

VÁLASZ

**Szarka László Csaba (D.Sc.) akadémikus úr opponensi véleményére
a „Felszínalatti vízáramlások mintázata fedetlen és kapcsolódó fedett karbonátos
vízartó rendszerekben a Budai-termáلكarszt tágabb környezetének példáján”
c. MTA doktori (D.Sc.) értekezéséről**

Ezúton köszönöm Szarka László Csaba akadémikus úrnak MTA doktori értekezésem mélyreható bírálatát, értékes észrevételeit és inspiráló, érdekes kérdéseit, továbbá azt, hogy értékelte munkám azon törekvését, miszerint a „medencehidraulikai megközelítés szemléletében egységes módszert” szeretnék kínálni a vizsgált hidrogeológiai környezetben. Opponensem két előzetes észrevételt és hét pontban megfogalmazott kérdéssort és megjegyzést tett bírálatában. Ezekre, a kérdés feltüntetése után, az alábbiakban válaszolok¹.

Előzetes észrevételek:

- 1) Bevezetés: Ez az ismertetés igen tömör; egy 2018-as IAH-előadás - Zhang, Liang, Jin, 2018 – szövegének ismerete nélkül nehéz megítélni a Tóth-i modern hidrogeológia globális alkalmazásának helyzetét, de szép bevezető idézettel tapintatosan utal az ellentmondásosságra.**

Valóban talán kicsit szűkszavú ez a tudományos kereteket tárgyaló bevezető, de a téma az utóbbi évtizedben jelentős fejlődésen ment keresztül, ami egyúttal újabb kérdéseket is felvetett². E fejlődés összefoglalását könyv formában tervezi az IAH Regionális Vízáramlási Bizottsága (RGFC). A bevezetőben ezt az összetett helyzetet csak illusztrálni tudtam, s erre a Bredehoeft (2018) mottó a „Tóth-féle forradalom” jó szolgálatot tett. De a kiegészítés is lényeges, az, hogy „a korábbi hidrosztratigráfiai fogalomhasználattal és módszerekkel a felszínalatti víz- és transzportrendszerek megismerése nem hatékony, de akár téves eredményekre is vezethet. ...s ez adja a téma jelentőségét.” (p 7. D).

- 2) Elfogadom a Budai-termáلكarsztra koncentráló megközelítést, de a módszertani ismertetést követően talán érdemes lett volna foglalkozni egyszerűbb karsztos modellekkel is. A szakterülettől kissé távolabb álló bíráló számára legalábbis kézenfekvő lett volna lépésről-lépésre eljutni a Buda-termáلكarszt modelljéig. ...Mindezzel csak a felfogásbeli különbséget illusztrálok a Jelölt és az Opponens között, de ez nem változtat az értekezés megítélésén.**

Megértem bírálóm észrevételét. Ugyanakkor az ún. klasszikus, vagy epigén karsztoknak is szerteágazó az irodalma, továbbá a téma nem igazán illett a logikai fonalba. Ezért csak a vizsgált hidrogeológiai környezetre összpontosítottam a bemutatásban. Bár utólag a kérdések alapján belátom, hogy a medencehidraulikai és a klasszikus karsztos megközelítés összevetése hasznos lett volna.

Kérdések és megjegyzések:

¹ Válaszomban munkám szó szerinti hivatkozásakor idézőjelet használok az oldalszám megjelöléssel, valamint a disszertációra utaló D jelzéssel.

² Folyamatosan bővülő gyűjtemény a medencehidraulikai cikkekről elérhető [itt](#)

- 1) **A numerikus szimulációs modellek korlátairól írottakkal egyetérttek, de úgy érzem, Oreskes et al. (1994)-re nem elég pontosan hivatkozik, sem a Bevezetőben, sem később. Naomi Oreskes és szerzőtársai szerint efféle bonyolult, csak mozaikszerűen ismert természeti rendszerek (pl. a felszínalatti vízáramlási rendszer) numerikus modelljeit lehetetlenség “ellenőrzés” (verifikáció, verifikálás) és “érvényességi vizsgálat” (validáció, validálás) alá vetni. ...A modellek elsődleges értéke heurisztikus jellegű, azaz az összefüggésekre való rálelésre segítenek.**

A dolgozatomban két helyen idézem Oreskes és mtsi. (1994) munkáját, s köszönöm bírálóm pontosító észrevételét. Ezek: i) “A természeti rendszerek folyamatainak numerikus modellezése során általánosságban sem a valóság minél pontosabb leképezése, hanem az összetett folyamatok lényegének megragadása a cél (Oreskes és mtsi. 1994)” (p 7. D). Itt a modellek elsődlegesen heurisztikus jellegére gondoltam, arra, hogy azok az összefüggésekre való rátalálásban segítenek. ii) “A természeti rendszerek (esetünkben a vízáramlási rendszerek) modellezése esetén a numerikus modellek validálása egyéb, (a gyakorlatban megszokott) módon nem lehetséges (Oreskes és mtsi. 1994)” (p 36. D). Itt pedig az említett modell “ellenőrzés” nehézségére utaltam (ld. 3.1. ábra, p 21. D).

Kérdései:

- (1) A Jelölt melyik publikációjában hivatkozott először Oreskes et al. (1994) tanulmányra?**

Az Oreskes és mtsi. (1994) tanulmányát MTA dolgozatomban hivatkoztam először³. Dolgozatom középpontjába a medencehidraulikai megközelítést helyeztem fedett és csatlakozó fedetlen karbonátos víztartó rendszerek vonatkozásában. Ezek a rendszerek Oreskes és mtsi. (1994) értelmezésével bonyolult és csak mozaikszerűen ismert természeti rendszerként kezelhetők. A dolgozatomban javasolt egységes módszertan (3.1. ábra, p. 21. D) a medenceléptékű modell eredmények megbízhatóbbá tételét segíti elő.

- (2) Mit ért az értekezésben számos alkalommal használt validálás/validáció kifejezés alatt? A 3.1 ábrán a numerikus modellekre vonatkozó validáció egyszer a megfigyelt vízáramlási jelenségekből és folyamatokból, egyszer a medenceléptékű hidraulikai szemléletből kiindulva alkalmazandó.**

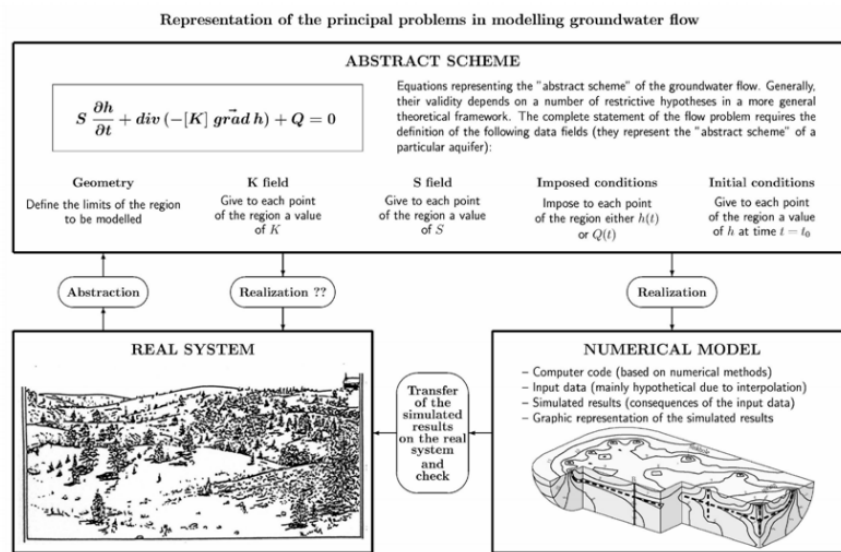
A validáció kifejezést többféleképpen értelmezhetjük. Az egyszerűbb modelleknél ún. 'sensitivity analysis'-t (paraméterérzékenységi vizsgálatot) szokás végezni. A numerikus számítást úgy tudjuk verifikálni, ha annak eredményét összevetjük a rendszerre vonatkozó analitikus megoldással.⁴ További lehetőség két lépcsőben a probléma egyszerű numerikus megoldása, majd a „valós” modell és annak korlátainak bemutatása (Guillou-Frottier és mtsi. 2020). Dolgozatomban a „confirmed” – 'megerősített/igazolt' értelmezésben használok a validációt.

³ A cikket az 1990-es évek végén már olvastam. Havril Tímea PhD hallgatóm dolgozata (2018) kapcsán bukkant fel a mű ismét, aki munkájában a Budai-termálkarszt numerikus szimulációjával foglalkozott, és ahogy dolgozatomban is utaltam rá, különböző geológiai fejlődéstörténeti fázisokon keresztül elemezte a hajtóerők (vízszintkülönbség, hőmérsékletkülönbség) szerepét és arányának változását, időfüggő áramlási és hőtranszport szimulációk során.

