

2003 JAN 13.



Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Geológiai Tanszékcsoport

Általános és Történeti Földtani Tanszék

Gyűjtő: B-C18/2003

15.

1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C
Levelezési cím: 1518 Budapest, Pf 120

Telefon: 209-0555/8025

Duna-Ipoly Nemzeti Park
Dr. Vas János Igazgató Úr részére

Tárgy: Kutatási jelentés a Budapest,
II. József-hegyi B0-barlangról

Budapest, II. Hűvösvölgyi út 52.

Hiv: 3415/8/2001., 289/2/2001

DUNA-IPOLY NEMZETI PARK IGAZGATÓSÁG Budapest	
Iktatás időpontja: ERKEZETT	Mellékletek:
Iktatókönyv száma: 2002 JAN 31. alszáma:	834/2002.
Előirat száma: 3415/2001.	Ügyintéző: Juhász M.

Tisztelt Igazgató Úr!


2001. tavaszán a Budapest, II. József-hegyi B0-barlangban víznyomjelzéses kísérlet elvégzésére kértünk és kaptunk Önöktől engedélyt a hivatkozott ügyiratszámú levélben.


Munkánkról előzetes beszámolót már benyújtottunk Önöknek. Ezúttal az elkészült végleges jelentésben foglaljuk össze tapasztalatainkat és eredményeinket, ill. értékeljük ki a kísérletet.

Munkánk támogatásáért, mellyel Melegh Csongor geológus szakdolgozónknak is segítséget nyújtottak, ezúton is köszönetet mondunk.

További sikeres együttműködésünkben bízva, tisztelettel:

Budapest, 2002 január 25-én.

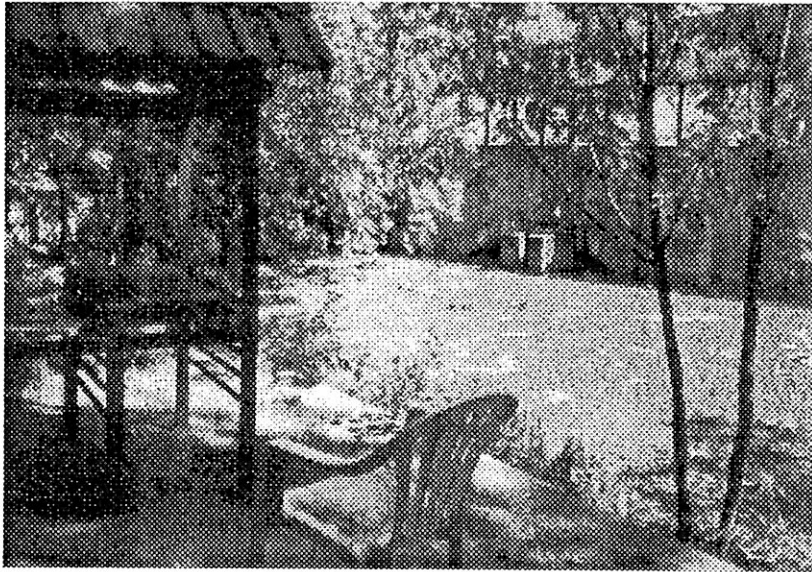

Dr Leél-Őssy Szabolcs
témavezető


Dr. Nagymarosy András
tanszékvezető egyetemi docens



ELTE TTK ALKALMAZOTT ÉS KÖRNYEZETFÖLDTANI TANSZÉK

A Budai Termáلكarszt-rendszer hidrodinamikájának vizsgálata nyomjelzéssel



Megbízó:

Dr. Tardy János, helyettes államtitkár
Környezetvédelmi Minisztérium, Természetvédelmi Hivatal

Témafelelős:

Dr. Mindszenty Andrea, tanszékvezető egyetemi tanár
ELTE TTK Alkalmazott és Környezetföldtani Tanszék

Közreműködők

Mádlné Dr. Szőnyi Judit, egyetemi adjunktus

Dr. Leél-Óssy Szabolcs, egyetemi adjunktus

Általános és Történelmi Földtani Tanszék

Dr. Kádár Mihály, tudományos főmunkatárs

Országos Közegészségügyi Intézet

Angelus Béla, egyetemi tanársegéd

Zsemle Ferenc, egyetemi tanársegéd

Erőss Anita, doktorandusz

Kalinovits Sándor, geológus-barlangász

Segesdi Judit, egyetemi hallgató

A projekben szakmai tanácsadóként közreműködött:

Prof. Dr. Müller Imre, hidrogeológus, CHYN, Neuchatel, Svájc

Tartalomjegyzék

1	Összefoglalás	2
2	Előzmények	4
2.1	A nyomjelzési kísérlet elvégzésének indokoltsága.....	4
2.2	A kísérlet alapjául szolgáló korábbi kutatások.....	4
2.3	A kísérlet megtervezése	4
2.4	A szerződésben vállalt feladatok	6
2.5	Engedélyeztetés	7
3	Elvégzett feladatok	8
3.1	A bejuttatási hely kiválasztása, felmérése.....	8
3.2	Az alkalmazott nyomjelző anyagok – elméleti háttér	10
3.2.1	Nyomjelzés Tinopal CBS-X optikai fehérítő anyaggal.....	10
3.2.2	Nyomjelzés halofil baktérium fágjával.....	12
3.3	Előkísérletek.....	19
3.3.1	A tinopal háttérkoncentráció mérése	19
3.3.2	Modellkísérlet a H 40 bakteriofág törzs túlélésének vizsgálatára	21
3.4	A nyomjelzési kísérlet lebonyolítása.....	22
3.4.1	Előöblítés, a jelzőanyagok bejuttatása	22
3.4.2	Mintavételezés.....	23
3.4.3	Fajlagos vezetőképesség és hőmérsékletmérések	24
3.4.4	A Tinopal mérése.....	25
3.4.5	A fágok mérése	25
3.4.6	Mérési, észlelési eredmények.....	25
3.5	Forráshozam-mérés.....	27
3.5.1	A Boltív forrás bemutatása	27
3.5.2	A medencetöltésre használt vízhozam meghatározása	29
3.5.3	A Malom-tó zsilipjén elfolyó vízhozam meghatározása	29
3.5.4	A mérési eredmények kiértékelése.....	31
4	Nyomjelzési, forráshozam-mérési eredmények értelmezése, javaslatok	39
5	Mellékletek jegyzéke.....	41
6	Fotók jegyzéke	42
7	Irodalomjegyzék	44

1 Összefoglalás

Jelentésünkben összefoglaltuk a József-hegy (B0 barlang) és a Lukács-fürdő között 2001. augusztus 8-án bakteriofág és Tinopal alkalmazásával elvégzett nyomjelzési teszt és a jelzőanyag detektálás (2001. augusztus 7- 2001. október 5.) körülményeit és eredményeit. Tárgyaltuk a nyomjelzési kísérlet értelmezéséhez nélkülözhetetlen – a Boltív-forráson 2001. (június 6.) augusztus 7. és 2001. november 8. között folytatott – hozammérés módját és az idősből levonható következtetéseket.

A kísérlet kiinduló hipotézisét a PHARE PROJECT 134/2 jelentésének VI. feladata „A barlangi nyelőképeség vizsgálata” (Sárváry et al., 1992) következtetéseiből vettük és ennek megfelelően a beérkezést 10 óra és 42 nap között vártuk. A vizsgálatot 2000. évi Zárójelentésünk keretében készítettük elő, akkor választottuk ki a bejuttatási helyet és a használt jelzőanyagokat. Felhívtuk a figyelmet a Malom-tónál kilépő vízmennyiség mérésének szükségességére, melynek technikai megoldását akkor még nem sikerült megtalálnunk.

A kísérlet célja távlati terveinkhez illesztett „...egy háromdimenziós hipotézis – ellenőrző válasz – modell felállítása a Budai Termálkarszt rendszerre vonatkozóan” (1999. Évi Zárójelentés). A modell a karsztrendszer működésére vonatkozó hipotézisen nyugszik. A hipotézisalkotás feltétele a rendszer működésének jobb megértése. Elképzeléseink szerint ehhez járul hozzá a kísérlet, amely „elvégzése révén bizonyíthatjuk – az egyébként kézenfekvőnek tetsző megállapítást – a József-hegyi beszivárgási terület és a Malom-tó környéki karsztforrások kutak kapcsolatát”.

A Boltív-forráson kilépő vízhozam meghatározás célja is kettős volt. A források napi hozamváltozásai reprezentálják a karsztos vízadók általános válaszát a csapadékeseményekre, tehát hozzájárulnak a rendszer működésére vonatkozó – előzőekben említett – hipotézis megalkotásához. Másrészt közvetlenül segítik a nyomjelzési eredmények kiértékelését. A hozammérés megoldása – az emberi igénybevétel miatt – a vízmérleg elv alkalmazásával vált csak lehetővé. A Lukács-fürdő által a Molnár-János barlangba beépített csövön kivett és a Malom-tavon átfolyó vízmennyiség összegzése tájékoztat a kilépő víz relatív hozamváltozásairól. Ehhez a fürdő által felhasznált, továbbá a Malom-tó zsilipjén átfolyt vízmennyiség napi regisztrálását kellett elvégezzük.

A nagy gondossággal folytatott mérések ellenére jelzőanyag beérkezést nem tapasztaltunk. Azaz, a kézenfekvőnek látszó kapcsolatot – a használt injekciós hely és a Lukács-fürdő között – nem sikerült igazolnunk. Az általunk mért vízhozam adatok többszörösen meghaladták az archív adatok alapján várt értéket. Így már a hígulás miatt is lehetetlennek minősíthető a Tinopal detektálható mennyiségének beérkezése. A fágoknál elvben a hígulás nem zárta ki a beérkezés észlelését. A hígulás mellett még további két alternatíva merült fel a jelzőanyag eltűnésével kapcsolatban. Egyik, egy ma még ismeretlen – a B0 aknához kapcsolódó – 500 m³-nél nagyobb barlangüreg fogta fel az öblítővizet és a kétféle jelzőanyagot. Másik, hogy az anyag ugyan elérte a karsztvízszintet, de

nem a fürdő forrásai és kútjai, hanem közvetlenül a Duna felé vette az irányt és ott csapolódott meg. Sajnos a három alternatíva esetleges együttes fennállása is reális lehetőség, amely kutatócsoportunk adatai alapján ez idő szerint ugyancsak nem cáfolható.

Elvégzett munkánk a várthoz képest eltérő, de tudományos szempontból új gondolatokat felvető eredményre vezetett. A nyomjelzési kísérlettel véleményünk szerint úgy lehetne tovább próbálkozni, hogy a Malom-tótól a Rózsadomb felé távolodva – szerkezeti vonalakat, mint preferált vízáramlási pályákat követve – fúrásokon keresztül történő injektálást alkalmaznánk. Közben a napi hozammérés folytatására, a mérési körülmények pontosítására és a csapadék-forráshozam összefüggés megértésére kellene a továbbiakban igen nagy figyelmet fordítani. Ez az út, amelyen a kitűzött távlati cél megvalósítása elősegíthető.

2 Előzmények

2.1 A nyomjelzési kísérlet elvégzésének indokoltsága

„... indokoltnak tartjuk – a barlangi nyelőképességet vizsgáló archív jelentés konklúziójával összhangban – nyomjelzési kísérlet elvégzését a József-hegyi-barlang (Solárium-terem aknája, ill. Szeréna úti fal tetején található akna) és a Duna menti források, kutak (kiemelt figyelemmel a Lukács-fürdő környezetére) között. Ezeknek a méréseknek az elvégzése révén bizonyíthatjuk – az egyébként kézenfekvőnek tetsző megállapítást – a József-hegyi beszivárgási terület és a Malomtó környéki karsztforrások-kutak kapcsolatát” (Idézet az 1999. évi Zárójelentésünk II. részének Javaslatok c. fejezetéből).

2.2 A kísérlet alapjául szolgáló korábbi kutatások

A József-hegyi PHARE PROJECT 134/2 jelentésének VI. feladata "A barlangi nyelőképesség vizsgálata" volt. Az erről készült beszámoló jelentés (Sárváry et al., 1992) szerint az elvégzett nyeletés igazolja, hogy a továbbiakban lehetséges nyomjelzési kísérletet végezni a József-hegyi barlang és a Szt. Lukács-fürdő Malomtavi forrása között. A nyelőképesség vizsgálata alapján ugyanis a József-hegyi barlang legmélyebb pontján a Solárium-terem aknájában a felszínről lefolyó vizek közel 400 l/perc hozammal képesek lefolyni a karsztvízszint ill. a források irányában. Sárváry et al. (1992) megállapítása szerint – a nemzetközi tapasztalatok alapján – folyamatos barlangjárat és bűvópatak (?) feltételezésével legalább 100 m/óra sebességgel a víz 9,6 azaz közel 10 óra alatt képes megtenni a 960 m-es légvonalbeli távolságot. Másnak ítéli meg a helyzetet, ha az egykori hévízszállító járatok eltömődtek. Ekkor a nyomjelző anyag első beérkezésének várható időtartamát – 1 m/órás átlagos áramlási sebesség figyelembe vételével – két nagyságrenddel nagyobbra, azaz 42 napra becsüli.

Jelzőanyagként Sárváry et. al. (1992) a semlegesnek tekintett NaCl-ot javasolja, mivel a forrás vize gyógyfürdőt táplál. A jelzett víz megjelenését a beérkezési helyen a víz vezetőképességének mérésével kívánja elvégezni. A javaslattevők véleménye szerint a fürdő valamennyi melegforrását, mint megfigyelési pontot kell számításba venni.

A javaslat számos hidraulikailag fontos kérdést vet föl. A Solarium-akna aljának tengerszint feletti magassága 26 méterrel van a karsztvíznívó fölött. Kérdés, hogy az akna alja hogyan kapcsolódik a keveredési korrózió övéhez (jelenlegi karsztvíznívó), illetve az ott található, feltehetően kitágított járatrendszerhez. Azaz feltételezhetünk-e egy ténylegesen összefüggő járatrendszert a barlang alja és a Malomtó forrásbarlang között. Ez az eredmény, a karsztszerkezet majdani modellbe építése szempontjából rendkívül lényeges.

2.3 A kísérlet megtervezése

A kísérlet tervét 2000. évi zárójelentésük keretében készítettük el (1. ábra). A korábban javasolt betáplálási helyet (a József-hegyi-barlang Solarium-aknája)

elvetettük, mert az a barlang egyik bejárattól legtávolabb eső aknája. A nyomjelzéshez szükséges vizet csak rendkívül nagy költséggel és igen nehézkesen lehetett volna oda lejuttatni. Reális lehetőségként merült fel az ún. B0-ás barlang, ahol szintén végeztek nyeletési próbát a PHARE PROJEKT 134/2 VI. feladata keretében. Összességében 213 m³ vizet juttattak be és a vízbeadás intenzitása itt is 400 l/perc volt. Az akna, mint nyelő működött visszaduzzasztás nélkül (Sárváry et al., 1992).

A hely könnyen megközelíthető, a kísérlet szempontjából kedvező, hogy a Szeréna út túloldalán található egy tűzcsap, ahonnan a víz biztosítható.

Mivel a betáplálási hely magasan a karsztvíznívó fölött helyezkedik el, a kísérlet sikerének egyik alapvető feltétele, hogy a telítetlen zónában – egy függőleges sávban – telített körülményeket tudjunk létrehozni átmenetileg. Ennek érdekében a jelzőanyag bejuttatását megelőzően 5-10 l/sec hozammal vizet kell nyeletni a B0 barlangban. Ez a Szeréna úton keresztül átvezetett, a tűzcsapról biztosított vízzel lehetséges.

