

KARSZTFEJLŐDÉS XX.

Szombathely, 2015. pp. 63-79.

DOI: 10.17701/15.63-79

VÍZNYOMJELZÉSES VIZSGÁLATOK A HARAGISTYA – SZILICE – BORZOVA KARSZTTERÜLETEN

TRACER TESTS IN THE HARAGISTYA – SILICA – SILICKÁ BREZOVÁ KARST AREA

GRUBER PÉTER¹ – DAGMAR HAVIAROVÁ² – BALÁZS ILMA³ –
MÁTRAHALMI TIBOR³ – SERFŐZŐ ANTAL³ –
AMBRUS MAGDOLNA⁴

¹Aggteleki Nemzeti Park Igazgatóság, 3758 Jósvafő, Tengersizem oldal 1.

²Szlovák Barlangok Igazgatósága, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš

³Geogold Kárpátia Kft., 4183 Kaba, Mátyás király u. 59.

⁴KSZI Környezetvédelmi Szakértői Iroda, 1132 Bp., Kresz Géza u. 18.

Abstract: The aim of the research was to detect and determine the hydrological connection between the sinkholes and springs in the Haragistya–Szilice–Borzova Karst area, including a measurement of the hydraulic leakage parameters and a more accurate mapping of the catchment area. Six Slovak (Papverme, Királykút Stream, Nyírsár Sinkhole, Kecső Meadow Cave, Vörös-kő Marsh and Majko Cave) and two Hungarian locations (Vízfakadás, Agancsos Sinkhole) were included in the tracer study. The tests successfully revealed leakage and flow factors. Up until now, the hydrological connection between Babot Well, Kis-Tohonya Spring and the catchment area's sinkholes (Agancsos Sinkhole and Papverme Sinkhole) had not been confirmed. In addition, the hydrological connections between the Majko Cave and Sólyomkő Spring; Papverme, Szilice Ice Cave and Fekete Stream; Agancsos Sinkhole, Fekete Stream, Milada Cave and Kecső Cave were established.

1. Bevezetés

Jelen tanulmány „Az Aggteleki-karszt és a Szlovák-karszt világörökség barlangjainak kezelése” (HUSK/1101/221/0180) című projekt keretén belül elvégzett víznyomjelzéses vizsgálatokat és eredményeit mutatja be. A Magyarország–Szlovákia Határon Átnyúló Együttműködési Program keretében zajlott nyomjelzéses vizsgálatokat a Karst Survey Konzorcium végezte az Aggteleki Nemzeti Park Igazgatóság és a Szlovákiai Barlangok Igazgatósága szakmai irányítása mellett.

2. A kutatási terület általános jellemzése

A vizsgált terület a Gömör–Tornai-karszt DNy-i részén, közvetlen az országhatár mentén helyezkedik el. A szlovák területrészen a Szilicei-fennsík DK-i részét fedi, Gombaszög, Szilice és Borzova településeket érintve. A

magyarországi térségben a Haragistyai-fennsík területét, részben a Jósvafői-fennsík ÉNy-i részét, valamint az Alsó-hegy nyugati csücskét foglalja magába, nyugati határvonala a Lófej-völgy.

A terület sajátos arculata a felépítésében döntő szerepet játszó középső-triász, jól karsztosodó mészköveiben és dolomitjaiban alakult ki. Ezek a hozzájuk társuló idősebb, alsó-triász vízzáró agyagpalával és homokkővel együtt igen bonyolult tektonikai kapcsolatban vannak: a kőzetso-rozatok egymás mellett és egymás fölött is előfordulnak, mivel gyúrt, pikkelyes és vetős szerkezetekkel is találkozunk a területen (GRUBER – GAÁL 2014). A terület morfológiájára a karsztos fennsíkok a jellemzők, amelyeket mély völgyek osztanak kisebb egységekre (GRUBER – GAÁL 2014). Ezek a kisebb hidrogeológiai egységek jelentős eltéréseket mutatnak — elsősorban az ott található kőzettípusoktól függően — mind vízháztartásukat, mind áramlási rendszerüket, mind a megcsapolásukat jelentő karsztforrások hozamait illetően.