⁴ A Tóth-féle egységmedence áramlási modell analitikus és numerikus megoldását összevetettük (Szijártó 2017).

Lényeges kérdés, hogy ezt a megerősítést vagy validációt mire alapozzuk? Ennek átgondolásában és a 3.1. ábrába történő beépítésében segítségemre voltak Király (1994) valamint Király és mtsi. (1998) munkái a valós rendszer, az absztrakt séma és a numerikus modell közötti különbségek és összefüggések felvázolásával (1. ábra). Ami az ábrából most érdekes, az a numerikus modell eredményeinek visszaültetése a valós rendszerbe és ellenőrzése. Ezt a Király-féle 'megerősítés/igazolás' értelmezést használtam.

A numerikus szimuláció eredményeit ugyanis nem egyedi adatokkal vetem össze, hanem egyrészt a medenceléptékű valós rendszert reprezentáló elemzéssel, másrészt a felszínalatti vízáramlási rendszerek által előidézett jelenségekkel⁵. Elfogadhatjuk, hogy a végeredmény így is részleges lesz, de ha a megfigyelés és az előrejelzés közötti kapcsolatot ('megerősítés/igazolás') nem csak adatszinten, hanem medenceléptékben és a kiváltott természeti jelenségek szintjén keressük, akkor a megismerést segíthetjük⁶.



1. ábra Összefüggés a valós rendszer, a valós rendszer sematikus reprezentációja és a numerikus modell között (Király nyomán módosítva, Király és mtsi. 1998)

(3) Lát-e ellentmondást az Oreskes-féle kutatói értelmezés és a döntéshozói értelmezés között?

A kutatói értelmezés elsődleges célja a megismerés, így a modellek az összefüggésekre való rátalálásban (Oreskes és mtsi. 1994) és a hipotézisek ellenőrzésében segítenek (Király és mtsi. 1998). A döntéshozói értelmezés célja egy konkrét feladat⁷ megoldása. Ellentmondást nem látok, de érzékelem a kétféle megközelítés különbségét. Napjainkban egyre szorítóbb az igény az ún. felfedező kutatási eredmények mielőbbi gyakorlati bevezetésére. Így e tekintetben nő a

⁵ A felszínalatti vízáramlások földtani, környezeti hatótényezzőként működnek a litoszférában (Tóth 1999). Az általuk előidézett jelenségek felhasználhatók a vízáramlási rendszerek nyomozására. Esetünkben a források, barlangok medenceléptékű eloszlása, azok jellemzőinek medenceléptékű különbségei.

⁶ A dolgozatban bemutatott, majd később továbbfejlesztett Budai-termálkarsztra vonatkozó modellre készült egy egyszerűsített paraméteranalízis és a numerikus szimulációs eredmények a valós rendszerre vonatkozó értékeléssel összevetve is „megerősítést” nyertek (Szijártó és mtsi. 2021).

⁷ A feladat adott határidőn belüli megoldása a rendelkezésre álló anyagi forrás mellett.

szándék a kétféle közelítés közötti átjárásra⁸. Ugyanakkor adódhat nehézség a modellezési eredmények téves értelmezéséből vagy felhasználásából (Klemes 1986). Ezért a kétféle értelmezés közelítése több mint kívánatos. Az átjárást segítheti, ha döntéshozói szinten is el tudják fogadtatni a modellezési leképezés sokféle lehetőségét (Suter 1966) és az ebből adódó felhasználási korlátokat. Szükséges az együttműködés, a kutatói és döntéshozói gondolkodás közötti kommunikáció és visszacsatolás.

2) Rendkívül lényeges, hogy a tudományos fogalmak egyértelműen és egyféleképpen legyenek definiálva, és azokat mindenki egyformán értelmezze. Szerepet játszik-e a megértési nehézségekben az eltérő magyar és angol szóhasználat, és amennyiben igen, hogy lehetne ezen segíteni?

Bírálóm kérdésére a válasz egyértelmű igen. E kérdésről beszélhetünk általánosságban és a medencehidraulika vonatkozásában is. E probléma jelentkezik a „groundwater” – felszínalatti víz fogalomnál, mely a nemzetközi szóhasználatban valamennyi telített zónában található vízre vonatkozik. Hazánkban a hagyományos nevezéktan őrzi a vízzáróval elkülönített talajvíz és rétegvíz fogalmát, mely gátolja a felszínalatti víz rendszerszintű működésének megértését. A hidrogeológusok szakmai közössége elfogadja a nemzetközivel megegyező fogalomhasználatot. De ez nem jutott még el a társtudományok és a közvélemény szintjére, ami gátolja a szakszerű döntéshozatalt. Ez tudományos értelemben is nehezíti a medencehidraulikai szemlélet terjedését és gyakorlati alkalmazását. A leghatékonyabb megoldás a társadalmi szintű ismeretterjesztés és szakmai kommunikáció,⁹ valamint a közoktatásban való megjelenítés¹⁰.

3) A „vastag fedetlen, ill. részben fedett és csatlakozó sziliciklasztos képződményekkel fedett karbonátos vízáadó rendszer vízáramlási hipotézismodellje” valójában és konkrétan a Budai-termálkarsztra vonatkozik.

Opponensem véleményével egyetérték, a hipotézismodellt konkrétan a Budai-termálkarsztra dolgoztuk ki, szűken értelmezve, ebben a formában, valóban arra vonatkozik. De nem csak arra használható, ahogyan erre utalunk cikkünkben (Mádl-Szőnyi és Tóth 2015) és dolgozatomban. Ez egyfajta alapmodellként kezelhető, mely az alapelveket megtartva, módosításokkal (adaptáció) más területeken is alkalmazható (Mádl-Szőnyi 2021). Ezt bizonyítja, hogy azóta több kínai (Yang és mtsi. 2017; Wang és mtsi. 2016; Yang és mtsi. 2019), spanyol (Andreo és mtsi. 2016; Gil-Marquez és mtsi. 2019), cseh (Sracek és mtsi. 2019), bolíviai (Aviles és mtsi. 2020), mexikói (Pérez-Quezadas és mtsi. 2017), algériai területen (Chabouer és mtsi. 2021) is használták, nyilván az eredeti modell adott területre történő adaptálásával.

(1) Kérdésem, nem lenne-e érdemes általánosabb hipotézismodellt kialakítani? Ez a 3.5 ábrából kiindulva - annak a diszkutálását jelentené, hogy az adott peremfeltételrendszeren belül egyes paraméterek (például a fedett-fedetlen területarány, felszínformák, üledékvastagság, illetve a rendszerméret)

⁸ Döntéshozatali célból is egyre inkább igénybe veszik a BTK területén született kutatási eredményeket.

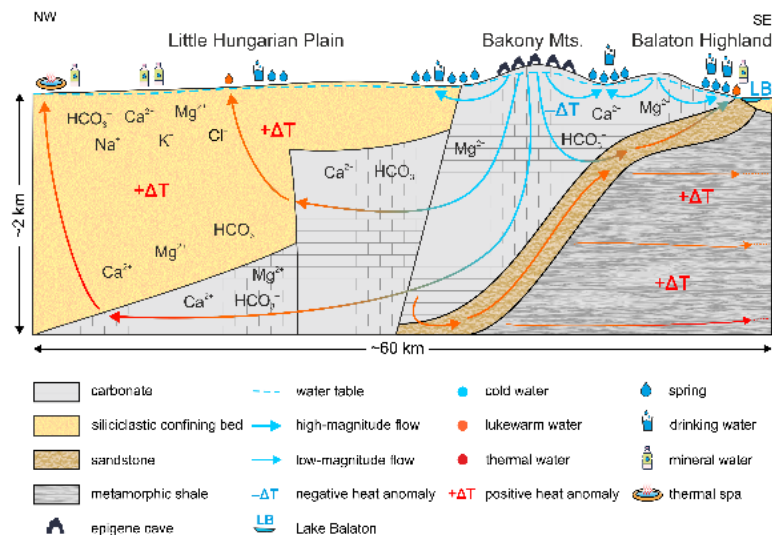
⁹ Magyar nyelvű blog: <https://felszinalattiviz.blogspot.com/>, Angol nyelvű blog: <https://geofluids.blogspot.com/>

¹⁰ Az új generációs földrajzkönyv felszínalatti vizekkel foglalkozó fejezetének szerkesztésébe bekapcsolódtam (2014-2015). A felszínalatti víz egységes fogalomhasználata megjelent a kilencedikes gimnáziumi földrajzkönyvben. Magyarázó cikk: Mádlné Szőnyi Judit és Makádi Mariann (2019) Vízszállító rendszerek a földkéregben. A felszín alatti vizekkel kapcsolatos új ismeretek és tanításuk lehetőségei. [Geometodika](http://foldrajztanitas.elte.hu/index.php/geometodika-2019-1-szam/vizszallito-rendszerek-a-foldkeregben-a-felszin-alatti-vizekkel-kapcsolatos-uj-ismeretek-es-tanitasuk-lehetosegei). <http://foldrajztanitas.elte.hu/index.php/geometodika-2019-1-szam/vizszallito-rendszerek-a-foldkeregben-a-felszin-alatti-vizekkel-kapcsolatos-uj-ismeretek-es-tanitasuk-lehetosegei>

változásának milyen törvényszerű kvalitatív (és esetleg kvantitatív) következményei vannak.

