation, as well as the geologic and environmental agency of groundwater flows account for several surface (e.g., salinization, groundwater dependent ecosystems (GDEs)) and subsurface (e.g., hypogene caves, hydrocarbon entrapment) phenomena and processes.

Keywords: groundwater flow, hydraulic continuity, basin hydraulics, gravity-driven flow systems, overpressure, underpressure, flow-related phenomena

Összefoglalás

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékének hidrogeológiai kutató- és oktatócsoportja (Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra) tevékenységének középpontjában a felszín alatti víz-áramlásoknak és kapcsolódó jelenségeknek a hidraulikus folytonosság alaptételére épülő medenceléptékű és rendszerszemléletű megközelítése áll. A jelen tanulmány e megközelítést történeti felvezetéssel és a korábbi, rétegtani (hidrosztratigráfiai) alapú „artézi” paradigmával szembeállítva mutatja be. A folyamatosan fejlesztett medenceléptékű hidrogeológiai kutatási módszertant röviden tárgyaljuk, a technikai részletek helyett kiemelve az alkalmazott módszertani megközelítések magyarázatát. Ezek közül legnagyobb jelentőséggel a kutakban mérhető hidraulikai adatok medenceléptékű, azaz medencehidraulikai elemzése bír, amelynek eredménye a „valós vízáramlási rendszermodell” felállítása. Ennek megfelelően kutatástörténetünkben a medenceléptékű és különösen a medencehidraulikai eredményeket szemléljük a továbbiakban, említve az ezek által összefüggésrendszerbe helyezett és egyéb módszerekkel vizsgált jelenségeket is. Az ország területének nagy részét lefedő kutatásaink domborzattól és kőzettypustól (sziliciklasztos vagy karbonátos) függetlenül kimutatták a kőzetváz hidraulikus folytonosságát és a gravitáció vezérelte regionális felszínalatti vízáramlási rendszerek jelenlétét. Ezek medenceléptékben fedetlen, csapadékvízből utánpótlódó és közel hidrosztatikus nyomásrezsimű tartományai alatt a mélymedencékben abnormális nyomásrezsimű (túlnyomásos vagy alulnyomásos) fedett, és nem vagy csak korlátozottan utánpótlódó tartományai találhatóak. E komplex hidraulikai helyzettel és a felszínalatti vízáramlások földtani és környezeti hatótényező szerepével számos felszíni (szikesedés, felszín alatti víztől függő ökoszisztémák, FAVÖKO-k stb.), és felszín alatti (hipogén barlangképződés, szénhidrogén csapdázódás stb.) jelenség és folyamat nyert magyarázatot.

Tárgyszavak: felszín alatti vízáramlások, hidraulikus folytonosság, medencehidraulika, gravitációs áramlási rendszerek, túlnyomás, alulnyomás

Bevezetés

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékének hidrogeológiai kutatócsoportja közel húsz éve foglalkozik a medencebeli felszínalatti vízáramlások és kapcsolódó jelenségek kutatásával. 2016 óta az említett tanszék szervezeti keretein belül működik a Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, mely kutatásaiban geofizikus szakemberekkel is kiegészült. Csoportunk oktatási és kutatási tevékenységének középpontjában a hidraulikus folytonosság (TÓTH 1995a,b) alapvetelére épülő medenceléptékű megközelítés áll. Ez számos ponton eltér a korábbi, a víztartó rétegeket, a bennük tárolt és belőlük kitermelhető vizet középpontba helyező rétegtani (hidrosztratigráfiai) avagy „artézi” megközelítéstől (JIANG et al. 2020). Kutatásaink jelentőségét felértékeli, hogy napjainkban a felszín alatti vízkészletek jelentősége egyre nő világszerte a népességrobbanás és klímaváltozás nyomán kibontakozó vízválság okán. De hazánkban is egyre inkább előtérbe kerül a felszín alatti térrész sokirányú használata és az igény ennek összehangolására (pl. célzott felszín alatti vízpótlás, talajjavítás, öntözés, csatornázás, szennyvezetékek kontrollálása, szénhidrogén-termelés, geotermikus energiahasznosítás, szén-dioxid-besajtolás, mélységi érckutatás stb.). E feladatok megoldásához elengedhetetlen a felszín alatti vízáramlási rendszerek és működési mechanizmusaik megismerése és megértése.

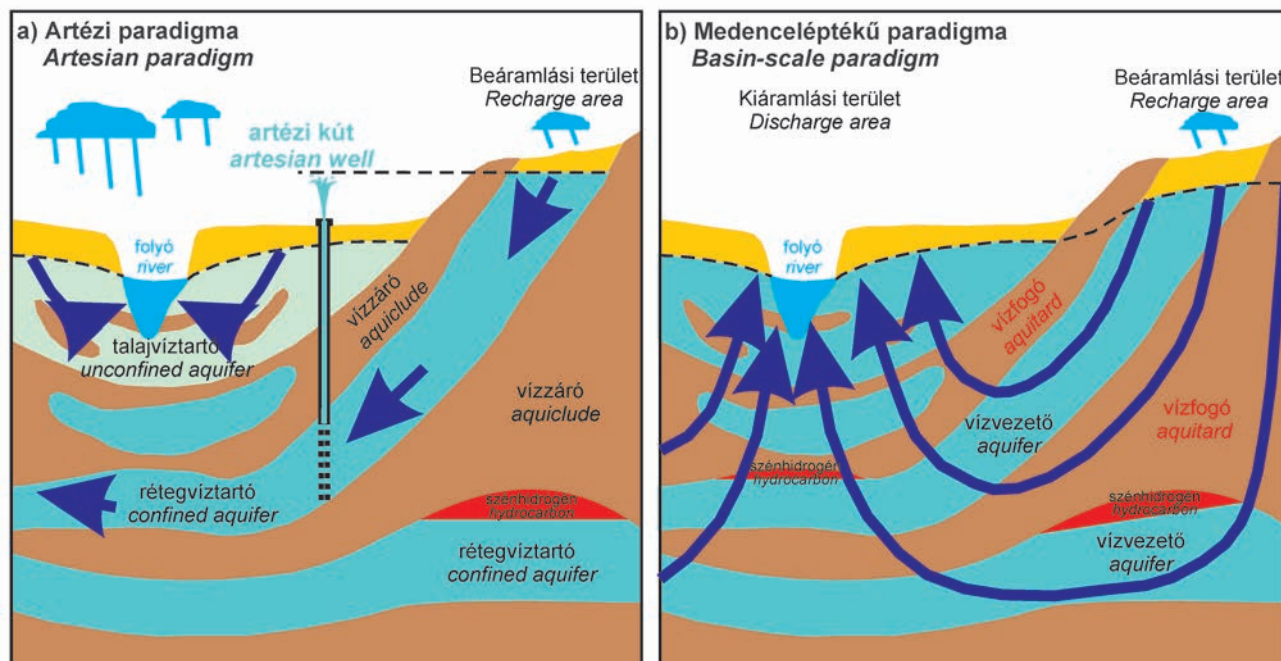
A jelen tanulmány célja egyrészt rövid történeti felvezetést követően kiemelni az alkalmazott megközelítések és módszerek újdonságait, másrészt szemelvényesen bemutat-

ni a medenceléptékű kutatásaink eddig többnyire angol nyelven közölt főbb eredményeit. Nem törekszünk a téma hazai műhelyekben született eredményeinek szisztematikusan áttekintésére, ez ugyanis messze meghaladná e cikk kereteit. Saját kutatásaink leírása is vázlatos, mellyel célunk, hogy felkeltjük az olvasók érdeklődését az eredeti munkák elolvasása iránt. E munkánkkal a Földtani Közöny 150 éves jubileuma alkalmából tisztelgünk a jeles elődök előtt.

Az artézi paradigmától a medenceléptékű felszín alatti vízáramlási rendszerekig

Az „artézi mechanizmus” a hidrogeológia első egysége – empirikusan levezetett – paradigmája (JIANG et al. 2020), mely a mélyfúrásos feltárásnak köszönhetően született meg és a XIX. század folyamán vált általánosan elfogadottá. Az artézi szó két vízzáró réteg közötti vízvezető rétegben tárolt vizet jelent, a föld felszíne fölé emelkedő vízszinttel. Fogalomhasználata szerint a talajvíz a legfelső vízzáró réteg fölött helyezkedik el és csapadékból utánpótlódik. A rétegvíz két vízzáró réteg közötti vízvezető (permeábilis) rétegben tárolt vizet jelent. A rétegvíz a réteg felszíni kibukkanásánál pótlódik a csapadékvízből, míg vízszintje a vízvezető bármely pontján fúrt kútban a felszíni kibukkanás vízszint magasságáig emelkedik. Ha ez a felszín fölé szökő vizet ad, akkor artézi vízről beszélünk (*1.a ábra*).

Ez a nézetrendszer a „hidraulikus folytonosság” felismerésével vált túlhaladottá a XX. század második felétől kezdődően (*1.b ábra*). A hidraulikus folytonosság a kőzet-



1. ábra. Az a) elkülönült víztartókra épülő artézi paradigma és a b) medenceléptékű, vízvezetők és vízfogók vertikális kapcsolatain alapuló, rendszerszemléletű hidrogeológia összevetése

Figure 1. Comparison of a) the separated aquifer-based artesian paradigm and b) the basin-scale system approach of hydrogeology based on the vertical connections of aquifers and aquitards

vázban tározott víznek az a tulajdonsága, hogy nyomásának (hidraulikus emelkedési magasságának) tetszőleges pontban bekövetkező megváltozása más pontokban is megváltoztatja a víz nyomását (hidraulikus emelkedési magasságot) (TÓTH 1995a,b). A hidraulikus kapcsolatok természetes hatásokra (tér felszín magasság különbségei, éghajlati körülmények vagy erózió/üledékképződés) és emberi beavatkozások eredményeként (szivattyúzás) is kialakulnak. Ugyanakkor mivel a porús vízben fellépő nyomásváltozások a kőzetvázban véges sebességgel terjednek annak átteresztős/vagy tárolóképessége függvényében, így a hidraulikus folytonosság észlelését megnehezíti a túl nagy távolság, a túl rövid megfigyelési idő. De akadályozhatja az is, ha a víz kémiai összetételében, hőmérsékletében, izotóposztételében, korában stb. bekövetkező jelentősebb változások egybeesnek a vízrekesztő képződmények határfelületeivel. Ezeknek a hidraulikus folytonosságot elfedő tényezőknek köszönhetően a folytonosság felismerése, valamint ebből következően a fogalomrendszer átalakulása és teljes átérté- se sok helyen még napjainkban is zajlik.

A hidraulikus folytonosság felismerése és következményei

Elsőként CHAMBERLAIN (1885) írta le, hogy „tökéletesen vízzáró rétegek nincsenek”, s már MUNN (1909) is a rétegek vízzáróságát „hagyományokon alapuló tévhit”-nek minősítette. Jóval később sikerült ezeket az állításokat mért permeabilitás értékekkel is alátámasztani (BRACE 1980, NEUZIL 1994). Ugyanakkor „indirekt” bizonyítékokkal a hidrogeológia két, egymással párhuzamosan fejlődő irányzata is szolgált. A „mérnöki” irányzat vízáadó vagy kúthidraulikai (helyi próbaszivattyúzási-) vizsgálatainak eredményeként az „ideálisan zárt vízáadó réteg” helyére a „többretegű vízáadó” lépett (pl. HANTUSH & JACOB 1955; HANTUSH 1956; NEUMANN & WHITERSPOON 1969a,b, 1972; HALÁSZ 1975; SZÉKELY 1977). A „tudományos” hidrogeológiai irányzat regionális vízkészlet-kutatási eredményei rávilágítottak, hogy a hosszú idejű próbaszivattyúzások, regionális nyomáseloszlások, az egész medencére kiterjedő vízmérlegek és nagy léptékű áramlási modellek számszerű értékelése csak a regionális és az egyes képződményeken túlmutató hidraulikus folytonosság feltételezésével lehetséges (pl. WALTON 1960; TÓTH 1963, 1978; FREEZE & WITHERSPOON 1966, 1967, 1968; MARTON & SZANYI 2000; SZANYI 2004; MARTON 2009). Végeredményben tehát a hidrogeológia „mérnöki” és „tudományos” irányzata is felismerte egymástól függetlenül a medenceléptékű, regionális hidraulikus folytonosságot. Ezzel megkezdődhetett a két irányzat közeledése, mely folyamat eredménye egy új, medencékben gondolkodó hidrogeológiai szemlélet kialakulása lett. Mi is ennek a jelentősége? Felismertük (i) a folyadékok általános jelenlétét a földkéregben, (ii) a medenceléptékű vízáramlási rendszereket, (iii) a kőzet-víz kölcsönhatás révén a folyadékok és áramlásuk mint földtani hatótényezők jelentőségét valamennyi földtani folyamatban, (iv) a kőzetváz deformációja által okozott tranzienst áramlási viszonyokat, (v) a tér- és

időskálák teljes spektrumában való gondolkodás jelentőségét, (vi) ezáltal a gyakorlati problémák okainak és megoldásainak (regionális) térbeli és (földtörténeti) időbeli léptékben történő kezelésének szükségességét.

Természetesen ezek a felismerések nem jelentették azt, hogy a változás mindenhol egyszerre és egy időben bekövetkezett, sokkal inkább egyes kutatók és nemzetközi kutatócsoportok (többek között az USA, Kanada, Kína, Mexikó, Ausztrália, Japán, Hollandia, Kolumbia és közöttük Magyarország) tették azt magukévá. 2011 óta a Hidrogeológusok Nemzetközi Szövetsége (IAH) Regionális Vízáramlási Bizottsága (RGFC) fogja össze a témában zajló kutatókat, és szorgalmazza világszerte a medenceléptékű szemlélet elterjedését és a vízáramlási rendszerek kutatását, elméleti és gyakorlati téren egyaránt.

A medencebeli vízáramlások rövid nemzetközi történeti áttekintése

A hidraulikus folytonosság fennállásának meghatározó következménye a kiterjedt medencebeli felszín alatti vízáramlási rendszerek felismerése. Ezek hajtóerőinek, térbeli mintázatának és kontrolláló tényezőinek spekulatív értékelése már a XX. század elejétől felmerült. Elsőként KING (1899) ismerte fel, a felszín alatti vizek felső határfelületét képező talajvíztükör domborzata nagyjából a földfelszínt követi. Továbbá a csapadékból utánpótlódó felszín alatti vizek a domborzati magaslatoktól a mélyedések felé áramlanak, majd a völgyek felszíni vízfolyásait táplálva csapolódnak meg. A formáción keresztüli vízáramlást elsőként MUNN (1909) feltételezte. A legkorábbi elképzelést hierarchikus eloszlású felszín alatti vízáramlási rendszerekről FOURMARIER (1939) publikálta.

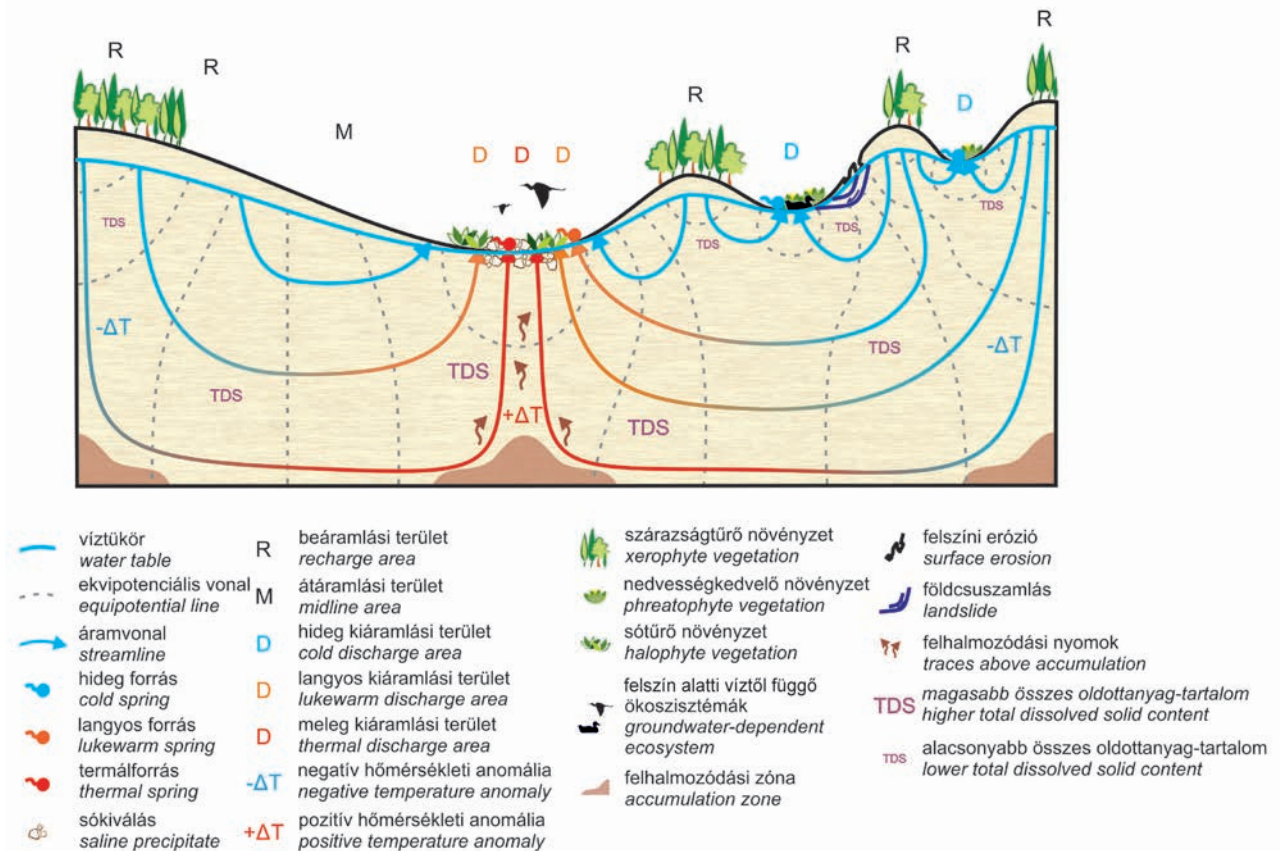
A vízáramlási rendszerek adatfeldolgozáson nyugvó és korszerű matematikai leírásához szükséges alapot HUBBERT (1940) klasszikus tanulmánya teremtette meg. Ebben bevezette a folyadékpotenciál (az egységnyi tömegű folyadékra jutó összes mechanikai energia mennyisége) fogalmát a vízföldtanba. Továbbá rámutatott annak összefüggésére a kutakban mérhető hidraulikus emelkedési magassággal (ahol g gravitációs állandó, h hidraulikus emelkedési magasság). Ezáltal a hajtóerőtér (nagysága és iránya – a folyadék a nagyobbtól a kisebb folyadékpotenciálú pont felé áramlik) kiszámíthatóvá és modellezhetővé vált. A hidraulikus hajtóerőt a kőzetváz hidraulikai tulajdonságaival (permeabilitás, hidraulikus vezetőképesség, tározás) kombinálva (DARCY, 1856) az áramtér (áramlási irányok és intenzitások) is leképezhetővé vált. HUBBERT (1940) folyadékpotenciál fogalomra alapozott felszín alatti áramképén KING (1899) felismeréseiből kiindulva a talajvíztükör domborzata nagyjából a földfelszínt követi és a felszín alatti víz csak a völgyekben csapolódik meg.

Annak felismerése, hogy a megcsapolódás völgyekben koncentrációja hibás posztulátum, TÓTH József magyar származású kanadai hidrogeológus professzor nevéhez fűződik. TÓTH (1962, 1963) tanulmányaival kezdődött a hidrogeológia ma már „Tóth-féle forradalom”-ként (BREDEHOEFT 2018) emlegetett korszaka, mely a „medenceléptékű hidrogeológia” kialakulásához vezetett. Ezekben TÓTH a HUB-

BERT (1940) által bevezetett folyadékpotenciál fogalmát elsőként alkalmazta medenceméretű vízáramlási folyamatok matematikai leírására. A stacioner vízáramlást leíró Laplace-egyenletet analitikusan oldotta meg a kétdimenziós egyszerű medence („unit basin”) és a kis vízgyűjtő vagy összetett medence („composite basin”) geometriai viszonyai és homogén-izotróp közeg feltételezése mellett. Az egyszerű medencében felső peremfeltételként a topográfiát követő talajvíztükröt alkalmazta lineáris lejtéssel, míg a medence oldalai szimmetriai okokból, az alja pedig idealizált impermeabilis határ. A számított folyadékpotenciál-értékekből az egyszerű medencében egy áramlási rendszer rajzolódik ki, melyben a megcsapolódás már nemcsak a völgyben koncentrálódik, hanem a medence teljes alsó szakaszán jelentkezik a felszínen is (2. ábra). Az „egységmedenceként” ismertté vált áramképen belül három különböző hidraulikai rezsimjellegű területet és medencerészt különített el, amelyek eltérő hidraulikai paraméterekkel jellemezhetők. Ezek a beáramlási (utánpótlódási), átáramlási és kiáramlási (megcsapolódási) területek, illetve medencerészek. Ebből adódóan „artézi” vízviszonyok homogén kőzetvázú egységmedencében is kialakulhatnak annak kiáramlási területén. Ez pedig a mélységgel növekvő hidraulikus emelkedési magasság és nem a vízzáró rétegek jelenlétének

következménye (JIANG et al. 2020). Az összetett medence (TÓTH 1963) felszíne már egy a valósághoz közelebb álló, szinuszos függvénnyel írható le, míg az ezt nagyjából követő vízszint hierarchikusan fészkelte áramlási rendszereket hoz létre, melyek különböző léptékű típusai a lokális, intermedier és regionális áramlási rendszerek (2. ábra).