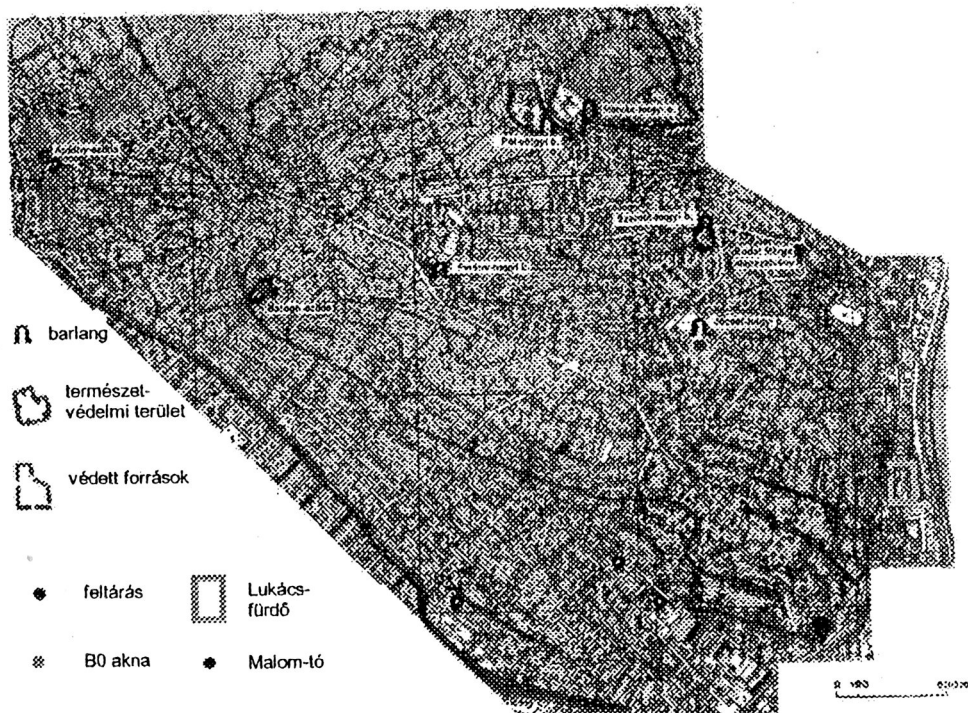
Az eredeti javaslattal (Sárváry et al., 1992) szemben a nyomjelzéshez – környezetvédelmi szempontból előnyösebb és korszerűbb megoldást – a bakteriofágok használatát javasoltuk. Kiegészítő mérésenként – a balneológiai és ivókúrás hasznosítást is figyelembe véve – tinopal használatát tartottuk megfelelőnek.

Sárváry et al. (1992) javaslata szerint a Lukács-fürdő valamennyi kútját és forrását, mint lehetséges mintázási helyet kell figyelembe venni.

A Malomtó esetében Kalinovits Sándor vállalta egy mintavevő cső beépítését a Molnár János barlang hideg vizes ágába.

A mintavétel bázishelyéül – mind a bakteriofágok mind a festékek tekintetében – a Malomtó mintavételi csövét javasoltuk.

A várható beérkezési időt az előzetes számítások alapján (Sárváry et al., 1992) igen tág határok között tudtuk becsülni, ezért legalább 1-2, legfeljebb 40-50 napos mintázásra kellett felkészülnünk.



1. ábra: A nyomjelzési kísérlet helyszíneinek áttekintő térképe

2.4 A szerződésben vállalt feladatok

A Környezetvédelmi Minisztérium Természetvédelmi Hivatala (Dr. Tardy János helyettes államtitkár) és az ELTE Alkalmazott és Környezetföldtani Tanszéke (Dr. Mindszenty Andrea tanszékvezető egyetemi tanár) 2000. november 20-án szerződést írt alá a "Rózsadombi termálkarszt monitoring optimalizálása" témában, a „Budai Termálkarszt hidrodinamikájának vizsgálata nyomjelzéssel” címmel. A feladat műszaki tartalma a következő volt (a szerződés alapján):

„A kísérlet elvégzésének várható menete: A nyomjelzési kísérletet két lépcsőben célszerű végrehajtani. Első lépésben a bakteriofágos vizsgálatot kell elvégezni, és annak eredménye alapján lehet a festéses – tinopal-lal, vagy fluoreszcens festékekkel történő – nyomjelzéskor szükséges jelzőanyag mennyiségét pontosan meghatározni. A tervezett nyomjelzésre a 2001. év tavasz-nyári időszakában kerülhet sor, a kiértékelést 2001. év őszére tervezzük.

A kísérlethez színreakciót nem, csak opalizálást okozó tinopal-t tervezünk használni. Ez a vártnál nagyobb koncentrációjú beérkezés esetén sem okoz vízelszíneződést, így tehát a Szt. Lukács gyógyfürdő vendégeit mindenképpen megkíméli a felesleges aggodalmaktól.

A tényleges nyomjelzési kísérletet megelőzően szükséges tájékoztató jellegű adatot beszerezni a Malomtó forrásának vízhozamáról. Ezt célszerűen egy rövid távú, a fluoreszcen hígulásán alapuló festési eljárással kísérjük megoldani, a barlangjárat-rendszerben a fürdő vízkivételi helye fölött betáplált igen kis mennyiségű festékekkel. Ily módon a műszer által a forráskilépésnél detektálható láthatatlan festék a Malomtó bukóján át maradéktalanul a csatornába jutna.”

A szerződés szerinti teljesítési határidő 2001. szeptember 30. volt, melynek 2001. november 30.-ra történő módosítását az alábbi indokok alapján kértük:

1. A nyomjelzési kísérlet tervezett júniusi megkezdését augusztus elejére kellett halasztanunk annak érdekében, hogy az egyik alkalmazott jelzőanyag (Tinopal) feltételezett háttérkoncentráció értékeiről egy hónapos mintavételezéssel bizonyosságot nyerjünk.

2. Az ELTE, ezen belül tanszékünk költözése szeptember hónap folyamán akadályozta a zavartalan munkavégzést.

3. A nyomjelzési mintavételezést 2001. október 5-én fejeztük be.

4. A Malom-tó forrás hozamának észlelését november 6.-ig folytattuk.

2.5 Engedélyeztetés

A festési eljárás lefolytatása engedélyköteles tevékenység. A munka lebonyolításához szükséges valamennyi hivatalos iratot megszereztük. Ezeket az 1.1-1.9. melléletek tartalmazzák.

3 Elvégzett feladatok

3.1 A bejuttatási hely kiválasztása, felmérése

A rózsadombi közvetlen beszivárgási pontok és a hegy lábánál fakadó hévforrások, ill. mesterséges kutak vize közötti közvetlen hidraulikai kapcsolat kimutatásának igénye a nyolcvanas évek óta többször felmerült. Gondot okozott a helyszín és a nyomjelző kiválasztása, a nagyon munka- és pénzigényes kísérlet megszervezése, finanszírozása. A Rózsadomb nagy része Budai Márgával fedett, vízáteresztő képessége korlátozott, a feltételezett beszivárgás csak a mészkő felszínére meghatározott érték ötöd része (Maucha, 1993 in Hazslinszky 1993). A városi lefedettség (úttestek vízzáró burkolata, épületek) is 30 % körüli. Ezt a képet azonban tovább tagolja a Rózsadombon felismert epikarsztos zóna (ld. zárójelentésünket a 2000-2001-ben elvégzett munkáról), amely részben átértékeli a beszivárgásról korábban alkotott elképzeléseinket. Ezen a területen ui. az epikarsztnak azon speciális kifejlődésével állunk szembe, ahol a karbonátos szálkőzet felett annak periglaciális folyamatok által érintett törmeléke található, számos esetben agyagos-löszös mátrixszal keverve Eddigi ismereteink szerint ennek a zónának számottevő víztározó képessége lehet, amelyből igen lassan szivároghat tovább a víz a karsztos telítetlen zónán keresztül.

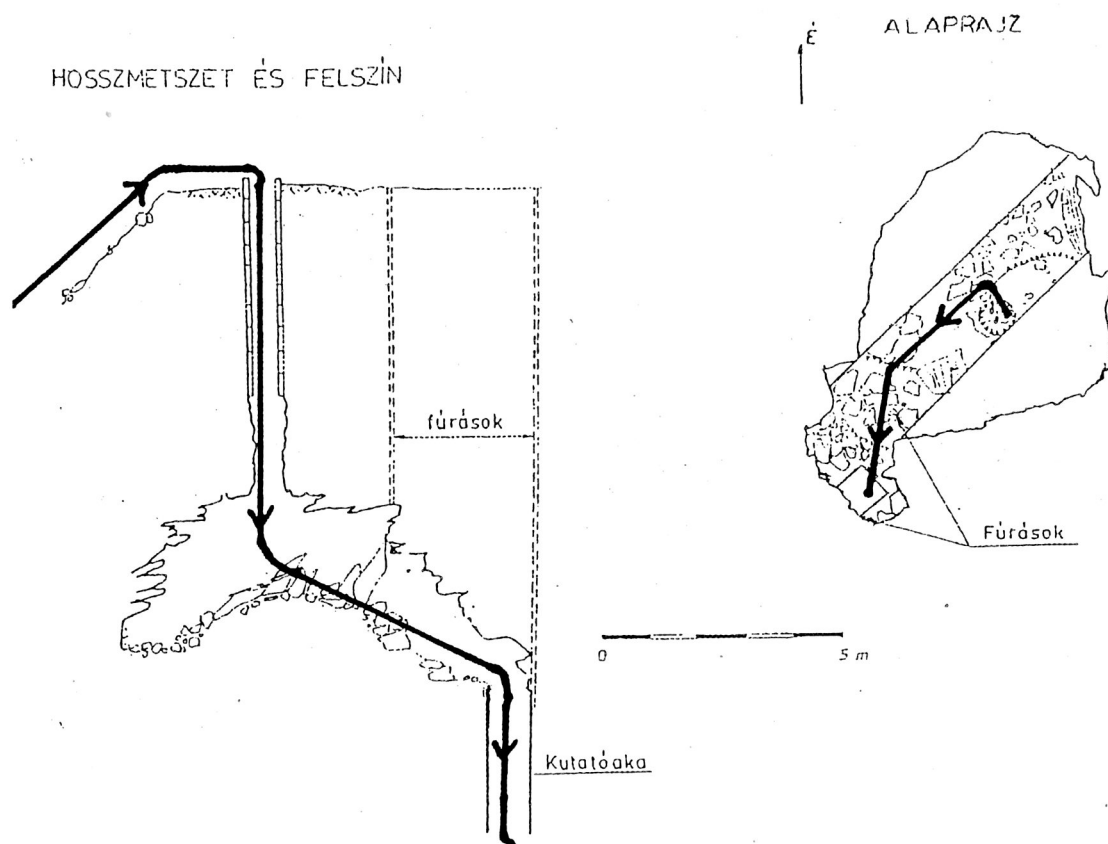
Minden szempontot figyelembe véve a legcélszerűbb helyszínnek egy barlang végpontja látszott. Az alig 4 km²-es karsztterületen mintegy 50-60 kisebb-nagyobb barlangot és kb. ugyanannyi barlangindikációt ismerünk. A barlangindikációkat többnyire különböző építkezések tárták fel, és ezek az építkezés befejeződésével általában megsemmisültek. A barlangok közül az 5 nagybarlang bármelyike szerencsétlen választás lett volna, mivel a fokozottan védett természeti értékek károsodhattak volna a kísérlethez szükséges nagymennyiségű víz bejuttatása során. A többtucatnyi kisbarlang közül aszerint választottunk, hogy

- a) milyen a megközelíthetősége,
- b) vannak-e képződményei,
- c) milyenek a belső méretviszonyai,
- d) milyen messze helyezkedik el a hévforrásoktól.

Úgy gondoltuk, egyszerűbb lesz egy közeli ponttal kimutatni az összefüggést, és ha a kísérlet sikerült, meg lehet ismételni távolabbi beadási pontról is. A forrásokhoz az egyik legközelebbi, ugyanakkor tágas és képződménymentes barlang a B0-barlang. Furcsa nevét az 1984-es BM-építkezés során a barlang bejárata mellett felépített lakóház betűjeléről kapta, amelynek bejárata az ingatlan kerítésétől alig 2 méterre húzódik, és – mint a kísérlet tervezése során kiderült – közelében nagyhozamú tűzcsap is található.

A B0-barlang egy Szeréna úti társasház kertjében nyílik. Két üregkutató fúrás találta meg 1985-ben. A fúrások adatai alapján kijelölt "kút" kiásása során fedezték fel a Kinizsi barlangkutató sportegyesület barlangkutatói. A barlang előre gyártott beton kútgyűrűvel kibiztosított, 7 m mély aknán keresztül

közélmthető meg (2. ábra). A feltárt barlang ovális alaprajzú, (nagytenyely 7 m, kistenyely 5 m) üreg, melynek szélén kutatási céllal a feltárást végző barlangkutatók 6-7 m mély aknát mélyítették. A kutatás annak idején a szomszédos ingatlanról ideszivárgó szennyvíz miatt maradt félbe. 1993-ban az akkor már 9 éve szerkezetkész "kísértet házak" befejezésekor statikus előírásra a Kinizsi Sportegyesület ezt a termet 75 %-ban – erősen megvasalt- perlitbetonnal kitöltötték. Csupán a terem hossztenyelyében hagytak egy közlekedő utat, hogy a későbbi esetleges feltáráshoz lehetőség nyíljon. Ugyancsak kibetonozták a kutatóaknát is. A kísérlet megkezdése előtt – 2001. július 31-én – az aknába leszállva állapot ellenőrzést tartottunk (Leél-Őssy Szabolcs, Mindszenty Andrea, Angelus Béla).



2. ábra: A B0-barlang alaprajza és hosszmetSZete és a tűzoltótömlő elhelyezése (Borka P. (1984) térképe alapján)

Ez azért volt fontos, mert így biztosítva volt, hogy a tűzoltó fecskendőn keresztül bejuttatandó öblítő víz garantáltan csak a felszíntől számított 13 méteres mélység alatt nyelődött el. Előre felelősen kizárható volt, hogy a bejuttatott víz a közeli, 3 szintes lakóépület (társasház) alatt kimosásokat végezzen. A nagytömegű, nagyszilárdságú betontömb kimozdulása is elképzelhetetlen volt. Ezért a helyszínt ilyen szempontból is abszolút biztonságosnak tekinthettük.

Az egész eredeti barlangüreg egy természetes felharapózás, ti. zsombolykeletkezési folyamat közben létrejött másodlagos omladékteremnek, tehát nem primer kioldódásnak tekinthető. Az alul elhelyezkedő, feltételezett barlangterem – amely mennyezetének beomlása a folyamatot elindította – mélységére vonatkozóan nincs adatunk. A zsombolykeletkezés, a főté leszakadozása még nem zárult le. Az eredeti feltárás idején gyakoriak voltak a kisebb omlások, sziklatömbök leszakadozása a főtéről, de ezt a folyamatot a terem kibiztosítása megszüntette és lehetetlenné tette. Enélkül előbb-utóbb az omlás elérte volna a felszínt (bár ennek az időtartama nyilván nem az épület élettartamával mérhető össze). Ez a szerkezet tette lehetővé, hogy a nagyméretű omladékban a víz akadálytalanul, gyorsan lejutthasson – feltételezhetően – a karsztvízszint irányában, bár az a beadási pont alatt kb. 80 méterrel volt várható.

3.2 Az alkalmazott nyomjelző anyagok – elméleti háttér

3.2.1 Nyomjelzés Tinopal CBS-X optikai fehérítő anyaggal

3.2.1.1 Bevezetés

Az alkalmazott hidrogeológiai és környezetföldtani kutatásokban az optikai nyomjelzők nagyon fontos szerepet töltenek be, mivel megbízhatóan bizonyítják a betáplálás és a beérkezés között fennálló hidraulikai kapcsolatot. A beérkezés idejével és körülményeinek sajátosságaival jellemzik a hidrogeológiai környezetet.

Az általános nyomjelző anyagok alkalmazása – még kis koncentrációban is – általában hatóságilag tilos vízbázisok védőterületén belül, mivel potenciális mérgező anyagok és erőteljesen színező hatásúak. Az optikai fehérítő anyagok – úgymint a Tinopal CBS-X – kedvező tulajdonságaiknak (alacsony toxicitás, kismértékű színező hatás és jó kimutathatóság) köszönhetően hatósági engedéllyel alkalmazhatók még vízbázisok védőterületén belül is.

3.2.1.2 A tinopal, mint az egyik alkalmazott jelzőanyag minősége, tulajdonságai, kimutatása

A nyomjelzésre egy optikai fehérítőt, az ún. Tinopal CBS-X nevű anyagot alkalmaztuk. Azért erre az anyagra esett a választásunk, mert a hagyományos fluoreszkáló festékekkel (pl. uranin) szemben színreakciót nem, csak szabad szemmel alig észlelhető opalizálást okoz.