Opponensem izgalmas kérdést vet fel, ami engem és munkatársaimat is foglalkoztat. Ezért i) a jelenlegi modell adaptációjával és ii) egy általánosabb hipotézismodell kérdésével egyaránt foglalkoztunk dolgozatom beadása óta.

i) A modell kiterjesztésének elméleti alapja az, hogy a hidrogeológiai környezet (topográfia, klíma, geológia) meghatározza a felszínalatti vízreztim paramétereit¹¹ a köztük fennálló ok-okozati összefüggések miatt (Tóth 1970). A felszínalatti vízreztim pedig befolyásolja a felszínalatti vízáramlásokhoz kapcsolható jelenségeket¹². Ebből következik, hogy az eredeti BTK koncepcionális modell módosítása minden egyes konkrét helyzetre szükséges és lehetséges egy adaptált koncepcionális modell formájában (Mádl-Szőnyi 2021). A topográfia-klíma-földtan változékonyság végtelen számú kombinációja lehetséges a fedett és fedetlen karbonátos kapcsolódó medencékre, amelyek gyakorlatilag végtelen számú áramlási reztim fajtát eredményezhetnek.



2. ábra Adaptált koncepcionális áramlási modell a Dunántúli-középhegység központi részére (Mádl-Szőnyi et al. 2021 in press. (Tóth 2018 munkája alapján)

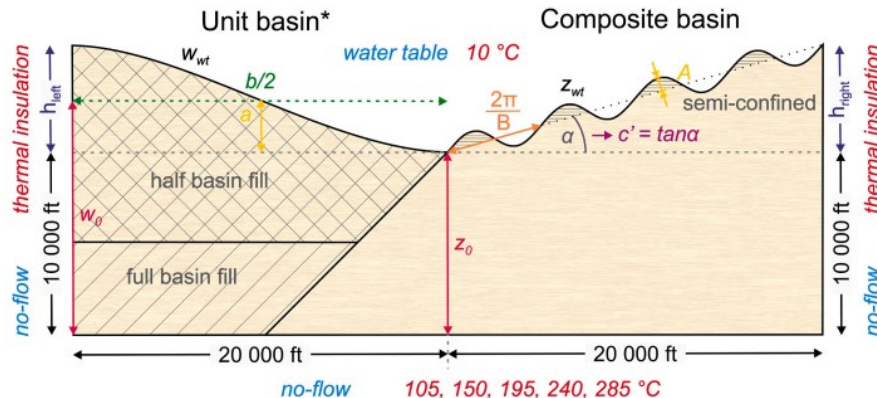
Ha megváltoztatjuk egy vizsgált félmedencére a domborzat lejtésirányát és mértékét, az módosítja a topográfiai hajtóerő nagyságát és irányát, s emiatt változik a vízáramlási mintázat és a vízkémia is (2. ábra). A karbonátos, vízfogó és fedő képződmények vastagsága, dőlése módosítja a topográfiai hajtóerőből következő áramlási irányokat (2. ábra). De a földtani viszonyok befolyásolják a hőfluxust is. A klíma a rendszerben rendelkezésre álló vízmennyiséget szabályozza és meghatározza a felszíni hőmérsékletet (Mádl-Szőnyi 2021). Ebből kiindulva további hazai karszterületekre is adaptáltuk a koncepcionális modellt (Mádl-Szőnyi és mtsi. 2021 in press).

ii) Az általánosabb hipotézismodell kérdésével Tóth és mtsi. (2020) numerikus szimulációs tanulmányában foglalkoztunk a kényszerkonvekciót figyelembe véve. Az opponensem által említett tényezők (fedett-fedetlen területarány, felszínformák, üledékvastagság) egy része

¹¹ Áramlási rendszerek, irányok, vízkémia, hőmérséklet eloszlás stb.

¹² Források jellemzői, vizes élőhelyek, barlangok, kiválások előfordulása, jellege.

bevonásra került az értékelésbe. A rendszerméret kérdésével nem foglalkoztunk, a REV koncepció alapján abból indultunk ki, hogy az a medenceléptéken¹³ belül maradván, nem befolyásol. Két félmedencét – melyek domborzati szempontból aszimmetrikusak – vizsgáltunk, egyik oldalon egy kis hidraulikus vezetőképességű fedőképződmény figyelembevételével (3. ábra). Az eredmények rámutatnak a potenciáeloszlás és a hőmérsékleteloszlás különbségeire a hidrogeológiai környezet változásai tükrében¹⁴. Azaz, megadják az eredeti hipotézis modell numerikus alapon történő kiterjesztését, általánosítását. Gyakorlati hasznuk, hogy segítenek a geotermikus potenciál széleskörű előrejelzésében a tárgyalt hidrogeológiai környezetekben (Tóth és mtsi 2020).



3. ábra Alap modell geometria, ami a medence paramétereket, a határfeltételeket mutatja (kék: hidraulikai, piros: termális határok). Az egységmedence* módosított egységmedencére vonatkozik, fél cosinuszos felső határfeltétellel, fél vagy teljes üledékes medencekitöltéssel és vékony fedő a heterogén modellekben (Tóth és mtsi. 2020)

(2) Milyen jellemző földtani körülmény kell ahhoz, hogy a gravitációs és a geotermikus hajtóerők mellett a kémiai koncentrációkülönbség és az elektromos potenciálkülönbség is észrevehető szerepet játsszon?

A numerikus szimulációk alkalmasak e kérdés megválaszolására. Azt találtuk, hogy ott fordul elő, ahol a hőmérséklet különbség, illetve a koncentráció különbség számottevő¹⁵ sűrűségkülönbséget gerjeszt és a felhajtóerő lényegesen meghaladja a termikus/molekuláris diffúzió mértékét¹⁶. Jellemző földtani környezetek: sódóмок közelében található víztartók (Evans és Nunn 1989; Sarkar és mtsi. 1995; Holczer és mtsi. 2010), hidrotermális érc képződési rendszerek (Yang és mtsi. 2009). A termikus konvekció vastag karbonátos víztartókban jellemző, hiszen i) a felszíni és mélybeli vízhőmérséklet jelentősen különböző, a víztartónak jó a hidraulikus vezetőképessége¹⁷. A Rayleigh-szám a rétegvastagsággal is arányos. Ezt megerősítették a Budai-termálkarsztra végzett és publikált kétdimenziós modellezések, melyek alapján valamennyi scenárió esetén időfüggő kevert termálkonvekció alakult ki, a medence

¹³ A rendszer hossza több száz kilométer, szélessége elérheti a száz kilométert, karbonátos képződmények vastagsága néhány száz métertől több ezer méterig terjedhet, a hasonló nagyságrendekben jelen levő fedőképződményekkel együtt (Mádl-Szőnyi 2021).

¹⁴ Topográfiai lejtés, lokális és regionális domborzat, fedőréteg teljes vagy fél medence vastagságot kitöltő, heterogenitás, anizotrópia, hőfluxus hatása.

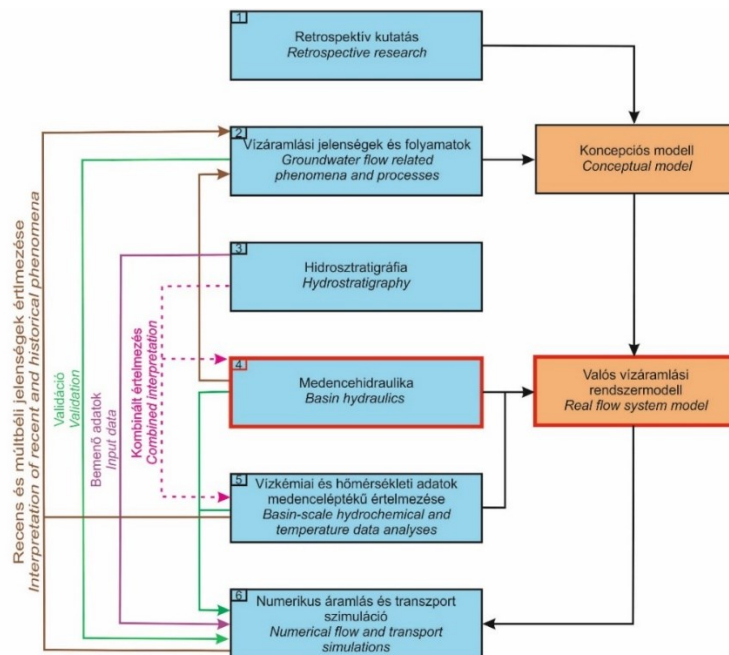
¹⁵ Több százalékos.