Már az egység- és összetett medence összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a valós medencék felszín alatti vízáramlási képe az egységmedence környezeti hatások miatt módosult változataként fogható fel. Az elméleti megoldás valós hidrogeológiai helyzetekre történő alkalmazására TÓTH maga is utalt korai munkáiban a „hidrogeológiai környezet” (domborzat, klíma, földtani felépítés) és a felszín alatti vízrezsím ok-okozati összefüggésrendszerének bevezetésével (TÓTH 1970). A környezeti körülmények megváltozásának hatására az áramlási rendszerek tranziens állapotba kerülnek, és megkezdődik átalakulásuk (pl. TÓTH & MILLAR 1983, HAVRIL et al. 2016, SZIJÁRTÓ et al. 2019b). Amennyiben ilyen változásokkal nem számolunk vizsgálataink során, akkor medenceléptékben feltételezhető a kvázi stacioner vízáramlási helyzet, azaz az áramlási pályák viszonylagos „állandósága”. Emiatt a víz és a kőzetváz tartós kölcsönhatásba kerülnek egymással, és ennek következtében a víz mint földtani hatótényező valamennyi felszín alatt



2. ábra. Üledékes medencékben kialakuló gravitációsan vezérelt felszín alatti vízáramlási rendszerek és a hatásukra kialakuló természeti jelenségek idealizált helyzetekben (bal oldali félmedence: „egységmedence”, jobb oldali félmedence: összetett medence) (TÓTH 1999 nyomán TÓTH et al. 2016)

Figure 2. Gravity-driven groundwater flow systems in sedimentary basins and the related natural phenomena (half-basin on the left-hand side: unit basin, half-basin on the right-hand side: composite basin) (TÓTH et al. 2016 after TÓTH 1999)

zajló folyamatban szerepet játszik. E folyamatok és a határukra kialakuló jelenségek rendkívül szerteágazóak az ásvány- és szénhidrogéntelepek képződésétől a barlangok kialakulásán, biogeokémiai kiválásokon, ökoszisztémákon és a geotermális jelenségeken át egészen a tektonikai mozgásokig (pl. TÓTH 1999, INGBRITSEN et al. 2006, KLIMCHOUK 2007, TÓTH 2009a, ERŐSS et al. 2012a, Kovács-BODOR et al. 2018). Ez egyúttal felkínálja a felszín alatti víz- és fluidumáramlások közvetett, az általuk okozott földtani és környezeti jelenségek megértésén alapuló kutatási lehetőségét.

Más szerzők arra is felhívták a figyelmet, hogy a vízszintkülönbségek (azaz atopográfiai hajtóerő) mellett egyéb hajtóerők (pl. kompaktió, tektonikus kompresszió, hőmérséklet- vagy sótartalom-különbségből adódó felhajtóerő) szerepével is számolni lehet, különösen az aktívan deformálódó üledékes medencékben (GARVEN 1995, INGBRITSEN et al. 2006, SIMMONS et al. 2001). Azonban ezek megértésében is alkalmazhatók a vízszintkülönbségek által vezérelt áramlási rendszerekre kidolgozott megközelítések és módszerek.

Napjainkban a modern hidrogeológia differenciálódása, azaz más tudományterületekre specializált ágazatainak (pl. olaj-, környezeti, öko-, városi, paleo-hidrogeológia) kialakulása (DEMING 2002) zajlik. De az elmélet fejlődése is nyomon követhető, így számos olyan tanulmány napvilágot látott az utóbbi években, amelyek a vízszintkülönbségek által vezérelt vízáramlási rendszerek mechanizmusainak és jellemzőinek jobb megértését célozták analitikus módszerekkel (pl. JIANG et al. 2011, WANG et al. 2017, ROBINSON & LOVE 2014) vagy a numerikus szimuláció eszközeivel (pl. GLEESON & MANNING 2008, CARDENAS & JIANG 2010, JIANG et al. 2010, ZHOU & LI 2011 stb.). Az elméleti fejlődés eredményeképpen mára a medencebeli vízáramlásokat földfelszín alatti energiaáramlási rendszereknek tekintik (ENGELEN 2013), azaz tágabb értelmezésben a transzport rendszerek közé sorolják (ZIJL 1999), melyek nagyobb viszkozitású folyadékáramlási rendszerekre szuperponálódnak (ZIJL 2019). E felismeréseknek köszönhetően a hidrogeológia a dinamikus folyamatok medenceléptékű megértésének korszakába lépett, követve a földtudományokban, a meteorológiában, az óceánológiában bekövetkezett fejlődést (BREDEHOEFT 2018).

A kérdéskör gyakorlati jelentősége

Mindennek a gyakorlati jelentősége különösen kiemelkedő napjainkban, amikor a felszín alatti vizek fontossága egyre nő a népességnövekedés és klímaváltozás nyomán kibontakozó globális vízválság révén. A medenceléptékű és az összefüggések megértésén alapuló hidrogeológia innovatív, rendszerszemléletű és fenntartható megoldásokat kínál (ld. IAH 2020) a szűk értelemben vett hidrológiai és hidrogeológiai kérdéseken, a vízkincsek felkutatásán és védelmén túl számos más területen is. Így környezetvédelmi, területtervezési, szikesedési, erdő- és mezőgazdasági, valamint ökológiai kérdések tudományos igényű kezeléséhez is. Ezen túlmenően új szemléletű megközelítéseket ígér a geotechnikai (pl. szén-dioxid-besajtolás), geotermikus, ásványfeltárási (pl. mélységi érckutatás) és szénhidrogén kutatási megoldásokhoz.

A magyarországi paradigmaváltás főbb lépései röviden

A hazai hidrogeológusok az 1950–1960-as években kezdték a kutakban mért vízszintadatok feldolgozását felszín alatti vízáramlási rendszerek térképezésére használni (SZEBÉNYI 1955, 1965; SCHMIDT ELIGIUS & ALMÁSSY 1962; URBANCSEK 1963; RÓNAI 1963). Ezek az empirikus tanulmányok felismerték a topográfiai magaslatok és mélyedések, a vízáramlás vertikális komponense és a hőmérséklet-eloszlás közti összefüggést, sekély mélységre (max. 400 m) korlátozódva.

TÓTH József professzor RÓNAI (1963) tanulmánya nyomán ismerte fel, hogy áramlási rendszer elmélete az Alföldre is alkalmazható. Kapcsolatfelvétele a magyarországi hidrogeológusokkal 1963-as, RÓNAI Andrásnak írott levelével kezdődött. Később már ERDÉLYI Mihály tartotta fontosnak, hogy elküldje TÓTHnak a Pannon-medence hidrodinamikájáról 1971-ben készült tanulmányának (ERDÉLYI 1976) kéziratát. Ebben mért adatok feldolgozásával igazolta TÓTH gravitációs vízáramlási rendszer modelljének fennállását az Alföldön, s egyúttal az alföldi kvarter vízadó és vízfogó képződmények egyetlen nagy rétegzett víztartó rendszerként történő viselkedését (levelezések adatait ld. MÁDL-SZŐNYI 2008). Keresztszelvényeinek logaritmikus skálájú vertikális tengelyével a sekélyebb mélységek gravitációs áramlási mintázatát hangsúlyozta. A mélységi túlnyomás eredetének és eloszlásának kérdéseivel azonban nem foglalkozott.

Az új, „rétegzett víztartó rendszer” avagy „hidraulikus folytonosság” szemléletet az 1970-80-as évektől többen alkalmazták (MARTON 2012) matematikai (HALÁSZ 1975), hidrogeológiai (RÓNAI 1975, 1985), kúthidraulikai (SZÉKELY 1977) és izotóphidrológiai (PAPP 1974, MARTON & MIKÓ 1989, STUTE & DEÁK 1989) alátámasztást szolgáltatva annak.

TÓTH József professzor 1994-től kapcsolódott be személyesen a hazai hidrogeológiai oktatásba és kutatásba. Az ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszékén, MÁDLNÉ SZŐNYI Judit vezetésével és TÓTH József személyes közreműködésével (ELTE, címzetes egyetemi tanár) elinduló képzés és iskolateremtés nyomán a hidrogeológiai csoport (2016 óta Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra) a 2000-es évektől már nemzetközi érdeklődésre számot tartó kutatásokat indított. Ezek mindegyike a Pannon-medence – mint természetes „kutatólaboratórium” – felszín alatti vízáramlási rendszereinek megértését célozta.

Az Alföld regionális áramlási rendszereinek, valamint a mélységi túlnyomás eredetének és eloszlásának vizsgálatára elsőként ALMÁSI (2001) PhD-dolgozatában és TÓTH & ALMÁSI (2001) publikációjában vállalkozott. Az egész Alföldre nagyjából 3000 m mélyséig kiterjedően mintegy 16 000 folyadékpotenciál-adat szisztematikus medencehidraulikai feldolgozását végezték el. A hidraulikai adatfeldolgozás értelmezéséhez elsőként végezték el az Alföld neogén képződményeinek regionális hidrosztratigráfiai tagolását a következők szerint: Preneogén képződmények (hidraulikus vezetőképesség, $K=10^{-5}$ m/s), Prepannoniai Vízvezető (pannoniaiánál idősebb neogén képződmények, $K=10^{-6}$ m/s),

Endrődi Vízfogó (Endrődi Márga Formáció, $K=10^{-9}$ m/s), Szolnoki Vízvezető (Szolnoki Homokkő Formáció, $K=10^{-7}$ - 10^{-6} m/s), Algyői Vízfogó (Algyői Formáció, $K=10^{-8}$ - 10^{-7} m/s), Nagyalföldi Vízvezető (Algyői Formációnál fiatalabb képződmények, $K=10^{-5}$ m/s). Tanulmányukban két különböző hajtóerő által vezérelt folyadékáramlási rezsimit különítettek el. Egy felső, a földfelszín eleváció különbségei által vezérelt (gravitációs) rezsimit és egy, az előbbi hidraulikusan alátámasztó, tektonikai kompresszió által vezérelt (ALMÁSI 2003) (túlnyomásos) rezsimit. Megállapították, hogy a gravitációs rezsimit normál nyomásállapotú, regionálisan fedetlen, és csapadékból utánpótlódik, míg a kompressziós rezsimit túlnyomásos (1–35 MPa többletnyomás) és regionálisan fedettnek tekinthető. A két rendszer közti átmenet üledékes ablakokon és vezető vetőkön keresztül valószínűleg meg. Az azonosított folyadékpotenciál-anomáliák szénhidrogén csapadázódásban betöltött szerepét is elemezték (ALMÁSI 2001, TÓTH 2003).

Végeredményben ezek a nagyszabású, mért adatokon nyugvó munkák az új paradigma további hazai alkalmazási és fejlesztési lehetőségeinek útját is megnyitották számos hazai hidrogeológiai műhelyben. Többek között vízkémiai-izotóp-hidrogeológiai (VARSÁNYI 2000, VARSÁNYI & Ó. KOVÁCS 2009), geomatematikai (MARTON & SZANYI 2000), numerikus modellezési (SZANYI 2004), vízbázisvédelmi és geotermikusenergia-hasznosítási (TÓTH et al. 2016, SZŐCS et al. 2018) és számos, itt külön nem említett területen és munkában.

Jelen tanulmány céljaival összhangban a továbbiakban az ELTE hidrogeológiai kutatócsoportjának az elmúlt két évtizedben Magyarország területére vonatkozó, többnyire csak angol nyelven publikált medencehidraulikai eredményeinek szemelvényes bemutatására törekszünk. Ugyanakkor megjegyezzük, hogy bár itt nem térünk ki rá, de a hazai intézmények hidrogeológus kutatói ugyanebben az időszakban számos munkában és tanulmányban alkalmazták a medencehidraulikai közelítést és gazdagították a Pannon-medencére vonatkozó eredményeket. Kutatásaink bemutatását megelőzően a medencehidraulikai megközelítést és módszertant vázoljuk.

Medenceléptékű hidrogeológiai módszertan

Az alkalmazott módszertan rövid tárgyalására azért van szükség, mert a medencehidraulikai feldolgozásokban a víztartó rétegekre használt („artézi”) megközelítéshez képest eltérő módon, a hidraulikus folytonosság elvéből kiindulva végezzük az elemzéseket. Ennek értelmében minden kőzetnek van valamennyi permeabilitása, így medenceléptékben nem számolhatunk tökéletes vízzárók jelenlétével (DEMING 2002), csak a modellezések során (matematikai értelemben) a határfeltételek megadásánál. Így a medenceléptékű vizsgálatokban a cél a víz útjának megismerése. Ez pedig a medencét felépítő vízvezető és vízfogó egységek hidraulikai kapcsolataitól függ. Mindezekből az is következik, hogy medenceléptékű (terület: 1000–10 000 km², mélység: több 1000 m) összefüggések hatást gyakorolnak nemcsak a

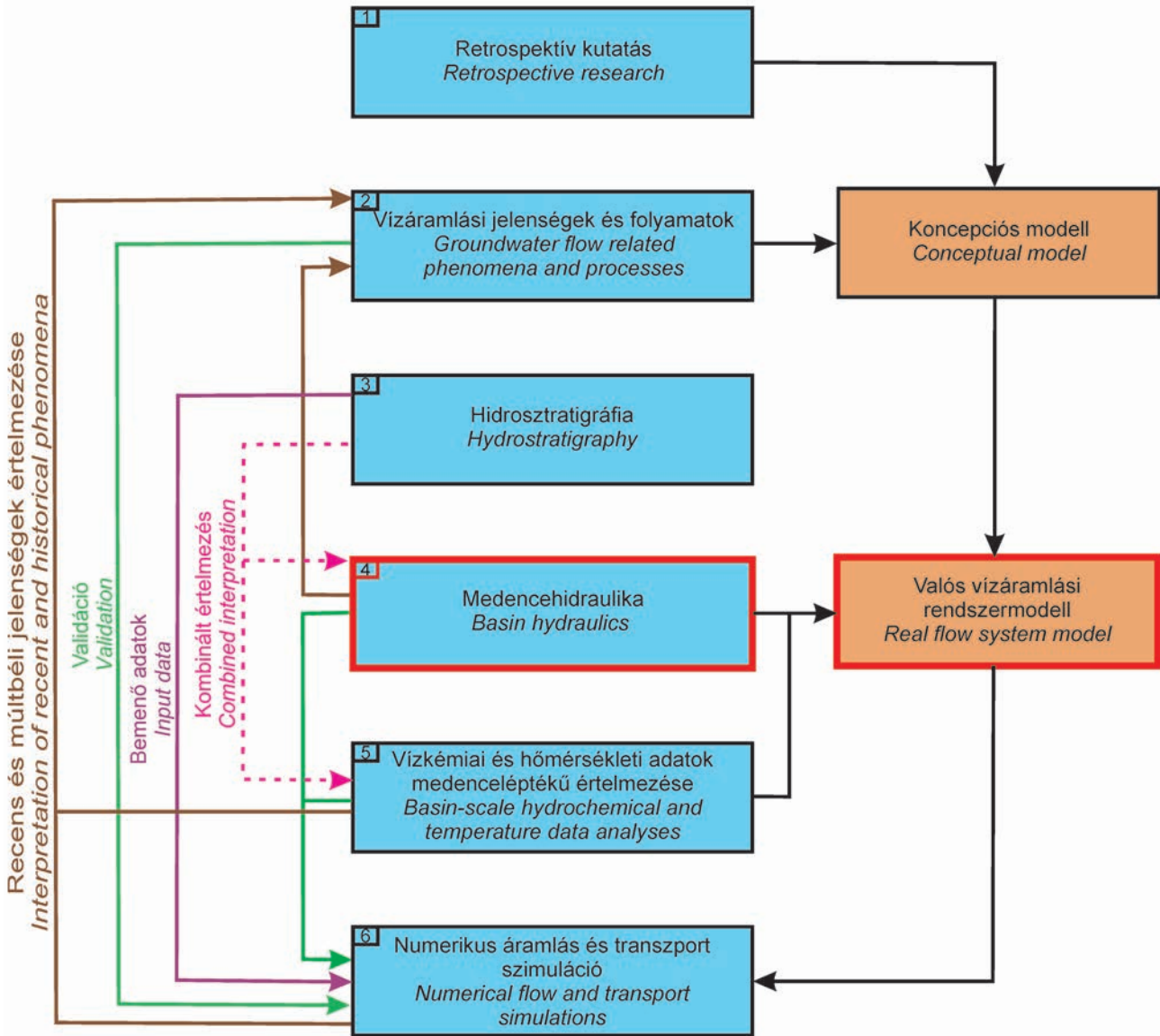
regionális léptékű, de a felszín alatti vizek lokális folyamataira is. Így lokális kérdéseket is célszerű a medenceléptékű kutatás eredményeibe ágyazva értékelni.

Egy munkafolyamatot dolgoztunk ki a felszín alatti víz-áramlási rendszerek medenceléptékű vizsgálatára (3. ábra). Ez részben TÓTH (2009) módszertánán alapul, melyet saját kutatási tapasztalataink alapján továbbfejlesztettünk. A tapasztalatokon nyugvó kutatási munkafolyamat az elvégzett fázisok visszacsatolásai révén újraindítható. Ezzel biztosítja a hipotézisek, adatfeldolgozások és modellek, és ezáltal a kutatási eredmények folyamatos fejlesztését és megújítását. A munkafolyamat alapsémája további módszerekkel és kimenetekkel bővíthető.

A munkafolyamat első lépéseként a víz-áramlási rendszerekhez kapcsolódó földtani és környezeti jelenségek és folyamatok retrospektív (3. ábra/1) és jelenlegi állapotának (3. ábra/2) vizsgálata zajlik, ami megalapozza az előzetes „hipotézis vagy koncepcionális víz-áramlási modellt”. A következő lépés a hidrosztratigráfiai értelmezés (3. ábra/3). A munkafolyamatban a legnagyobb hangsúllyal szereplő központi elem a kutakban mérhető hidraulikai adatok medenceléptékű, azaz medencehidraulikai elemzése (3. ábra/4), melyet kiegészíthet a kutak vízkémiai és hőmérsékleti adatainak feldolgozása (3. ábra/5). A medencehidraulikai eredményeket a hidrosztratigráfiával kombinálva felállítható a „valós víz-áramlási rendszermodell”. Ezt úgy értelmezhetjük, mint az adott terület víz-áramlási rendszereit az elérhető valós adatok háromdimenziós medencehidraulikai feldolgozása és rendszerszerű értelmezése alapján leíró modellt. A kezdeti „hipotézis vagy koncepcionális modell” a medencehidraulikai értelmezés „valós víz-áramlási rendszermodellje” által nyerhet megerősítést vagy akár cáfolatot. A vízkémiai és hőmérsékleti adatfeldolgozás (3. ábra/5) eredményei visszacsatolhatók a víz-áramlási rendszerek által előidézett jelenségekhez, így az 1. és 2. lépésben (3. ábra/1,2) értékelt jelenségekkel együtt a „valós víz-áramlási rendszermodell” révén nyerhetnek értelmezést. De megfordítva felhasználhatók recens és múltbéli, a víz-áramlásokhoz köthető jelenségek értelmezésére (például a nyersanyag és geotermikus energia kutatásában). Végül a numerikus áramlás és transzport modellezés (3. ábra/6) a valós rendszer ismerete és megértése, azaz a medencehidraulikai elemzés után következhet, mivel annak absztrakciójaként tekinthető. Ez az absztrakció teszi lehetővé a medenceléptékben meghatározó folyamatok megragadását a numerikus szimuláció révén. De látjuk a 3. ábra alapján, hogy bemenő adatait és validációját a munkafolyamat során felállított és értelmezett adatrendszerekből nyeri.