3. Anyag és módszer

A nyomjelzéses vizsgálatok helyszíneit a korábbi karszthidrologiai, nyomjelzéses kutatások eredményei alapján terveztük meg (SÁRVÁRY 1965, MAUCHA 1975, HAVIAROVÁ – GRUBER 2006), az alábbi célkitűzéseket szem előtt tartva:

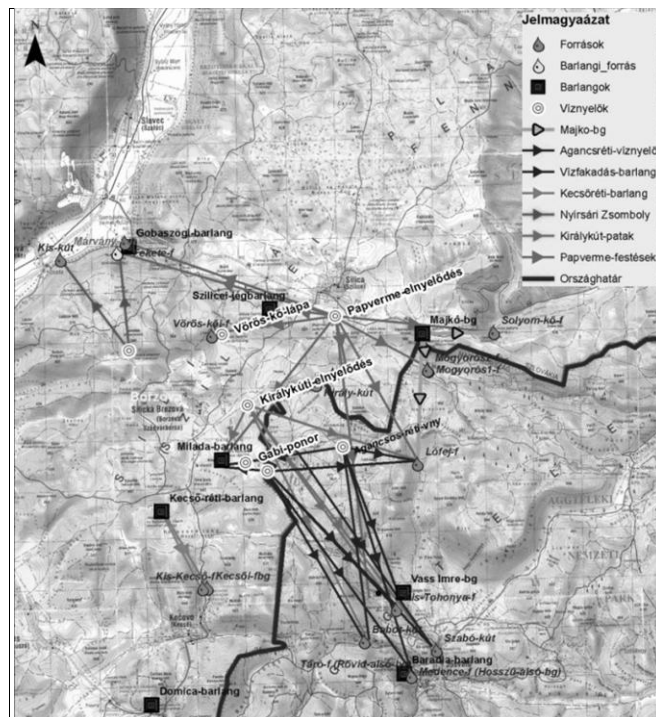
- A Vass Imre- és a Milada-barlangok vízgyűjtőterületének lehatárolása, a barlangok feltételezett összeköttetésének igazolása.
- A betáplálási helyek és a területen fellelhető karsztforrások potenciális hidrogeológiai kapcsolatának kimutatása.
- A felszínalatti víz áramlási és szállítási paramétereinek jellemzése.

A vizsgálatok megkezdését megelőzően felmértük vizsgálatok helyszíneit, majd a terepen észlelte alapján állítottuk össze a részletes vízfestési stratégiát, meghatározva a nyomjelző anyagokat, ezek mennyiségét, a mintavétel menetét, a mintaelemzés helyszínét és darabszámát (1. ábra).

A nyomjelző anyagok kiválasztás során sok paramétert kell figyelembe venni. A beérkezési idő várható hossza és a jelzett víz minősége meghatározzák, hogy az alkalmazható anyag lebomlásra és adszorpcióra mennyire lehet hajlamos, a várható hígulás mértéke a szükséges kimutathatóssági határt és az alkalmazandó mennyiséget szabja meg.

Mivel több helyszínen viszonylag egyidejű festést terveztünk, arra is figyelni kellett, hogy olyan nyomjelző anyagokat válasszunk, amelyeket szimultán ki lehet mutatni egyetlen megfigyelési pontban. Továbbá azt is figyelembe kell venni, hogy a kiválasztott festékanyag ne legyen toxikus,

ugyanis több helyszínen, ahol a festékanyag várhatóan megjelenik, ivóvízbázis is. A fentieket figyelembe véve 5 féle nyomjelző anyagot alkalmaztunk, amelyből 4 fluoreszkáló nyomjelző: *Uranin* (Na-fluorescein, $C_{20}H_{10}Na_2O_5$), *Eozin* ($C_{20}H_6Br_4Na_2O_5$), *Rhodamin WT* ($C_{29}H_{29}ClN_2Na_2O_5$), *Tinopal CBS-X* ($C_{28}H_{20}O_6S_2Na_2$), egy pedig a *H40/I* típusú tengeri bakteriofág.



1. ábra: A nyomjelzéses vizsgálatok helyszínei a várható megjelenésekkel
Fig. 1: Locations of tracer studies with their expected emergences

4. A nyomjelzés menete

A magyar részen a Haragistyai-fennsíkon lévő, Wettersteini mészkőben és dolomitban kifejlődött Agancsos-réti-víznyelő, a határ közvetlen közelében, szintén Wettersteini mészkőben található Vízfakadás került nyomjelzésre. A szlovák oldalon a Szilicei-fennsíkon, Wettersteini és Reiflingi Formációk érintkezési vonalában kialakult Nyírsári-zsomboly és Vöröskői-nyelő, ettől D-re Wettersteini mészkőben található Kecő-réti-barlang, valamint a kutatási terület északi részén lévő Majkó-barlang került nyomjelzésre. A betáplálás két esetben felszíni vízben történt: a szlovákiai Király-kút környékéről eredő Király-kúti patak, valamint a Szilicétől északra lévő Papverme-

víznyelőben felduzzasztott tó túlfolyójában. A nyomjelzés megkezdése előtt, minden megfigyelési pontból minden trésszerre alapvizsgálatot végzünk, hogy a háttér-koncentrációkat, korábbi vízfestéses vizsgálatok maradványait kiszűrhessek.