A Tinopal CBS-X kémiai összetétele 4,4'-Dystyryl biphenil derivative (DSBP), anion, melynek oldhatósága desztillált vízben 25°C-on kb. 25 g/l, 95°C-on kb. 300 g/l. A Tinopal CBS-X szilárd formában sárga színű, közepesen finom szemcséjű, szabadon folyó, nem porló anyag. A nyomjelző anyagot oldott állapotban kell bejuttatni a felszín alatti környezetbe. Irodalmi tapasztalatok (Schleyer, 1997; Käss, 1998 stb.) szerint geno- és ökotoxikológiai adatai kedvezőek. Az anyag nem lép kölcsönhatásba a melegvérű élőlényekkel. Vízi

környezetben napfény hatására gyors fotodegradáción megy keresztül, metabolitokká alakul, melyek biológiailag lebomlanak.

Tinopal CBS-X mennyisége (ppm)	fénykitettség időtartama (h)		
	0	1	4
1	100 %	88 %	82 %
0,1	100 %	86 %	80 %
0,01	100 %	95 %	76 %

1. táblázat: A Tinopal CBS-X nyomjelző anyag lebomlása a koncentráció mértékének és a fénykitettség időtartamának függvényében (Uggeri et al., 1997)

Laboratóriumi és terepi tesztelések alapján a Tinopal CBS-X nyomjelző anyagnak csak néhány kevésbé kedvező tulajdonságát állapították meg a többi optikai fehérítő nyomjelző anyaghoz képest: alacsony oldhatóság (amely azonban jelentősen nő forró vízben ld.: fent) és porózus víztartóban a finom mátrix felületén könnyebben megtapad (Uggeri et al., 1997).

A hatályos előírásoknak megfelelően szükségesnek volt az Országos Közegészségügyi Intézet (OKI) Tinopal CBS-X-re vonatkozó bizonyítványát beszerezni az alkalmazni kívánt anyag minősítéséhez. Az alkalmazás ellen az OKI nem emelt kifogást, amelyről 2001. április 17-én hatósági szakvélemény formájában tájékoztatott bennünket, és hozzájárult a kísérlet megkezdéséhez. A hatósági szakvéleményt az 1.3. melléklet tartalmazza.

Az ÁNTSZ Országos Tisztifőorvosi Hivatala engedélyét is megkaptuk a Tinopal alkalmazására (1.8. melléklet).

A Tinopal koncentrációját fluoreszcencia elvén mérő GGUN FL-2 típusú spektrofluoriméter segítségével határozzuk meg. A műszer, a benne található, megfelelően szűrt UV lámpa fénye által gerjesztett festékrészecskék másodlagos emisszióját detektálja. Alsó mérési határa 10^{-9} g/ml (Tinopalra). Használat előtt a műszert kalibráltuk három, különféle koncentrációjú Tinopal oldattal (10^{-6} g/ml, 10^{-7} g/ml, 10^{-8} g/ml). A detektor által leadott feszültség értékekkel kalibrációs file-t készítettünk, amit a műszerhez tartozó program használ. A műszer 10 másodpercenkénti vagy 4 percenkénti gyakoriságú detektálásra is alkalmas. Laboratóriumi körülmények között a vízmintákat műszerbe töltve, mérés során közvetlenül mV értékek, illetve a kalibrációs file segítségével koncentráció értékek olvashatók le.

3.2.1.3 A Tinopal CBS-X magyarországi hidrogeológiai célú alkalmazása

A Tinopal CBS-X optikai fehérítő anyag alkalmazásával hazánkban, 2001 májusában, júniusában történt az első hidrogeológiai nyomjelzéses vizsgálat (Mádliné Szőnyi et al., 2001).

Zirc városának vízellátását részben a Reguly-forrás biztosítja. A nyomjelzési kísérlet célja az volt, hogy a vízbázis külső védőterületét a mérési eredményekből kiinduló számításokkal határozzák meg.

A Zirci Mészki Formációból táplálkozó Reguly-forrás és annak tápterülete – a Jobbágyok legelője – közötti kapcsolatot vizsgálták kiterjesztve a közeli Cihelka-, TSZ-forrásokra és megfigyelőkútra.

A Tinopal CBS-X jelzőanyag bejuttatására a Jobbágyok legelőjén lévő – a Cihelka-forrástól kb. 150 méter távolságban elhelyezkedő – előzetesen kivizsgált víznyelőbe 2001. május 7-én került sor. A 600 liter vízben feloldott 5 kg festéket 7 m³ víz betáplálásával juttatták be egy óra alatt. A Reguly-forrásba – mint a fő megfigyelési objektumba, amely a víznyelőtől mintegy 750 m távolságra helyezkedik el északkeletre – a jelzőanyag bejuttatását megelőzően telepített spektrofluoriméter folyamatosan regisztrált. A mintavételezést a festést követően három órával kezdődött meg négyóránkénti gyakorisággal – kivéve a Cihelka-forrás, ahol az első négy órában óránként történt. A forrásokban az első 3 napon (május 7-től 10-ig) 4 óránként, a következő 4 napon (május 11-től 14-ig) 8 óránként vettek mintát.

Az első beérkezést (0,52 ppb) a Reguly-forrásban tapasztalták 1 óra 45 percet követően, amely – a betáplálás és a karsztforrás távolságából adódóan – 225 m/óra átlagos vízáramlási sebességnek felelt meg.

A második beérkezést a festékanyag betáplálása után három nappal a tinopal koncentrációja – Reguly-forrás kivételével – az alapszinthez képest mindenütt minimum egy, maximum két nagyságrenddel történő emelkedése mutatja.

3.2.2 Nyomjelzés halofil baktérium fágjával

3.2.2.1 Bevezetés

Hidrogeológiai nyomjelzés céljára csak specifikus, a természetes környezetben elő nem forduló anyagok alkalmasak. A nyomjelző anyagnak a nyomjelzés ideje alatt stabilnak és kimutathatónak kell maradnia. Ezért olyan molekula, amely szubsztrátként részt vehet biokémiai körfolyamatokban, valamint egyéb, a biokonverziós folyamatokban résztvevő anyagok nem jöhetnek számításba. Ökológiai szempontból szakmai etikai elvárás a környezetet nem terhelő nyomjelző alkalmazása.

A nyomjelzővel szembeni környezet-egészségügyi elvárások: nem toxikus, vagy könnyen lebomló anyag legyen, ne legyen kórokozó, vagy ne legyen annak jelenlétéhez kötve (pl. patogén baktériumtörzs bakteriofágja) sem. E követelményeknek felel meg a halofil baktériumok fágjainak alkalmazása.

3.2.2.2 A fágnyomjelzés elméleti háttere

3.2.2.2.1 Kémiai és fizikai nyomjelzők

Nem reaktív és alacsony kimutatási határral detektálható valódi oldatokat több évtizede alkalmaznak a hidrogeológiában. A leggyakrabban alkalmazott

anyagok egyes, igen kis koncentrációban (pl. 0,4 ppb) kimutatható fluoreszcens festékek, és halid anionok (pl. jodid, bromid kb. 20 ppb kimutatási határral). A kémiai nyomjelző anyagok alkalmazásának egyes korlátjai, pl. a környezet bizonyos mértékű szennyezése, kimutathatósági problémák, kedvezőtlen jel-zaj viszony vagy analitikailag nehezen kezelhető mátrix esetén, jelentős veszteség és nagyfokú vándorlási retardáció finomszemcsés porózus közegben bekövetkező diffúzió miatt, stb. Ezek előnyei mellett környezetvédelmi szempontból rendkívüli hátrányuk, hogy a környezetet terhelik nem természetes anyaggal, ezért a hidrogeológusok már régóta próbálkoznak alkalmasabb anyaggal, mint a biológiai nyomjelzők alkalmazásával.

3.2.2.2.2 Biológiai nyomjelzők

Ezek a nyomjelző anyagok külön kategóriáját képezik, mivel nem oldott molekulák, hanem a kolloid mérettartományba (néhánytól – néhány száz nanométerig) tartozó partikulák. A különböző biológiai nyomjelző anyagok alkalmazási lehetőségeit és előnyeit a felszín alatti vizek kutatásában Keswick és mtsai foglalták össze 1982-ben.

3.2.2.2.3 Bakteriofágok

A biológiai nyomjelzők közül egyértelműen a bakteriofágok kínálják a nyomjelzésre és a szennyeződési transzport folyamatok modellezésére legalkalmasabb feltételeket az alábbiak miatt: méretük nagyjából azonos az eukarióta szervezetek patogén vírusaival (kb. 20-200 nm között) és mint minden vírus, képtelenek önálló szaporodásra. Ehhez specifikus gazdaszervezetre lenne szükség, amely anyagcseréjét saját reprodukciójuk érdekében eltérítik annak normális menetétől. A bakteriofágok esetében a gazdaszervezet kizárólag baktérium – ezen belül is egy szűk csoport (általában faj vagy annak alcsoportja). A fágok a gazdasejten belül összeépülő komplex protein burokból (capsid) és ezekbe burkolt, genetikailag információt hordozó DNS vagy RNS molekulából állnak. Morfológiájuk meglehetősen sokféle: egyesek szabályos geometriájú poliéderek, farokkal, vagy anélkül, mások hosszú filamentum formájában fordulnak elő. Sok fág rendelkezik különböző speciális, a gazdasejthez történő adszorpciót és annak effektív megfertőzését segítő függelékekkel (ld.: Ackermann és DuBow, 1987).

A bakteriofágok egyik legfontosabb előnye az, hogy kimutatásuk rendkívül egyszerű, olcsó, ami nagyszámú minta párhuzamos vizsgálatát teszi lehetővé. Ez a migrációs és hidrológiai nyomjelzéses vizsgálatok során általában elengedhetetlen. A hidrológiai vizsgálatok során 1-2 ml mintából lehetséges egyetlen fág részecske kimutatása, ugyanakkor a bevitt nyomjelző koncentrációban 10^{11} - 10^{12} darab/ml koncentrációban lehetnek jelen. Ezáltal a legérzékenyebb kimutatási módszerekkel észlelhető kémiai nyomjelzőknél is nagyobb érzékenységgel mutathatók ki.

A fágok használata további előnyökkel jár, ilyen, pl. igen szűk gazdaspecificitásuk, ezért egyidejűleg több fág használható, és egyedileg külön-külön detektálható egy nyomjelzéses kísérletben. Ez olyankor jelenthet

felbecsülhetetlen előnyt, amikor több lehetőség közül kell választani egy, adott vízádot szennyező forrást, vagy pl. egy víznyelőről vagy szennyező forrásról kell megállapítani, hogy a feltételezett objektumok közül melyekkel lehet közvetlen hidrológiai kapcsolata.

Nem toxikusak és a gazdabaktériumon kívül egyetlen élő szervezetre sem patogének. 10^{15} fágreszecske tömege kb. 1 g, így bevitele a vízádot rétegbe gyakorlatilag semmiféle szennyezést nem jelent, szemben a kémiai nyomjelzőkkel, melyekből egy eredményes vizsgálathoz általában több kg anyag bevitele szükséges.

Túlélésük a környezetben korlátozott, néhány héttől néhány hónapig terjedhet (a fizikai körülményektől függően). Ez ugyanakkor a nyomjelzéses kísérlet időtartamához viszonyítva elegendő hosszú.

A természetes környezetben végzett vizsgálatok ritkábbak, mivel a talaj fizikai tulajdonságai és a permeabilitás helyi eloszlása ismeretének hiányában vírusok terjedése és a hidrológiai körülmények közti összefüggés nehezen határozható meg. A fágok, mint nyomjelzők előnyeit illusztrálják a kémiai anyagokkal szemben McKay és mtsai (1993), akik egy kiterjedelmű helyszíni vizsgálat során a relatíve kis koncentrációban alkalmazott fágok terjedését vizsgálva azt tapasztalták, hogy az megközelíti a talajvíz áramlási sebességét, szemben a párhuzamosan használt kémiai nyomjelzőkkel (bromid ion), amely a finomszemcsés porózus közegben (mállási anyag) fennálló nagyfokú diffúzió miatt kb. 100-szoros késéssel volt csak detektálható. A kolloidális részecskék méretük miatt a porózus mátrixból általában kizáródnak, így az oldott anyagoknál jelentkező mátrix-diffúzió nem hátráltatja hidraulikai erők által irányított vándorlásukat.

A fágok és más nyomjelzők együttes alkalmazásából többlet információk nyerhetők, amit jól illusztrál Rossi és mtsai (1994) közleménye, amelyben kétféle fág és egy fluoreszcens nyomjelző (naphtionate) áttörési görbéi és migrációs sebessége mérésével és a radio-magneto-tellurimetriával (RMT) kapott permeabilitás eloszlások maximumának összehasonlítása arra engedett következtetni, hogy vizsgálati körülmények között a fágok 3,15-ször gyorsabban vándoroltak a hagyományos fluoreszcens nyomjelzőnél.

A fágok alkalmazásának további előnyeit demonstrálja Rossi és mtsai legújabb közleménye, amely egy, az északi tengerből izolált fág folyami nyomjelzéses vizsgálatban történt felhasználását ismerteti.

A H40/1 jelzésű fág kizárólag tengerből izolált halofil gazdabaktériumban képes szaporodni. Mivel sem a fág, sem a gazdabaktérium nem képes megtelepedésre, vagy akár hosszabb idejű túlélésre édesvízi környezetben, a gazdabaktériumnak és fágjának esetleges kisintenzitású természetes előfordulásából eredő „háttérzaj” vagy a természetes mikroflóra hidrológiai kísérletekből eredő esetleges megváltozásának veszélye nem áll fenn. Mivel a tengeri fágok kimutatása a halofil gazdabaktérium tenyésztésére szolgáló speciális, nagy sótartalmú táptalaj alkalmazásához kötött, a fág kimutatással kapcsolatban szennyezettebb környezetben jelentkező, és aspecifikus

felülfertőzésből eredő értékelési nehézségek is egyszerűen, antibiotikumok alkalmazása nélkül kiküszöbölhetők. Az édesvízi környezetben előforduló gazdabaktériumok fágjainak kimutatásakor időnként szelektív céllal alkalmazott antibiotikumokkal kapcsolatban az az aggály merülhet fel, hogy a fágtenyésztéssel elkerülhetetlenül a környezetbe juttatott antibiotikum rezisztens baktériumtörzsből a rezisztenciáért felelős genetikai struktúra természetes úton átjuthat más típusú, érzékeny baktériumtörzsekbe és így a rezisztencia terjedését idézheti elő.

Mivel két további, halofil gazdabaktériumban szaporodó, környezeti feltételeink között tartósan életképtelen fág-gazdabaktérium rendszer is rendelkezésünkre áll, a fent említett egyidejű többrendszeres nyomjelzéses kísérletek lehetősége is fennmarad.

Megjegyzendő, hogy a természetes vízmintákba (és így a hidrogeológiai mintákba is) környezeti, fekális eredetű szennyezésként bekerülhet a bakteriofágok más csoportja, amelyek gazdatörzsei fekálindikátor baktériumok. E bakteriofágok könnyű és gyors kimutatása lehetőséget teremt nemcsak vízminősítésre, hanem ezeknek a bakteriofágoknak a vizsgálatával modellezni lehet a humán és állati patogén Entero-, és egyéb vírusok környezeti perzisztenciáját.

A nyomjelzésben használatos tengeri fágokat és gazda baktériumaikat, a svájci neuchateli Egyetem Mikrobiológiai tanszékétől szereztük be. Geológiai munkákban már az 1990-es évek eleje óta használatban van. A tengerből izolált baktériumok fágjai a baktériummal azonos megnevezésűek.

Az alkalmazott H40 fágot rendszertanilag a Siphoviridae családba, annak B1 osztályába sorolta Ackermann és Eisenstark (1974). Genetikai szerkezete kettőszálú DNS, ikozahedrális fejből, és nemkontraktibilis és flexibilis nemkontraktív farokból áll, a fej és a farok méretei 82-85, illetve 39-43 nm hidrofóbicitása $\zeta = -68,70$ zéta potenciálja $-42,0$ mV, gazdatörzsen a duplikációs ideje 15 perc körüli.

A H40 gazdatörzset a *Vibrio harveyi*-t ételkagyló (*Mytilus edulis*) extraktumából az Atlanti óceán parti részéről izolálták (ld.: Moebus, K., Hermann, F., 1987, Moebus K., Nattkemper, H., 1989, Moebus K. 1992).

A bakteriofágok töltése negatív az édesvízi környezetben, izoelektromos pontjukat 3,5 és 4,5 pH között határozta meg a Zéta potenciál alapján Ackermann és DuBow (1987). Ez azt jelenti, hogy a nyomjelzésre használatos bakteriofágok a vizekben erősen negatív töltésűek. A H40 fág izoelektromos pontja pH 4,2-nél van.