Retrospektív kutatás, víz-áramlási jelenségek és folyamatok

A felszín alatti víz-áramlási rendszerek felszínen nyomonkövethető környezeti következményeinek (hidrológiai, talajtani, növénytani, szállítási, felhalmozási, geomorfológiai stb. jelenségek (TÓTH 1999)) vizsgálata egyrészt a jelenségek és folyamatok recens terepi lenyomatainak térképezés-



3. ábra. A felszín alatti vízáramlási rendszerek medenceléptékű vizsgálatának munkafolyamata (MÁDLNÉ SZÖNYI 2019 nyomán módosítva)

Figure 3. Workflow for the basin-scale analysis of groundwater flow systems (after MÁDLNÉ SZÖNYI 2019)

sén alapul (3. ábra/2). De magában foglalja a retrospektív vagy történeti dokumentumokon (katonai térképek, levéltári anyagok stb.) alapuló visszatekintő kutatást is (ENGELEN & KLOOSTERMAN 1996) (3. ábra/1). Utóbbi célja a felszín alatti vizek kvázi „természetes”, emberi befolyástól (pl. víztermelések által okozott depresszió) mentes állapotának rekonstruálása, ezáltal a vízáramlási rendszerek természetes működési mechanizmusának megismerése.

Hidrosztratigráfia

A kőzetváz hidrosztratigráfiai jellemzése (3. ábra/3) annak litológiájától függ, így medenceléptékben a litosztratigráfiai egységek egyúttal hidrosztratigráfiai egységként is kezelhetők. A tagolás során a cél a kőzetváz vízvezető és vízfogó képződményeinek elkülönítése (MAXEY 1964), e-

zért medenceléptékben a hasonló hidraulikai viselkedésű (hidraulikus vezetőképességű és permeabilitású) képződményeket összevonjuk (TÓTH 1978). Fontos megjegyezni, hogy a vízkémiai és hőmérsékleti jellemzők nem tartoznak a hidrosztratigráfiai értékelésbe a definíció értelmében. Szintén fontos kiemelni, hogy a hidrosztratigráfia közvetlenül nem része a hidraulikai adatfeldolgozáson nyugvó elemzésnek (3. ábra/4). Azonban a 3. ábra értelmében segítséget nyújt a „valós vízáramlási rendszermodell” felállításához. A hidrosztratigráfia ugyanis genetikusan befolyásolja a folyadékpotenciál eloszlását (TÓTH 2009a), mivel a folyadékpotenciál térben észlelhető anomáliák, rendszerint földtani heterogenitások (azaz jelentősebb permeabilitásváltozások, pl. záró vetők) jelenlétére vezethetők vissza (pl. ROSTRON & TÓTH 1996; ALMÁSI 2001; TÓTH 2003, 2009a; CZAUNER & MÁDL-SZÖNYI 2011, 2013; MÁDLNÉ SZÖNYI 2019a). Ezek

vizsgálata céljából a hidrosztratigráfiai értelmezést úgy kombináljuk a medencehidraulikai módszerekkel, hogy a profilokon, térképeken és szelvényeken a hidraulikai adatok mellett a hidrosztratigráfiai felépítést is feltüntetjük. Emiatt az adatfeldolgozáson nyugvó medencehidraulikai munkák esetén – figyelembe véve az elérhető hidraulikai adatmennyiséget és adateloszlást – a nagyobb léptékű heterogenitásokat hangsúlyozó litosztratigráfiai tagolás és regionális szerkezeti helyzet többnyire elegendő alapot nyújt a hidraulikai és a kapcsolódó értelmezésekhez. Ugyanakkor a medenceléptékű kiinduló és egyre részletesebb numerikus modellezések a hidrosztratigráfiai feldolgozás finomítását igénylik (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009, BALOGH 2016, KAPILLER 2016). Ezekben ugyanis a hidraulikus vezetőképesség-értékek már bemenő paraméterként szolgálnak az áramlási irányok és intenzitások meghatározásához.

Medencehidraulika

A hidraulikai kútdatok medenceléptékű, azaz medencehidraulikai elemzése (3. ábra/4) során a teljes vizsgált területet a felszíntől a medencealjzatig (beleértve a víztartókat és vízfogókat is) egységesen kezeljük és értékeljük. Itt a cél a stacioner áramlási tér feltérképezése, ugyanis az áramképek ennek megjelenítésére alkalmasak. Ezért a vízkutak és szénhidrogén-kutató fúrások eredeti kútdokumentációban rögzített, létesítéskor mért vízszint, illetve pórusnyomás adatait elemezzük, mivel ezek tükrözik leginkább a „kvázi természetes”, azaz fluidumtermelés előtti állapotot. Magyarországon az 1970-80-as évektől kezdődő intenzív vízkivétel előtti állapot tekinthető „kvázi természetesnek” a vízszintek szempontjából. Fontos megjegyezni, hogy mivel ezek a kútdatok különböző időpontokból származnak, így a stacioner áramlási tér értelmezhetőségéhez feltételezzük, hogy a hidraulikus emelkedési magasság változásainak különbségei (Δh) az adott léptékben vizsgálva beleférnek a medenceléptékű probléma hibahatárába. A körültekintő adatszűrést követő hidraulikai számításokhoz (hidraulikus emelkedési magasságok átszámítása pórusnyomás-adatokká és fordítva) meg kell határozni egy átlagos vízsűrűségértéket, mivel a különböző pontokra meghatározott folyadékpotenciál-értékek csak azonos sűrűséggel számítva hasonlíthatók össze (HUBBERT 1940, LUSZYNSKI 1961). Számításaink és regionális kutatási tapasztalataink szerint az 1000 kg/m^3 vízsűrűség alkalmazható a Pannon-medencében. CZAUNER (2012) számításai rámutattak, hogy a magas geotermikus gradiens ($50 \text{ }^\circ\text{C/km}$) és a relatíve alacsony (max. 40 g/l) oldottanyag-tartalom hatása nagyjából kiegyenlíti egymást. A kimutatható eltérések a medencehidraulikai feldolgozás szempontjából elhanyagolhatóak (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013, ERHARDT et al. 2017).

A hidraulikai adatok medenceléptékű megjelenítésének és elemzésének módjai közül három tekinthető alapvetőnek. Ezek a nyomás vs. eleváció profilok [$p(z)$], tomografikus potenciál térképek [$h(x,y)$], és hidraulikus kereszt-szelvények [$h(s,z)$]. A $p(z)$ profilokon a nyomásrezsím (közel hidrosztatikus, túlnyomásos vagy alulnyomásos) és az adatpon-

tokra illeszthető vertikális nyomásgradiensek (γ) értékelhetők az egyensúlyi, hidrosztatikus értékhez képest. Utóbbi határozza meg a hajtóerő vertikális komponensének irányát: a szuperhidrosztatikus vertikális nyomásgradiens feláramlást, a szubhidrosztatikus leáramlást jelez, míg a közel hidrosztatikus érték a vertikális komponens (és nem a hajtóerő, avagy áramlás) hiányára utal. Ezen túl a nyomásrezsím és a vertikális nyomásgradiens mélységgel történő változásainak mértékéből és jellegéből következtetni lehet a kőzetváz heterogenitásainak hidraulikai szerepére is (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013, ERHARDT et al. 2017, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a; CSONDOR et al. 2020). Ezért érdemes a profilokon a hidrosztratigráfiai felépítést is jelölni.

A víztartóléptékben készülő „hagyományos” potenciométrikus térkép definíció szerint egy horizontális és fedett víztartóra szerkeszthető, ez a kritérium azonban ritkán teljesül a valóságban (dőlt rétegek, szerkezeti tagoltság miatt), ami igaz a Pannon-medencére is. Ezzel szemben a medencehidraulikai megközelítés szerint a tomografikus potenciál térkép egy adott elevációtartományban mért hidraulikus emelkedési magasság értékeinek (vízszintes, X-Y síkban történő) kontúrozásával állítható elő (ALMÁSI 2001). A tomografikus térképeket egymás alatti eleváció intervallumokra (a kutak szűrőközép-értékei mint mérési pontok eleváció szerinti eloszlása alapján) szerkesztjük, és míg az egyes térképeken a hajtóerő horizontális komponensét lehet meghatározni, addig az egymás alatt következő térképek összehasonlításával a vertikális áramlási komponensekre lehet következtetni. (A hajtóerő-vektorokat az egyszerűség kedvéért áramlási irányként jelöljük.) A módszer másik előnye, hogy indirekt módon lehet következtetni a szerkezetek és vízfogó képződmények hidraulikai viselkedésére az általuk okozott folyadékpotenciál- anomáliák alapján. Ezért érdemes a tomografikus potenciál térképekével azonos eleváció intervallumokra hidrosztratigráfiai térképeket (szerkezeti elemekkel kiegészítve) is készíteni (MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). A függőleges és lehetőleg a hidraulikus gradiens irányának megfelelő síkban szerkesztett hidraulikus kereszt-szelvényeken a szelvény síkjába eső vertikális és horizontális hajtóerő komponensek értelmezhetők, míg az azonos nyomvonalon szerkesztett hidrosztratigráfiai és a szerkezeteket is bemutató szelvények nagyban segítik az értékelést.

Vízkeimiai és hőmérsékleti adatok medenceléptékű értelmezése

A medencehidraulikai értelmezést érdemes a kutakból származó vízkémiai és hőmérséklet adatok értékelésével is kiegészíteni (3. ábra/5), mivel ezen paraméterek eloszlását a felszín alatti vízáramlások, mint földtani hatótényezők, alapvetően befolyásolják. Annak érdekében, hogy az elemzések összevethetőek legyenek a hidraulikai értelmezéssel, lehetőleg itt is létesítéskori adatokat használunk, és ugyanazon adatfeldolgozási módszereket alkalmazzuk, mint a hidraulikai adatoknál (elevációprofilok, tomografikus térképek, kereszt-szelvények), lehetőleg azonos területekre, eleváció intervallumokra és szelvény nyomvonalakra. Ezek

mellett a „hagyományos” módszerek (Stiff-diagram, STIFF 1951), Piper-diagram (BACK 1966), vízkémiai fáciések meghatározása stb.) alkalmazása is célravezető lehet. Fontos azonban megjegyezni, hogy a felszín alatti víz kémiai jellege, izotópos összetétele vagy kora nemcsak a vízáramlási rendszerek jellemzőitől (pl. rezsimjelleg, rendűség) függ, hanem a földtani környezettől (pl. kőzetösszetétel), az éghajlattól és a keveredési folyamatoktól is. Ezért csupán ezen paraméterek alapján nem lehet a valós „vízáramlási rendszermodell” felállítani, legfeljebb koncepciók modell alkotható.

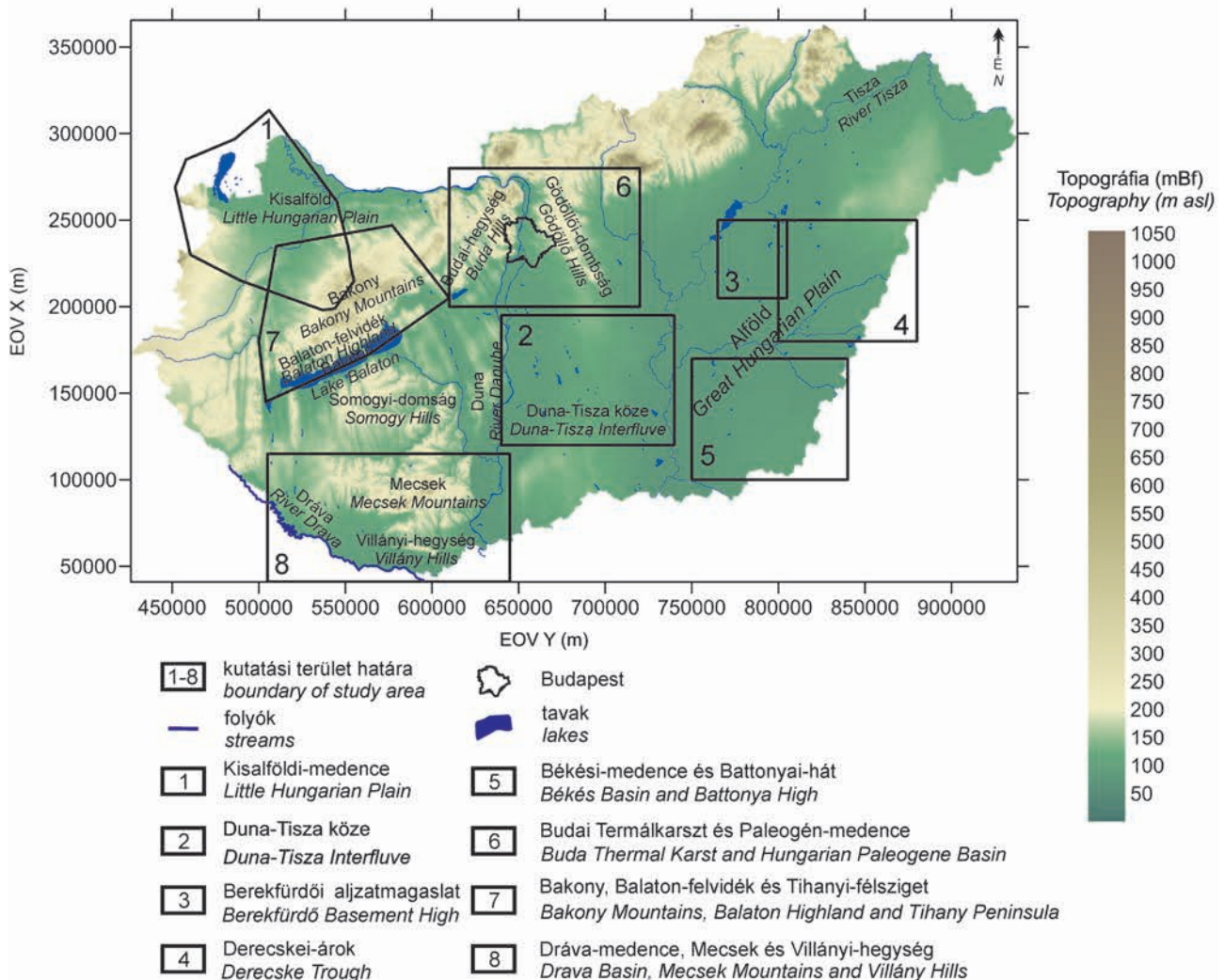
Numerikus áramlás és transzport szimuláció

A „valós vízáramlási rendszermodell” megalkotása után következhet a felszín alatti vízáramlási tér kvantitatív (numerikus) térbeli szimulációja (3. ábra/6). Ennek célja a felszín alatti vízáramlási rendszerek működésének, fizikai folyamatainak megértése, ami megalapozza a kvantitatív értékelést. Az ilyen jellegű modellezésekhez koncepciók hátteret, permfeltételeket és validációs lehetőséget nyújt a

„valós vízáramlási rendszermodell”. Ugyanakkor a medencehidraulikai vizsgálatok és eredmények, valamint a medenceléptékű vízáramlási és transzport modellezés együttesen segít számos vízáramláshoz köthető jelenség recens és geológiai időskálán történő értelmezésében (3. ábra). Érdekes még megjegyezni, hogy míg a medencehidraulikai elemzések célja a hajtóerőtér feltérképezése (3. ábra/4), addig az áramlási intenzitások és irányok egzakt értékelése csak a numerikus modellezéssel lehetséges.

Eredmények az ELTE-n

A következőkben a Magyarország területének jelentős részét lefedő (4. ábra) medenceléptékű kutatásaink összegzett eredményeit mutatjuk be. A hangsúlyt nem annyira a konkrét eredményekre, mint inkább a medencehidraulikai megközelítés szemléltetésére helyezzük. A változott témakörökben további részletek a hivatkozott publikációkban olvashatók.



4. ábra. A bemutatott kutatási területek elhelyezkedése Magyarországon

Figure 4. Position of the presented study areas

Kisalföldi-medence

Az első medenceléptékű hidrogeológiai kutatásokat az OVF (Országos Vízügyi Főigazgatóság) megbízásából – vízbázisvédelmi intézkedések megalapozása céljából – végeztük a Kisalföldi-medence magyarországi részére vonatkozóan (4. ábra) (PETHŐ et al. 2004). Ennek során igazolást nyert vízkutatási célú kutak hidraulikai adatainak feldolgozásával a Kisalföldi-medence rétegösszleteinek hidraulikus folytonossága és a gravitációs, azaz felszíni topográfia által vezérelt áramrendszerek működése –1000 mBf (méter a Balti-tenger szintje felett) elevációig. E csapadékból utánpótlódó vízáramlási rendszerek beáramlási területei a medence peremén fekvő dombok és előtereik, míg ezek irányából a víz a medence belsejében fekvő kiáramlási területek felé áramlik. Azonban a –1000 (–1800) mBf eleváció intervallumban változás tapasztalható, ahol a medence mély, központi részein jelentkeznek a legnagyobb hidraulikus emelkedési magasság értékei. A kimutatott túlnyomás magyarázatával a kutatás nem foglalkozik, de jelentkezési helye és szintje kijelöli a gravitációsan vezérelt vízáramlási rendszerek alsó határát. A feldolgozás egyúttal igazolta a kisalföldi Duna-szakasz mentén a beáramlási (felső Szigetköz) és a kiáramlási területek (alsó Szigetköz) folyó menti megjelenését, ami a folyó és a felszín alatti vizek kapcsolatának (rátápláló, illetve megcsapoló) megváltozását medencehidraulikai feldolgozással bizonyítja. Továbbá rámutatott arra is, hogy erre az eltérő, de permanens hidraulikai kapcsolatra szuperponálódik a Duna vízszintváltozásából adódó tranzienst hatás.

Duna–Tisza köze

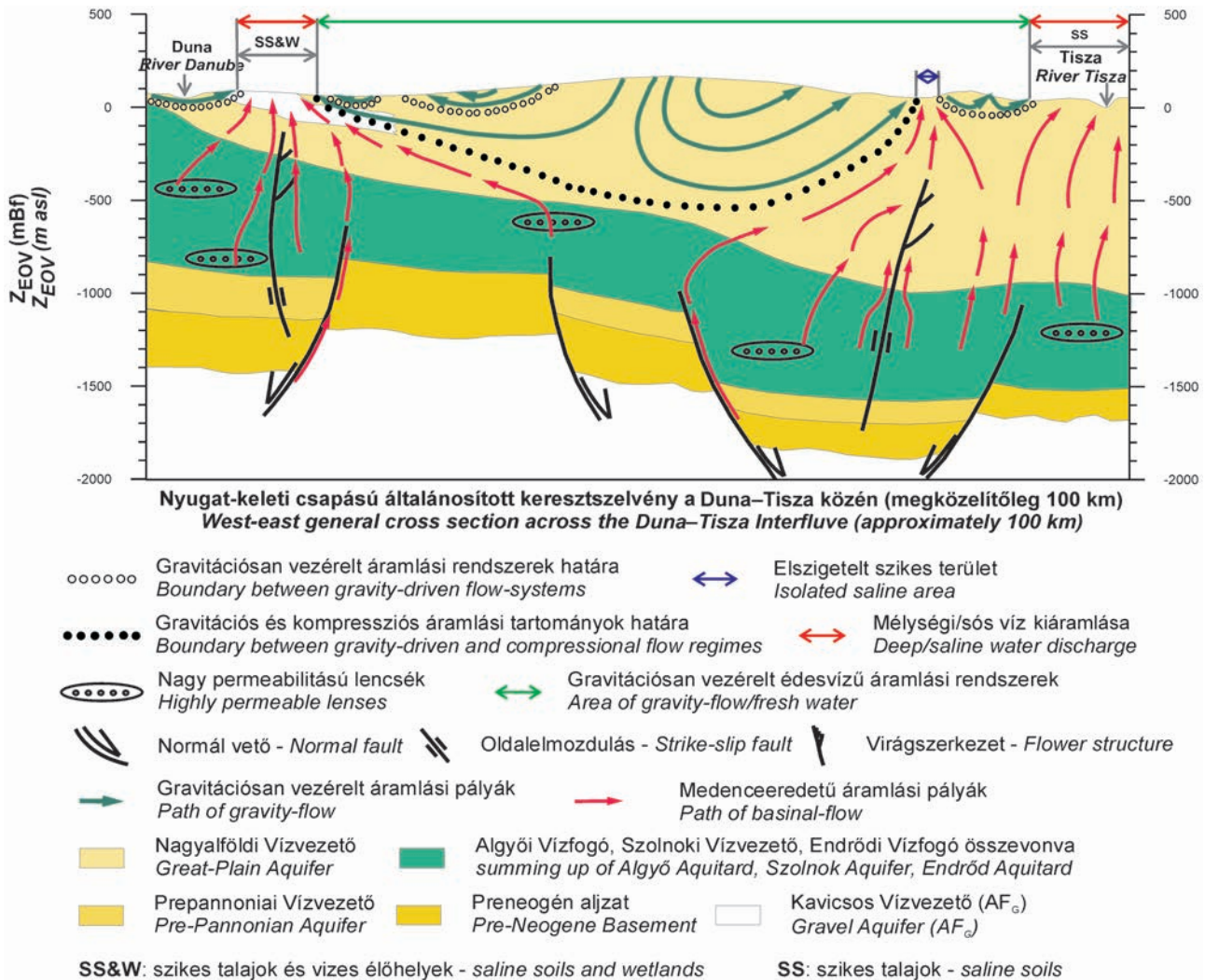
Az alföldi részterületek kutatásának ALMÁSI (2001) és TÓTH & ALMÁSI (2001) az Alföldre kiterjedő medencehidraulikai tanulmánya biztosított hátteret. E tanulmányok sorozata szemlélteti, hogy a medencehidraulikai kutatások növekvő léptékben és csökkenő területre végezve a vízáramlási rendszerek szisztematikus és egyre alaposabb megértését teszik lehetővé. A Duna–Tisza közti tanulmányokat a Duna-völgyben a folyóval közel párhuzamosan megfigyelt magas TDS (összes oldott anyag) tartalom, valamint a vízszintben megmutató kémiai sokszínűség, „foltosság” okainak kutatása inspirálták (KUTI & KÓRÖSSY 1989). A kérdés az volt, hogy mi lehet az oldottanyag-tartalom forrása és annak felszínközeli elosztási mechanizmusa. Továbbá ennek összefüggése a felszínközeli szikesedési jelenségekkel (szikes talajok), a tavak, vizenyős területek elhelyezkedésével, jellegével és vizük sótartalmával. A Duna–Tisza köze középső részére (4. ábra) e kérdések megválaszolása érdekében egy OTKA-kutatás keretében végeztük el a medencehidraulikai elemzést és értelmezést, melyet kiegészítettük a kutakból rendelkezésre álló vízkémiai adatok (TDS, Na⁺, K⁺, Cl⁻) feldolgozásával. A feltett kérdésekre adott választ és a medenceléptékű kutatás eredményeit a 'Duna–Tisza köze hidrogeológiai típusszelvénye' formájában összegeztük (5. ábra) (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009).