¹⁶ Azaz a kritikus termikus, illetve halin Rayleigh-számot. A felhajtóerők szerepét legkönnyebben a Rayleigh-számmal lehet jellemezni (Diersch and Kolditz, 2002), nagyon egyszerű esetekben $Ra_{cr} = 4\pi^2$ (horizontálisan végtelen fedett tározóban) (Turcotte and Schubert 1982).

¹⁷ Ami emeli a Rayleigh-számot (pl. Rubin 1976).

mély részeiben és a fedőrétegek alatt (Szijártó és mtsi. 2021). Ugyanakkor láttuk, Havril és mtsi (2016) és Havril (2018) geológiai időskálán történő modellezései alapján, hogy ha a fedetlen és félig fedett medencerészen idővel nő a fedetlen területek részaránya, a megnövekvő beszivárgó víztömeg hűtő hatása (kényszer konvekció) egyre inkább elnyomja a szabad konvekciót. Azaz medencén belüli jelentősége csökken. ii) Amennyiben a medencén belül számottevő összes oldottanyag tartalom különbség tapasztalható¹⁸, akkor ez is gerjeszthet vízáramlást¹⁹.

- 4) A 3.1 ábrán mutatott folyamatábra az értekezésben vizsgált peremfeltétel-rendszertől függetlenül, általánosan érvényes. Nem lenne-e érdemes olyan folyamatábrát készíteni, amelyik kiterjed a Tóth-féle medencehidraulikai megközelítésben szereplő tényezőkre, illetve az adott speciális peremfeltétel-rendszerre való áttérés specialitásaira? (A 3. fejezetben leírtak vizuális, de a medencehidraulikai elméletre kitékintő összefoglalása alapján szerintem algoritmusba foglalható lenne.)



4. ábra. A felszínalatti vízáramlási rendszerek medenceleptéki vizsgálatának munkafolyamata (Mádlné Szőnyi 2019 nyomán módosítva) (Czauner és Mádl-Szőnyi 2020)

Köszönöm opponensem kiváló javaslatát. Ezt a lehetőséget mi is beláttuk, a folyamatábrát tovább fejlesztettük és általánosítottuk (Czauner és Mádl-Szőnyi 2020) (4. ábra).

A medencehidraulikai módszerekből (Tóth 2009) indultunk ki, és felhasználtuk a dolgozatomban bemutatott folyamatábrát (3.1. ábra, p 21. D). Különbség, hogy önálló lépésként szerepel a hidrosztratigráfia, melynek részleteivel dolgozatomban nem foglalkoztam. A modellezés bemenő adatai, a kombinált medencehidraulikai értelmezés, a validáció lehetőségei, a recens és múltbéli jelenségek értelmezése teremt kapcsolatot a lépések között. A tapasztalatokon nyugvó kutatási munkafolyamat az elvégzett fázisok visszacsatolásai révén újra indítható. Ezzel biztosítja a hipotézisek, adatfeldolgozás és modellek és ezáltal a kutatási

¹⁸ Meteorikus és medencefluidum a fedő és a karbonátos képződményekben.

¹⁹ Ezt a hatást kimutatták Galsa és mtsi. (2021) tranziens szimulációi a Tóalmás-vonaltól délre elemzett hidraulikai/vízkeimiai szelvény (Mádl-Szőnyi és mtsi. 2019) mentén.

eredmények folyamatos fejlesztését. A munkafolyamat alapsémája további módszerekkel és kimenetekkel bővíthető.

- 5) A térség egyes elemei közelíthetők 2D módon (például a hasadékrendszer ÉNY-DK irányú, a fedett-fedetlen határfelület É-D irányú), úgyhogy olyan szelvények mentén, amelyek átszelik a kutatási terület különböző adottságú, jellegzetes területeit, a kétdimenziós modellezés rámutathat a rendszer lényegi jelenségeire.**
(1) Tekintettel arra, hogy a teljes térség összességében kifejezetten háromdimenziós jelleget mutat, érdemes 3D numerikus modellezésben is gondolkodni. Milyen lehetőségeit és korlátait látja a 3D numerikus modellezésnek?²⁰

Köszönöm az előremutató kérdést. Annak eldöntésére, hogy a kétdimenziós modellezés elfogadható közelítés-e, rendelkezünk módszerrel²¹. A Dunántúli-középhegységre elvégzett értékelés alapján a víztükör beszivárgás vezérelt és a 2D modellezés elfogadható (Tóth 2018)²². A Budai-termálkarsztra Havril és mtsi. (2016) és Havril (2018) levezetése alapján szintén elfogadható a 2D közelítés. A BTK numerikus szimulációján munkatársaimmal (Galsa Attila, Tóth Ádám) és hallgatóinkkal (Szijártó Márk) PhD munkája keretében dolgozunk. Természetesen a háromdimenziós numerikus szimuláció tudná kezelni a bíráló által is említett háromdimenziós jelenségeket.

A lehetőség abban rejlik, hogy a BTK felszínalatti vízáramlási, vízháztartási viszonyairól a rendelkezésre álló numerikus eszközök felhasználásával a lehető legteljesebb kvantitatív képet alkossunk. Ez lehet alkalmas újabb vízhasználatok hatáselemzésére, geotermikus beruházások tervezésének elemzésére. Azaz, a gyakorlati felhasználás lehetőségeit is segítené. A legnagyobb korlát a háromdimenziós földtani modell hiánya és a peremfeltételek definiálása. Egyelőre megbízható módon csak kétdimenziós szelvények mentén tudtuk elvégezni a szimulációt. A háromdimenziós modellezésnél egy egyszerűsített földtani modell is megfelelő lehet kiindulásnak. Korlátot okozhat a többi hajtóerő bevonása, mely az időfüggő folyamatok miatt nagy számítási kapacitást igényel.

- (2) A különböző elérhető numerikus modellezési szoftverek között vajon van-e olyan, amely kifejezetten medencehidraulikai szemléletű?**

Kifejezetten medencehidraulikai célokat szolgáló és kereskedelmi forgalomban lévő modellezési szoftverről nem tudok, hiszen a megoldandó egyenletek, Darcy-törvény, hő- és tömegtranszport egyenlet skálafüggetlenek²³. A numerikus szimulációkat a FLONET /TR2²⁴

²⁰ A kérdés átfed Szűcs Péter opponensem 6. kérdésével, így válaszaimban is van átfedés, melyet dőlt betűvel jeleztem.

²¹ "Modellezési szempontból fontos kérdés, hogy a szimuláció elvégezhető-e két dimenzióban vagy a topográfiai hatás összetettsége révén csak három dimenzióban nyújt kielégítő eredményt. E kérdés Gleeson és Manning (2008) tanulmánya alapján vizsgálható." (pp. 33-34. D)

²² Amennyiben az $R/K < 0,15$, akkor az áramlás a fő hidraulikus gradienssel párhuzamosan zajlik, az áramlás kevésbé hierarchizált és a transzverzális áramlások részesedése nem éri el a teljes vízforgalom 10%-át, ilyen esetben a kétdimenziós modellezés elfogadható (Gleeson és Manning 2008).

²³ Eltekeintve — természetesen — attól, hogy mikroszkópikus skálán a porózus közeg nem tekinthető folytonosnak, nem kezelhető kontinuumként.

²⁴ Ez a stationer áramlási tér hidraulikus emelkedési magasságainak, áramvonalainak, áramlási sebességeinek, oldott anyag koncentrációinak, valamint a felszínalatti víz korának szimulációjára alkalmas kód, mely változatos hidrogeológiai körülmények között használható.