Két tényező határozza meg a bakteriofágok kimutathatóságát a környezetben, az inaktiváció és az adszorpció, amely a környezeti geológiai felület (talaj, agyag, stb. ill. annak szerves anyag tartalma) fiziko-kémiai jellegzetességeinek függvénye. Moore és Mtsai (1981) 34 különböző talajminta kölcsönhatását vizsgálta a poliovírus túlélésére, és erős korrelációt találtak a vírus adszorpciója és a szerves anyagok jelenléte között. Lipson és Stotzky (1983) reovírus agyag felületen történő adszorpciója és kation-cserélő kapacitása között

korrelációt mutatott ki. Bár Yates és mtsai. (1985) MS-2 fág és két tesztelt vírus (poliovírus 1, echovírus1) környezeti túlélése között kizárólag a hőmérsékletet találta az egyetlen szignifikáns paraméternek. Sok szerző szerint azonban a bakteriofágok adszorbeálódni tudnak mind szuszpendálódott kolloid részecskékhez (szerves és szervetlen kolloid partikulák), mind a vízáadó rétegben előforduló felületekhez (Bitton, 1975, Koya és Koya, 1977, Bixty és O'Brien, 1979, Seely és Primrose, 1980, Lipson és Sotzky, 1983, Yates és mtsai., 1985, Nasser és mtsai., 1993).

3.2.2.2.4 Inaktiváció

A vírusok és bakteriofágok virulenciájukat számos ok miatt veszthetik el, amint ezt Babich és Stotzky (1980) leírták. Virulencia elvesztését okozhatják az alábbi tényezők:

1. a vírusok és fágok kapszidjának vagy farkának a fizikokémiai megváltozásai, vagy elbomlása,
2. ha sérülnek vagy tönkremennek a vírus vagy fág specifikus gazdasejt felismerő receptorai,
3. a vírusok vagy fágok genetikai anyagának kémiai vagy fizikai változásai,
4. komplexek képződése szerves makromolekulákkal (huminsav) – ez általában reverzibilis folyamat.

A másik fő eliminációs tényező maga az adszorpció. A vízben lebegő kolloid részecskékhez való adszorpció nagyon gyors és nagymennyiségű vírust vagy bakteriofágot megkötő folyamat (Carlson és mtsai., 1968, Bitton és Mitchell, 1974, Scaub és Sagik, 1975, Hurst és mtsai., 1980, Gerba, 1984, Armon és Cabelli, 1988, Powelson és mtsai., 1991). Elektrosztatikus-, Van der Waals-, és hidrofób kölcsönhatások befolyásolják az adszorpciót. Scahub és Ságik, (1975) kimutatták, hogy az adszorbeálódott fágok védve vannak a gyors inaktivációtól. Ezért nagyobb távolságokra képesek transzportálódni a víz által. Az adszorpció nem irreverzibilis, deszorpciót követően képesek visszanyerni virulenciájukat. Labor kísérletekben a pH változásra, szerves anyagok koncentrációjának növekedésére, vagy az ionkoncentráció csökkenésére deszorpció következik be (Ostle és Holt, 1979). Kaotrop ágensek és detergens alkalmazása hatékony a deszorpcióra. Folyadék-levegő határfelületen történő fág inaktiválódással Bricej és Sisko (1992) foglalkozott.

A hidrogeológiában alkalmazható bakteriofág-gazda baktérium rendszer (BHB: bakteriofág-host baktérium) az alábbi követelményeknek kell, megfeleljen:

- A gazda szervezet aerob, heterotróf és mezofil baktérium, melynek telepei gyors növekedést mutatnak egyszerűen kivitelezhető módszer mellett,
- A természetes karsztvizekben természetes körülmények mellett ne forduljon elő, háttérflórából eredő „zaj” ne zavarja a kimutatást,
- A gazdabaktérium törzs ne legyen patogén,
- A fág ne adjon kereszt-lízist más baktériumok bakteriofágjaival,
- A bakteriofág kimutatási határa alacsony legyen.

A bakteriofágok nyomjelzéses alkalmazásáról szakvélemény készült (1.4. melléklet). Az ÁNTSz engedélyét is megkaptuk a H-4, H-6 és H-40-es jelzésű tengeri halofil baktériumokban szaporodó bakteriofágok alkalmazására (1.8. melléklet).

3.2.2.3 A tengeri fágokkal történő hidrogeológiai nyomjelzés hazai előzményei

Tengeri fágok alkalmazásával hazánkban 2000. október-novemberben az Aggteleki karszton a Lófej-forrás vizének közeli nyelője és a Nagy-tohonya forrás között történt az első vizsgálat. Azért ezt a légvonalban egymástól kb. 3 km-re levő kapcsolatot választottuk a fágok nyomjelzésben való felhasználhatóságának vizsgálata színhelyéül, mivel ennek fennállásáról korábbi nyomjelzéses vizsgálatok már bizonyítékokat szolgáltatottak. A kísérletet párhuzamosan két fág alkalmazásával végeztük az alábbi mennyiségekkel:

nyomjelző fág	fágtiter	térfogat	összes betáplált fág
H 40	2×10^{10} /ml	160 ml	$3,2 \times 10^{12}$
H 6	$2,5 \times 10^9$ /ml	200 ml	5×10^{11}

A mintavétel időpontjai: beoltáskor és az azt követő 5., 9., 14. napon, és ettől kezdve naponta. A vízmintákat mind a H6, mind a H40 fágok kimutatása céljából feldolgoztuk. A H 40 fág a fágnyomjelzés 26. napján jelent meg, majd két ezt követő napon volt még kimutatható az alábbi plakk-számokkal:

A H40 nyomjelző fág megjelenése

az inokulálást követően

plakkok száma

2×1 ml 2×5 ml

26. nap 1 5

27. nap 19 94

28. nap 2 11

A H6 teljes bizonyossággal nem volt kimutatható.

Egy nagyságrendbeli titer eltérés volt a két alkalmazott nyomjelző fág között, és csak a nagyobbik titerben alkalmazott nyomjelző fág volt kimutatható. A beadás és megjelenés közti viszonylag hosszú időszak alatt bekövetkezett hígulás, adszorpció és inaktiváció kombinációja volt az oka annak, hogy az alacsonyabb titerű fágot nem lehetett kimutatni, de a magasabb titerű is csak 3 napig volt kimutatható. A H 40 fág beadagolt és visszkapott koncentrációja között $2,1 \times 10^9$ -nyi a különbség (arány), míg a H 6 fág esetében ez az arány nagyobb, mint $2,5 \times 10^9$. A fágok visszanyerési arányáról pontosabb becslést a Nagy-tohonya forrás adott időszakban jellemző vízhozamának ismeretében lehetne adni, ez az adat azonban nem állt rendelkezésünkre.

3.2.2.4 Anyagok és módszerek

A kísérletekben a Vh5a-Vibrio harveyi BHB rendszert választottuk, ahol a gazdatörzs és a fág jele egyaránt H 40. A módszer alkalmazásához az alábbi eljárások szükségesek:

- A gazdabaktériumtörzs és a fág törzs fenntartása (stock). A baktériumtörzset és a felszaporított fág törzset hosszabb időtartamra 20% (v/v) glicerin tartalmú „tengeri leves” táptalajban mélyhűtőben tároltuk. Rövidebb időtartamra a baktériumtörzset tengeri agaron elszaporítva 22°C-on tartottuk, háromhetenkénti átoltással. A felszaporított fagot tengeri levesben, 5°C ±2°-on tároltuk, ahol az legalább hat hónapig fenntartható titervesztés nélkül.
- A gazdatörzs elszaporítása fágpropagálás céljára. A törzs tárolt tenyészetéből egy kacsnyit beoltunk „tengeri levesbe” és szobahőmérsékleten (20°-25°C között) 100/perc fordulattal rázatva egy éjen át tenyésztjük.
- A gazdatörzs elszaporítása fágtitrálás céljára. A gazdatörzs elszaporított tenyészetéből 1-2 ml-t beoltunk 50-100 ml térfogatú friss tengeri levesbe és 3-5 órán át 100/min fordulattal rázatva tenyésztjük 20-25°C között
- A fág (H 40) elszaporítása. A gazdatörzs elszaporított tenyészetéből 1 %-nyit (v/v) beoltunk a felhasználni kívánt fág mennyiségének megfelelő térfogatú friss tengeri levesbe és 3-5 órán át 100/min fordulattal rázatva tenyésztjük 20-25°C között, majd a megfelelő sűrűség elérésekor hozzáadunk 2%-nyi (v/v) mennyiségű tárolt, (előzetesen magas titerig elszaporított) fág tenyészetet. A keveréket az opálos szuszpenzió feltisztulásáig tovább rázatjuk, majd a felhasználásig hűtőszekrényben tároljuk.
- A fág titrálása (minták vagy a propagált fáguszuszpenzió titerének vizsgálata). A mintából, és/vagy annak hígításaiból 2 párhuzamosban 1-1 ml-t steril „tengeri agar” felszínére öntünk, majd hozzáadunk 4 ml előzetesen felolvasztott és rövid ideig 46°C-on tartott „tengeri lágyagart”, melyhez közvetlenül a rámerést megelőzően a gazdatörzs 0,5 ml frissen elszaporított tenyészetét adtuk. A mintát, a törzset tartalmazó lágyagarral a „tengeri agar” felszínén elterítjük és vízszintes felületen 20-25°C közötti hőmérsékleten másnapig inkubáljuk. Az inkubáció után a gazdabaktérium pázsitszerű tenyészetén kialakult tartfoltokat megszámláljuk és a hígítás fokának figyelembevételével meghatározzuk a mintából kimutatott fágkoncentrációt.
- Minőségellenőrzési módszerek. A minták vizsgálatával egyidejűleg negatív kontrolok (gazdabaktérium steril desztillált vízzel, és gazdabaktériummentes lágyagar) valamint pozitív kontrol (hígított fáguszuszpenzió, 10-100/ml közötti koncentrációval) beállítása szükséges.

Az alkalmazott táptalajok összetétele.

- „tengeri agar”: pepton (pl. Oxoid L37) 2,5 g; élesztőkivonat (Oxoid Yeast Extract, L21) 0,5 g; lepárolt tengeri só (akvarisztikai szaküzletekben kapható) 24,5 g; agar por (Oxoid) 10 g; ionmentes víz 1000 ml; pH 7,1 ±0,1. Az összetevőket egyenletesen elkeverjük a vízben, majd autoklávban sterilizzük 121 °C-on 20 percig. A 50-55 °C-ra lehűtött táptalajt steril petricsészékbe kiöntjük 4-5 mm-es rétegbe, majd

vízszintes felületen hagyjuk megdermedni. Felhasználásig (legfeljebb 3 hónapig) kiszáradástól védve hűtőszekrényben tároljuk.

- „tengeri lágyagar”: tripton (pl. Oxoid L42) 2,5 g; élesztőkivonat (Oxoid Yeast Extract) 0,5 g; lepárolt tengeri só (akvarisztikai szaküzletekben kapható) 24,5 g; agar por (Oxoid) 6 g; ionmentes víz 1000 ml; pH 7,1 ±0,1. Az összetevőket egyenletesen elkeverjük a vízben, majd autoklávban sterilizzük 121 °C-on 20 percig. A kész táptalajt 4 ml-enként steril Wasserman csövekbe fejtjük, és kihűlés után hűtőszekrényben tároljuk (legfeljebb 1 hónapig). A felhasználás előtt kellő számú csövet áramló gőzben felolvasztunk és 46 °C-os vízfürdőbe helyezük, majd csövenként 40 µl 1%-os (v/v) steril kalcium-klorid oldatot adunk hozzá.
- „tengeri leves”: tripton (pl. Oxoid L42) 2,5 g; élesztőkivonat (Oxoid Yeast Extract) 0,8 g; lepárolt tengeri só (akvarisztikai szaküzletekben kapható) 24,5 g; ionmentes víz 1000 ml; pH 7,1 ±0,1. Az összetevőket egyenletesen elkeverjük a vízben, majd autoklávban sterilizzük 121 °C-on 20 percig. A kész táptalajt lehűtve hűtőszekrényben tároljuk legfeljebb 3 hónapig.

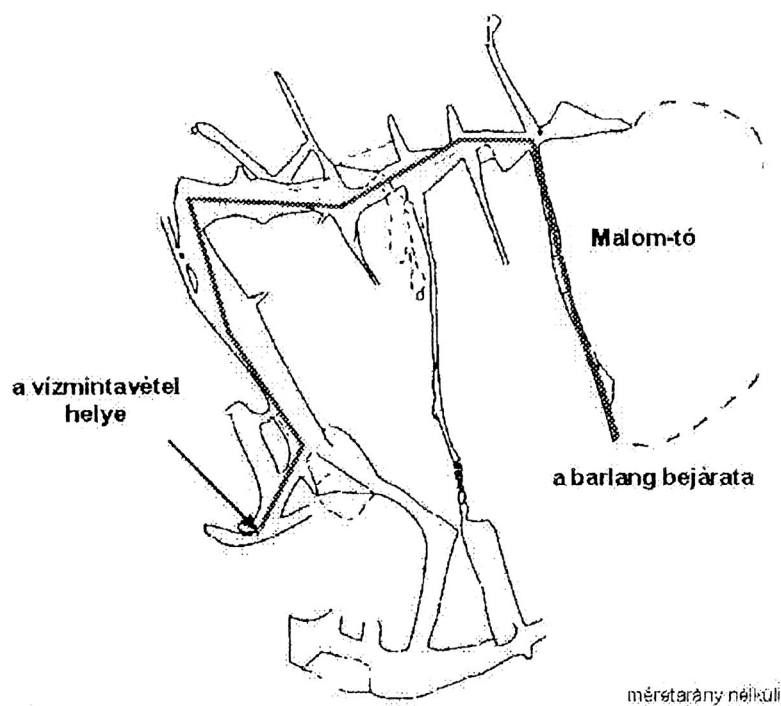
3.3 Előkísérletek

3.3.1 A tinopal háttérkoncentráció mérése

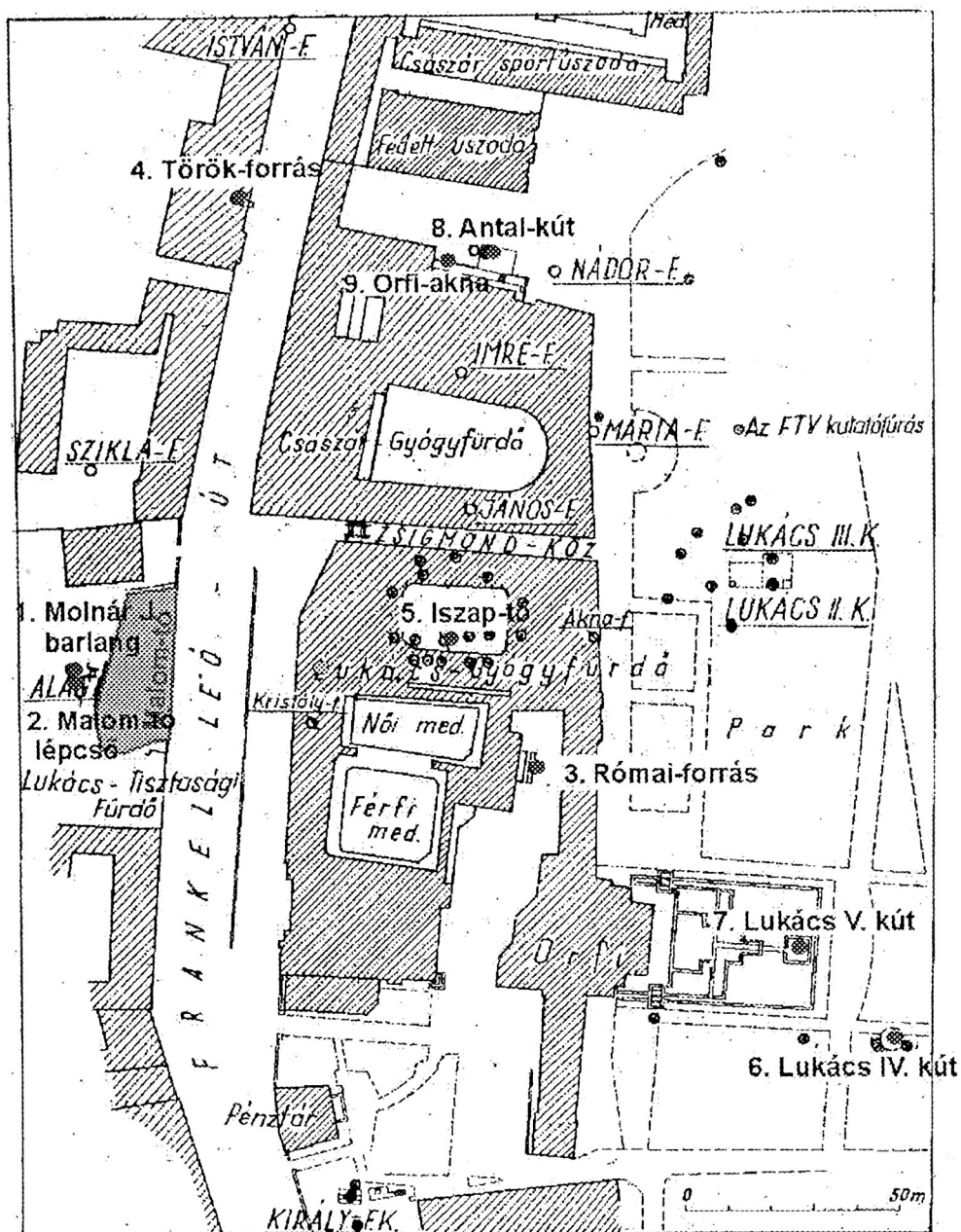
A Tinopal CBS-X nyomjelzőanyag bejuttatását megelőzően szükségesnek láttuk az előzetes háttérkoncentráció ellenőrzését a Lukács-fürdő potenciális mintavételi helyeinél. A vizsgálat alapja az a feltételezés volt, hogy – mivel ezen anyagot mosószeradalékként is használják (HENKEL) – elvben nem kizárt megjelenése a József-hegy felől a Lukács-fürdőhöz érkező vizekben. A vizsgálat célja e feltételezés igazolása vagy cáfolása volt.