Vízáramlási rendszerek és a szikesedési mintázat

Az eredmények megerősítették ALMÁSI (2001) valamint TÓTH & ALMÁSI (2001) felismeréseit az Alföld két különböző, de egymással hidraulikai kapcsolatban álló áramlási tartományát illetően. A gravitációsan (a talajvízszint magasságkülönbségei által) mozgatott, csapadék eredetű vizek felső áramlási tartományát alátámasztja egy túlnyomásos tartomány (ennek vízkészletei nem utánpótlódók). A két eltérő eredetű vízrendszer közötti hidraulikai kapcsolat a neogén Endrődi és Algyői Vízfogókon – mint regionális kiterjedésű vízrekesztőkön – keresztül szerkezeti elemeken és nagy permeabilitású homokkőlelencséken keresztül valósul meg. A két tartomány vizeinek oldottanyag tartalma is jelentős különbséget mutat: a gravitációs rendszerben TDS = 420–2 500 mg/L (vízkémiai fációs: Ca, Mg(HCO₃)₂ típus), míg a túlnyomásos rendszer vizeiben a TDS = 10 000–38 000 mg/L (vízkémiai fációs: NaCl típus). A mélységi, nagy sótartalmú vizek feláramlását a teljes vizsgálati területen kimutattuk, melynek lehetséges forrása a preneogén aljzat, míg a preferált áramlási pályát az aljzattól induló és felszínközeli nyúló vetőrendszerek biztosítják. Erre a regionális feláramlásra szuperponálódik a felszíntől nagyjából 500 m mélységig a meteorikus vizek gravitációs áramlási tartománya, amelynek beáramlási területe a Duna–Tisza közti hátság. Innen a kelet és nyugat felé tartó gravitációs áramlások hierarchikus rendszereket formálnak (lokális, intermedier és regionális), a mélységből feláramló vizeket is eltérítik ezekben az irányokba, így azok csak keveredve tudnak megcsapolódni a hátsági gravitációs kiáramlási területektől (lokális és intermedier) nyugatra és keletre (5. ábra).

Ez az áramlási mintázat magyarázatul szolgál a hátság menti, nagy kiterjedésű vizenyős területek (gravitációs áramlások lokális és intermedier kiáramlási területei) és az azoktól nyugatra és keletre elhelyezkedő szikes területek (a mélységi eredetű, magas oldottanyag-tartalmú és a meteorikus eredetű regionális áramlási rendszerek kevert vizeivel) elhelyezkedésére. A preneogén medencealjzat a Duna-völgyi szikesek zónájában közelíti meg leginkább a felszínt, továbbá a felszín közelében található, folyóvízi kavicsréteg is segít a mélységi eredetű, magas oldottanyag-tartalmú vizek és a hozzá keveredő gravitációsan mozgatott vizek észak-déli csapás mentén történő felszínre jutásának. Ez magyarázatul szolgál a vízszintben a magas oldottanyag-tartalmú sávok relatíve éles határára a Duna-völgyben. A szikes zóna a Tisza-völgyben inkább foltoszerűen, kevésbé élesen jelentkezik hidrosztratigráfiai okok és a preneogén aljzat nagyobb mélysége miatt. Fontos megjegyezni, hogy a megcsapolódó mélységi és a meteorikus eredetű vizek energiája (folyadékpotenciálja) a Nagyalföldi Vízvezetőbe jutva hasonló nagyságrendű. Ennek oka, hogy a mélységi túlnyomás disszipálódik az Endrődi és Algyői Vízfogókon történő átáramlás során, így a medence eredetű vizeket csak kémiai jellegük különbözteti meg a gravitációs rendszerek meteorikus vizeitől.

A hipotézismodell, az adatfeldolgozás és a „valós vízáramlási rendszermodell” kialakítását, valamint a kapcsolható hidrológiai, vegetációs és szikesedési jelenségek meden-



5. ábra. A 'Duna-Tisza köze hidrogeológiai típus szelvénye' (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009)

Figure 5. The Duna-Tisza Interfluve Hydrogeological Type Section (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2009)

celéptékű feldolgozását követően készült numerikus modellezés (COMSOL Multiphysics) alátámasztotta a medencehidraulikai értelmezés során feltárt hajtóerőteret és a módszertan létjogosultságát. Továbbá a hőtranszport-modellizés kimutatta az advektív hőszállítás szerepét is a területen (BALOGH et al. 2017a,b).

A Duna-Tisza közti kutatások alapvető jelentőségükön túl felhívták a figyelmet a Víz Keretirányelv végrehajtása kapcsán a felszíni és felszín alatti víztestek lehatárolása során felmerülő kérdésekre (PADISÁK et al. 2006). Az eredményeik felhasználhatók a Duna-Tisza közti vízellátási problémák kezelése, a mezőgazdasági területhasználat megtervezése, szikes talajok javítása, a lápok és szikes tavak védelme során.

Az Ágasegyházi-, Kolon- és Kelemenszék-tó hidraulikai viszonyai és annak következményei

A regionális elemzés mellett lokális léptékű kutatások is zajlottak a Duna-Tisza közén három tó és a felszín alatti vizek kapcsolatának feltárása céljából. Itt is a kvázi természete-

tes állapotot reprezentáló retrospektív kutatásokból indultunk ki. A megközelítőleg azonos kelet-nyugati vonalba és egymástól nagyjából 11–15 km-re eső Ágasegyházi-, Kolon- és Kelemenszék-tó eltérő hidraulikai viszonyai (beáramlási, átáramlási és kiáramlási hidraulikai helyzet), valamint a kapcsolódó felszíni és felszínközeli jelenségek (talajtípusok, vegetáció) alátámasztják a mélységi feláramlás és a gravitációs áramlási rendszerek medencehidraulikai értelmezés során feltárt mintázatát, és lehetővé teszik azoknak a tavak környezetében történő értelmezését (ZSEMLE et al. 2002, MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2005). A legnyugatabbra eső Kelemenszék-tó környezetében végzett átfogó kutatások bizonyították, hogy a Kelemenszék egy feláramló felszín alatti vizekkel táplált tó (azaz FAVÖKO vagy felszín alatti víztől függő ökoszisztéma), amely a Duna-völgyi szikesek zónájába tartozó „hidraulikai ablakban” található, ahol a mélységi eredetű, magas oldottanyag-tartalmú feláramlás meteorikus eredetű vizekkel keveredve, koncentráltan jut felszínre (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2005; CZAUNER et al. 2008; SIMON et al. 2008, 2011).

Geotermikuspotenciál-értékelés

A medencehidraulikai feldolgozás eredményei geotermikuspotenciál-értékelésre is használhatók. Ennek módszertanát a Duna–Tisza közti kutatási eredmények alapján dolgozta ki MÁDL-SZŐNYI & SIMON (2016). Később az eredményeket MÁDLNÉ SZŐNYI (2019b) a Budai Termálkarsztra is adaptálta. A módszertan a „természetes geotermikus rendszer” elemeit (hő, megfelelő tározó kőzet, fluidum, DICKSON & FANELLI 2013) medenceléptékben értékeli, kiegészítve azt a hidraulikai, azaz a víztartó és a vízfogó rétegek között fennálló összefüggések megismerésével. Az 1993. évi XLVIII. törvény a bányászatról jelenleg a 2500 m-es felső mélység határral definiálja a zárt, koncesszió alá eső geotermikus rendszereket (melyekbe a kizárólag energetikai célra használt termálvíz visszasajtolása kötelező). Továbbá elkülöníti a fölötté lévő nyitott tározókat. Ezzel szemben a regionális nyomásrészes mért adatokra alapozott (medencehidraulikai) feltárása lehetőséget kínál a geotermikus készletek – mélységtől független – zárt és nyitott jellegének, valamint a visszasajtolás előzetes hidraulikai értékelésére (MÁDL-SZŐNYI & SIMON 2016, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019b). A regionálisan fedetlen gravitációs áramlási tartomány nyitott tározónak tekinthető és a csapadék utánpótlás mértékében termelhető. Besajtolás szempontjából az át- és kiáramlási területeken kisnyomású besajtolás lehetséges, míg a beáramlási területeken energia befektetés nélkül üzemeltethető nyelő kút. Ezzel szemben a túlnyomásos tározók esetében nem számolhatunk természetes utánpótlással (a termelés a víz és a kőzetváz rugalmas tulajdonságainak, azaz a fajlagos tározás függvénye), ezért ezek zártnak tekinthetők és csak (nagynyomású) visszasajtolás mellett termelhetők. Az alulnyomásos tározók szintén zártnak tekinthetők abból a szempontból, hogy az alulnyomás és az utánpótlás hiánya miatt nem termelhetők, ellenben nyelő kút energiabefektetés nélkül üzemeltethető. Fontos megjegyezni, hogy az értékelési séma nemcsak a geotermikus készletekre, hanem általában a fluidumkészletek (felszín alatti víz, szénhidrogén) termelhetőségére és visszasajtolási lehetőségeire (víz, CO₂-elhelyezés) is vonatkoztatható.

Berekszentmiklósi aljzatmagaslat, Derecskei-árok, Békési-medence, Battonyai-hát

A medencehidraulikai megközelítés a szénhidrogén-földtani kutatásokban is hasznos, a gyakorlatban rutinszerűen nem használt megközelítéssel szolgál. A K- és DK-Alföldön a MOL Nyrt. támogatása mellett végzett medencehidraulikai kutatásaink a vetők és alacsony permeabilitású képződmények – különösen az Algyői Vízfogó – felszín alatti folyadék áramlási rendszerekben és szénhidrogén-csapadékosztásban betöltött szerepére összpontosított.

Szerkezeti elemek lokális hidraulikai szerepe

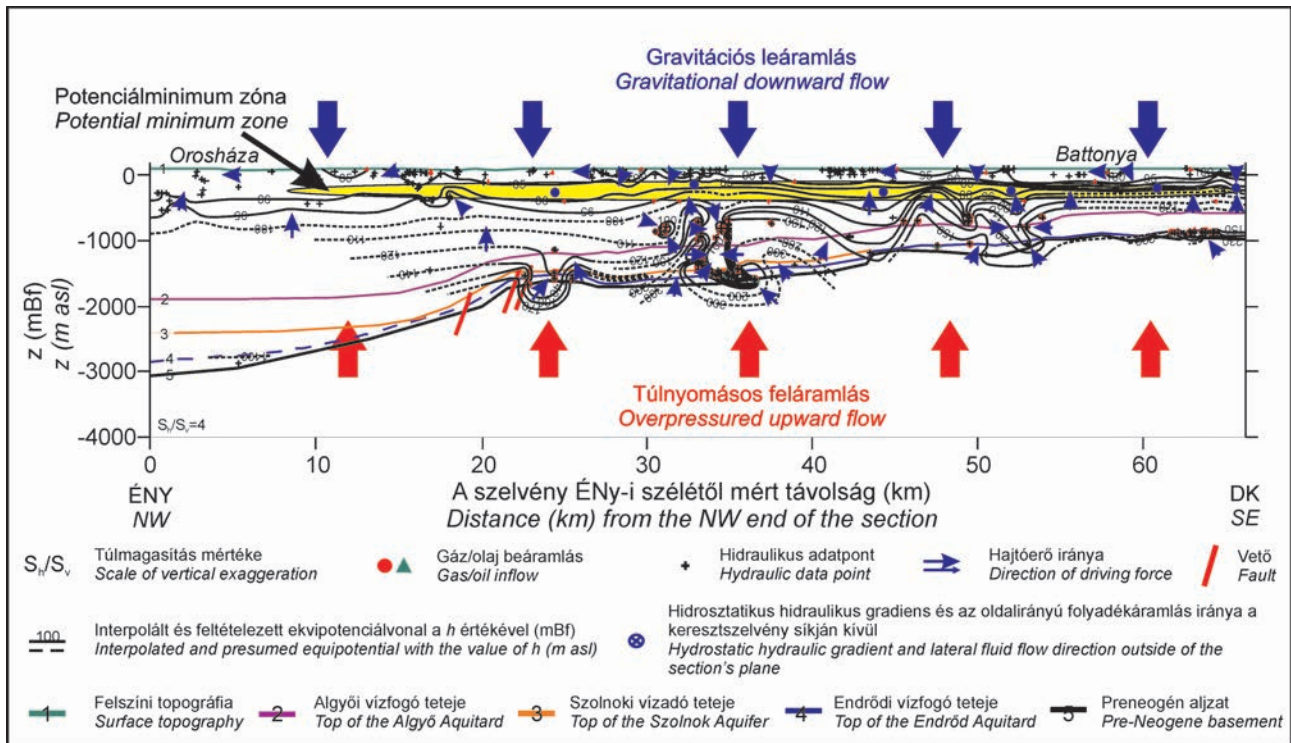
Ennek a kutatásnak előfutára volt egy jóval kisebb terület lokális vizsgálata, ahol a vetők hidraulikai szerepének tisztázása volt a cél a preneogén aljzatmagaslat fölötti termálvíz (Berekszentmiklósi) és szénhidrogén (Kunmadarasi földgázmező) előfordulás létrejöttében (4. ábra). Az elvégzett

szeizmikus, medencehidraulikai és kapcsolódó vízkémiai elemzések kombinált értelmezése feltárta az aljzatmagaslatot határoló oldalelmozdulási zónák irányonként változó hidraulikai szerepét és hozzájárulását a gázfelhalmozódáshoz, valamint a vetőkereszteződésben a „Pávai-Vajna-féle” egykori termálvízfeltáráshoz (CZAUNER et al. 2008, CZAUNER & MÁDLNÉ SZŐNYI 2008, CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2011).

Szerkezeti elemek és kis permeabilitású képződmények regionális hidraulikai szerepe

A Derecskei-árok, Békési-medence és Battonyai-hát területén (4. ábra) a vetőrendszereknek és az alacsony permeabilitású képződményeknek a mélységi túlnyomás lecsengésében (disszipálódásában) játszott regionális hidraulikai szerepét elemeztük, különös tekintettel a szénhidrogén csapadékosztás feltételeire (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013). A víz és szénhidrogén kutak adatainak bevonásával végzett medencehidraulikai és olajhidrogeológiai értelmezés, valamint a kapcsolódó vízkémiai és hőmérsékleti adatfeldolgozás eredményeként itt is sikerült azonosítani a gravitációs áramlási tartományt és annak különböző rezsimszerű területeit. Továbbá kimutattuk az ezt hidraulikusan alátámasztó túlnyomásos rendszert, amelyben a feláramlás dominál. A két tartomány hidraulikai elkülönítése ott volt lehetséges, ahol a túlnyomásos rendszer feláramlása a gravitációs tartomány beáramlási területei alatt azok lefelé irányuló áramlásaival találkozik. Az ilyen összetartó vertikális áramlások zónáit folyadékpotenciál-minimum jellemzi, ami hidraulikus csapadékosztás szolgálhat a felszín alatti víz által szállított anyagok számára (TÓTH 1980). Mivel a kutatás a szénhidrogénekre koncentrált, így azok vertikális migrációjának felső határaként definiáltuk ezeket a folyadékpotenciál-minimum zónákat a Derecskei-árok északkeleti részén, illetve a Battonyai-hát mentén (6. ábra).

A kutatás a hidrosztratigráfiai egységeket tekintve megerősítette, hogy a Nagyalföldi Vízevezető medenceléptékben megközelítőleg hidrosztatikus nyomásállapotú ($\gamma = 9,81 \pm 0,5$ MPa/km, ezen belül gravitációs fel- és leáramlások működnek). Ugyanakkor a Prepannóniai és Preneogén Vízevezetők erősen túlnyomásosak (a túlnyomás mértéke a 200%-ot is meghaladhatja). Eközben a vertikális nyomásgradiens csak enyhén szuperhidrosztatikus, ami vízevezető jellegükre és a laterális áramlás dominanciájára utal. Ezzel szemben a közbeeső Endrődi Vízfogó, Szolnoki Vízevezető és Algyői Vízfogó területenként változó nyomásviszonyokat, de jellemzően szuperhidrosztatikus vertikális nyomásgradienseket (akár >20 MPa/km) mutat. Ebből következik, hogy ennek a három egységnek és különösen az Algyői Vízfogónak a szerkezeti és üledékföldtani heterogenitásai határozzák meg a túlnyomás lecsengésének módját a Nagyalföldi Vízevezető irányába. Mivel e heterogenitások igen gyakran egybeesnek folyadékpotenciál, hőmérsékleti és vízkémiai anomáliákkal, valamint szénhidrogén-felhalmozódásokkal, ezért diagnosztikus összefüggést lehetett kimutatni a jelenségek együttes előfordulása közt. Kapcsolatrendszerükben a geológiai felépítésnek a túlnyomás lecsengésében játszott szerepe bizonyult meghatározónak. Fontos



6. ábra. Hidraulikus keresztmetsvény a Battonyai-hát mentén a feltárt felszín alatti vízáramlási rendszerekkel és a folyadékpotenciál-minimum (hidraulikai csapda) zónával (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013)

Figure 6. Hydraulic cross-section along the Battonya High with the interpreted groundwater flow systems and fluid-potential minimum (hydraulic entrapment) zone (CZAUNER & MÁDL-SZŐNYI 2013)

azonban megjegyezni, hogy ez a kapcsolat kétirányú, ugyanis a folyadékpotenciál-tér is hatással van a kőzetvázra a porúsnomás változásai révén (TERZAGHI 1923).