(Molson és Frind 2013) kétdimenziós programmal kezdtük a Budai-termálkarszton (Martinez 2013). A munkát a Heatflow Smoker Version 8.0²⁵ végelelemes modellező kóddal folytattuk (Molson és Frind 2016). A geológiai időszakokra végzett kétdimenziós időfüggő modellezéseket ezzel a kóddal végeztük a Budai-termál-karsztra (Havril és mtsi. 2016; Havril 2018). Később a COMSOL Multiphysics 5.2 (Zimmermann 2006) végelelem alapú szoftverrel²⁶ dolgoztunk. Ezt használtuk a többi BTK-t érintő modellezési munkánkban (Mádl-Szőnyi és Tóth 2015; Mádl-Szőnyi és mtsi. 2019; Szijártó 2021) valamint az elméleti medencehidraulikai modellezésekben is (Szijártó és mtsi. 2019; Tóth és mtsi. 2020; Galsa és mtsi. 2021). A teljesség igénye nélkül megállapítható, hogy a medenceleptékkü vízáramlások és transzportfolyamatok kutatását célzó elméleti modellezésekben ezt a szoftvert használják leginkább (Cardenas és Jiang 2010; An és mtsi. 2015 stb.). Ugyanakkor a regionális léptékű medence modellezésekben a FEFLOW (Welch and Allen 2012 stb.) és a MODFLOW is megjelenik (Gao 2011; Goderniaux és mtsi. 2013 stb.). Ezeken túlmenően a HydroGeoSphere háromdimenziós véges elemes integrált felszíni és felszínalatti vízáramlási modellező szoftvert (Therrien és Sudicky 1996; Therrien és mtsi. 2006) is használták ott, ahol a felszíni vizeket is bevonták a medence modellezésbe (Gleeson és Manning 2008). Mindezek mellett számos esetben analitikus megoldást is alkalmaznak elméleti modellezések során (Jiang és mtsi. 2011; Zhao és mtsi. 2018 stb.).

(3) Jelent meg publikáció a 3D „Visual MODFLOW Extra” modellszámítás alkalmazásáról a Budai-termálkarsztra (Zahra Poyanmehr 2016). Mit tud mondani annak eredményéről?

A modellezésről saját munkámmal és a kiegészítő modellezéseinkkel összevetve a következő összehasonlító állításokat tettem:

(1.a) Poyanmehr (2016) munkájának célja a budapesti felszín alatti áramlási útvonalak jellemzése volt egy kalibrált stacionáris állapotú 3D modell készítése. 3D permanens modelljével a mennyiségtani elemzés mellett “vízminőségi, vízgeokémiai viszonyok jobb térbeli értékeléséhez” és a területet érintő “megfelelő kérdések megfogalmazásához” kíván hozzájárulni (Poyanmehr 2016 p. 61). Azaz alapvetően döntéshozói célokat szolgáló modell. (1.b) A Budai-termálkarsztra a dolgozatomban bemutatott 2D modellek célja alapvetően tudományos: “arra keresek választ, hogy a valós vízáramlási rendszermodellből levezethető peremfeltételekből kiindulva ...két budapesti földtani szelvény (Fodor in Mindszenty szerk. 2013) mentén végzett kétdimenziós áramlási és hőtranszport szimuláció milyen vízáramlási rendszereket, összefüggéseket és milyen hőmérséklet eloszlást eredményez.” (p. 68 D)

(2.a) A tanulmányban kijelenti: “A területen csak meteorikus vizek cirkulálnak” (Poyanmehr 2016 p 62.). (2.b.) Dolgozatomban a medencefluidumok jelenlétét is igazoltam.

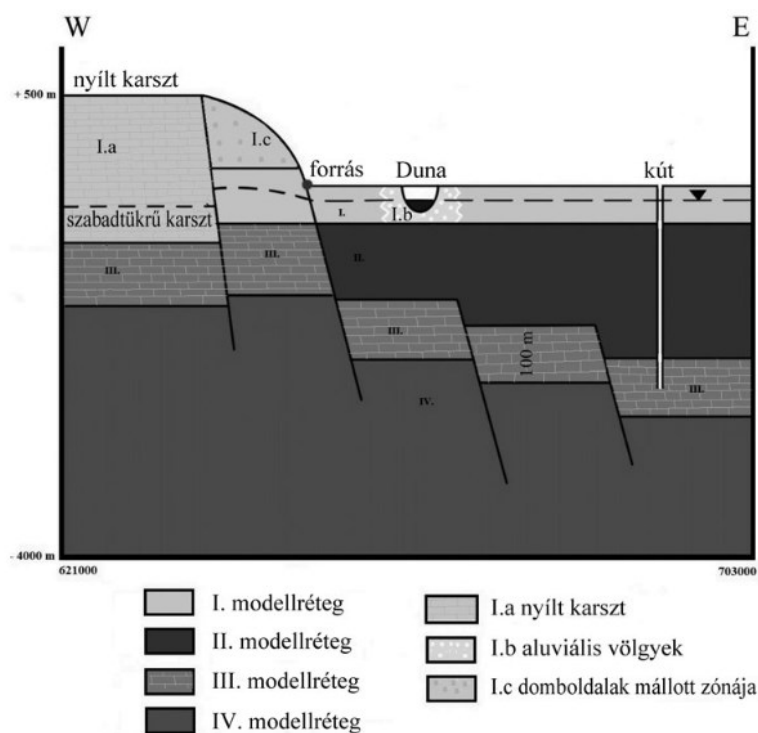
(3.a) Modelljében külön talajvíztartó és karsztvíztartó modellréteget határozott meg egy közöttük elhelyezkedő vastag, rossz vízvezető, paleogén–neogén komplex réteggel. A karsztvíztartó alatt egy további, kevésbé karsztosodott rosszabb vízvezető réteget definiált. Így a mély áramlású karsztvízrendszer elkülönül a sekély vízáramlási (talajvíz)-rendszertől (5. ábra). (3.b) A hidraulikus folytonosság elve alapján, a medencehidraulikai értékelésben a teljes

²⁵ Sűrűségfüggő vízáramlás, advektív és diszperzív hőtranszport, tömeg vagy tartózkodási idő háromdimenziós porózus és diszkrét repedezett porózus közegben

²⁶ A COMSOL Multiphysics program, mellyel a nyomást, hőmérsékletet és a fluxust számolhatjuk a modellezett medencerészre.

összetet egyben vizsgáltuk. A modellezés során valós földtani szelvény alapján levezetett hidrosztratigráfiai kategóriákat használtunk.

(4.a) A terület határainak kijelölése során “a Dunántúli-középhegység fő karsztvízáramlási rendszerén belül egy kisebb területet választott ki” a modellezés céljára (Poyanmehr 2016) (p. 64). (4.b) A Budai-termálkarszt medencehidraulikai elemzésből levezetett hidraulikai határából indultunk ki a modellezés során.



5.ábra Vízföldtani modellrétegek, I. — a talajvíztartó zóna és a nyíltkarszt terület (talajvíz tározó réteg); II. — a vízzáró-félig áteresztő paleogén és neogén rétegcsoport; III. — a karsztrendszer felső 100 méteres zónája (főkarszt réteg) és; IV. — az „üde” karszt, ami a karsztrendszer fekéjéig terjed (Poyanmehr 2016 3. ábra, p 63)

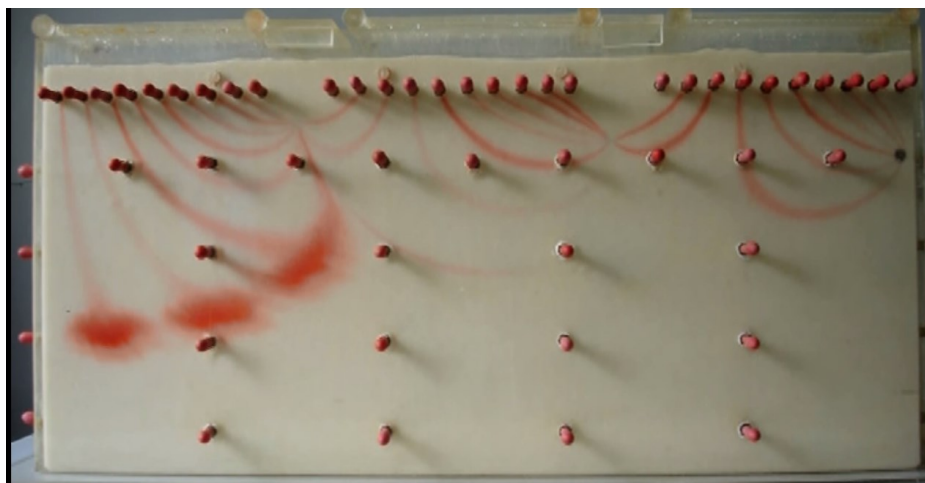
(5.a) A szerző azt írja, hogy a talajvíz potenciálszint alakítása érdekében a paleogén-neogén modellréteget további három különböző homogén, illetve anizotróp rétegre osztotta és így vált lehetővé a lokális és az intermedier áramlási rendszer közötti vízmegosztás és a potenciálviszonyok befolyásolása (Poyanmehr 2016). (5.b) A modellezésünkben a hierarchikus rendszerek kialakulásához nem volt szükséges a modellrétegek befolyásolása.