A kísérletek megkezdéséhez szükség volt egy mintavételi cső beépítése a Molnár János barlang hidegforrásához. A csövet Kalinovits Sándor bűvár-barlangász 2001. július 7-én beépítette (3. ábra). A Tinopal háttérkoncentrációját 2001. július 10-24. között a Molnár János-barlang (mint fő megfigyelési objektum) hideg vizű ágához csatlakoztatott GGUN FL-2 típusú spektrofluoriméter segítségével folyamatosan – tízperces időközönként – mértük. Továbbá július 10-16. között napi két, majd 2001. július 17-24. között napi egy mintán, valamennyi észlelendő objektumon (Molnár János-barlang, Török-forrás, Antal-kút, Római-forrás, Iszap-tó, Orfi-akna, Lukács IV-kút, Lukács V-kút) észleltük (4. ábra). Nem végeztünk előzetes méréseket a Duna-vízen és Malom-tó lépcső mintavételi helyeken. A napi kétszeres mintavételezésre azért volt szükség, hogy megállapítsuk, a Tinopal-koncentráció esetleg mutat-e napi ingadozást.

A szakszerűen – hűtve és fénytől védve – tárolt mintákat spektrofluoriméter segítségével megmértük, de háttértértéket nem sikerült kimutatnunk. Azaz az előforduló háttérkoncentráció a műszer kimutatási határa alatt maradt.



3. ábra: A vízmintavételi cső helye a Molnár János-barlangban (Kalinovits S. térképvázlata alapján)



- mintavételi helyszín
- ◉ vízhozammérés helyszíne
- Malom-tó

4. ábra: Helyszínrajz a mintavételi helyekről (Alföldi et al., 1968 után módosítva)

3.3.2 Modellkísérlet a H 40 bakteriofág törzs túlélésének vizsgálatára

A nyomjelzési kísérlet kezdete előtt mintát vettünk a nyomjelzés vízvételéhez (beadagolt fágok beöblítéséhez) használt tűzcsapról az összehasonlító túlélési kísérlet céljára. A nyomjelzési kísérlethez előkészített, felpropagált

fágszuszpenzió hígításából egy kis mennyiséget adtunk ehhez a mintához és párhuzamosan steril foszfátpuffer oldathoz, mely a fágok túlélése szempontjából kedvező közegnek tekinthető (pH 7,4). A fággal befertőzött oldatot és vízmintát hűtőszekrényben tároltuk. A befertőzést követően azonnal, majd a nyomjelzési kísérlet időtartama alatt többször, legutoljára október 2-án (62 nap múlva) mintát vettünk a befertőzött vízmintából és puffer oldatból és meghatároztuk a fágok aktuális titerét. Az eredmények szerint a fág titer gyakorlatilag nem változott és nem tért el a kétféle közegben: augusztus 1-én a vízmintában és a pufferben talált fágkoncentráció $9 \cdot 10^7/\text{ml}$ ill. $11 \cdot 10^7/\text{ml}$ volt. Az utolsó, október 2-i vizsgálat eredménye: $12,5 \cdot 10^7$, ill. $12,2 \cdot 10^7/\text{ml}$ ugyanezen mintákban.

3.4 A nyomjelzési kísérlet lebonyolítása

A nyomjelzési kísérlet részletes programját a 2. melléklet mutatja.

3.4.1 Előöblítés, a jelzőanyagok bejuttatása

A kísérlet megkezdése előtt egy nappal, 2001. augusztus 6-án hétfőn reggel tízkor kezdtük meg az előöblítést a B0 aknába. Az öblítés során a tűzcsapról (1. fotó) engedéllyel (1.6. melléklet) nyert vizet tűzoltó felügyelete mellett, kb. 100 m hosszú vezetéken juttattuk le a B0 második aknája aljára. Az előöblítés egy napja alatt a kísérlet vezetői végig a helyszínen tartózkodtak (Leél-Óssy Szabolcs). A végpontra a vezetéket, Melegh Csongor juttatta le és a kísérlet egész ideje alatt ő ellenőrizte a barlangi történéseket. A kísérlet során végig jegyzőkönyvet vezettünk a történésekről. A kísérlet első percében 2,65 m magasra duzzadt vissza a víz, a 300 l/perces kezdő hozam mellett. De aztán hamar utat mosott magának és 10:25-től visszaduzzadás nélkül nyelődött el. 18:35-kor a tűzcsapot technikai okok miatt el kellett zárni 18:50-ig. Ezt követően 300 l/perc hozammal folytattuk tovább az öblítést. Augusztus 7-én éjjel 1 órakor 150 l/percre levettük az öblítővíz hozamot a maximális biztonság érdekében. Reggel 6:00-tól ismét 300 l/perccel öblítettünk. A beadott mennyiség folyamatosan nyelődött el. Az akna mellett a kőzet nyílt barlangi feltárásában semmilyen változás nem mutatkozott, ami arra utalt volna, hogy a víz felfelé is emelkedett, ami esetleg gondot okozhatott volna az épület statikai vonatkozásában. Az egész beadás az előírtaknak megfelelő idő alatt, a kalkulált vízmennyiséggel, a legkisebb rendellenesség nélkül zajlott le. A kísérlet folyamán messzemenően betartottuk a különböző engedélyező hatóságok, így pl. a természetvédelem előírásait (barlangi kutatásvezető helyszíni művezetése, stb.) Munkánk ellen az ott lakók részéről sem merült fel semmilyen panasz.

A jelzőanyagok bejuttatására – a programnak megfelelően – augusztus 7-én került sor. Elsőként a bakteriofágokat indítottuk útjukra két megfontolásból. Egyrészt abból az ismert tényből kiindulva, hogy a fágok terjedése többé-kevésbé advekcios, várhatóan gyorsabban célba érnek, mint a kémiai festékek. Másrészt a festék fágokra gyakorolt hatását nem ismerjük, de későbbi indítással az esetleges fagra gyakorolt kedvezőtlen hatás elkerülhető. Annál is inkább, hiszen a festék terjedésénél a késleltetési folyamatoknak is nagy szerep jut.

Az öblítővíz hozamát 9:55-kor 150 l/percre állítottuk be. Majd 10:07-kor elsőként a fágokat – közvetlenül a barlangüregbe folyó vízszugárba – beöntöttük. A nyomjelzéshez 4,5 liter $1,5 \times 10^{12}$ fág/ml koncentrációjú H40 szuszpenziót juttattunk a beadagolás helyére. A bejuttatott fágok mennyisége $6,75 \times 10^{15}$ infektív egység volt.

A fágok bejuttatását követően az öblítővíz hozamát 300 l/percre növeltük. A Tinopal bejuttatása érdekében 10:58-kor az öblítővizet rövid időre – míg egy vízszugárszivattyút építettünk a rendszerbe – elzártuk.

10 kg tinopal-t előzőleg feloldottunk 600 l vízben. Az így elkészített – kb. 15 g/l koncentrációjú – festékoldatot műanyagbordókban szállítottuk a helyszínre.

A Tinopalt a hordókból közvetlenül a tűzoltótömlőre csatlakoztatott vízszugárszivattyú segítségével juttattuk be a barlangaknába. Az anyagbejuttatás 11.08-kor indult 150 l/perc hozammal. A hordók kiürítéséről jegyzőkönyvet vezettünk. Két leállás mellett az anyag bejuttatással 12:21-re végeztünk. Ezt követően a hordókat kiöblítettük és az öblítővizet is elengedtük az aknába. Hordónként 10-15 l vizet használtunk erre a célra. A hordók öblítését 12:35-kor fejeztük be.

Az anyag bejuttatását követően utóöblítést végeztünk. Ennek az volt a célja, hogy a jelzőanyagok bemosódását egy nagyobb vízhullámmal segítsük. Az utóöblítést 12:40-kor kezdtük 310 l/perc vízhozammal. Majd 13 órától fokozatosan emeltük a hozamot. 13:09-re elértük az 500 l/perc értéket. Ezzel a hozammal folytattuk tovább az utóöblítést egészen 13:16-ig.

Az anyagbejuttatást követően a munkaterület takarítását maradéktalanul elvégeztük.

3.4.2 Mintavételezés

A mintavételezést augusztus 7-én 10:00-kor kezdtük meg. Ez a mintavétel gyakorlatilag egybeesett a nyomjelzőanyag bejuttatásának kezdetével (2001. augusztus 7. 10:07), ezért ezeket az első mintákat szántuk referencia mintának.

A mintavétel tíz helyszínen történt: 1. Malom-tó mintavételi cső, azaz Molnár János-barlang (2. Fotó), 2. Malom-tó lépcső, 3. Római-forrás, 4. Török-forrás, 5. Iszaptó, 6. Lukács IV., 7. Lukács-V., 8. Antal-kút, 9. ORFI-akna, 10. Duna-víz) (4. ábra.) (A Dunából csak augusztus 9-20 között történt mintavételezés, nem a teljes mintázási időszakra.) A mintavételi helyszínek egy része használaton kívüli forrás ill. kút volt. Ezekben a mintavételezésnek csak akkor volt értelme, ha a vízforgalmat beindítjuk ill. fenntartjuk. A Török-forrást és az Antal-kutat a fürdő gépészei a kísérlet sikere érdekében csaknem végig üzemeltették. Az Iszap-tavat pedig, minden mintavétel előtt egy órával – saját búvárszivattyúnkkal – beindítottuk.

A mintavétel rendje a következő volt:

Augusztus 7. 17:00 – augusztus 8. 16:00: óránként

Augusztus 8. 18:00 – augusztus 11. 12:00: 3 óránként

Augusztus 11. 18:00 – augusztus 14. 18:00: 6 óránként

Augusztus 15. 8:00 – augusztus 17.18:00: 12 óránként

Augusztus 18.-tól október 5-ig: naponta egyszer 18 , majd 16 órakor.

A spektrofluoriméter a Molnár János-barlangnál beépítve folyamatosan mérte a nyomjelzőanyag koncentrációját egészen október 5-ig. A Malom-tó lépcsőnél és a Molnár János-barlangnál a mintavétel gyakoriságával megegyezően konduktivitás-mérést (3. fotó) is végeztünk (ld. 2.4.3. fejezet).

A mintavételezés rendje a 3. melléklet (mintavételi tájékoztató) szerint zajlott. A vízmintavételhez sötét barna színű, zárható, 100 ml-es üvegedényt használtunk. Egy mintavételi helyről két mintát is vettünk, egyiket a tinopálos, a másikat a fágos elemzésekre. A tinopálos minták esetében, ahol lehetőség volt rá, ott egy buborékkal vett – az üveget teljesen kitöltő – mintát vettünk, illetve ahol csapról vagy csőről történt a mintavételezés, ott az üvegeket minden esetben színültig töltöttük. A csapról történő és a merítéses mintavétel rendjét külön-külön lefektettük. A fágmintavétel miatti szigorúbb szabályokat érvényesítettük valamennyi mintavételnél.

Hasonlóképpen szigorúan betartottuk az adatok dokumentálására vonatkozó előírásokat, amelyek biztosították, hogy a nagyszámú minta ellenére a kísérlet során nem történt keveredés. Az üvegeket a mintavételi helyszíneknek megfelelően beszámoltuk, és az adatlapon a mintavétel pontos időpontjával együtt feltüntettük. A fürdőben tartózkodó mintavevők névsorát jegyzőkönyvben vezettük.

A mintavételben valamint a nyomjelzési kísérlet lebonyolításában közreműködő személyek nevét a 4. melléklet tartalmazza.

A mintákat a Lukács-fürdő gépházában, (a fágos és a tinopalos elemzésekre szántakat egymástól elkülönítve) hűtőszekrényekben tároltuk. A fágos mintákat eleinte naponta, majd később igény szerint, az OKI munkatársai hűtőtáskában elszállították. A Tinopalos minták nem igényeltek szállítást, azokat a Malom-tónál regisztráló műszerrel mértük.

3.4.3 Fajlagos vezetőképesség és hőmérsékletmérések

A nyomjelzési kísérletet megelőzően 24 órával a Molnár János-barlang mintavételezési helyszínen óránkénti gyakorisággal végeztünk vezetőképesség és vízhőmérséklet-mérést. A B0-aknál tűzcsapról vett, előöblítésre használt víz konduktivitását is megmértük, ahol alacsonyabb konduktivitás értéket tapasztaltunk (B0 akna: 524 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Molnár János-barlang: 904 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Kíváncsiak voltunk arra, hogy az előzetesen betáplált, kisebb vezetőképességgel jellemezhető víz (mintegy 430 m³) elérve a karsztvízszintet, csökkentheti-e annak vezetőképességet, amelyet a Malom-tó lépcső és a Molnár János-barlang mintavételezési helyszíneken ki tudunk mutatni.

A fajlagos vezetőképesség- és a hőmérsékletmérést a mintavétel befejezéséig, azaz október 5-ig folytattuk.

3.4.4 A Tinopal mérése

A jelzőanyag mintákon történő kimutatása ugyanazzal a műszerrel történt, mint amelyet a Molnár János-barlangban folyamatos detektálás céljából helyeztünk el. A műszer által gyűjtött adatok letöltését, illetve a minták mérését hordozható számítógéppel a helyszínen (Malom-tónál) végeztük (4. fotó). Az egyes vízminták mérésének időtartamára, illetve a fluoriméter telepének cseréje és a rögzített adatok letöltése idejére a detektálást szüneteltetni kellett. Az analízist lehetőség szerint naponta igyekeztünk elvégezni, eltekintve attól az időszaktól, amikor már napi egy mintavétel történt.

1100 db mintát vizsgáltunk Tinopalra – a 2.2.1. fejezetben leírtak szerint, továbbá felhasználtuk a spektrofluoriméter regisztrátumát is.

3.4.5 A fágok mérése

A kilenc mintavételi helyről 115 mintát (néhány eseti kivétellel) szállítottak be fág-vizsgálatra eleinte naponta, majd kétnaponta, végül hetente kétszer. A mintákat a megvétel, és az elszállítás közti időszakban hűtőszekrényben tároltuk. A beérkezett mintákat azonnal feldolgoztuk a 2.2.4. fejezetben leírtak szerint.

A Dunából vett mintákat az ismertetettől eltérő módszerrel 2×5 ml-ben dolgoztuk fel.