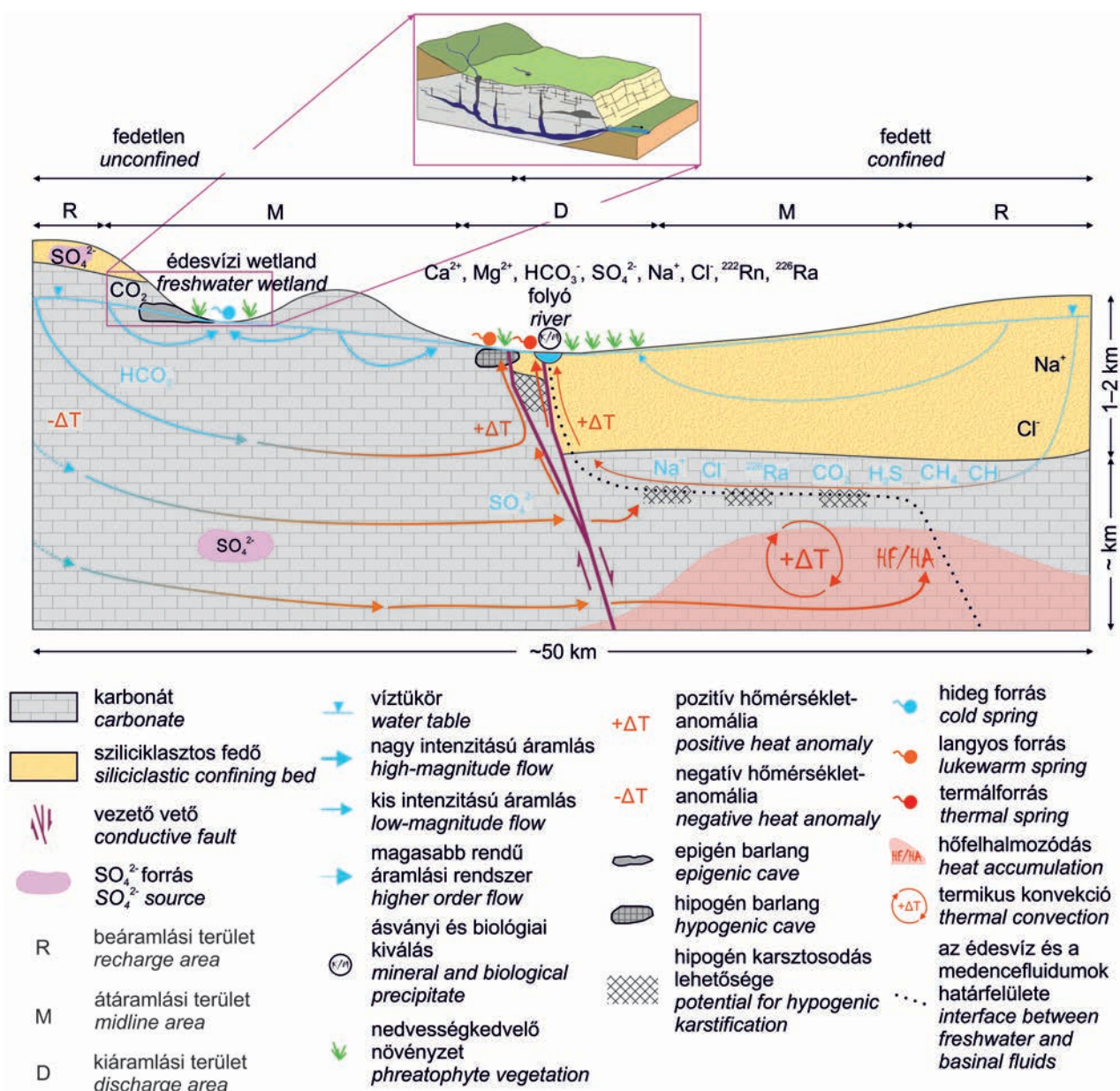
Míndezek alapján végül hét régiót különítettünk el a kutatási területeken belül, amelyek geológiai felépítésbeli eltéréseikre visszavezethetően különböző túlnyomás-lecsengési módokkal jellemezhetők. Így például a Derecskei-árok északi peremén az Algyői Vízfogó nagyfokú heterogenitást mutat a sűrű vetőhálózatnak köszönhetően, így a nyomáscsökkenés az egységen keresztül fokozatos, ezért a szénhidrogén-előfordulások az Algyői Vízfogó teljes vastagságintervállumból ismertek. Ezzel szemben az árok déli peremén jóval ritkább a vetőhálózat, így a nyomáscsökkenés lokalizáltan és ugrásszerűen történik az Algyői Vízfogót hátrántoló vetők mentén. Eközben a mátrix hatékonyan gátolja a nyomásdisszipációt (azaz a folyadékáramlást), azaz tartja fent a túlnyomást. Ennek eredményeként szénhidrogénmezők itt legsekélyebben az Algyői Vízfogó mélyebb zónáiból ismertek. Azaz ennél magasabb zónákba hidraulikai értelemben gátolt a migráció. A Battonyai-hát területe a hat másik régiótól jelentősen eltérő viszonyokat mutat a preneogén aljzat kiemelt helyzetének, valamint a neogén rétegek kis vastagságának és relatíve nagy permeabilitásának köszönhetően. Ezért túlnyomás itt csak a preneogén aljzatban, nagyjából 2000 m mélységtől jelentkezik. Ugyanakkor szénhidrogén-előfordulások a teljes neogén rétegsorból (és az aljzattól is) ismertek, a hidraulikus csapdázódás már említett zónájánál nagyobb mélységben.

Budai-termáلكarszt és Paleogén-medence

Háttér

A vastag karbonátos víztartó rendszerek, a bennük zajló vízáramlások és a kapcsolódó hipogén karsztosodási és kiválási folyamatok medencehidraulikai szemléletű kutatásának bevezetésében nemzetközi szinten is kezdeményező szerepet vállaltunk (GOLDSCHIEDER et al. 2010, MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). Ezért ennek háttérét bővebben ismertetjük. Ebben nagy szerepet játszott, hogy az 1950 és 1990 között zajló intenzív bányászati célú víztelenítés következményei felhívták a figyelmet a Dunántúli-középhegység triász karbonátjaiban fennálló regionális hidraulikus folytonosságra (MÁDLNÉ SZŐNYI 1997, ALFÖLDI & KAPOLYI 2007 stb). E régió belül a Budai-termáلكarszt (BTK) természetes „kutatólaboratórium” több mint húsz éve szolgál hidrogeológiai kutatásaink színteréül. Kezdetben a Barlangtani Intézet természetvédelmi, barlang- és forrásvédelmi szempontjai vezéreltek, majd a Shell Ltd. támogatásával a karbonátos rezervoár képződés recens analógiájaként elemeztük a területet. Ezek keretében elvégeztük a retrospektív kutatást, a vízáramláshoz köthető jelenségek és folyamatok vizsgálatát, a hipotézismodell megalkotását (ERŐSS et al. 2008; ERŐSS et al. 2012a,b; MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015; MÁDL-SZŐNYI et al. 2019) (7. ábra).

A medencehidraulikai értelmezés több lépésben és lépésekben zajlott, melyre egy interdiszciplináris OTKA-kutatás és a MOL Nyrt. támogatásával a Paleogén-medencét is



7. ábra. Vastag fedetlen (ill. részben fedett), és csatlakozó sziliciklasztos képződményekkel fedett karbonátos vízadó rendszer vízáramlási hipotézismoddelle - melyet a medencehidraulikai adatfeldolgozás alátámasztott -, a kapcsolódó jelenségekkel együtt (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015 után módosítva). A sekély karsztok lokális vízáramlási rendszerekként (GOLDSCHIEDER & DREW 2014 nyomán) illeszthetők be a medenceléptékű modellbe

Figure 7. Conceptual groundwater flow model, which was confirmed by the basinhydraulic data analysis, and its consequences of flow-related manifestations for the interface of confined and unconfined carbonates (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a modified after MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). The shallow karst aquifer (modified after GOLDSCHIEDER & DREW 2007) is embedded into the regional flow pattern as a local system

magában foglaló (4. ábra) kutatás teremtett alapot (ERHARDT et al. 2017, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). Ezek eredményeképpen került sor a hidraulikus folytonosság módszertani érvényesítésére és egyben bizonyítására, valamint a „valós vízáramlási rendszermodell” megalkotására (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Ezek alapozták meg a területre vonatkozó vízáramlási és transzport szimulációkat (HAVRIL et al. 2016, SZUJÁRTÓ et al. 2020), valamint a vízáramláshoz köthető jelenségek, elsődlegesen a megcsapolódási jelenségként értelmezett biogeokémiai kiválások további vizsgálatát (KOVÁCS-BODOR et al. 2018, 2019). A BTK-n végzett kutá-

tásaink így reprezentálják a medenceléptékű kutatások munkafolyamatának teljes ciklusát (3. ábra). Az alábbiakban ezekből a kutatásokból sokrétűségük folytán csak a medencehidraulikai eredményekre koncentrálnunk.

A vastag karbonátos víztartó rendszerek medencehidraulikai sajátosságai

Az eddigiekben bemutatott alföldi és kisalföldi kutatási területekhez képest a BTK és Paleogén-medence esetében jelentős különbség mutatkozik a topográfia, a fejlődéstörténet és a hidrosztratigráfiai felépítés komplexitását tekintve

is. Egyrészt az eddigi síkvidéki kutatási területekhez képest a domborzat itt változatos, magában foglalja többek között a Budai-hegységet (max. 559 mBf), a Gödöllői-dombságot (max. 344 mBf) és a Pesti-síkságot (95–120 mBf) is. A másik különbség, hogy míg az eddigi példákban egy medence süllyedéstörténetével, addig itt a süllyedés mellett a hegység és dombságok kiemelkedésével is számolni kell. Végeterül a hidrosztratigráfiai felépítés is eltérő, hiszen a sziliciklasztos medencékben a pannóniai vízfogók hidraulikai szerepe volt meghatározó, míg itt a kutatás elsődlegesen a pretercier karbonátos képződmények vízármlási rendszerére irányult. A földtani felépítés változatosságát jelzi, hogy ezek a karbonátok a BTK területén részben fedetlen helyzetben találhatók, míg a Paleogén-medencében – annak pretercier aljzatát képezve – akár 2000 m vastag, uralkodóan sziliciklasztos fedő alatt találhatók. E kutatás során módszertant dolgoztunk ki arra vonatkozóan, hogy az egyedi képződményekre levezetett hidrosztratigráfiai tagolásból a medenceléptékű feldolgozáshoz azok összevonásával csoportokat (Hidrosztratigráfiai Csoport – HCS) vezessünk le (MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, GARAMHEGYI et al. 2020). A képződmények közül a pretercier karbonátok alkotta HCS1 Vízvezető (VV) jellemezhető a legnagyobb hidraulikus vezetőképesseggel, míg a fedőképződmények közt az oligocén sziliciklasztos (Tardi és Kiscelli Agyag dominálta) HCS3 Vízfogó (VF) képviseli a legalacsonyabb vízvezető-képességi értékeket. Így ennek a hidraulikai szerepe a leghangsúlyosabb a medenceléptékű vízármlási rendszerek mintázatában. Ugyanakkor a korábbi példák esetén hangsúlyos pannóniai és fiatalabb képződmények itt egy csoportba (HCS5 Vízvezető-Vízfogó (VV-VF)) kerültek.

A medencehidraulikai kutatás során a főnti eltérések miatt módszertani fejlesztésekre is szükség volt, mivel az eredetileg sziliciklasztos medencékre lett kidolgozva. Ennek következtében a BTK és Paleogén-medence területén folytatott adatfeldolgozás egyik legfőbb eredménye, hogy bizonyította a medencehidraulikai módszerek alkalmazhatóságát vastag karbonátos víztartó rendszerek környezetében is (ERHARDT et al. 2017, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

A BTK vízármlási rendszerei és felszín alatti határa

A kutatás eredményeként kimutattuk, hogy a gravitációs hajtóerő, azaz a vízszintkülönbségek mozgatják döntően a vizeket –500 mBf elevációs szintig. Meghatároztuk a vízármlások vertikális komponenseit, melyek az áramlások hierarchizáltságát (lokális/intermedier/regionális áramlások) előidézik, és lehatároltuk a különböző rendű áramlási rendszerek utánpótlódási területeit a Pilis, a Budai-hegység és a Gödöllői-dombság területén (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Az ezekhez tartozó megcsapolódási területek kijelölésénél a medencehidraulikai értelmezést a források hierarchikus klaszterezéséből levezetett lokális, intermedier és regionális áramlásokhoz köthető jellegével is kiegészítettük (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019). A BTK fő megcsapolódási területe 0 mBf eleváció szintig Visegrádtól

a Duna völgyében húzódik, majd a Csepel-sziget északi csúcsától déli irányban kiszélesedik. A 0 mBf elevációs szint alatt keleti-délkeleti irányú átáramlás figyelhető meg a Duna alatt (ERHARDT et al. 2017, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). Mindezek alapján javaslatot tettünk a BTK felszín alatti vízgyűjtőjének hidraulikai lehatárolására, ami vízminőségi és vízkészlet gazdálkodási szempontból is meghatározó jelentőségű (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

Hidraulikus folytonosság és elkülönülés a BTK és a Paleogén-medence vízármlási rendszerén belül

A 500 mBf eleváció alatt a domborzat hatása már nem észlelhető, a folyadékpotenciál-eloszlás hidrosztatikushoz közeli viszonyokat tükröz, azaz az átáramlás dominanciáját. Mindez egybevágg azzal, hogy az áramlási rendszer elsődlegesen utánpótlásvezérelt (HAITJEMA & MITCHELL-BRUKER 2005, HAVRIL et al. 2016). A víztükördomborzat hatásának kisebb mértékű érvényesülése a karbonátos víztartóknak a sziliciklasztos kőzetekkel összevetve nagyobb hidraulikus diffuzivitásával (a pórusnyomás-változás terjedését leíró formációtulajdonság) magyarázható, ami a hidraulikus kapcsolatok erősödését és így a potenciálkülönbségek kiegyenlítődsét okozza (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). Ebből adódóan a vízszintdomborzat kevésbé követi a térfelszín lokális változékonyságát, sokkal inkább regionális lejtése meghatározó, míg az áramlási rendszerek kevésbé hierarchizáltak, és az áramtérben az átáramlás domináns. A nagyobb hidraulikus diffuzivitás további következménye, hogy mivel a hidraulikai kapcsolat vagy összefüggés (azaz folytonosság) a karbonátos víztartókban jóval hatékonyabb, így ezen a folytonos téren belül a torlasztó vetők és a regionális vízfogó képződmények (HCS3 VF) hatékony hidraulikai elkülönülést tudnak okozni. Ezt az ekvipotenciálok besűrűsödése, valamint a vízkémiai és hőmérsékleti különbségek is jelzik (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019; MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). A legmarkánsabb vízfogó, a HCS3 VF regionális hidraulikai szerepét tekintve eltérő hatású a vastagsága függvényében. A budai oldalon, ahol kisebb vastagságú a vízfogó (200-400 m) vagy hiányzik, a hidraulikai kapcsolat a fekü (HCS1-2) víztartóval intenzívebb, ami a (felső sziliciklasztos és karbonátos HCS4-5) víztartók potenciálértékeinek regionális kiegyenlítődsében jelentkezik. Ahol azonban nagy vastagságban van jelen a vízfogó, ott nagyobb potenciálkülönbség tud fennmaradni a fedő és fekü vízadók közt, így például a Gödöllői-dombság területén (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

Potenciálanomáliák az áramlási térben

A 1000 mBf eleváció alatti tartományban továbbra is az átáramlás dominál, mégis jelentős változások figyelhetők meg a potenciáeloszlásban. Az átáramlás oka, a beszivárgásvezérelt rendszerben kialakult regionális vízszintkülönbségekből adódik. A potenciáeloszlásban tapasztalt anomáliák az eddigi alföldi példák mélységi túlnyomásával szemben a Paleogén-medence fedett pretercier karbonátjaiban és paleogén vízvezetőiben (HCS1-2 VV) jellemzően inkább alulnyomásként jelentkeznek (1–2 MPa nyomásdefi-

cit) (8. ábra) (MÁDL-SZŐNYI et al. 2015, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019). Ez egyrészt leáramlást generál a fedőből a fekü HCS1-2 víztartókba, amit ebben a mélységben a vízszintkülönbségek már nem indokolnak (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Másrészt a sekélyebb szintekben a BTK kiemelt területei felől érkező, Pest alatt megforduló és a Duna felé irányuló horizontális (át)áramlási komponens a mélyebb szintekben a BTK felől a Paleogén-medence felé irányul az ott jelentkező nyomásdeficit miatt. Az oligocén HCS3 Vízfogón keresztüli leszivárgás további következménye, illetve indirekt bizonyítéka a hidrosztratigráfiai csoporton belül ismert anyagokzetekből (Tardi Agyag) a szénhidrogén lefelé történő migrációja és a feküképződményekben való felhalmozódása. Az alulnyomás előidézésében feltehetően több jelenség, ill. folyamat együttes hatása játszhat szerepet (MÁDL-SZŐNYI et al. 2015, MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Így a HCS3 Vízfogó (200–1000 m vastagságú) jelenléte geológiai időskálán vertikális, míg a Tóalmás-vonal és a Szada-vető hidraulikai zárása kelet-délkeleti irányban laterális utánpótlódási hiányt okozhat a HCS1-2 víztartókban. Szintén szerepe lehet az alulnyomás kialakulásában a Gödöllői-dombság 4 millió éve megkezdődött kiemelkedésének és az ezzel együtt járó erózióknak, ami megbontva a pórusnyomás és a hatékony feszültség egyensúlyát eróziós dekompakciót idézhetett elő (MÁDL-SZŐNYI et al. 2015). De elméleti modellezéseinkben kimutattuk, hogy a gravitációs hajtóerő és kényszerkonvekció mellett jelen lévő hőmérséklet-különbség és a sótartalom-különbség (ld. később) hatására fellépő szabad konvekció is felelőssé tehető hasonló mértékű potenciálanomáliák kialakításáért az áramlási térben (GALSA et al. 2019, SZIJÁRTÓ et al. 2019a).

Hőmérsékleti és vízkémiai jellemzők medencehidraulikai értékelése

A medencehidraulikai értelmezést a hőmérsékleti és vízkémiai (TDS, Cl) adatfeldolgozás eredményei is megerősítették. Az oldottanyag-tartalom eloszlásában is tükröződik a domborzat, a hidrosztratigráfia, a szerkezetek és ebből következően a hidraulikai kapcsolatok áramlási képre gyakorolt hatása (MÁDL-SZŐNYI et al. 2019, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Így például a Tóalmás-vonaltól DK-re a fedett karbonátos víztartókban drasztikusan megnövekedett oldottanyag-tartalom alátámasztja a szerkezeti vonal hidraulikai vízrekesztő szerepét. A BTK szempontjából kiemelkedő jelentőségű eredmény, hogy sikerült térben és a hidraulikához köthetően elkülöníteni a „karsztvíz” és a korábban feltételezett „medencefluidum” (ALFÖLDI 1979) jelenlétét a rendszerben (ERŐSS et al. 2011, 2012a, b; POROS et al. 2010, 2012; MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015; MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018). Továbbá a medencehidraulikai feldolgozás alapján a karsztvízkomponens mellett egy „hidrotermális” komponens jelenlétét is ki tudtuk mutatni (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a).

A budai oldalon a (1) karsztkomponens (TDS < 1000 mg/l; Cl < 30 mg/l) meteorikus eredetű, és a Budapesttől nyugatra fekvő és hidraulikailag is kimutatott utánpótlódási területeken jut a felszín alá, majd helyi és intermedier áram-

lások révén jut a felszínre a Duna vonalában. A (2) medencekomponens a karbonátos víztartót fedő oligocén (HCS3 VF) és főként az alsó- és középső-miocén (HCS4 VV-VF) képződmények tengeri eredetű, átalakult (NaCl-os) pórusfolyadékából származtatható. Ez a budai oldalon az utánpótlódási területek leáramlásai, a Paleogén-medencében pedig az alulnyomás generálta leáramlás révén jut a karbonátos víztartóba (HCS1 VV). A (3) hidrotermális komponens a budai oldal regionális beszivárgási területein jut a felszín alá, eredetét tekintve ez is meteorikus karsztvíz, behatolása a mélység irányában, a Duna és a pesti oldal alatt „édesvíz” front formájában kelet felé nyomozható. A hosszú felszín alatti tartózkodási ideje és a víz-kőzet kölcsönhatás miatt átalakuláson esik át, majd a megcsapolódás során medencekomponens is hozzákeveredik.