(7.a) Poyanmehr három irányt erősített meg modellezésével, melyek kijelölik a források felé történő áramlásokat. (7.b) Dolgozatomban kijelöltem a medencehidraulikai feldolgozásból levezetett különböző rendű áramlási rendszerek utánpótlódási és megcsapolódási területeket (5.1. ábra, D), valamint az intermedier és regionális áramlási irányokat (7.2 ábra, D). Ezekkel vettem össze a modellezésből levezetett hierarchikus áramlási rendszereket.

6) A különféle 2D és 3D numerikus modellek mellett vajon vannak-e a szakterületen különféle fizikai modellek a bemutatott jelenségek tanulmányozására? Ilyen modelleket viszonylag könnyen lehetne építeni, akár az elektromos analógia alapján is. (A VITUKI-ban valaha volt is egy működőképes modellező

laboratórium.) Perspektivikusnak látja-e a fizikai modellezést szakterületén? Egy jó fizikai kísérletsorozat nem csak a stacionárius állapotot modellezheti bármilyen bonyolult háromdimenziós geometria esetén, hanem az egyes peremfeltételek megváltozása (pl. vízkivételre) következtében kialakuló tranziensek is jellemezhetők lennének.

Bírálom ismét egy előre mutató kérdést tett fel. A felszínalatti térrész vízáramlási, szennyezési, vízkivételi vagy utánpótlódás változási folyamatai, azaz a stacioner és tranziens folyamatok is bemutatathatók egyszerű fizikai modellekkel. Ilyen kísérleteket mi is készítettünk egyrészt ismeretterjesztő rendezvények céljaira és a földrajz tanárjelöltek oktatására²⁷. Ezeken túlmenően egyetemi oktatási célból jól hasznosítható videók elérhetők a hálózaton²⁸.



5.ábra Komplex felszínalatti vízáramlási homokdoboz modell (Foto: Xing Liang, in Mindentudás Egyeteme 2011, Mádlné Szőnyi Judit)

Ezek mellett készült olyan fizikai modell is, amely célzottan a hierarchikusan fészkelte felszínalatti vízáramlásokat mutatja be (Liang és mtsi. 2010). A szerzők egy áramlási rendszer homokdoboz modellt készítettek. Ez lehetővé teszi a komplex vízáramlási rendszerek kialakulásának és jellemzőinek megfigyelését²⁹ (5. ábra). A kis homokmedence modellben több utánpótlási és megcsapolási hely található. Megfigyelhető a medence regionális lejtésének és a lokális esés változásának hatása homogén és heterogén körülmények között, de alkalmas transzportfolyamatok bemutatására is (Liang és mtsi. 2010).

7) Az összegyűjtött és bemutatott adatok nagyon különböző időkből származnak. Van-e elvi és gyakorlati lehetőség arra, hogy el lehessen különíteni egyes

²⁷ Ezeket a már említett [Geometodika](#) cikk részletesen tárgyalja, de [videókat](#) is készítettünk, melyeket a felszínalatti vízáramlásokkal foglalkozó blogon közzétettünk

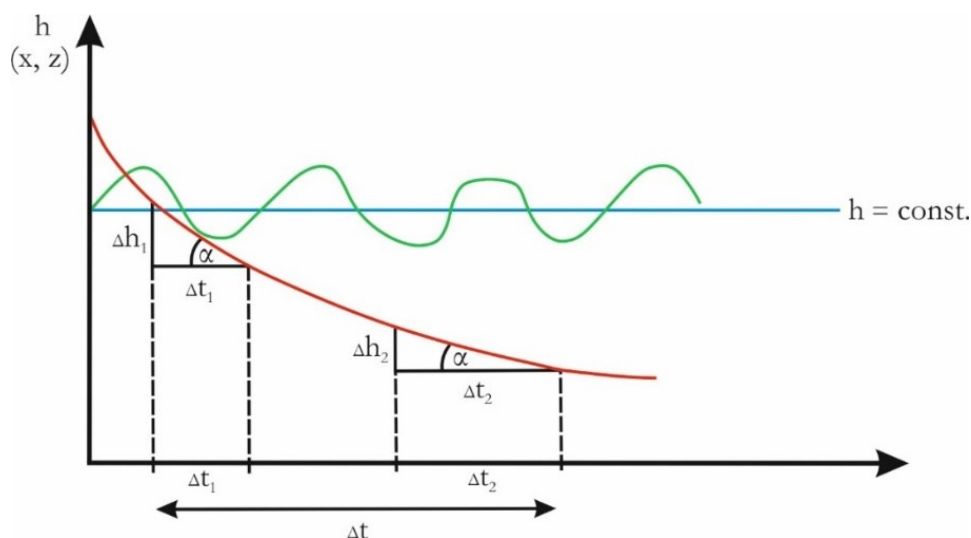
²⁸ Szemléltetik: az utánpótlódási és megcsapolódási területeket, a vízfogó, vízvezető rétegeket, vízszintet, annak változékonyságát, a folyókat, tavakat és azok kölcsönhatását a felszínalatti vizekkel. Segítségükkel bemutatathatók az utánpótlódás és a megcsapolódás megnövekedésének hatásai homogén és heterogén rendszerre vonatkozóan egyaránt. A kísérletek alapján számolhatók gradiensek, a vízsebesség, fluxus, követhető a víztermelés hatása, szennyező felszínalatti terjedése, azaz megfigyelhetők a kapcsolódó transzport folyamatok is. [Lab 5 Groundwater Model 1 - YouTube](#), [Aquifer Demonstration - YouTube](#)

²⁹ A regionális, intermedier és lokális áramlási rendszerek a hidraulikus emelkedési magasság, áramlási irány és elérési idők alapján kvantitatívan jellemezhetők. Emellett az egyes rendszerek léptéke, alakja és az áramlási pályák, az áramvonalak közvetlenül megfigyelhetők.

időintervallumokat az elmúlt évtizedeken belül? (Például új és régi vízkivételek hatását?)

Egyetértek bírálómmal abban, hogy a bányavíz-telenítés miatt bekövetkeztek trendszerű változások (Csepregi in Alföldi és Kapolyi szerk. 2007; Kovács és Erőss 2017 stb.), így az időfüggés kritikus a medencehidraulikai értelmezés szempontjából. Ugyanakkor az adatfeldolgozás során speciális közelítést alkalmazunk. Abból indulunk ki, hogy a feldolgozott adatok ugyan nem egy időpillanatot reprezentálnak, de feltételezzük, hogy az adott térbeli léptékben az időbeli eltérésekből adódó hiba elhanyagolható. Azaz a permanens áramlási tér értelmezhető³⁰. Ez megengedi az időbeli változásokat, sőt a trendszerű változásokat is, amennyiben igaz az említett kritérium (6. ábra). A gyakorlatban ezért az 1980-as évek előtti adatokkal dolgozunk, amikor az intenzív vízkivétel trendszerű hatása még kizárható.

Mindezek ellenére feltettem a kérdést, hogy ez a hatás hol és milyen mértékben okozhat hibát az elvégzett hidraulikai értékelésben: (1) hol látszik a befolyásoltsága a potenciometrikus kontúrtérképek alapján; illetve (2) milyen mértékű hatásokat okozott a Budai-termálkarszt területén a bányavíz-telenítés a megfigyelőkutak adatai alapján.