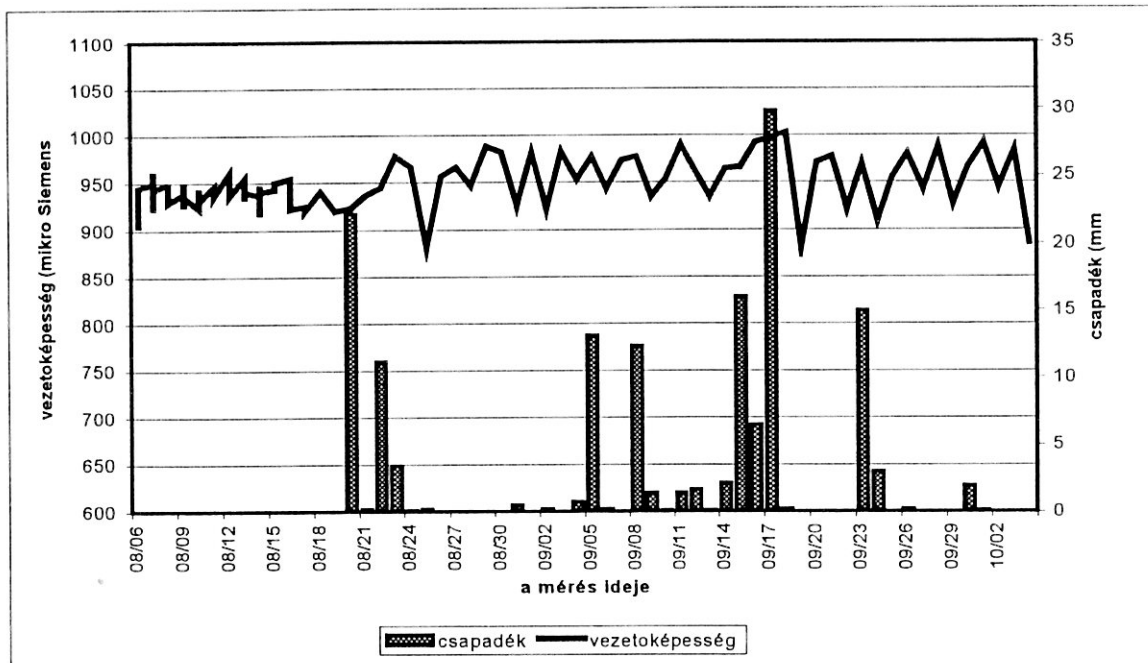
3.4.6 Mérési, észlelési eredmények

Az 1100 db. tinopálos minta, illetve a spektrofluoriméter regisztrátuma is negatív eredményt mutat. A Tinopal CBS-X nyomjelzőanyag beérkezését nem sikerült kimutatni, ezért a mérési eredmények közlésétől eltekintünk.

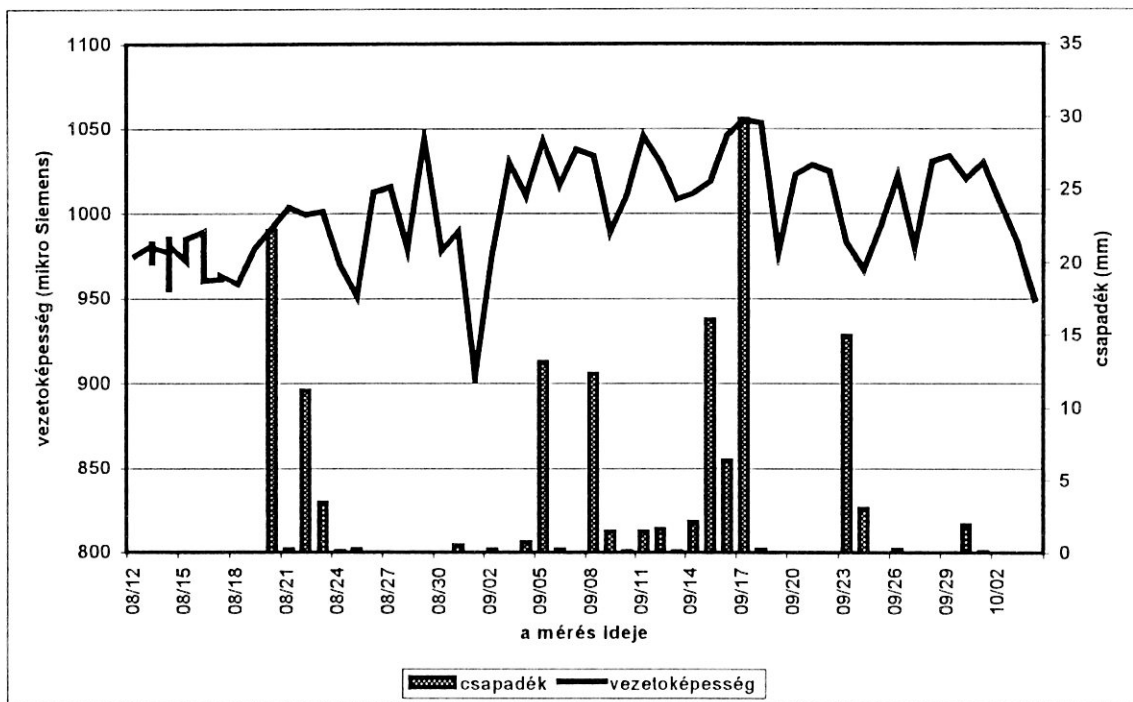
Hasonlóképpen egyetlen vizsgált mintából sem tudunk fágot kimutatni. Úgyszintén eltekintünk a mérési eredmények közlésétől.

A kéthónapos mérésorozatot követően a mért vezetőképesség-értékekben nem észleltünk jelentős változást (5. melléklet, 5/a, 5/b ábra). A Molnár János-barlang mintavételi helyszínen a konduktivitás 900 és 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ érték között változik, átlagosan 950 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (5/a ábra) A Malom-tó lépcső esetében – eltekintve egy 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -es minimumtól – valamivel magasabb értéket mutat: 950-1050 μS között ingadozik, átlagosan 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (5/b ábra).

A 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ -es ingadozás természetesnek mondható. A konduktivitás értékek a mért csapadékadatokkal nem hozhatók – a vizsgált (kéthónapos) idősor esetén – összefüggésbe (5/a, 5/b ábra). A fajlagos vezetőképesség és lehullott csapadékmennyiség között fennálló kapcsolat kimutatására több csapadékos periódusra és hosszabb idősorra (legalább egy éves) lenne szükség. Az öblítővíz hatását egyáltalán nem sikerült kimutatni, ami arra utalhat, hogy olyan vízmennyiségben hígult, hogy nem okozott a kilépésnél mérhető fajlagos vezetőképesség változást.



5/a ábra: Molnár János-barlang mintavételi helyszín: a fajlagos vezetőképesség és a lehullott csapadékmennyiség viszonya (2001. augusztus-október)



5/b ábra: Malom-tó lépcső mintavételi helyszín: a fajlagos vezetőképesség és a lehullott csapadékmennyiség viszonya (2001. augusztus-október)

3.5 Forráshozam-mérés

A Rózsadomb lábánál fakadó források (Malom-tó forrása (Boltív-forrás), Lukács-fürdő egyéb forrásai) vízhozamának mérése a forrásokhoz tartozó karsztrendszer megismerése szempontjából kiemelkedő fontossággal bír. A karsztrendszer sajátosságait a forráshidrogram és a vízgyűjtő területen lehulló csapadék együttes értelmezésével lehet feltárni. Ehhez a vizsgálathoz legalább háromhavi észlelés szükséges. Az észlelési időszak alatt szükséges legalább egy tartós száraz időszak, melyet hirtelen nagy csapadék követ (Jakucs, 1959; Maucha, 1980; Williams, 1983; Bonacci, 1993)

Ez a vizsgálat a nyomjelzési kísérlettel is szorosan összefügg, mégpedig kétféle módon. Egyrészt a forrásokon kijövő vízmennyiség ismerete teszi lehetővé a jelzőanyag várható hígulásának előzetes kalkulációját. A forráshozamok pontos ismeretében pedig a festési eredmények kvantifikálhatók. Másrészt a festési eredmény a forráshozam idősor fényében értelmezhető jól. Elvben a jelzőanyag koncentrációváltozások korrelálnak a természetes eredetű vízhozam változásokkal.

Tehát a forráshozam mérések önmagukban is rendkívüli jelentőségűek a karsztrendszer szerkezete megismerése szempontjából. Erre a tényre 1999. évi zárójelentésünk keretében már felhívtuk a figyelmet. 2000. évi jelentésünk 3. témája keretében beszámoltunk arról, hogy a mérésre korábban alkalmasnak talált Boltív-forrásnál (Malomtó) – rajtunk kívülálló okok miatt – nem tudtuk a vízhozam-mérést megoldani. Ugyanakkor ez a kérdés a nyomjelzési kísérlet miatt különösen fontossá vált.

Sajnos a kérdéses források hozamát abszolút értékben nem lehet meghatározni számos természetes, illetve mesterséges ok miatt. Ezen okok közül a legfontosabbak:

- A fürdő által használt forrásokat, illetve kutakat szivattyúzzák, a kitermelt víz mennyisége az igényektől függően változik.
- A különböző források és kutak egymásra hatnak, így a termelésen kívüli források hozamát is befolyásolja a vízkitermelés.
- Feltételezhetően nem csak az ismert forrásokon keresztül csapolódik meg a karsztrendszer vize, hanem szökevényforrásokon és diffúz módon is felszínre jut ismeretlen mennyiségű víz.

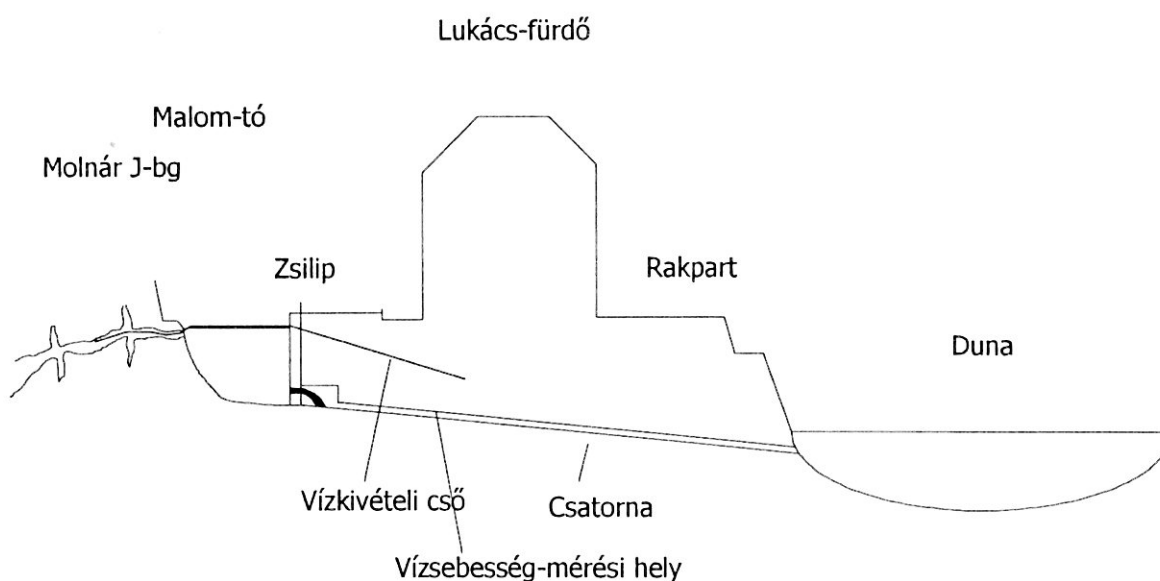
A karsztrendszer jellegének megismeréséhez viszont nem szükséges az abszolút hozam ismerete, sokkal inkább a forrás hozamváltozásának a csapadékkal való összefüggésének regisztrációjára van szükség. Ennek érdekében a Boltív-forráson (a Malom-tavon keresztül) megcsapolódó víz mennyiségét próbáltuk megállapítani.

3.5.1 A Boltív forrás bemutatása

A Boltív-forrás a Molnár János-barlang kijárata a Malom-tó irányába. A Molnár János-barlangban keveredik össze a mélyről származó forró, illetve a forrással szomszédos vízgyűjtőről származó hideg karsztvíz. A barlangon belül jól meghatározható a hideg karsztvíz és a langyos (20-26 fokok) kevert vizek

belépési pontja. A forró víz – Kalinovits Sándor feltételezése szerint egy – a hegy felé eső – nyitott hasadékon tör fel, amelyet eddig nem sikerült feltárni. Így az ismert barlangjáratokba a víz már hideg vízzel keverve langyos vízként jut be.

A Boltív-forrás a Lukács-fürdő egyik legfontosabb hidegvíz forrása. Innen nyerik az ún. női és férfi medence töltéséhez a hideg vizet. A vizet egy, a Molnár János-barlangba beépített csővezetéken keresztül gravitációsan termelik (6. ábra). A cső beépítésére – a barlang belsejében még nem, de – a forrásszájnál már észlelhető fekális szennyeződés miatt volt szükség.



6. ábra: A Molnár János-barlang – Malom-tó – csatorna – víz kivételi cső rendszer vázlatja

A Malom-tó egy mesterséges tó, melynek vízszintjét a Frankel Leó út szélénél lévő zsilip szabályozza. A zsilipen elfolyó víz egy csatornán keresztül a Dunába ömlik. A Boltív-forrás nyitott hasadékokon keresztül közvetlen kapcsolatban van a Török-forrással (Kalinovits S. szóbeli közlése), mely jelenleg vízminőségi problémák miatt üzemén kívül van. Az elfolyó víz útja a Török forrásnál le van zárva, így ott a jelenlegi körülmények közt nincs vízfolyás.

A fentiek alapján megállapítottuk, hogy a Rózsadomb lábánál fakadó vizek egy része a Lukács-fürdő által termelt forrásokon, kutakon keresztül távozik a karsztrendszerből. Egy másik része diffúz módon, illetve nem ismert szökevényforrásokon keresztül csapolódhat meg. A harmadik része pedig a Malom-tavon keresztül lép ki a rendszerből. Negyedik részét a Lukács-fürdő vízvezető csövében át medencetöltésre használják. Az első két komponens nem mérhető. Ugyanakkor a másik kettő feltehetően tájékoztat a Boltív-forrásnál kilépő vízhozam természetes változásairól.

Elgondolásunk szerint a Malom-tavon átfolyó vízmennyiség tartja fenn a tó vízszintjét (csapadékból adódó hozzáfolyás elhanyagolható). A tó vízszintváltozásai pillanatszerűen arányosak a tóba belépő és onnan kilépő vízhozam különbségeivel. A vízszintnövekedés arra utal, hogy a belépő hozam megnövekedik a kilépő rovására. A megnövekvő vízszint – a megnövekvő vízoszlopmagasság miatt megnöveli a kilépő vízhozamot is (lásd részletesen a 2.7.2 fejezetben). Így a Malom-tó vízszintje alkalmas mérce a Boltív-forrás vízhozamának meghatározására.

Ezt a rendszert befolyásolja a Lukács-fürdő vízelvezető csövén át kitermelt víz mennyiség. Ez ugyanis csökkenti a tóba belépő vízhozamot, azaz vízszintcsökkenést okoz. Ebből adódóan a vízmérleg közelítés akkor segít a kilépő vízhozam meghatározásában, ha a kivett vizet összeadjuk a Malom-tóból kifolyó víz mennyiségével.

3.5.2 A medencetöltésre használt vízhozam meghatározása

A Molnár János-barlangba beépített csövön át kitermelt víz mennyiségét a csőre épített vízóra alapján – napi egyszeri leolvasással – rögzítettük. (ld. 6.1 mellékletet)

3.5.3 A Malom-tó zsilipjén elfolyó vízhozam meghatározása

A Boltív-forráson kilépő víz többi része a tó kifolyó zsilipjén keresztül a csatornán át távozik. A forrás hozamának e komponense meghatározásához a csatornán át elfolyó víz mennyiségét kellett megmérni. A csatornán elfolyó víz mennyiségének megállapítását két – egymástól független – módon kíséreltük meg. Az egyik módszer szerint, a csatornán folyó víz sebességének mérése, a másik módszer szerint a zsilip nyílása és a felette lévő vízoszlop nyomása alapján történő számítással határoztuk meg a vízhozamot.

3.5.3.1 A csatornán lefolyó vízhozam sebességmérésen alapuló meghatározása

A Malom-tóból eltávozó vizet egy – a fürdő épülete alatt vezető – csatorna juttatja a Dunába. E csatorna egy helyen hozzáférhető, itt lehetett elvégezni a hozammérést.