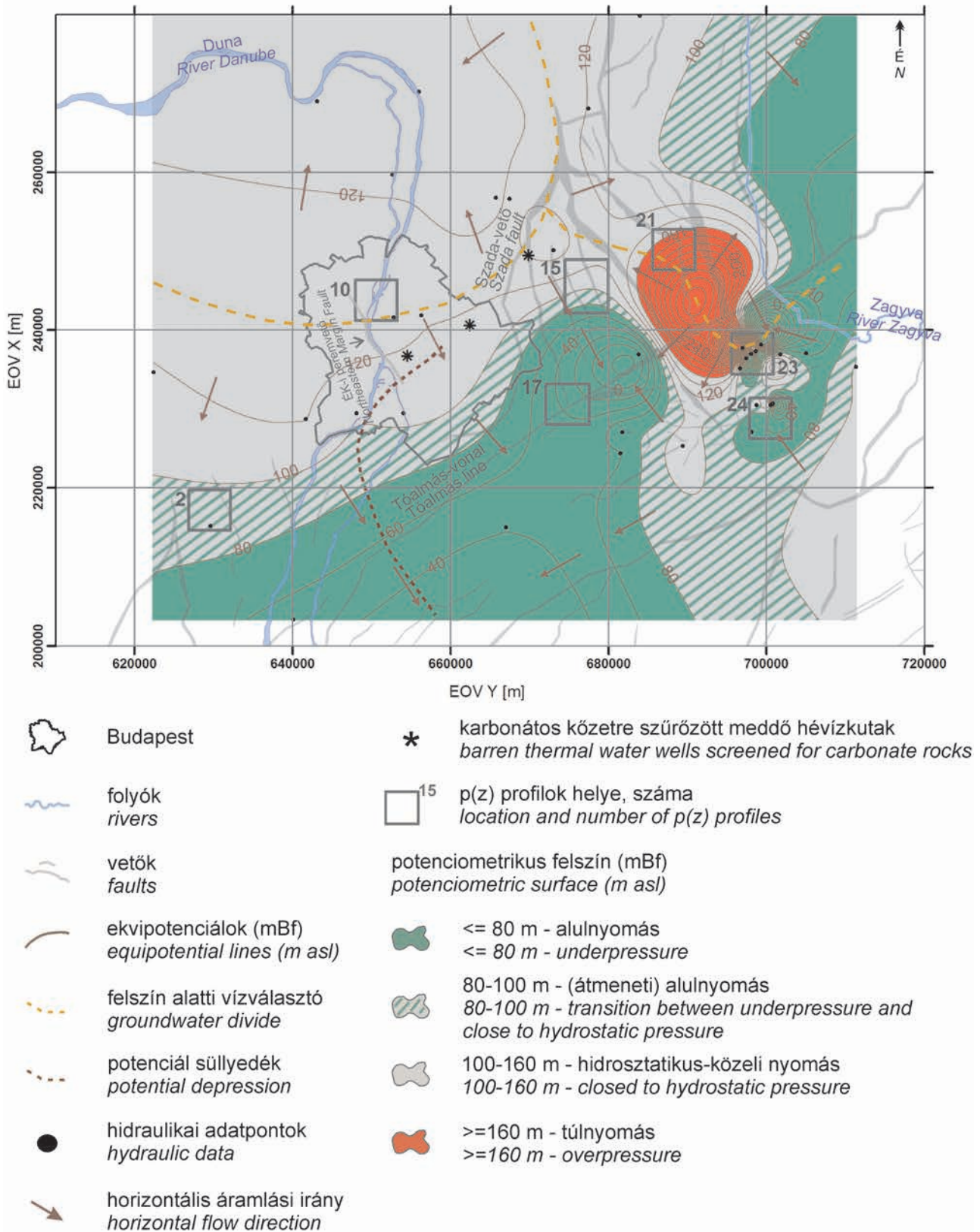
Aszimmetrikus áramlási kép

A vízáramlási pályák aszimmetrikus jellege, azaz a nyugatról érkező Duna alatti átáramlás, majd a nyugat felé történő visszatérülés a BTK-ra vonatkozó korábbi – tisztán hipotézisen alapuló – koncepcionális modellek mindegyikében megjelent (SCHAFARZIK 1928, VENDEL & KISHÁZI 1964, KOVÁCS & MÜLLER 1980, ALFÖLDI 1981 stb.). E kérdést ismét felvetve a jelenséget medencehidraulikai feldolgozással és medenceléptékű numerikus modellezéssel (ekvivalens porózus közeg megközelítéssel) is sikerült kimutatnunk (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015). E tanulmányban tisztáztuk a jelenség hidrosztratigráfiai okát, melynek következménye a budai és pesti oldal közti hajtóerő és beszivárgás különbség (7. ábra). Az előzőekben hivatkozott koncepcionális modellek a sziliciklasztos fedőrétegeket ab ovo impermeabilisként kezelték, ezért nem számoltak medencefluidum hozzájárulásával sem. Ebben az értelemben mind a medencehidraulikai feldolgozás, mind pedig a medenceléptékű modellezés új eredményeket hozott.

Végül a mért adatok medencehidraulikai és kapcsolódó vízkémiai értelmezése az aszimmetrikus áramlási képet a budapesti központi megcsapolódási rendszer (Rózsadomb előtere) hidrotermális vízkomponensére vonatkozóan igazolta (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018, MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Az aszimmetrikus áramkép kérdését azóta általánosságban is kiterjesztettük, és elemeztük kialakulását különböző medencealakulatok és hidrosztratigráfiai adottságok mellett (TÓTH et al. 2020).

Következmények

Módszertani szempontból a medenceléptékű adatfeldolgozás és numerikus modellezés közös eredménye tehát, hogy keretbe helyezte a BTK kútjaiban és forrásaiban felszínre jutó vizek ismert különbözőségét (ld. 3. ábra, „recens jelenségek értelmezése”). Erre építve tágabb összefüggésben tudtuk értelmezni nemcsak a Budapestnél megcsapolódó vizek fenti-ekben leírt lehetséges eredetét (az utánpótlódási területeket és áramlási rendszereket figyelembe véve), valamint azok hőmérsékleti, kémiai és izotópposztételében megnyilvánuló különbözőségét, hanem a mindezek következményeként értelmezhető biogeokémiai és ásványkiválásokat, valamint poro-



8. ábra. Anomáliák (alul- és túlnyomás) és normál nyomásrezsimek a potenciáltérben a $z < -1000$ mBf szintben a HCS1-2 Vízvezetőre szűrözött kutak potenciáladatai alapján (MADLNÉ SZÓNYI 2019)

Figure 8. Anomalies (under- and overpressure) and normal pressure regimes in the fluid-potential field below 1000 m asl based on the hydraulic data of wells screened for the HCS1-2 Aquifer (MADLNÉ SZÓNYI 2019)

zításfejlődési folyamatokat, így a jelenleg is zajló hipogén karsztosodási folyamatokat (pl. ERŐSS et al. 2011, 2012a, b; ÖTVÖS et al. 2017; KOVÁCS-BODOR et al. 2018, 2019).

A medencehidraulikai értelmezés kapcsán végzett hőmérsékleti adatfeldolgozás szerint a hőmérséklet-eloszlás a HCS3 Vízfógó hőfelhalmozó hatását tükrözi, míg a szilicikus fedő- és a karbonátos feképződményekre jellemző gradiensek egy függély mentén is számottevő eltérése különböző hőtranszport folyamatokra utal (MÁDLNÉ SZŐNYI 2019a). Így ezek az eredmények további medenceléptékű transzportmodellezéseket inspiráltak. Az áramlási és transzportmodellezések kimutatták, hogy a domborzatilag vezérelt áramlások mellett a késő-miocéntól máig egyre csökkenő mértékben, de a termikus hajtóerő befolyásával is kell számolni (HAVRIL et al. 2016). Mi több, a jelenlegi állapotra vonatkozó tranzienst áramlási és hőtranszport-modellezés erre vonatkozó kvantitatív eredményekkel is szolgált (SZIJÁRTÓ et al. 2019b). Ezek a medenceléptékű modellezések a valós vízáramlási rendszermodellből indulnak ki, és validálásuk is a medencehidraulikai és hőmérsékleti adatfeldolgozáson alapul (3. ábra).

Bakony, Balaton-felvidék, Tihanyi-félsziget

A Dunántúli-középhegységen belül a Bakony és a Balaton-felvidék, valamint a Tihanyi-félsziget (4. ábra) vízáramlási rendszereinek kutatása az utóbbi tíz évben került érdeklődésünk középpontjába. Itt olyan alapvető kérdések merültek fel, mint a Bakony–Balaton-felvidék rendszer és a Balaton lehetséges összefüggései, a források hierarchizáltsága és annak vízáramlási oka, továbbá a tihanyi tavak és a felszín alatti vízáramlások kapcsolata. A vastag karbonátos víztartókra kidolgozott hipotézismodellünk az itteni kutatásokhoz is jó kiindulási alapot szolgáltatott (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015) (7. ábra)

Hidraulikus folytonosság és a források hidraulikai jelentősége

A Bakony és a Balaton-felvidék hidrogeológiailag egy komplex, fedetlen, karbonátos vízáadó rendszerként kezelhető (TÓTH & MÁDL-SZŐNYI 2016). A rendszer hidraulikus folytonosságát és az utánpótlás által vezérelt regionális vízszintkülönbségek okozta vízáramlási rendszerek működését hidraulikai adatok medenceléptékű elemzésével TÓTH (2018) bizonyította. Az itt elvégzett medencehidraulikai feldolgozás módszertani újszerűségét nemcsak a karbonátos rendszerre való alkalmazás, hanem a kisszámú kútadat mellett a források adatainak (az összes hidraulikai adat 57%-a) a hidraulikai értékelésbe történő bevonása is jelentette. Mivel a források az áramlási rendszerek végpontjait tükrözik (TÓTH 2009b) (2. ábra), így a felszínalatti víztükör természetes megnyilvánulásainak tekinthetők, és fakadási szintjük megfeleltethető a hidraulikus emelkedési magasságnak (TÓTH 2018).

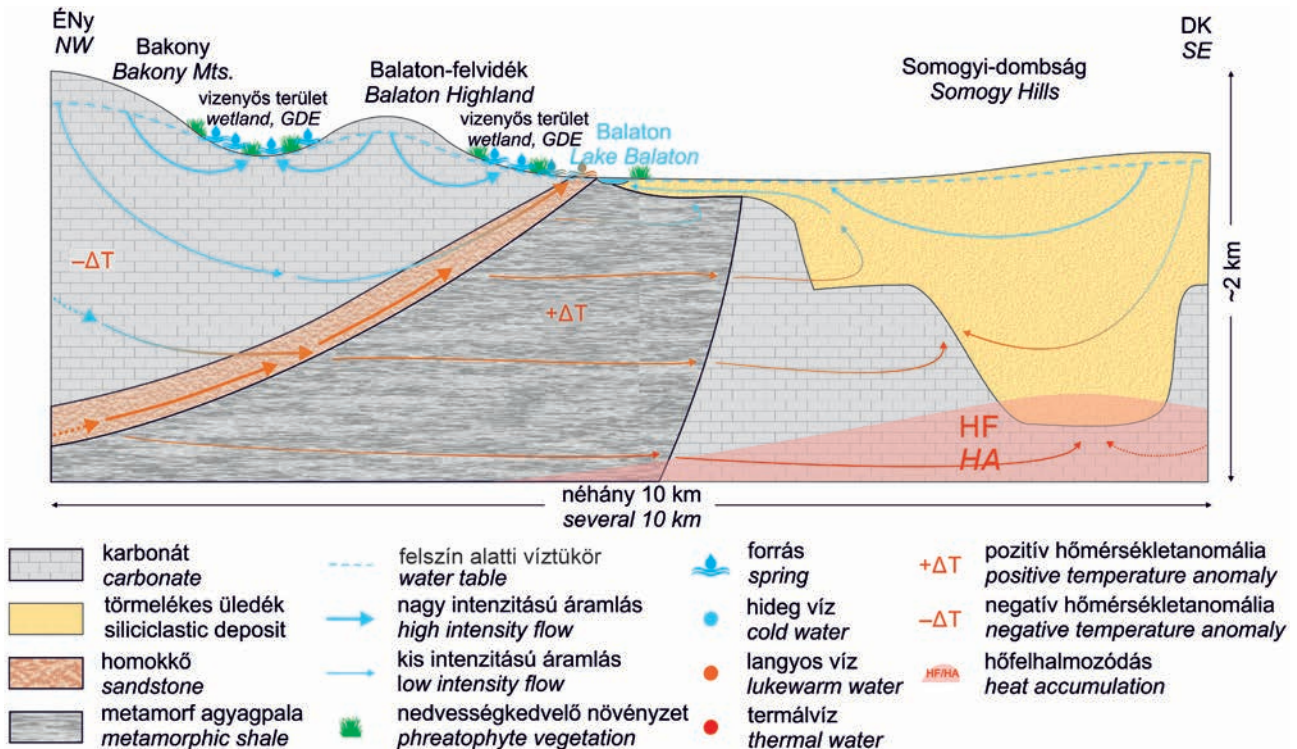
Vízáramlási rendszerek

A területen elvégzett medencehidraulikai, vízkémiai és hőmérsékleti adatelemzés kimutatta, hogy az utánpótlásvezérelt, gravitációs felszín alatti vízáramlások itt is közel hid-

rosztatikus nyomásviszonyokat idéznek elő. Ennek hatására az áramló vizek a Bakony beáramlási területeitől ÉNy és DK felé az alacsonyabb térszínnek irányába tartanak. Hierarchizált áramlások 150–200 mBf szintig fordulnak elő, ennél nagyobb mélységben a horizontális áramlások dominanciája mutatható ki. A Bakony és a Balaton-felvidék között kétirányú a hidraulikai kapcsolat: felszínközépen (>250 mBf) a Balaton-felvidék felől szivárog víz a Bakony felé, ennél nagyobb mélységben viszont ellentétes irányban, a Balaton felé zajlik a vízmozgás. Továbbá sikerült bizonyítani, hogy a Bakony és Balaton-felvidék felszín alatti vizei is megcsapódnak a Balaton északi partja mentén és a Balatonban. Emellett a térség felszíni vízfolyásai is szállítanak felszín alatti eredetű vizet, így összességében közel 25%-ban járulnak hozzá a felszín alatti vizek a tó vízkészletéhez (TÓTH 2018, TÓTH et al. 2020). A mélyebb regionális áramlások a Balaton medencéje alatt továbbhaladnak déli irányba. Ott a Somogyi-dombságból érkező felszín alatti vízáramlásokkal találkozva a két oldal közti hajtóerő-különbség eredményeként itt is aszimmetrikus áramkép alakul ki (TÓTH & MÁDL-SZŐNYI 2019). A medencehidraulikai feldolgozás alapján megismert valós vízáramlási rendszermodell (3. ábra) két, a Bakonyt és Balaton-felvidéket harántoló, ÉNy–DK csapású szelvény mentén végzett numerikus áramlásszimuláció és a kapcsolódó felszíni jelenségek értelmezése révén validáltuk (TÓTH 2018). A hidraulikai, hőmérsékleti és vízkémiai adatelemzés, valamint áramlási és hőtranszport-modellezés (ekvivalens porózus közeg megközelítéssel) eredményeként egy új, a Bakony–Balaton-felvidék–Balaton rendszerre vonatkozó, felszín alatti vízáramlási modellt sikerült megalkotni (9. ábra) (TÓTH & MÁDL-SZŐNYI 2019, TÓTH et al. 2020).

A Tihanyi-félsziget és a tavak hidraulikai helyzete

Érdemes kiemelni a vizsgálati területen belül a Tihanyi-félszigetet, amelynek felszín alatti vízáramlási rendszereit részletesen tanulmányoztuk (TÓTH et al. 2016). Itt a kútadatok és a források szinte teljes hiányában felszíni elektromágneses geofizikai mérések és a tavak körül létesített potenciométerek alapján határoztuk meg a 3D numerikus áramlásszimulációhoz szükséges hidrosztratigráfiai felépítést, geometriát és peremfeltételeket. A numerikus szimuláció alapján levezetett 3D áramképet a felszín alatti vízáramlások által előidézett felszíni jelenségek előfordulása segítségével (3. ábra) validáltuk. A Tihanyi-félszigeten kialakult áramlási rendszerek a Bakony és Balaton-felvidék felől érkező megcsapoló-átáramló felszín alatti vízáramlásba fészkelődnek, és hidraulikusan alátámasztott helyzetben vannak nagyjából –200 mBf eleváció szint fölött (TÓTH 2018). Az áramképet tekintve a félsziget topográfiai magassalatai lokális és intermedier áramlások utánpótlódási területeiként szolgálnak, míg a fő megcsapoló a Balaton, a tihanyi „tavak” (Külső- és Belső-tó, Rátai-csáva) pedig vízszintjüktől függő hidraulikai kapcsolatban állnak egymással, de rátáplálnak a Balatonra is. Ezáltal bizonyítottuk, hogy a tihanyi vizes élőhelyek felszín alatti víztől függő ökoszisztémák (FAVÖKO-k) (TÓTH et al. 2016), amelyek hidraulikai helyzetüktől függően eltérő mértékben érzéke-



9. ábra. A Bakony-Balaton-felvidék-Balaton rendszer felszín alatti vízáramlásainak, valamint a kapcsolódó folyamatoknak és jelenségeknek elvi vázlata (TÓTH & MÁDL-SZÓNYI 2019)

Figure 9. Generalized model of the groundwater flow systems and the related processes and phenomena in the Bakony-Balaton Highland - Lake Balaton system (TÓTH & MÁDL-SZÓNYI 2019)

nyek a klímaváltozás (csapadék, hőmérséklet, evapotranszspiráció) hatásaira (HAVRIL et al. 2018).

Dráva-medence, Mecsek és Villányi-hegység

Gravitációs és túlnyomásos rendszerek

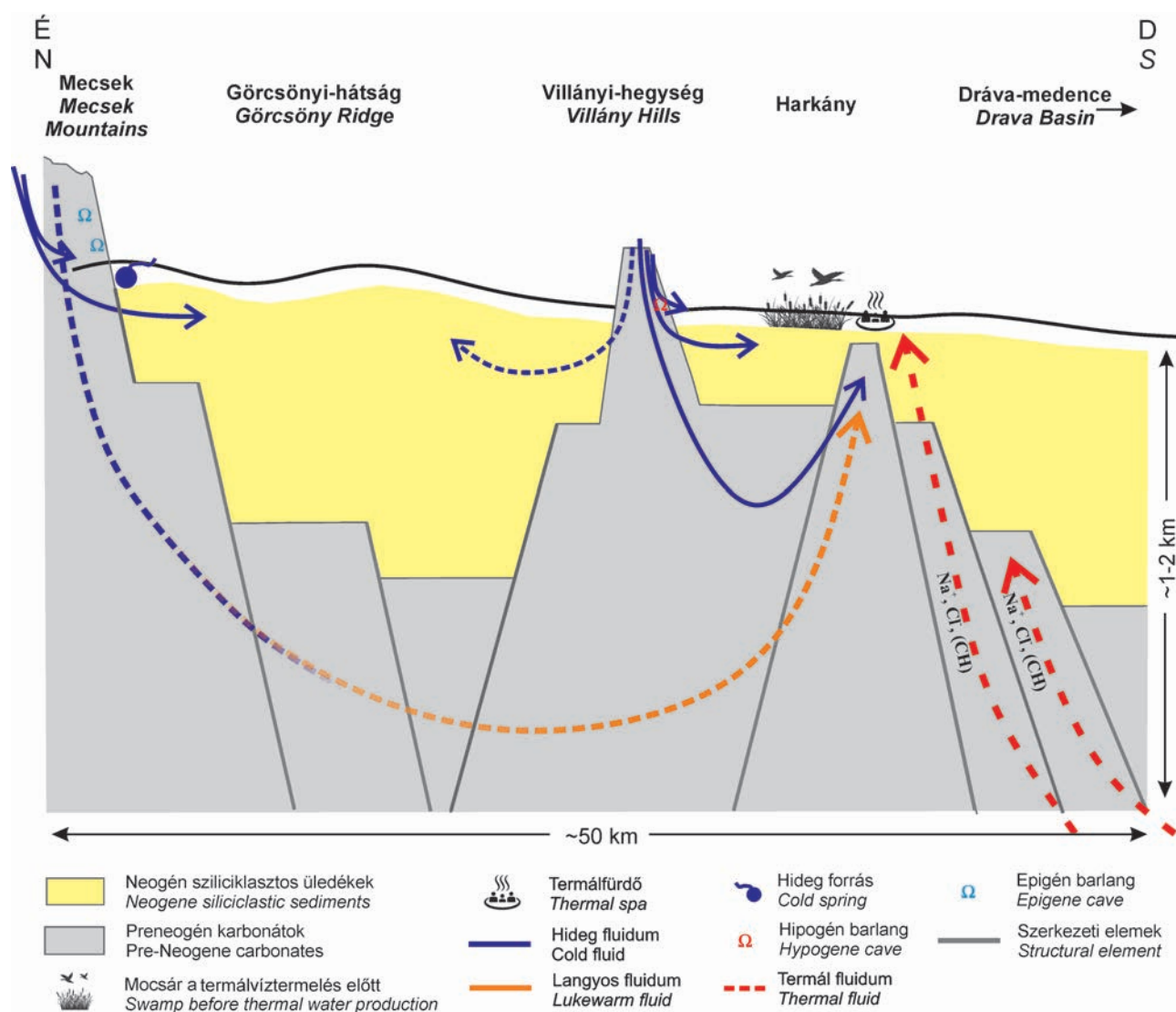
A Dráva-medence magyarországi részének medencehidraulikai kutatása a Magyar Horizont Energia Kft. megbízásából kezdődött. Ezt egy PD OTKA kutatás keretében kiterjesztettük egészen a Mecsekig és a Villányi-hegységig (4. ábra). A fő kérdés ismét a pannóniai képződmények regionális hidraulikai viselkedése volt. Ugyanakkor lokális jelenségeket is értelmeztünk a regionális áramlási képbe helyezve a Villányi-hegység déli előterében. Ez a terület a fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerek peremterületeinek újabb példájaként szolgált (CSONDOR et al. 2020).