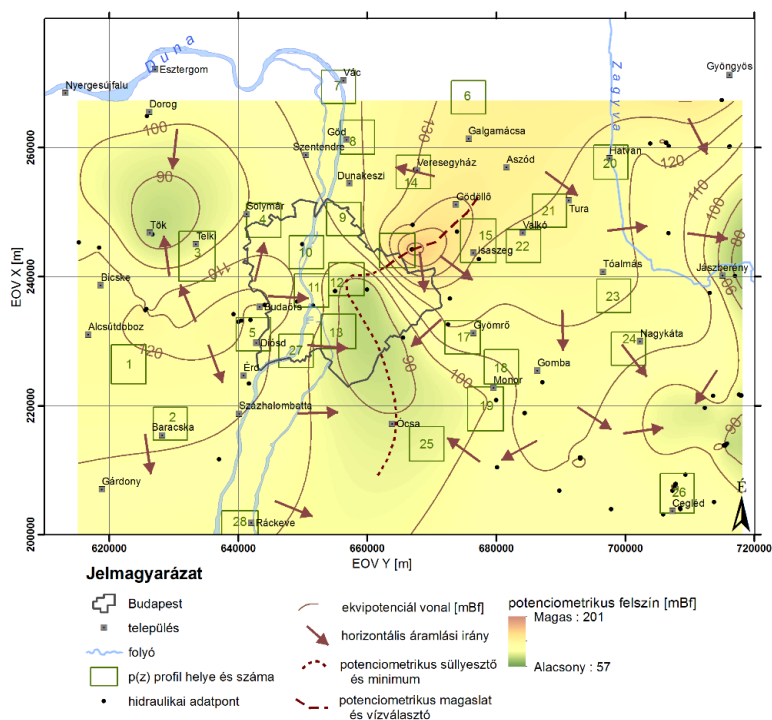


6. ábra A stacioner vagy permanens állapot értelmezésének lehetséges feltételei medencehidraulikai kutatás során (kék vonal: $h = \text{const.}$; zöld görbe: $h = h_{\text{atl}}$, piros görbe: $h = f(t) < \Delta h$, ahol Δh a probléma hibahatára) (Mádlné Szőnyi és mtsi. 2013b nyomán) (3.2. ábra 26. p D)

Az elvégzett feldolgozás alapján Dorog és környezete potenciáleloszlása „zavart”³¹ (7. ábra).

³⁰ Amikor ezzel a feltételezéssel élünk, abból indulunk ki, hogy a hidraulikus emelkedési magasság változások különbségei (Δh) az adott medenceléptékben vizsgálva beleférnek a probléma hibahatárába.

³¹ A tatabányai és a nagyegyházi vízemelések nagyobb vízszintsüllyedést okoztak Dorog térségében, mint amit a dorogi bányászat okozott a Pilisben az 1960-as években (Csepregi in Alföldi és Kapolyi szerk. 2007). A Dorog 120-as megfigyelőkútban az 1960-as 120 mBf-es vízszintek 1991-re 95 mBf-re csökkentek. Ez a hatás jelenhet meg a Tök és Dorog közötti $h = 90\text{--}100$ mBf-es potenciálértékekben ($z = (-375)$ mBf szeletközpont), melyek depressziós anomáliát formálnak (7. ábra). Az elemzett potenciometrikus térképeken több ilyen víztelenítéssel összefüggésbe hozható anomáliát nem tudtam azonosítani.



7. ábra Potenciometrikus térkép a $z = (-250)$ – (-500) mBf eleváció között szűrőzött kutakból szerkesztve (szelektközépsík: $z = (-375)$ mBf; ekvipotenciál köz: 10 m).

A hidraulikus emelkedési magasság értékeket kontúrok és színárnyalatok jelzik (4.7. ábra D)

Tézisek:

Ezek egy része (sőt a Budai-termálkarsztra vonatkozók nagy része) – más szerzőknél is megtalálható.

Bírálómmal egyetérttek abban, hogy a Budai-termálkarsztra vonatkozó felismerések sokasága nehezen megítélhetővé teszi a megállapítások újdonság értékét, ugyanakkor a dolgozat sajátos céljaiból és a munkámban bemutatott eredményekből levezethető egyedi megállapításokat tükröznék. Természetesen egy részük megjelent korábban publikációkban, de ezekben minden esetben társszerző voltam. A tézisek nem tartalmaznak olyan eredményeket, melyek más szerzőknél közreműködésem nélkül előfordulnának. A publikált eredményekhez képest is újra gondoltak a megállapítások, mind a kontextus, mind az értelmezés tekintetében.

Még egyszer megköszönöm bírálóm alapos munkáját és építő észrevételeit.

Budapest, 2021. február 14.

Mádlé Szőnyi Judit

Mádlé Szőnyi Judit

Hivatkozások társszerzőkkel írt munkákra:

- Czauner B. Mádlné Szőnyi J. (2020) Szemelvények az elmúlt két évtized ELTE-n végzett, medenceléptékű hidrogeológiai kutatásaiból. 150/4, 545–570. DOI: 10.23928/foldt.kozl.2020.150.4.545.
- Galsa A. Szijártó M. Tóth Á. Pedretti D. Mádl-Szőnyi J. (2021) Interaction of topography- and salinity-driven groundwater flow in synthetic and real hydrogeological systems, manuscript.
- Havril T., Molson J. W., Mádl-Szőnyi J. (2016) Evolution of fluid flow and heat distribution over geological time scales at the margin of unconfined and confined carbonate sequences - A numerical investigation based on the Buda Thermal Karst analogue. Marine and Petroleum Geology. http://real.mtak.hu/80485/1/Havril_et_al_2016_BTK_u.pdf
- Mádlné Szőnyi Judit, Czauner Brigitta, Simon Szilvia, Erőss Anita, Zsemle Ferenc, Pulay Eszter, Havril Timea (2013) Hidrogeológia <https://ttk.elte.hu/dstore/document/868/book.pdf>
- Mádlné Szőnyi Judit és Makádi Mariann (2019) Vízszállító rendszerek a földkéregben. A felszín alatti vizekkel kapcsolatos új ismeretek és tanításuk lehetőségei. Geometodika.
- Mádl-Szőnyi J., Tóth Á. (2015) Basin scale conceptual groundwater flow model for an unconfined and confined thick carbonate region. Hydrogeology Journal 23 (7), pp. 1359-1380
- Mádl-Szőnyi J., Czauner B., Iván V., Tóth Á., Simon Sz., Erőss A., Bodor P. (2019) Confined Carbonates – Regional scale hydraulic interaction or isolation? Marine and Petroleum Geology. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.006>
- Mádl-Szőnyi J. (2021) Basin-scale groundwater flow pattern in carbonate systems: from Buda Thermal Karst to further karst regions. Karlsruhe Karst Lectures. 2021. 01.25.
- Mádl-Szőnyi J. Erőss A. Csondor K. Iván V. Tóth Á. (2021) Hydrogeology of the Karst Regions in Hungary in press
- Szijártó M., Galsa A., Tóth Á., Mádl-Szőnyi J. (2019) Numerical investigation of the combined effect of forced and free thermal convection in synthetic groundwater basins. Journal of Hydrology. Vol. 572. pp. 364-379.
- Szijártó M., Galsa A. Tóth Á. Mádl-Szőnyi J. (2021) Numerical analysis of the potential for mixed thermal convection in the Buda Thermal Karst, Hungary. Journal of Hydrology:Regional Studies. Vol. 34C 100783
- Tóth, Ádám, Attila Galsa, and Judit Mádl-Szőnyi (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 (2020): 103344.

Hivatkozott egyéb munkák:

- An R., Jiang X.W., Wang J.Z., Wan L., Wang X.S., Li H. (2015) A theoretical analysis of basin-scale groundwater temperature distribution. Hydrogeol J 11. doi:10.1007/s10040-014-1197-y
- Andreo B., Gil-Márquez J.M., Mudarra M., Linares L., Carrasco F. (2016) Hypothesis on the hydrogeological context of wetland areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaén provinces, Southern Spain) Environmental Earth Sciences 75: 759.
- Bredehoeft J.D. (2018) The Toth Revolution. Groundwater, 56(1), pp. 157-159.
- Cardenas M. B., Jiang X. W. (2010) Groundwater flow, transport, and residence times through topography-driven basins with exponentially decreasing permeability and porosity. Water Resour. Res. 46 (11): W11538.
- Chabour, N., Dib, H., Bouaicha, F. et al. A conceptual framework of groundwater flowpath and recharge in Ziban aquifer: south of Algeria. Sustain. Water Resour. Manag. 7, 2 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00483-8>
- Csepregi A. (2007) A karsztvíztermelés hatása a Dunántúli-középhegység vízháztartására. – In: Alföldi L. & Kapolyi L. (szerk.) Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli középhegységben. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet kiadványa, Budapest, pp. 103–113.
- Diersch H.-J.G., Kolditz O., (2002) Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges, Advances in Water Resources, Volume 25, Issues 8–12, 2002, Pages 899-944, ISSN 0309-1708, [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00063-5).
- Evans D., Nunn J. (1989): Free thermohaline convection in sediments surrounding a salt column. Journal of Geophysical Research, 94, 12413-12422.
- Fodor L. (2011) A Budai-hegység földtani K-Ny-i irányú földtani szelvénye. In: A. Mindszenty (szerk.) (2013) Földtani értékek és az ember. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest.