A csatorna geometriája, a rendelkezésre álló mederszelvény és a nagy vízhozam miatt nem sikerült bukó műtárgy segítségével regisztrálni a vízhozamot. Ezért a hozamot forgószárnyas vízsebességmérő műszer segítségével napi egy méréssel regisztráltuk. A műszert a Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság Vízirajzi Osztályától kaptuk kölcsön használatra. A KDV-VIZIG munkatársai helyszíni szemle és próbamérés után adták át részünkre a műszert az általuk megfelelőnek tartott vitorlával. (A mérési eredményeket a kísérlet végeztével – kérésükre – részükre átadtuk.)

A meder, a mérési szakaszon 60 cm széles, 70 cm mély tojásszelvényű csatorna. A mederben három függély mentén mértünk vízsebességet. Egy, a rendelkezésünkre bocsátott program segítségével értékeltük ki a mérési eredményeket. A kiértékelő program elve: a mért sebességadatokat a nedvesített

szelvény mentén két dimenzióban integráljuk, így kapjuk meg a szelvényen átfolyó vízhozamot.

A mérést nagymértékben nehezítette a csatornán folyó víz igen nagy sebessége.

3.5.3.2 A csatornán lefolyó vízhozamnak a Malom-tó vízszintje és zsilipátmérő alapján történt meghatározása

A Malom-tó vízszintjét a Frankel Leó úttal határos oldalon lévő zsilippel lehet szabályozni. A zsilipnek van egy alsó kifolyó nyílása, illetve egy felső átfolyása. Műszaki okok miatt az alsó zsilip úgy van beállítva, hogy felső átfolyásra ne kerüljön sor soha (6. ábra).

A csatornán lefolyó víz mennyiségét meghatározhatjuk a tó vízszintje alapján is, ugyanis egy adott keresztmetszetű nyíláson – a tavat lezáró zsilip alsó nyílásán – átfolyó víz mennyiségét a nyílás felett lévő vízoszlop magassága határozza meg a következő összefüggések alapján:

$$Q = F \cdot \mu \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

illetve,

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot b \sqrt{2 \cdot g} \left(h_1^{3/2} - h_2^{3/2} \right)$$

ahol Q a vízhozamot, F az átfolyási nyílás területét, b az átfolyási nyílás szélességét, g a nehézségi gyorsulást, h a nyílás feletti vízoszlop magasságát, h_1 és h_2 a nyílás alsó és felső pereme feletti vízoszlop magasságát, μ a kifolyási tényezőt jelenti. μ értékét 0,68-nak vettük, mely értéket legömbölyített nyílás esetén kell használni. A felső összefüggés a nyílást pontszerűnek tekinti, míg a második képlet figyelembe veszi a nyílás alja és teteje közti vízoszlopmagasságkülönbséget is (Palotás L: Mérnöki kézikönyv 4. kötet, Műszaki Könyvkiadó 1961 pp.: 36-37). Az értelmezés során a második összefüggéssel számított értéket használtuk, ugyanis az elsőt több elhanyagolás terheli. Ennek ellenére a két számítással kapott eredmények közt nincs lényegi különbség. A zsilip nyílásának szélessége 45 cm, magassága 8 cm, melyet a fürdő munkatársai nem változtatnak (Kalinovits Sándor mérése). A zsilip nyílásának magassága 103,04 mBf. A vízoszlop magasságot (h , h_1 , h_2) a Boltív-forrásban elhelyezett vízszintregisztráló berendezés segítségével mértük. A vízszintet mindig a csatornán történt sebességmérés időpontjára olvastuk le a Boltív-forrás regisztrátumából (a regisztrátumot Jánosházy Judit (Budapest Fürdői és Hévízei Rt. Energia- és Vízgazdálkodási Osztály) bocsátotta rendelkezésünkre). (A 6.1 melléklet mutatja a mérési adatokat.)

3.5.3.3 Csapadékmérés

A lehulló csapadékot Budapest II. kerület Borbolya u. 5. szám alatti társasház kertjében elhelyezett szabvány csapadékmérő edény segítségével észleltük. A csapadékot napi leolvasással mértük. A mérőhely kb. 300 m távolságra Ny-ra helyezkedik el a Boltív-forrástól, a Rózsadombon. A mérési adatsort a 6.1 melléklet tartalmazza.

3.5.3.4 Duna vízállás

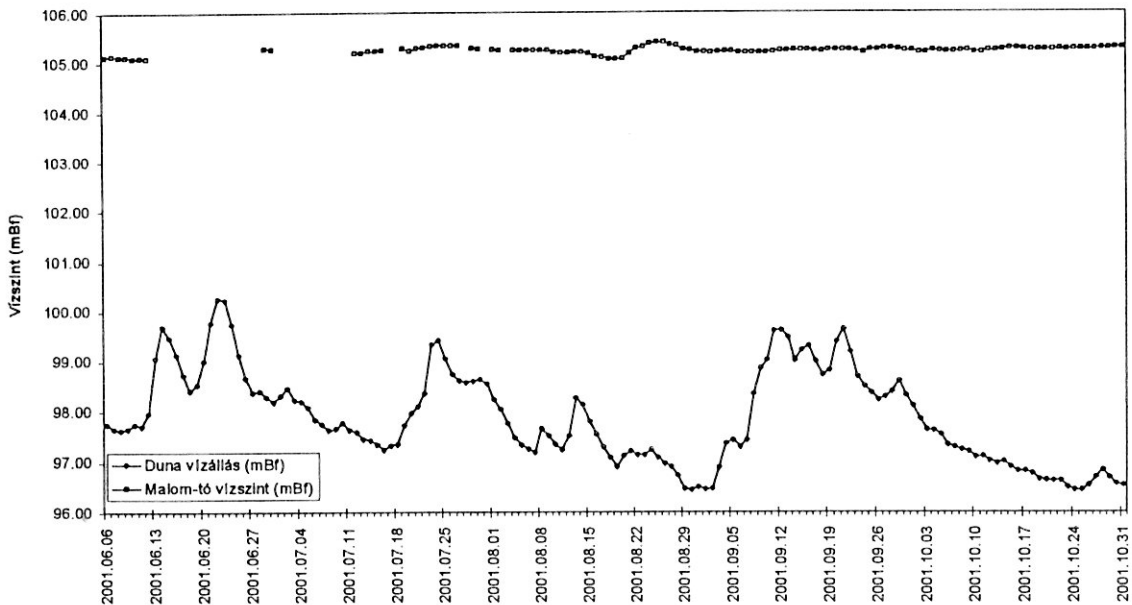
A Duna vízállásának változása hatással lehet a partvonal közelében fakadó források hozamára és a kutak vízszintjére. Annak érdekében, hogy ezt a kapcsolatot tisztázhassuk, össze kellett hasonlítani a Malom-tó és a Duna vízszintjének magasságát. Ennek érdekében kikértük a KDV-VIZIG-től a Duna vízállásgörbéjét.

A Boltív-forráshoz legközelebb eső vízmérce a Vigadó téren található, 2,5 km távolságban. A vízmérce „0” pontjának tengerszint feletti magassága 94,97 mBf. A Duna esése a budapesti szakaszon 1,37 cm/km. Ezen adatok alapján meghatároztuk a Duna vízszintjének tengerszintfeletti magasságát a Lukácsfürdő magasságában. A mérési adatsort a 6.1 melléklet tartalmazza.

3.5.4 A mérési eredmények kiértékelése

A forráshozam-méréssel összefüggő észleléseket és adatokat a 6.1 melléklet adattáblázata tartalmazza. Az észleléseket 2001. június 6-án kezdtük. A csatorna vízhozam propelleres vízsebességmérővel történő meghatározását csak 2001. augusztus 10-én tudtuk elkezdni. A Malom-tó vízórájának napi szintű leolvasását is augusztus 10-én kezdtük. A regisztrációt november 5-ig folytattuk. A sebességmérés kiértékelt jegyzőkönyveit a 6.2 melléklet mutatja.

9. ábra: A Duna és a Malom-tó vízjárása



7. ábra: A Duna és a Malom-tó vízjárása

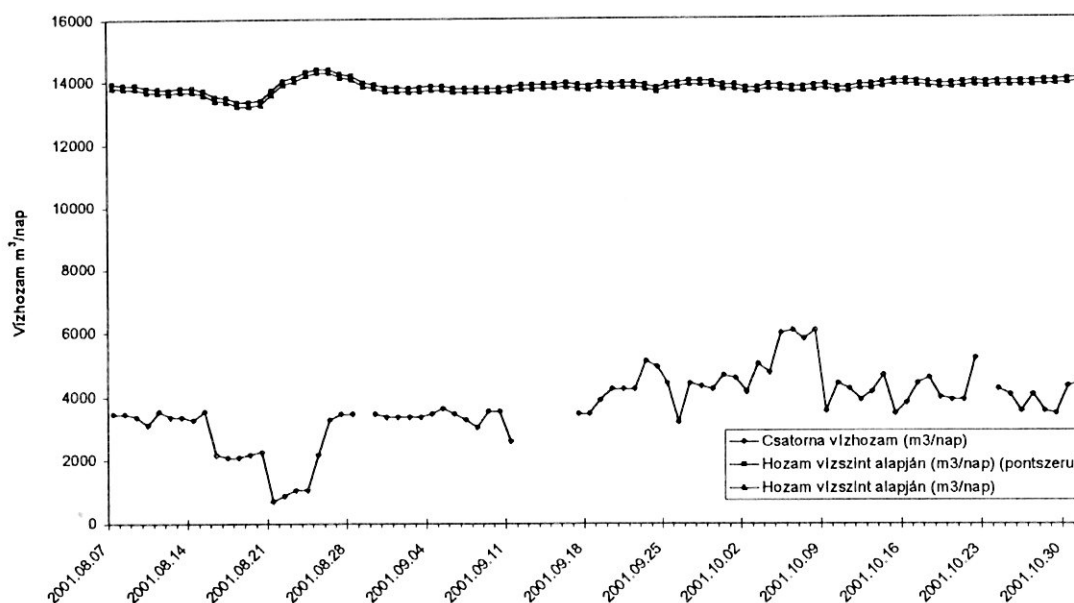
3.5.4.1 A Duna vízállásának hatása a Malom-tó vízszintjére és a Boltív-forrás hozamára

Megszerkesztettük a Duna vízállásgörbéjét a Lukács-fürdő magasságában és összevetettük a Malom-tó vízszintjével (7. ábra). Megállapítottuk, hogy a Duna legmagasabb vízállása esetén is majd 5 méterrel magasabb a Malom-tó vízszintje. Emellett semmiféle összefüggés nem mutatható ki a Boltív-forrás hidrogramja és a Duna vízjárása közt. E tapasztalatok alapján a vizsgált időszakban a Duna nem okozhatott a kifolyó csatornán visszaduzzadást, tehát a forrás hozamát nem befolyásolta.

3.5.4.2 A csatornán végzett sebességmérésből és a Malom-tó vízszintjéből számított vízhozam értékek összehasonlítása

A kétféle módon végzett vízhozam mérések összehasonlítását a 8. ábra mutatja. A diagramon látszik, hogy a sebességméréssel kapott hozamérték általában kb. negyed-ötödrésze a tó vízszintjéből számítottnak. Ezt az eltérést valószínűleg az okozza, hogy a sebességmérés feltételei nem voltak ideálisak. Nagyon nagy volt a víz sebessége, kényelmetlen volt a mérési hely. Ezt támasztja alá a sebességmérésből számított adatok nagy szórása is.

Vízhozamok összehasonlítása



8. ábra: A Malom-tóból a csatornán át elfolyó vízhozam a sebességmérés és a tó vízszintje alapján számítva

A tóvízszintből történő átszámítást pedig a regisztrátum leolvasási pontossága korlátozta.

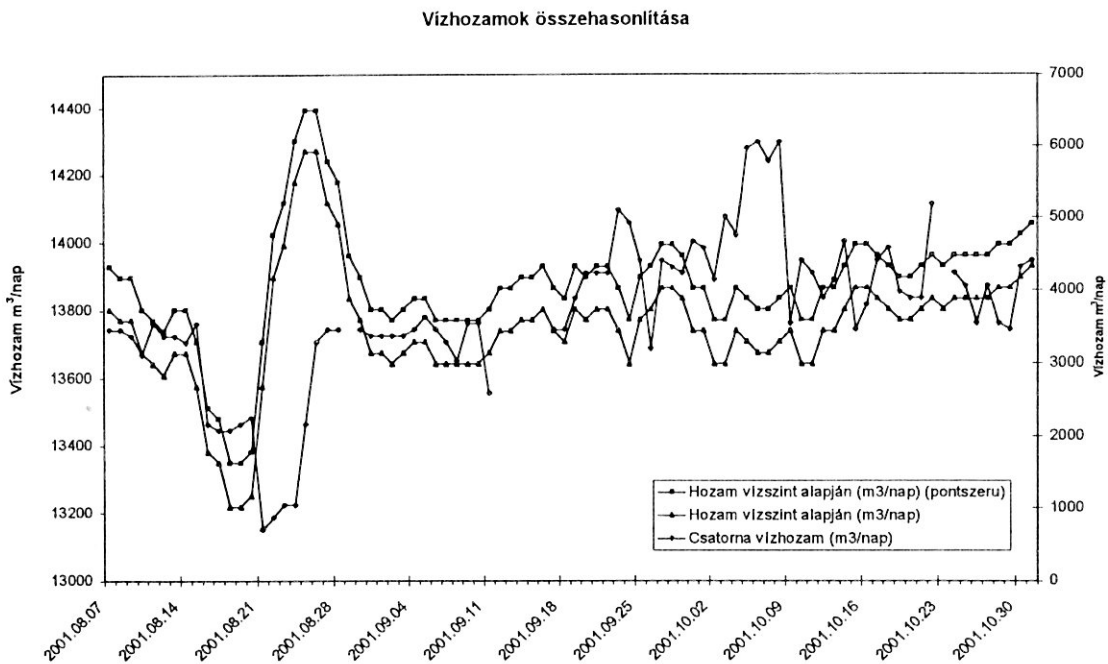
A kétféle mérés eredménye közti eltérés okát keresve tűnt fel, hogy a sebességmérés kiértékelésekor a vízfolyás közepsebességére 0,8 és 1,3 m/s közötti értékeket kaptunk. Ezt az értéket egy egyszerű – úsztatásos – sebességméréssel ellenőriztük. Az ellenőrzés során átlagos vízállás mellett 2,2 és 3,4 m/s közti értéket mértünk. Ez a propelleres mérés kiértékelésekor kapott 1,2 m/s-os közepsebességhez képest 2-3-szoros eltérést mutat. Az ellenőrzés alapján várhatóan az összes hozamadat, melyet a sebességmérés alapján számítottunk 2-3-szoros értéket vehet fel, így lényegesen közelebb kerülhet a két mérési eredmény.

A fentiek alapján a hozammérés során a Malom-tó vízszintje alapján számított hozamértékek megbízhatóbbak.

A sebességmérés hibája valószínűleg szisztematikus, ami abból is látszik, hogy a két módon nyert vízhozam adatok tendenciája többnyire megegyezik.

Ez alól kivételt jelent az augusztus 14-e és 28-a közti időszak. Ebben az időszakban a két vízhozam görbe ellentmondást mutat (8. és 9. ábra). E rendellenesség oka a zsilip működésében (működtetésében) keresendő. Egyértelműen látszik, hogy mikor a tó vízszintje alapján számított hozam megemelkedik (azaz emelkedik a tó szintje), leesik a sebességmérésből számított hozam (a csatornán ténylegesen lefolyó vízhozam). Ennek oka, hogy a 3.4.2 fejezetben leírt összefüggés nem teljesül. Az összefüggésben az egyetlen tényező, ami változhat, a zsilip nyílásának keresztmetszete! Ezt okozhatja

dugulás (a fürdő munkatársai szerint időnként előfordul), illetve a zsilipnyílás változtatása. Ez utóbbit teszi valószínűbbé, hogy augusztus 14-e és 21-e között a tó szintje lecsökkent, míg a csatornán mért hozam megemelkedett.