A medencehidraulikai értelmezés eredményeként a felszíntől –500 mBf elevációs szintig vízszintkülönbségek által vezérelt gravitációs áramlási rendszereket tudtunk kimutatni. A –500 – (–1000) mBf elevációintervallumban már a laterális áramlások dominálnak gyenge feláramló vertikális komponenssel. Ezek a hegy- és dombvidékektől a Dráva és Duna irányába zajló dél-délkeleti áramlásirányt, valamint továbbra is a gravitációs hajtóerőt reprezentálják. A –1500 – (–2000) mBf elevációintervallumban kimutatott átmeneti zóna alatt azonban már a korábban vizsgált medencékhez hasonlóan (a Paleogén-medence kivételével) egy túlnyomá-

sos tartomány (maximum 66% túlnyomás) jelentkezik a Dráva-medence (magyarországi részének) északnyugati felében. Ezen belül a feláramlás dominál a vertikális áramlási komponens tekintetében. A laterális áramlások a mélyebb medencerészekről azok peremei felé mutatnak, jellemzően északkeleti és keleti irányba. A túlnyomás lecsengésében itt is meghatározónak bizonyult az Algyői Vízfogó szerepe. Az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságát tekintve lehatároltunk egy szénhidrogének hidraulikai csapdázódására alkalmas területet és elevációintervallumot a Dráva-medence északnyugati részén. Ez képezi a szénhidrogének vertikális migrációjának felső hidraulikai határát, amit a területen ismert szénhidrogén-előfordulások helyzete is alátámaszt.

Vízáramlási komponensek

A Dráva-medence délkeleti feléből hidraulikai adat csak a felszíntől –200 mBf elevációs szintig állt rendelkezésre, így az ennél mélyebb áramlási tartományról csak analógia alapján tudtunk következtetéseket levonni. A medence északnyugati és délkeleti fele közt nincs jelentős (víz) földtani eltérés a rétegsort és a fejlődéstörténetet tekintve. Így a mélységi túlnyomásos tartomány jelenléte a délkeleti részben is valószínűsíthető. Ezt támasztja alá, hogy a feltételezett mélységi túlnyomás hatására a medence központi részeitől a peremei felé tartó „medenceeredetű” – fluidumok hatásai a Villányi-hegység déli előteréből, különösen Harkány térségéből ismert hidraulikai, vízkémiai és barlangképződési jelenségekben is kimutathatók (10. ábra). Ezek alapján a



10. ábra. A felszín alatti vízáramlások, valamint a kapcsolódó folyamatok és jelenségek elvi vázlatja Harkány térségében (CSONDOR et al. 2020 után módosítva)
Figure 10. Generalized flow field model of the Harkány area with the related processes and phenomena (after CSONDOR et al. 2020)

Villányi-hegység déli előterének kiáramlási területein megcsapolódó felszín alatti vizeknek van egy meteorikus eredetű „karsztvíz” komponense, amelynek utánpótlódási területeit a Villányi-hegység fedetlen pretercier karbonátjai képezik. Ugyanakkor a medencehidraulikai értelmezés alapján Harkánynál a Mecsek felől érkező regionális áramlások „hidrotermális” fluidumjainak megcsapolódása is valószínűsíthető. Ezek mellett Harkánynál feltételezhető a „medencekomponens” is. Ez megmutatkozik a termásvíz kémiai összetételében (Ca-Na, HCO₃-Cl-SO₄-fácies magas klorid és nátrium tartalommal), ami átmenetet képez a karsztvizek Ca-Mg, HCO₃ és a Dráva-medence északnyugati részéből kimutatható Na-K, Cl-SO₄-HCO₃-fáciesű „medencekomponens” közt. Továbbá egy kimutatott pozitív hidraulikai (folyadékpotenciál) anomália intenzív vető menti feláramlásra utal. Ezen jelenségek kialakulása éppen Harkánynál feltehetően azzal is magyarázható, hogy a Villányi-hegység déli előterén belül ez a terület van legközelebb a Dráva-

medence pereméhez. Mindezek alapján Harkány térségében is számolhatunk a fedett és fedetlen karbonátos peremterületekre a BTK-analógia alapján (MÁDLNÉ SZŐNYI et al. 2018) azonosított fluidumkomponensekkel. Azonban a karsztvíz és medenceeredetű fluidum keveredési zónájának kiterjesztése Harkánytól keletre, tehát a teljes Villány-előterre a recens vízkémiai és hőmérsékleti adatok alapján nem indokolható.

Barlangképződési következmények

A medencehidraulikai eredményeket itt is felhasználtuk a vízáramlási jelenségek értelmezésére (3. ábra). Földtani időskálán vizsgálva a barlangképződési jelenségek arra utalnak, hogy a fejlődéstörténet korábbi szakaszaiban intenzívebb lehetett a medenceeredetű feláramlás, ami az északról érkező karsztvízzel együtt generált keveredési korrózió révén hipogén barlangok kialakulását eredményezte. Ezek a barlangok magasabb rendű áramlási rendszerek kiáramlási

területeire jellemzőek (KLIMCHOUK 2007) ott, ahol a fedettség és medencekomponens hatásával is számolni lehet (MÁDL-SZŐNYI & TÓTH 2015) (7. ábra). Azonban a Villányi-hegység déli előterében a hipogén barlangok ma már átáramlási területeken, fedetlen és sekély helyzetű fedett karbonátokban találhatóak, gyakran a talajvíztükör szintje felett. Mindezek, valamint a recens vízkémiai és hőmérsékleti adatok szerint Harkánytól keletre már nem azonosítható fluidumkeveredési zóna. Ennek alapján e hipogén barlangok képződése nem köthető a jelen áramlási rendszerekhez, hanem a medencefejlődés valamely korábbi szakaszához, amikor a gravitációs vízármlások intenzitása kisebb, a medenceeredetű áramlásoké pedig nagyobb mértékű volt a mainál. Később a gravitációs áramlások dominanciája a Mecsek és Villányi-hegység kiemelkedésével és a pretercier karbonátok – mint utánpótlódási területek – exhumálódásával megerősödhetett. Így a medenceeredetű áramlások viszább szorulásával a hipogén barlangképződés egyelőre befejeződött. Ezt a folyamatot a Beremendi-kristálybarlang esetén ERŐSS et al. (2020) vízkémiai és izotóp ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) mérésekkel, valamint numerikus áramlás- és hőtranszportmodellezéssel is alátámasztotta. Érdemes megjegyezni, hogy az analógiaként kezelhető BTK területén – ahol ráadásul a részleges fedettség a budai oldalon is fennáll – ma is aktívak a hipogén barlangképződési folyamatok. Így bár a medenceeredetű feláramlás itt is erősebb lehetett a fejlődéstörténet korábbi szakaszaiban (POROS et al. 2012), de még most is intenzívebb, mint a recens Villányi-hegység–Drávamedence rendszerben.

Összegzés és kitekintés

Az ELTE-n folyó medencehidraulikai kutatások az utóbbi két évtizedben beépültek a hazai földtani kutatásba. Munkánk során az 1950-es évektől kezdődő hazai empirikus medencehidraulikai kutatások eredményeiből indultunk ki, majd építettünk a nemzetközi tapasztalatokra, és az ún. „Tóthiskola” hazai képviselőjévé váltunk. Működésünk során a medencehidraulikai alapelveket alkalmaztuk, de egyúttal elméleti és módszertani értelemben tovább is fejlesztettük a kezdeti eljárásokat. Kutatási tevékenységünket a Pannon-medencében folytatva és közben nemzetközi kapcsolatokat építve, a hazai területekre vonatkozó eredmények a publikációink révén szervesen beépültek a nemzetközi szakmai ismeretanyagba, ezzel is öregbítve a hazai földtan nemzetközi hírnevét.

A bemutatott eredmények alapkutatási jelentőségén túl többször is utaltunk gyakorlati alkalmazhatóságukra, melyet fontos kiemelni. A kezdeti empirikus magyarországi medencehidraulikai értelmezéseket követően az utóbbi évtizedek nagy, medenceléptékű modellezései már építettek ezekre az eredményekre és számos gyakorlati kérdés és megoldás alapjául szolgáltak a vízbázisvédelemtől a geotermikus energia hasznosításáig (TÓTH et al. 2016, SZŐCS et al. 2018 stb.). Megállapítható, hogy a legtöbb hazai és régiós kutatás gyakorlati indítékú regionális munka, melyben alap-

kutatási kérdések is felmerülnek, de céljuk többnyire gyakorlati feladatok hatékony megoldása. Ezekhez alap-, ill. felfedező medencekutatással járul hozzá az ELTE. A kutatások szisztematikusan fejlesztett megközelítésen alapulnak, a természetes vízármlási rendszerek megértése, hipotézis-alkotás, következetes medencehidraulikai feldolgozás, valós vízármlási rendszermodell” kialakítása, az áramlások által előidézett jelenségek és a numerikus modellezés szerves egységét kialakítva (3. ábra). Azaz munkánk során egyrészt a medencehidraulikai módszertan fejlesztése zajlik, másrészt olyan elméleti kérdéseket elemzünk, mint a különböző fluidum hajtóerők és azok kölcsönhatásai. De célzott figyelmet kapnak a fluidum-közet kölcsönhatás révén kialakult jelenségek, melyek végtelen tárháza kapcsolható a vízármlásokhoz. Így a bemutatott szikesedés, barlangképződés, szénhidrogén-cspadázódás, biogeokémiai kiválások és még sok egyéb. E jelenségek, valamint a vízármlási rendszerek és a numerikus elemzések összekapcsolása további összefüggések felismerését teszik lehetővé a jövőben. Végezetül ezen eredmények sajátossága, hogy a Pannon-medence „kutatólaboratóriumában” kerülnek leírásra és bemutatásra. Így válhatott a Tihanyi-félsziget a félsziget jellegű vízármlási rendszerek típusterületévé vagy a BTK a vastag fedett és fedetlen karbonátos víztartó rendszerek és áramlási rendszereik nemzetközileg elismert mintaterületévé.

A hidrogeológiai fejlődési trendekből kiindulva a jövőben várhatóan egyre több alkalmazási területtel foglalkozunk. Így az utóbbi évek újdonságai például a felszín alatti vizek radionuklid-tartalmának vízármlási szemléletű értékelése, de a mesterséges vízpótlás, azaz a MAR-ok (Managed Aquifer Recharge) kérdései, de a biogén (szénhidrogén) gázok felszín alatti vízármlás kontrollálta migrációjának és csapadázódásának kérdései is ide sorolhatók. 2018-ban indult hároméves kutatás a geofluidumok és az azokhoz kapcsolódó erőforrások (felszín alatti víz, geotermikus energia, hidrotermális ércesedések) rendszerszemléletű értékelésére ENeRAG (Excellency Network Building for Comprehensive Research and Assessment of Geofluids H2020) címen. A projekt célja az ELTE (mint konzorciumvezető) kutatási és innovációs kapacitásának további erősítése nemzetközi kiválósági központ létrehozásával és hálózatépítéssel a felszín alatti fluidumok oktatása és kutatása területén. Célunk a felszín alatti víz, valamint a geotermikus és hidrotermális fluidumok összefüggéseinek jobb megértése, ezáltal a fenntartható kinyerésükre alkalmazott – vízgazdálkodási, geotermikus energiahasznosítási, ásványi nyersanyag feltárási és hasznosítási – technológiák hatékony fejlesztése.

Az elmúlt húsz év kutatási eredményeinek oktatásfejlesztési hasznosulása is látható a CHARM (Challenge-driven, Accessible, Research-based, Mobile) European University (CHARM-EU) „Víz” témájú mesterszakos programjában is, mely pilot képzés nemzetközi kooperációban 2021-től indul meg egyetemünkön. Emellett az ismeretek kommunikációjára is egyre nagyobb figyelmet fordítunk, ezért indítottuk el magyar és angol nyelvű blogjainkat

(<https://felszinalattiviz.blogspot.com/>; <https://geofluids.blogspot.com/>). A jövő tehát egyre több lehetőséggel és feladattal kecsegtet a medencehidraulikai kutatás, oktatás és tudáskommunikáció terén is, ami a globális vízválság korában különösen jelentőséggel bír és egyúttal felelősséget is jelent.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői ezúton mondanak köszönetet mindazoknak a hazai elődöknek, akik Magyarországon lefektették az empirikus medencehidraulika alapjait, közülük is kiemelten ERDÉLYI Mihálynak. TÓTH József professzornak köszönjük, hogy hazahozta tudását Kanadából és megosztotta a magyar

szakemberekkel. MINDSZENTY Andrea egykori tanszékvezető jóindulatú támogatása és Tóth professzor folyamatos segítségével az ELTE lehetett az az intézmény, ahol a medencehidraulika elismert kutató és képző helye kialakult. Köszönjük továbbá mindazoknak, akik az elmúlt húsz évben munkájukkal hozzájárultak az elvégzett és itt bemutatott kutatások megvalósításához. ERHARDT Ildikónak köszönjük az ábrák elkészítése kapcsán nyújtott segítségét. Dr. SZANYI János szakszerkesztőnek, Dr. ALMÁSI Istvánnak és két további lektornak köszönjük az építő jellegű kritikákat. A cikk az ENeRAG-projekt keretein belül készült, amelyet az Európai Unió Horizont 2020 kutatási és innovációs programja támogatott a 810980 azonosító számú támogatási megállapodás alapján.

Irodalom – References

- ALFÖLDI L. 1979: Budapesti hévizek. – *VITUKI kiadvány*, Budapest, 102 p.
- ALFÖLDI L. 1981: A budapesti geotermikus áramlási rendszer modellje. – *Hidrologiai Közöny* **9**, 1–7.
- ALFÖLDI L. & KAPOLYI L. (szerk.) 2007: *Bányászati karsztvízszintsüllyesztés a Dunántúli-középhegységben*. – Magyar Tudományos Akadémia Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest, 139 p.
- ALMÁSI, I. 2001: Petroleum Hydrogeology of the Great Hungarian Plain, Eastern Pannonian Basin, Hungary. – PhD Thesis, University of Alberta, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Edmonton, Alberta, 312 p.
- ALMÁSI, I. 2003: Evaluation of the possible mechanisms able to generate and maintain the overpressured regime in the Pannonian Basin, Eastern Hungary. – *Journal of Geochemical Exploration* **78–79**, 139–142. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00084-0](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00084-0)
- BACK, W. 1966: Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain. – *USGS Professional Paper* **498-A**, 42 p. <https://doi.org/10.3133/pp498A>
- BALOGH V. 2016: A Duna–Tisza köze áramlási rendszereinek és a hajtóerők szerepének vizsgálata numerikus modellezéssel. – Szakdolgozat, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 103 p.
- BALOGH, V., SIMON, SZ. & TÓTH, Á. 2017a: Role of fluid driving forces in large sedimentary basins – case study from the Pannonian Basin, Hungary. – In: POSAVEC, K. & MARKOVIC, T. (eds): *44th Congress of International Association of Hydrogeologists – Book of abstracts*. Paper: T3.4.22.
- BALOGH, V., TÓTH, Á. & SIMON, SZ. 2017b: Effect of different driving forces in large sedimentary basins. – In: SMERDON, B., TÓTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. (eds): *Characterizing regional groundwater flow systems: Insight from practical applications and theoretical development: Symposium Agenda and Abstracts*, 36 p.
- BRACE, W. F. 1980: Permeability of crystalline and argillaceous rocks. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **17**, 241–251. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90784-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90784-1)
- BREDEHOEFT, J. D. 2018: The Toth Revolution. – *Groundwater* **56/1**, 157–159. <https://doi.org/10.1111/gwat.12592>
- CARDENAS, M. B. & JIANG, X. W. 2010: Groundwater flow, transport, and residence times through topography-driven basins with exponentially decreasing permeability and porosity. – *Water Resources Research* **46/11**, W11538. <https://doi.org/10.1029/2010wr009370>
- CHAMBERLAIN, T. C. 1885: *The requisite and qualifying conditions of artesian wells*. – US Geological Survey 5th Annual Report, 131–175.
- CZAUNER, B. 2012: Regional hydraulic function of structural elements and low-permeability formations in fluid flow systems and hydrocarbon entrapment in eastern-southeastern Hungary. – PhD disszertáció, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 189 p.
- CZAUNER B. & MÁDL-SZŐNYI J. 2008: A berekfürdői mélyszerkezet és vízföldtani vonatkozásai. – *Hidrologiai Tájékoztató* **48/1**, 32–34.
- CZAUNER, B. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2011: The function of faults in hydraulic hydrocarbon entrapment: Theoretical considerations and a field study from the Trans-Tisza region, Hungary. – *AAPG Bulletin* **95/5**, 795–811. <https://doi.org/10.1306/11051010031>
- 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**, 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.08.016>
- CZAUNER, B., MÁDL-SZŐNYI, J., ERŐSS, A. & VOJNITS, A. 2008: Mapping vegetational and salinization phenomena to evaluate the extent of Lake Kelemenszék. – *Central European Geology* **51/3**, 231–240. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.5>
- CZAUNER, B., MÁDL-SZŐNYI, J., TÓTH, J. & POGÁCSÁS, GY. 2008: Hydraulic potential anomaly indicating thermal water reservoir and gas pool near Berekfürdő, Trans-Tisza Region, Hungary. – *Central European Geology* **51/3**, 253–266. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.7>
- CSONDOR, K., CZAUNER, B., CSOBAI, L., GYÓRI, 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**, 2803–2820. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02216-9>
- DARCY, H. 1856: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. – Victor Dalmont, Paris.
- DEMING, D. 2002: *Introduction to hydrogeology*. – McGraw-Hill, New York, 480 p.
- DICKSON, M. H. & FANELLI, M. 2013: *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. – Routledge, London, 224 p. <https://doi.org/10.4324/9781315065786>
- ENGELEN, G. B. 2013: Hierarchically nested energy flow systems of planet Earth. – *Proceedings of the International Symposium on Regional Groundwater Flow: Theory, Applications and Future 116 Development, Xi'an, China, 21–23 June 2013, China Geological Survey, Commission on Regional Groundwater Flow, IAH 225*.
- ENGELEN, G. B. & KLOOSTERMAN, F. H. 1996: *Hydrological systems analysis: methods and applications*. – Kluwer, Dordrecht, 152 p.
- ERDÉLYI, M. 1976: Outlines of the hydrodynamics and hydrogeochemistry of the Pannonian Basin. – *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **20/3–4**, 287–309.
- 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**, 1871–1891. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1591-3>
- ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J. & CSOMA, A. É. 2008: Characteristics of discharge at rose and Gellért Hills, Budapest, Hungary. – *Central European Geology* **51/3**, 267–281. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.8>
- ERŐSS, A., POROS, ZS., MÁDL-SZŐNYI, J., MINDSZENTY, A., MOLNÁR, F., RONCHI, P. & CSOMA, A. É. 2011: 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**, 119–133. <https://doi.org/10.1201/b12715-12>
- ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., GOLDSCHIEDER, N. & CSOMA, A. É. 2012b: Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. – *Journal of Hydrology* **426–427**, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.031>
- 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**, Article number: 132, 15 p. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8870-3>
- EURÓPAI PARLAMENT & AZ EURÓPAI UNIÓ TANÁCSA 2000: Az Európai Parlament és a Tanács 2000/60/EK irányelve (2000. október 23.) a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról. – *Official Journal L 327*, 22/12/2000, p. 1–73, Special edition in Hungarian Chapter 15, Volume 005 P. 275 – 346.
- FOURMARIER, P. F. J. 1939: *Hydrogéologie*. – Masson, Paris.
- FREEZE, R. A. & WITHERSPOON, P. A. 1966: Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. – *Water Resources Research* **2/4**, 641–656. <https://doi.org/10.1029/wr002i004p00641>
- FREEZE, R. A. & WITHERSPOON, P. A. 1967: Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variation. – *Water Resources Research* **3/2**, 623–634. <https://doi.org/10.1029/wr003i002p00623>
- FREEZE, R. A. & WITHERSPOON, P. A. 1968: Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. Quantitative interpretations. – *Water Resources Research* **4/3**, 581–590. <https://doi.org/10.1029/wr004i003p00581>
- GALSA, A., SZIJÁRTÓ, M., TÓTH, Á., LENKEY, L. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2019: Interaction of topography- and salinity-driven groundwater flow in synthetic numerical models and a real geological situation. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU2019-9960, 2019.
- GARAMHEGYI, T., SZÉKELY, F., CARRILLO-RIVERA, J. J. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2020: Revision of archive recovery tests using analytical and numerical methods on thermal water wells in sandstone and fractured carbonate aquifers in the vicinity of Budapest, Hungary. – *Environmental Earth Sciences* **79**, Article no. 129. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8835-6>
- GARVEN, G. 1995: Continental-scale groundwater flow and geologic processes. – *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **23/1**, 89–117. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.000513>
- GLEESON, T. & MANNING, A. H. 2008: Regional groundwater flow in mountainous terrain: three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. – *Water Resources Research* **4/10**, W10403. <https://doi.org/10.1029/2008wr006848>
- GOLDSCHIEDER, N. & DREW, D. (eds) 2014: *Methods in Karst Hydrogeology*. – Taylor & Francis, London, 280 p. <https://doi.org/10.1201/9781482266023>
- GOLDSCHIEDER, N., MÁDL-SZŐNYI, J., ERŐSS, A. & SCHILL, É. 2010: Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. – *Hydrogeology Journal* **18**, 1303–1318. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0611-3>
- HAIJEMA, H. M. & MITCHELL-BRUKER, S. 2005: Are water tables a subdued replica of the topography? – *Ground Water* **43/6**, 781–786. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x>
- HALÁSZ, G. 1975: A study of the behaviour of orifice in a quasistationary flow. Proceedings of the Fifth Conference on Fluid Machinery. – In: *5th Conference on Fluid Machinery, Proceedings*, Volume 1. (A76-22978 09-02). Akadémiai Kiadó, Budapest, 389–392.
- HANTUSH, M. S. 1956: Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. – *Eos, Transactions American Geophysical Union* **37/6**, 702–714. <https://doi.org/10.1029/tr037i006p00702>
- HANTUSH, M. S. & JACOB, C. E. 1955: Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer. – *Eos, Transactions American Geophysical Union* **36/1**, 95–100. <https://doi.org/10.1029/tr036i001p00095>
- 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* **78**, 738–749. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.10.001>