- Gabriela Patricia Flores Avilés, Marc Descloitres, Céline Duwig, Yvan Rossier, Lorenzo Spadini, Anatoly Legchenko, Álvaro Soruco, Jaime Argollo, Mayra Pérez, Waldo Medinaceli (2020) Insight into the Katari-Lago Menor Basin aquifer, Lake Titicaca-Bolivia, inferred from geophysical (TDEM), hydrogeological and geochemical data, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 99, 2020, 102479, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102479>
- Gleeson T., Manning A.H. (2008) Regional groundwater flow in mountainous terrain: three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. *Water Resour. Res.* 44 (10): W10403.
- Goderniaux P., Davy P., Bresciani E., de Dreuzay J. R., Le Borgne T. (2013) Partitioning a regional groundwater flow system into shallow local and deep regional flow compartments. *Water Resour. Res.* 49 (4): pp. 2274–2286. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20186>
- Guillou-Frottier L., Duwiquet H., Launay G., Taillefer A., Roche V., and Link G (2020) On the morphology and amplitude of 2D and 3D thermal anomalies induced by buoyancy-driven flow within and around fault zones. *Solid Earth*, 11, 1571–1595, 2020 <https://doi.org/10.5194/se-11-1571-2020>
- Hongze Gao, Groundwater Modeling for Flow Systems with Complex Geological and Hydrogeological Conditions, *Procedia Earth and Planetary Science*, Volume 3, 2011, Pages 23-28, ISSN 1878-5220, <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.061>.
- Haitjema H. M., Mitchell-Bruker S. (2005) Are water tables a subdued replica of the topography? *Ground Water* 43 (6) pp. 781–786.
- Havril T. (2018) Numerical simulation of groundwater flow and heat transport over geological time scales at the margin of unconfined and confined carbonate sequences. Doktori disszertáció. ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest. 94 p.
- Holczer et al. 2010 Thermohaline Groundwater Circulation to Flow and Transport Parameters: A Numerical Study Based on Double-Diffusive Convection above a Salt Dome. *Transport in Porous Media*, 88, 771-791. <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9480-4>
- Gil-Márquez J.M., J. Sültenfuß, B. Andreo, M. Mudarra, Groundwater dating tools (3H, 3He, 4He, CFC-12, SF6) coupled with hydrochemistry to evaluate the hydrogeological functioning of complex evaporite-karst settings, *Journal of Hydrology*, Volume 580, 2020, 124263, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124263>.
- Jiang X.W., Wang X.S., Wan L., Ge S. (2011) An analytical study on stagnation points in nested flow systems in basins with depthdecaying hydraulic conductivity. *Water Resour. Res.* 47: W01512. doi:10.1029/2010WR009346
- Király L. (1994) Groundwater flow in fractured rocks: models and reality. 14th Mintrop Seminar über Interpretationsstrategien in Exploration und Produktion, Ruhr Universität Bochum, 159, pp. 1-24.
- Kiraly, L., Jeannin, P. Y., & Sauter, M. (1998). Introduction to karst modelling. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 16, 1–6.
- Klemes V. (1986) Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*. 31:1, 13-24.; <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Kovács J., Erőss A. (2017) Statistically optimal grouping using combined cluster and discriminant analysis (CCDA) on a geochemical database of thermal karst waters in Budapest. *Applied geochemistry*, 84, pp. 76-86.
- Liang X, Liu Y, Jin M, Lu X, Zhang R (2010) Direct observation of complex Tóthian groundwater flow systems in the laboratory. 2010 Hydrological Processes. <https://doi.org/10.1002/hyp.7758>
- Martinecz Á. (2014) hidrosztratigráfiai értékelés és áramkép szimuláció a Budai Termálkarszton. Diplomamunka ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék Budapest. p. 110.
- Molson, J., Frind, E., (2013) FLONET/TR2 User Guide Version 3.0 June 2013: A Two-Dimensional Simulator for Groundwater Flownets, Contaminant Transport and Residence Time, Université Laval, Québec City and University of Waterloo, 52 p.
- Molson J. W., Frind E.O. (2016) Heatflow-Smoker Version 8.0 – Density-dependent flow and advective-dispersive transport of thermal energy, mass and residence time in three dimensional porous or discretely-fractured porous media. Université Laval. Canada.
- Oreskes N., Shrader-Frechette K., Belitz K. (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263 (5147), pp. 641-646.
- Pérez-Quezadas J., Cortés-Silva A., Salas-Ortega M. del R., Araguás-Araguás L., Morales-Puente P., Carrillo-Chávez A. (2017) Evidencias hidrogeoquímicas e isotópicas sobre el origen del agua subterránea en la cuenca hidrográfica Río Actopan, Estado de Veracruz. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* Vol. 34 No.1 México abr. 2017.

- Pingheng Yang, Qun Cheng, Shiyu Xie, Jianli Wang, Longran Chang, Qin Yu, Zhaojun Zhan, Feng Chen, Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China, *Journal of Hydrology*, Volume 549, 2017, Pages 50-61, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.054>.
- Poyanmehr Z. (2016) A felszín alatti vízáramlás modellezése Budapest tágabb területén. *Földtani Közlöny*, 146 (1), pp. 61-70
- Rubin H. (1976) Onset of thermohalin convection in a cavernous aquifer. *Water Resources Research*, 12/2, 141-147., <https://doi.org/10.1029/wr012i002p00141>
- Sarkar A., Nunn J., Hanor S.J. (1995) Free thermohalin convection beneath allochthonous salt sheets: An agent for salt dissolution and fluid flow in Gulf Coast sediments. *Journal of Geophysical Research*, 100, 18085-18092
- Stracek O., Geršl M., Faimon J., Bábek O. (2019) The geochemistry and origin of fluids in the carbonate structure of the Hranice Karst with the world's deepest flooded cave of the Hranická Abyss, Czech Republic *Applied Geochemistry*, Volume 100, January 2019, pp. 203-212.
- variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media, *J. Contam. Hydrol.*, 23, 1 – 44, doi:10.1016/0169-7722(95) 00088-7.
- Szijártó M. (2017) Topográfiai és hőmérsékleti különbségek együttes hatása által vezérelt felszín alatti vízáramlás numerikus modellezése szintetikus egységmedencében. MSC diplomamunka. Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, ELTE, Budapest p. 70.
- Therrien R, Sudicky EA (1996) Three-Dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media, *Journal Contam Hydrology*, 23, 1-44.
- Therrien R, McLaren RG, Sudicky EA and Panday SM (2006) *Hydrosphere: A Three-Dimensional Numerical Model Describing Fully Integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport*, 349 pp. Groundwater Simul. Group, Waterloo, Ont
- Tóth Á. (2018) A Balaton-felvidék felszínalatti vízeinek hidraulikai kapcsolata a Bakonnyal és a Balatonnal. Doktori disszertáció. ELTE TTK, Budapest.
- Tóth J. (1970) A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology* 10 pp. 164-176.
- Tóth J. (2009) *Gravitational systems of groundwater flow theory, evaluation, utilization*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Turcotte D., Schubert G. (1982) *Geodynamics: Applications of continuum mechanics to geological problems*, John Wiley, New York.
- Yang J.W., Feng Z.H., Luo X.R., Chen Y.R. (2009): On the role of buoyancy force in the ore genesis of SEDEX deposits: Example from Northern Australia. *Science in China Series D: Earth Science*, 52, 452., <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0043-x>
- Yang P., Dan L., Groves C., Xie S. (2019) Geochemistry and genesis of geothermal well water from a carbonate–evaporite aquifer in Chongqing, SW China, *Environmental Earth Sciences*, January 2019 78: 33. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8004-3>.
- Yang, P., Dan, L., Groves, C. Shiyu Xie Geochemistry and genesis of geothermal well water from a carbonate–evaporite aquifer in Chongqing, SW China. *Environ Earth Sci* 78, 33 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8004-3>
- Wang J., Jin M., Lu G., Zhang D., Kang F., Jia B. (2016) Investigation of discharge-area groundwaters for recharge source characterization on different scales: The case of Jinan in northern China. *Hydrogeology Journal*, 24 (7), pp. 1723-1737.
- Welch LA, Allen DM (2012) Consistency of groundwater flow patterns in mountainous topography: Implications for valley bottom water replenishment and for defining groundwater flow boundaries. *Water Resources Research* <https://doi.org/10.1029/2011WR010901> Ke-Yu
- Zhao, Xiao-Wei Jiang, Xu-Sheng Wang, Li Wan, Jun-Zhi Wang, Heng Wang, Hailong Li, An analytical study on nested flow systems in a Tóthian basin with a periodically changing water table, *Journal of Hydrology*, Volume 556, 2018, Pages 813-823, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.051>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416306187>)
- Zimmerman W. B. (2006) *Multiphysics modeling with finite element methods*. World Scientific Publishing Company, London, 422 p.