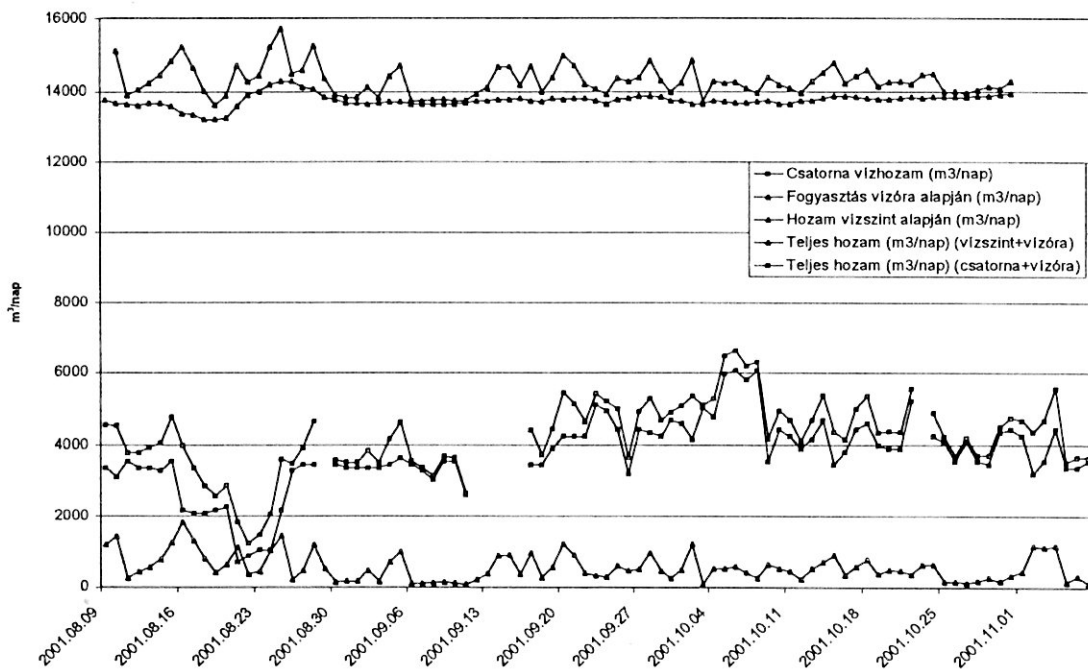


9 ábra: A Malom-tóból a csatornán át elfolyó vízhozam tendenciája a kétféle számítás alapján

A sebességmérésből előállított hidrogram sajnos nem folytonos, ugyanis két időszakban – szeptember 11 és 17, illetve november 22 és 24 között műszerhiba miatt szünetelt a mérés.

A kétféle módon (számított, mért) vízhozam értékek csak a fürdő által a Molnár János-barlangba beépített csövön keresztül kivett vízmennyiséggel együtt tükrözik a valós vízhozam értékek változékonyságát. A kivett víz mennyiségét – mint már utaltunk rá – a csövön lévő vízóra alapján regisztráltuk.

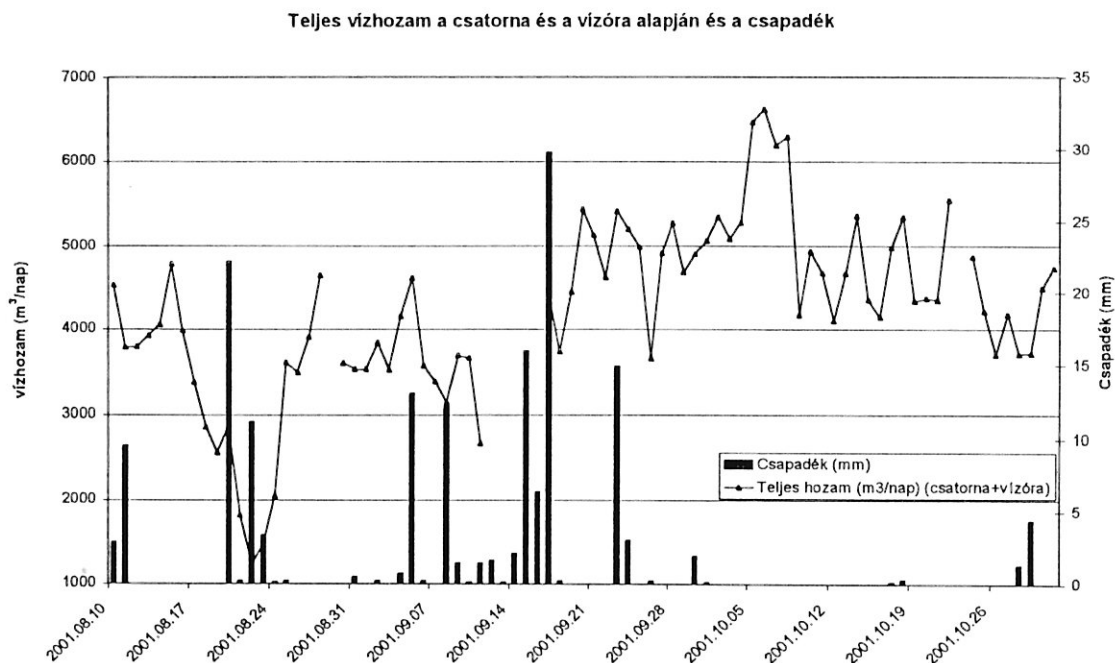
A teljes vízhozam-görbét a mért vízhozam és a fürdő által levett vízmennyiség összege adja (10. ábra), ezen a kétféle mérés és a kivett vízhozam együttese szerepel.



10 ábra: A Malom-tóból csatornán elfolyó vízhozam, a Molnár János-barlangba épített csövö keresztül kivett vízmennyiség és a Boltív-forrás hozama (a kettő összege)

3.5.4.3 A teljes vízhozam-görbe és a csapadék összehasonlítása

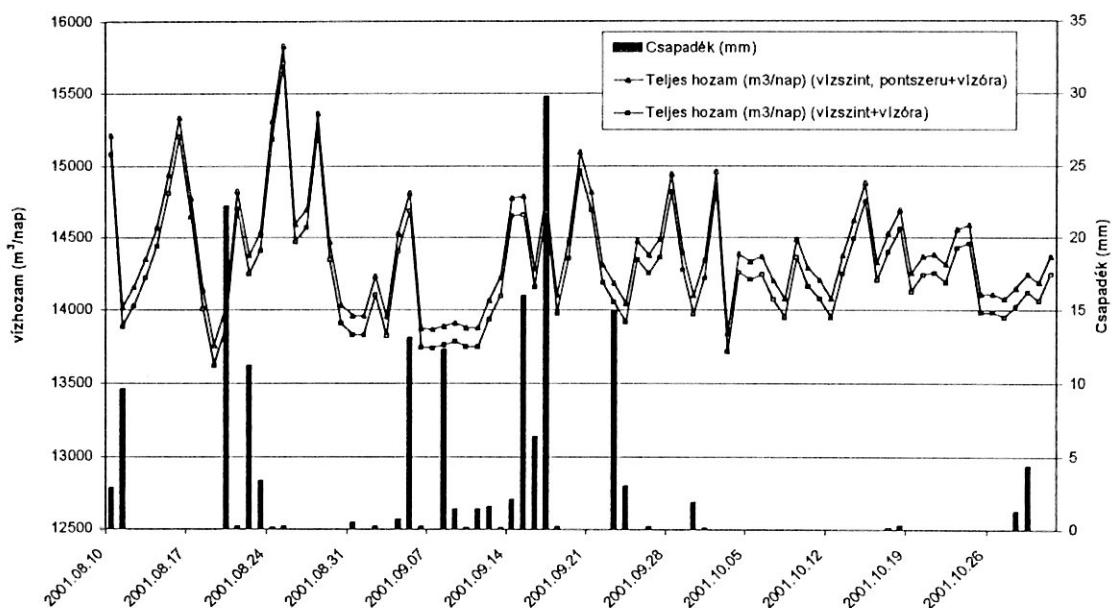
A források vízhozam idősorai (hidrográfjai) információt nyújtanak a rendszer hidraulikai paramétereiről, felépítéséről. A forráshozam idősorok magukon hordozzák a csapadékesemények, és azon útvonal jellemzőit, amelyet a víz megtesz a beszivárgástól a forrásig.



11. ábra: A Boltív-forrás hozama a csatorna hozam alapján és a csapadék összefüggése

A teljes vízhozam-görbét a csapadékeseményekkel ábrázoló diagramon (11. és 12. ábra) látható, a csapadékesemények hatása nem jelentkezik egyértelmű, ugrásszerű hozamnövekedés formájában. Ennek oka lehet, hogy a megfigyelési időszakon belül (augusztus 10 – november 8.) nem volt kiemelkedő mennyiségű csapadék, sem hosszabb ideig tartó csapadékos időszak, ami megfelelt volna az értékelés kívánalmainak, illetve a Malom-tó és a mögötte lévő barlangrendszer által létrehozott hatalmas nyílt víztükör erősen tompította a forráshozam ingadozásait. Másik ok, amiért nem észleltünk értelmezhető összefüggést a csapadék és a forráshozam változásai között a karsztrendszer összetettségében keresendő, a forrás igen nagy (a tó vízszintje alapján átlagosan 14000 m³/nap, illetve a sebességmérés alapján 4200 m³/nap) hozamában keresendő. Ezeknek köszönhetően a csapadékesemények általi ugrásszerű hozamnövekedés „leárnyékolódik”.

Teljes vízhozam a Malom-tó vízszintje és a vízóra alapján és a csapadék



12. ábra: A Boltív-forrás hozama a Malom-tó vízszintje alapján és a csapadék összefüggése

Sajnos lehetőségeink a mérés tekintetében igen korlátozottak voltak. Emiatt mindkét megközelítés szerinti mérés hibát hordoz. E hiba is hozzájárulhatott ahhoz, hogy ne tudjunk kimutatni összefüggést a forráshidrogram és a csapadék között.

3.5.4.4 A valós vízhozam-görbe és a kilépő teljes vízmennyiség összefüggése

A valós vízhozam-görbe alapján a Malom-tavon keresztül legalább 1200 m³/nap, legfeljebb 16000 m³/nap vízmennyiség csapolódik meg. Ennél feltehetően sokkal több a ténylegesen megcsapolódó vízmennyiség. 34000 m³/napra becsülték a Lukács fürdőnél eredetileg kilépő vízmennyiséget (Maucha, 1993 in Hazslinszky 1993). A forráshozam-mérés bevezetőjében hangsúlyoztuk, hogy az elfolyó vízhozamnak csak egy része mérhető meg a mi módszerünkkel. De ez is olyan értéket jelent, amely – az archív mérési adatot, a 3000 m³/nap – 6500 m³/nap értéket (Alföldi et al., 1968) – 2-6 szorosán meghaladja. Nem feltételezhetjük, hogy az 1955-ből, Papp Ferenc méréséből származó értékhez képest megváltozott volna a kilépő vízhozam. Ennek ismeretében viszont kérdéses, hogy az eredeti forráshozam az eredetinek nem néhányszorosa-e, mint azt a korábbi ismeretek alapján feltételezni lehetett.

A nyomjelzés céljára – mint arra már utaltam – a vízkilépési helyeket tartósan szivattyúzták a vizsgált időszakban. Így a használaton kívüli Török forrást és az Antal kutat is. Ezek hatását a kilépő vízhozamra nem vizsgáltuk. A valós hozamgörbe további pontosítása a kutak egymásra hatásainak megfigyelésével és a különböző csatornákon elfolyó vizek hozamának mérésével

végezhető el. Ekkor tudnánk reális választ adni a Lukács fürdő környezetében megcsapolódó összes vízmennyiségre vonatkozóan.

4 Nyomjelzési, forráshozam-mérési eredmények értelmezése, javaslatok

Elsőként le kell szögezni, hogy a mért vízhozam adatok olyan nagymennyiségű vízkilépésről tanúskodnak a Boltív-forrás környezetében, hogy azok a nyomjelzés – mint alkalmazott módszer – realitását kérdőjelezzik meg. Ezt a helyet tekintettük a József-hegy felől utánpótlódó vizek elsődleges kilépési helyének és a várható hozam prognózisánál az 1955-ös mérésekből indultunk ki. Ezt többszörösen meghaladó vízmennyiséget kaptunk, ami a bejuttatott festék detektálhatóságát eleve lehetetlenné teszi a nagy hígulás miatt. A fágok esetében ez még nem elégséges körülmény a negatív eredményhez.

Kiegészítő mérési adatok a jelzőanyag elvesztési alternatívák vizsgálatához:

Kalinovits Sándor – alternatíváink elemzése céljából - vízsebesség mérést végzett a Molnár János barlangban. A Malom-tó felé tartó vízben 1 m²-es járatátmérő mellett 1,7 m/perc-es vízsebességet mért. A szűkebb járatokban – ugyanilyen áramlási fluxust feltételezve – még gyorsabb áramlási sebességek lennének várhatóak. Ha ezt az értéket kiterjesztjük a B0 akna légvonalbeli távolságáig, és a legnagyobb esést a Malom-tó irányába feltételezzük, akkor a 900 m-es út megtételéhez 8,8 órára lenne szükség, amennyiben a jelzőanyag elérte a karsztvízszintet.

Kalinovits a barlang É-i járataiban az előbbinél is nagyobb, 4 m/perces vízsebességet észlelt és 18-19 °C-os bejövő vízhőmérsékletet mért.

Az Antal-kút tartós szivattyúzása miatt az eredetileg 60 °C-os vízhőmérséklet 68 °C-ra emelkedett (Kalinovits szóbeli közlése).

A Tinopal és a fág sorsát – elvesztését – illető lehetséges alternatívák:

1. A jelzőanyag a karszt telítetlen zónájában egy – eddig nem ismert 400-500 m³-nél nagyobb térfogatú – barlangüregben elakadt. A B0-barlang keletkezése egy nagyobb terem beszakadására vezethető vissza és 20-25 méterrel a szokásos fő barlangszint felett található. Alatta lehet újabb, ismeretlen barlangterem. Sőt, a források felé haladva lehetnek fiatal járatok, amelyek szükségszerűen az ismert barlangok és a Molnár János-barlang szintje között találhatóak. A Ferenchegy-barlang esetében kb. 20 m vastagságban járatos a kőzet. A Szemlőhegyi-barlangnál, amely 40-60 m-rel alacsonyabban van (140-160 mBf körül) a nagyméretű üregekkel átjárt kőzetvastagság kb. 40 m-es. Ez számunkra azt jelenti, hogy kb. ilyen vastagságú, üreges "emeletekben" lehet gondolkodni. Hogy hányban, azt senki nem tudja. Annyi bizonyos, ha a festék elakadt, onnan szivárgással tudott csak tovább haladni. A szivárgási sebességnek megfelelően időeltolódással érte el a karsztvíznívót. A Tinopal és a fág a teljes öblítővíz mennyiségben hígult. A szivárgás miatt nem teljesült a koncentrált vízszinthez juttatás kritériuma, amely a nyomjelzés sikerének egyik feltétele lett volna. Ezért a nyomjelző kimutathatatlaná vált.
2. A nyomjelzőanyag elérte ugyan a karsztvízszintet, de a domborzati esésből kiindulva elképzelhető, hogy a karsztvízszintben is a legnagyobb

lejtés a Duna felé észlelhető. Szökevényforrásokon a Dunába bejutott és nem a várt beérkezési helyeken csapolódott meg.

3. A nyomjelzőanyag elérte ugyan a karsztvízszintet és a Lukács-fürdő megcsapolódási hely felé vette az irányt, de olyan mennyiségű vízben hígult, hogy kimutathatatlaná vált. A festék esetében ez egyértelműen negatív eredményt eredményhez vezetett. Kérdés, hogy mi a helyzet a fágokkal. Azok 10^9 m³ víz bejelzésére voltak alkalmasak. Ideális karsztvízszinthez érést feltételezve 10^4 m³ – 10^5 m³ nagyságrendű vízzel ért le a jelzőanyag. Azaz, amennyiben a vizsgálati időn belül ért volna a kilépési helyhez, a hígulás még nem akadályozta volna meg a kimutatást. Ez a számítás az 1-2. alternatívákat erősíti.

A fenti megállapítások tükrében bármelyik alternatíva lehetséges, de leginkább az feltételezhető, hogy azok kombinációi idézték elő a nyomjelzők eltűnését. További hozammérések azt erősíthetik meg, hogy a nyomjelzésnek nincs realitása a területen. Ha mégis meg lehet vele próbálkozni, akkor a Malomtő kilépési helytől a Rózsadomb felé távolodva, a szerkezeti vonalakat – mint preferált pályákat követve – lehetne újabb kísérletekkel próbálkozni. Mivel ezeken a területeken nem ismertek természetes barlangüregek, csak fúrással, kútkiképzéssel lehetne próbálkozni.