- HAVRIL, T., TÓTH, Á., MOLSON, J. W., GALSA, A. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2018: Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: Can wetlands disappear due to recharge reduction? – *Journal of Hydrology* **563**, 1169–1180. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.020>
- HUBBERT, M. K. 1940: The theory of ground-water motion. – *The Journal of Geology* **48/8**, 785–944. <https://doi.org/10.1086/624930>
- IAH: Strategic Overview Series. <https://iah.org/education/professionals/strategic-overview-series> Utolsó megtekintés időpontja: 2020.07.19.
- INGEBRITSEN, S., SANFORD, W. & NEUZIL, C. 2006: *Groundwater in Geologic Processes*. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 536 p.
- JIANG, X. W., WAN, L., CARDENAS, M. B., GE, S. & WANG, X. S. 2010: Simultaneous rejuvenation and aging of groundwater in basins due to depth-decaying conductivity and porosity. – *Geophysical Research Letters* **37/5**, L05403. <https://doi.org/10.1029/2010gl042387>
- JIANG, X. W., WANG, X. S., WAN, L. & GE, S. 2011: An analytical study on stagnation points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity. – *Water Resources Research* **47/1**, W01512. <https://doi.org/10.1029/2010wr009346>
- JIANG, X. W., CHERRY, J. & WAN, L. 2020: Flowing wells: history and role as a root of groundwater hydrology. – *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, in review. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-270>
- KAPILLER R. 2016: Hidrogeológiai modellezés a bemenő földtani paraméterek változékonyságának függvényében. – Diplomamunka, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 85 p.
- KING, F. H. 1899: Principles and conditions of the movement of groundwater. – *US Geological Survey Annual Report* **19** (Part II), 59–294.
- KLIMCHOUK, A. B. 2007: Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective. – *Special paper no. 1, National Cave and Karst Research Institute*, Carlsbad, NM, 106 p.
- 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**, 231–255. <https://doi.org/10.1007/s10498-018-9341-2>
- 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**, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.01.020>
- KOVÁCS J. & MÜLLER P. 1980: A budai-hegyek hévizes tevékenységének kialakulása és nyomai. – *Karszt és Barlang* **2**, 93–98.
- KUTI L. & KÓRÖSSY L. 1989: *Az Alföld Földtani Atlasza: Dunaújváros–Izsák*. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 19 p.
- LUSCZYNSKI, N. J. 1961: Head and flow of ground water of variable density. – *Journal of Geophysical Research* **66/12**, 4247–4256. <https://doi.org/10.1029/jz066i012p04247>
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 1997: Vízartó rendszerek sérülékenységi vizsgálata a dunántúli-középhegységi főkarsztvíztároló rendszer (DNy-i rész) példáján. – *Földtani Közlöny* **127/1–2**, 19–83.
- MÁDL-SZŐNYI, J. 2008: The contribution of József Tóth to modernization of Hungarian hydrogeology. – *Central European Geology* **51/3**, 189–201. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.2>
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2019a: *Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos víztartó rendszerekben a Budai-termáلكarszt tágabb környezetének példáján*. – MTA Doktori értekezés, Budapest, 131 p.
- MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2019b: A regionális pórusnyomásviszonyok jelentősége a termálvíz feltárásban és a készletek megújulásában. – *Magyar Tudomány* **180/12**, 1796–1807. <https://doi.org/10.1556/2065.180.2019.12.6>
- MÁDLNÉ SZŐNYI J., SIMON SZ., TÓTH J. & POGÁCSÁS GY. 2005: Felszíni és felszín alatti vizek kapcsolata a Duna–Tisza közti Kelemen-szék és Kolon-tó esetében. – *Általános Földtani Szemle* **30**, 93–110.
- MÁDLNÉ SZŐNYI J., ERŐSS A., HAVRIL T., POROS ZS., GYÓRI O., TÓTH Á., CSOMA A., RONCHI P. & MINDSZENTY A. 2018: Fluidumok, áramlási rendszerek és ásványtani lenyomataik összefüggései a Budai Termáلكarszton. – *Földtani Közlöny* **148/1**, 75–96. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2018.148.1.75>
- MÁDL-SZŐNYI, J. & SIMON, S. 2016: Involvement of preliminary regional fluid pressure evaluation into the reconnaissance geothermal exploration – Example of an overpressured and gravity-driven basin. – *Geothermics* **60**, 156–174. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.001>
- MÁDL-SZŐNYI, J. & TÓTH, Á. 2015: Basin scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. – *Hydrogeology Journal* **23/7**, 1359–1380. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1274-x>
- MÁDL-SZŐNYI, J. & TÓTH, J. 2009: A hydrogeological type section for the Duna–Tisza Interfluve, Hungary. – *Hydrogeology Journal* **17/4**, 961–980. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0421-z>
- 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* **74/12**, 7523–7538. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4608-z>
- MÁDL-SZŐNYI, J., CZAUNER, B., IVÁN, V., TÓTH, Á., SIMON, SZ., ERŐSS, A., BODOR, P., HAVRIL, T., BONCZ, L. & SÓREG, V. 2019: Confined carbonates – Regional scale hydraulic interaction or isolation? – *Marine and Petroleum Geology* **107**, 591–612. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.006>
- MARTON L. 2009: *Alkalmazott hidrogeológia*. – ELTE Eötvös Kiadó Kft., Budapest, 626 p.
- MARTON L. 2012: Az Alföld ásványi kincse a felszín alatti víz. – *Magyar Tudomány* **2**, 206–215.
- MARTON L. & MIKÓ L. 1989: Izotóp-adatok interpretálása az Alföld hidrogeológiai kutatásában. – *Hidrologiai Közlöny* **69/1**, 50–58.
- MARTON L. & SZANYI J. 2000: A talajvíztükör helyzete és a rétegvíz termelés kapcsolata Debrecen térségében. – *Hidrologiai Közlöny* **80/1**, 2–18.
- MAXEY, G. B. 1964: Hydrostratigraphic units. – *Journal of Hydrology* **2/2**, 124–129. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(64\)90023-x](https://doi.org/10.1016/0022-1694(64)90023-x)
- MUNN, M. J. 1909: The anticlinal and hydraulic theories of oil and gas accumulation. – *Economic Geology* **4**, 509–529. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.4.6.509>
- NEUMAN, S. P. & WITHERSPOON, P. A. 1969a: Theory of flow in a confined two aquifer system. – *Water Resources Research* **5/4**, 803–816. <https://doi.org/10.1029/wr005i004p00803>

- NEUMAN, S. P. & WITHERSPOON, P. A. 1969b: Applicability of current theories of flow in leaky aquifers. – *Water Resources Research* **5/4**, 817–829. <https://doi.org/10.1029/wr005i004p00817>
- NEUMAN, S. P. & WITHERSPOON, P. A. 1972: Field determination of hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. – *Water Resources Research* **8/5**, 1284–1298. <https://doi.org/10.1029/wr008i005p01284>
- NEUZIL, C. E. 1994: How permeable are clays and shales? – *Water Resources Research* **30/2**, 145–150. <https://doi.org/10.1029/93wr02930>
- ORSZÁGOS VÍZÜGYI FŐIGAZGATÓSÁG 2016: Vízyűjtő-gazdálkodási Terv – A Duna-vízgyűjtő magyarországi része, 676 p.
- ÖTVÖS V., ERHARDT I., ERŐSS A., CZAUNER B., SIMON SZ. & MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2017: A Budai Termálkarst hidraulikai viszonyainak barlangképződési vonatkozásai. – *Karsztfelődés* **22**, 5–33.
- PADISÁK J., ÁCS É., BORICS G., BUCZKÓ K., GRIGORSZKY I., KOVÁCS CS., MÁDLNÉ SZŐNYI J. & SORÓCZKI-PINTÉR É. 2006: A Víz Keretirányelv és vízi habitatdiverzitás konzervációbiológiai vonatkozásai. – *Magyar Tudomány* **167**, 663–669.
- PAPP B. 1974: Felszínalatti vizek oxigén-18 és deutérium összetevőinek regionális vizsgálata. – *Kézirat*, Budapest.
- PETHŐ S., MÁDLNÉ SZŐNYI J. & TÓTH J. 2004: A Kisalföldi-medence regionális felszín alatti gravitációs vízáramlási képe hidraulikai adatfeldolgozás alapján. – *Földtani Kutatás* **41/2**, 13–20.
- POROS, ZS., ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., MINDSZENTY, A., MOLNÁR, F., RONCHI, P. & CSOMA, E. A. 2010: Mixing of karstic and basinal fluids affecting hypogene cave formation and mineralization in the Buda Thermal Karst, Hungary. – In: ZAHARIA, L., KIS, A. TOPA, B., PAPP, G. & WEISZBURG, T. (eds): *Acta Mineralogica Petrographica Abstract Series*, Budapest, 864 p.
- POROS, ZS., MINDSZENTY, A., MOLNÁR, F., PIRONON, J., GYÓRI, O., RONCHI, P. & SZEKERES, Z. 2012: Imprints of hydrocarbon-bearing basinal fluids on a karst system: mineralogical and fluid inclusion studies from the Buda Hills, Hungary. – *International Journal of Earth Sciences* **101/2**, 429–452. <https://doi.org/10.1007/s00531-011-0677-8>
- ROBINSON, N. I. & LOVE, A. J. 2014: Hidden channels of groundwater flow in Tóthian drainage basins. – *Advances in Water Resources* **62**, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.10.004>
- RÓNAI A. 1963: Az Alföld negyedkori rétegeinek vízföldtani vizsgálata. – *Hidrológiai Közlöny* **43/5**, 378–391.
- RÓNAI A. 1975: A talajvíz és rétegvizek kapcsolata az Alföldön. – *Hidrológiai Közlöny* **55/2**, 49–53.
- RÓNAI A. 1985: Az Alföld negyedidőszaki földtana. – *Geologica Hungarica Series Geologica* **21**, 1–412.
- ROSTRON, B. J. & TÓTH, J. 1996: Ascending fluid plumes above Devonian pinnacle reefs: numerical modeling and field example from west-central Alberta, Canada. – In: SCHUMACHER, D. & ABRAMS, M. A. (eds): *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. AAPG Memoir **66**, 185–201.
- SCHAFARZIK F. 1928: Budapest székesfőváros ásványvízforrásainak geológiai jellemzése és grafikus feltüntetése. – *Hidrológiai Közlöny* **4-6**, 14–20.
- SCHMIDT ELIGIUS R. & ALMÁSSY E. (szerk.) 1962: *Magyarország vízföldtani atlasza*. – Magyar Állami Földtani Intézet, 78 p.
- SIMON, SZ., MÁDL-SZŐNYI, J., MÜLLER, I. & ZSEMLE, F. 2008: Identification of near-surface saline water in the Lake Kelemenszék area, Danube–Tisza Interfluve, Hungary. – *Central European Geology* **51/3**, 219–230. <https://doi.org/10.1556/ceugeol.51.2008.3.4>
- SIMON, SZ., MÁDL-SZŐNYI, J., MÜLLER, I. & POGÁCSÁS, GY. 2011: Conceptual model for surface salinization in an overpressured and a superimposed gravity-flow field, Lake Kelemenszék area, Hungary. — *Hydrogeology Journal* **19**, 701–717. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0711-8>
- SIMMONS C. T. & SHARP J. 2001: Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: Approaches, resolutions and future challenges. — *Journal of Contaminant Hydrology* **52**, 245–275. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00160-7)
- STIFF, H. A. 1951: The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. – *Journal of Petroleum Technology* **3/10**, 15–17. <https://doi.org/10.2118/951376-g>
- STUTE, M. & DEÁK, J. 1989: Environmental isotope study (^{14}C , ^{13}C , ^{18}O , D, noble gases) on deep groundwater circulation systems in Hungary with reference to paleoclimate. – *Radiocarbon* **31/3**, 902–918. <https://doi.org/10.1017/S0033822200012522>
- SZANYI J. 2004: Felszín alatti víztermelés környezeti hatásai a Dél-Nyírség példáján. – PhD disszertáció, Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Kőzettani és Geokémiai Tanszék, Szeged. 88 p.
- SZEBÉNYI L. 1955: Artézi vizek függőleges irányú mozgásáról. – *Hidrológiai Közlöny* **35/11–12**, 437–440.
- SZEBÉNYI L. 1965: Az artézi víz forgalmának mennyiségi meghatározása. – *Hidrológiai Közlöny* **45/3**, 125–130.
- SZÉKELY F. 1977: Víztermelés hatására kialakuló regionális vízszintsüllyedés számítógépes vizsgálata negyedkori képződményeinkben. – *Hidrológiai Közlöny* **57/3**, 118–125.
- 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* **572**, 364–379. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.003>
- 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* **21**, EGU2019-5830, 2019.
- SZÓCS, T., RMAN, N., ROTÁR-SZALKAI, Á., TÓTH, GY., LAPANJE, A., ČERNÁK, R. & NÁDOR, A. 2018: The upper pannonian thermal aquifer: Cross border cooperation as an essential step to transboundary groundwater management. – *Journal of Hydrology: Regional Studies* **20**, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.004>
- TERZAGHI, K. 1923: Die berechnung der durchlassigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungsserscheinungen. – *Akademie der Wissenschaften in Wien, Sitzungsberichte, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse Part IIa*, **132/3–4**, 125–138. (Reprinted in BJERRUM, L., CASSAGRANDE, A., PECK, R. B. & SKEMPTON, A. W. [eds] 1960: *From Theory to Practice in Soil Mechanics*. John Wiley, New York, 133–146).
- TÓTH Á. 2018: A Balaton-felvidék felszínalatti vizeinek hidraulikai kapcsolata a Bakonnyal és a Balatonnal. – PhD disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 202 p.

- TÓTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2016: Scale-dependent evaluation of an unconfined carbonate system – Practical application, consequences and significance. – *Karst without boundaries, IAH – Selected papers on hydrogeology* **23**, 199–214. <https://doi.org/10.1201/b21380-17>
- TÓTH, Á. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2019: Where does the drinking water come from? – Interrelationship between surface water and groundwater in a carbonate area, Hungary. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU2019-8902, 2019.
- TÓTH, Á., GALSA, A. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2020: Significance of basin asymmetry and regional groundwater flow conditions in preliminary geothermal potential assessment – Implications on extensional geothermal plays. – *Global and Planetary Change* **195**, 103344. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103344>
- TÓTH, Á., HAVRIL T. & MÁDLNÉ SZŐNYI J. 2020: Rejtőzködő vizek nyomában a Balaton térségében – Mi hiányzik a Balatonból? – In: BABINSZKI E. & HORVÁTH F. (szerk.) *A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán*. – MFT, Budapest, 287–311.
- TÓTH, Á., HAVRIL, T., SIMON, SZ., GALSA, A., SANTOS F. A. M., MÜLLER, I. & MÁDL-SZŐNYI, J. 2016: Groundwater flow pattern and related environmental phenomena in complex geologic setting based on integrated model construction. – *Journal of Hydrology* **539**, 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.038>
- TÓTH, GY., RMAN N., ROTÁR-SZALKAI, Á., KERÉKGYÁRTÓ, T., SZÓCS, T., LAPANJE A., ČERNÁK R., REMSÍK A., SCHUBERT G. & NÁDOR, A. 2016: Transboundary fresh and thermal groundwater flows in the west part of the Pannonian Basin. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **57**, 439–454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.021>
- TÓTH, J. 1962: A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada. – *Journal of Geophysical Research* **67/11**, 4375–4387. <https://doi.org/10.1029/jz067i011p04375>
- TÓTH, J. 1963: A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. – *Journal of Geophysical Research* **68/16**, 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/jz068i016p04795>
- TÓTH, J. 1970: A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. – *Journal of Hydrogeology* **10/2**, 164–176. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90186-1)
- TÓTH, J. 1978: Gravity induced cross-fundamental flow of formation fluids, Red Earth Region, Alberta, Canada: Analysis, patterns, and evolution. – *Water Resources Research* **14/5**, 805–843. <https://doi.org/10.1029/wr014i005p00805>
- TÓTH, J. 1980: Cross-formational gravity-flow of groundwater: A mechanism of the transport and accumulation of petroleum (The generalized hydraulic theory of petroleum migration). – In: ROBERTS, W. H. & CORDELL, R. J. (eds): *Problems of Petroleum Migration. AAPG Studies in Geology* **10**, Tulsa, Oklahoma, USA, 121–167.
- TÓTH, J. 1995a: Hydraulic continuity in large sedimentary basins. – *Hydrogeology Journal* **3/4**, 4–16. <https://doi.org/10.1007/s100400050250>
- TÓTH J. 1995b: A nagy kiterjedésű üledékes medencék felszín alatti vizeinek hidraulikai folytonossága. – *Hidrologiai Közlemények* **75/3**, 153–159.
- TÓTH, J. 1999: Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. – *Hydrogeology Journal* **7/1**, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>
- TÓTH, J. 2003: Fluid-potential patterns and hydrocarbon deposits in groundwater flow-fields induced by gravity and tectonic compression, Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. – *Journal of Geochemical Exploration* **78–79**, 427–431. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(03\)00024-4](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(03)00024-4)
- TÓTH, J. 2009a: *Gravitational Systems of Groundwater Flow – Theory, Evaluation, Utilization*. – University Press, Cambridge, UK, 310 p.
- TÓTH, J. 2009b: *Springs seen and interpreted in the context of groundwater flow-systems*. – GSA Annual Meeting, 2009. október 18–21., Portland, USA.
- TÓTH, J. & ALMÁSI, I. 2001: Interpretation of observed fluid potential patterns in a deep sedimentary basin under tectonic compression: Hungarian Great Plain, Pannonian Basin. – *Geofluids* **1**, 11–36. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2001.11004.x>
- TÓTH, J. & MILLAR, R. F. 1983: Possible Effects of Erosional Changes of the Topographic Relief on Pore Pressures at Depth. – *Water Resources Research* **19/6**, 1585–1597. <https://doi.org/10.1029/wr019i006p01585>
- URBANCSEK J. 1963: A földtani felépítés és rétegvíznyomás közötti összefüggés az Alföldön. – *Hidrologiai Közlemények* **43/3**, 205–218.
- VARSÁNYI Z. 2000: Felszín alatti vízmozgási rendszerek elkülönítése a Dél-Alföldön kémiai és izotópos vizsgálatok alapján. – *Hidrologiai Közlemények* **80/3**, 145–156.
- VARSÁNYI, I. & Ó. KOVÁCS, L. 2009: Origin, chemical and isotopic evolution of formation water in geopressed zones in the Pannonian Basin, Hungary. – *Chemical Geology* **264**, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.03.006>
- VENDEL M. & KISHÁZI P. 1964: Összefüggések melegforrások és karsztvizek között a Dunántúli-középhegységben megfigyelt viszonyok alapján. – *MTA Műszaki Tudományos Osztályának Közleményei* **32**, 393–417, **33**, 205–234.
- WALTON, W. C. 1960: Leaky artesian aquifer conditions in Illinois. – *Illinois Water Survey Report of Investigations* **39**, 27 p.
- WANG, X. S., JIANG, X. W., WAN, L., GE, S. & LI, H. 2011: A new analytical solution of topography-driven flow in a drainage basin with depth dependent anisotropy of permeability. – *Water Resources Research* **47/9**, W09603. <https://doi.org/10.1029/2011wr010507>
- ZHOU, Y. & LI, W. 2011: A review of regional groundwater flow modeling. – *Geoscience Frontiers* **2/2**, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.03.003>
- ZIJL, W. 1999: Scale aspects of groundwater flow and transport systems. – *Hydrogeology Journal* **7/1**, 139–150. <https://doi.org/10.1007/s100400050185>
- ZIJL, W. 2019: Creep Flow Systems in the Earth Crust: A Complement to Groundwater Flow Systems. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU2019-1790-3, 2019.
- ZSEMLE F., MÁDLNÉ SZŐNYI J. & ANGELUS B. 2002: Felszíni hidraulikai rezsimjelleg térképezése az izsáki Kolon-tó környezetében. – *Hidrologiai Közlemények* **82**, 110–119.

Kézirat beérkezett: 2020. 07. 19.