I. táblázat
Table 1.

A használt nyomjelző anyagok összefoglaló táblázata
Summary of tracer materials used

Helyszín	Festék-anyag	Mennyiség	Betáplálás dátuma	Mesterséges vízöblítés a nyomjelzéssel egy időben (m ³)
Nyírsáriszomboly	H10 típusú bakteriofág	8 l 10 ¹⁴ /ml fągsűrűség	2014.02.10.	-
Papverme-víznyelő	Uranin	5 kg	2014.05.20.	-
Agancsos-réti víznyelő	Rhodamin WT (20%-os oldat)	40 l (kb. 15 kg)	2014.05.20.	24
Vízfakadás	H40/1 típusú bakteriofág	8 l 10 ¹⁴ /ml fągsűrűség	2014.05.20.	16
Vöröskő-lápa	Tinopal-CBS-X	7 kg	2014.05.23.	24
Király kúti elnyelődés	Eozin	0,5 kg	2014.05.27.	-
Kecső-réti-barlang	H40/1 típusú bakteriofág	8 l 10 ¹⁴ /ml fągsűrűség	2014.07.07.	-
Majkó-barlang	H40/1 típusú bakteriofág	8 l 10 ¹⁴ /ml fągsűrűség	2014.07.07.	-

Az előirányzatoknak és a terepi adottságoknak megfelelően a vízfestést követő mintavételezés a határ mindkét oldalán 23 db mintavételi helyszínen történt, melyből 8 db Magyarországon, 15 db Szlovákiában található. A szlovákiai oldalon a Szilicei-fennsík középső részén, nagyjából a Szilicei-jegebarlang és a Gombaszögi-barlang között található a vizsgálati terület egyik legkiterjedtebb természetes föld alatti folyosórendszere. A rendszer legrégebben kutatott része a Szilicei-jegebarlang. Föld alatti vízfolyása, a Fekete-patak 3,3 kilométerre tőle, a gombaszögi Fekete-forrásban látja meg a napvilágot (GAÁL 2008), amit korábbi vízfestések is igazoltak. Nagy valószínűséggel ezekhez kapcsolódik még a Vöröskői-víznyelő két kisebb barlanggal, a Borzova melletti, 135 m mély Nyírsár-zsomboly és a Papverme víznyelője is. Ezek alapján rendszeresen, terv szerint mintáztuk a Szilicei-jégbarlangban található Fekete-patakot és a Gombaszögi-barlang Fekete-forrását. A Gombaszögi-barlangban emellett figyeltük az időszakos Márvány-kutat, továbbá a Papverme-víznyelőtől K-re található Sólýomkő-

forrást. A borzova-kecsői hidrológiai rendszer (*KRUPÁR* 1946, 1947, *MAJKÓ* 1958, 1959a, 1959b, 1961, *SÁRVÁRY* 1965, *MAUCHA* 1975, *ORVAN* 1994, *HAVIAROVÁ – GRUBER* 2006, *GRUBER – GAÁL* 2014) további összefüggés-vizsgálatainak céljából mintáztuk a Milada-barlang felszín alatti vízfolyását, a két Kecő-forrást, valamint a Királykúti-patakot és az ezt tápláló Ardócska-forrást. A vízrendszer feltételezett északi határa az alsó-triászi Bódvaszilasi Formáció keskeny palasávja. Erről a mészkő-pala érintkezési zónáról folyik el a Király-kúti patak. Ellenőrző jellegű, kisszámú mintavétel a Majko-barlangban, a Puszta-kútban, a Kis-kútban, illetve a Milada-patak mellékágából történt.

A magyar oldalon mintát vettünk a Vass Imre-barlang alól induló, s a barlang vizeit felszínre vezető Kis-Tohonya-forrásból, és az ettől kb. 1 km-re, DK-re található Szabó-kútból. Figyeltük a Babot-kutat, ami Jószaforrás csoportból a Táró-forrást és a Medence-forrást. A Rövid–Alsó-barlang vizét a szivárgó víz mellett két barlangi víznyelőből kapja, majd a Táró-forrásban lép a felszínre. A Hosszú-Alsó-barlang járatai az Aggtelek község határában nyíló Bábalyuk-víznyelőtől indulnak és a Medence-forrásnál végződnek (*GRUBER – GAÁL* 2014). Továbbá mintáztuk a Lófej-völgy és Ménes-völgy magasan fakadó forrásait is: a hármas szivornya-rendszerű Lófej-forrást, amelynek vize a forrás alatt elnyelődve a Nagy-Tohonya-forrást táplálja (*IZÁPY – MAUCHA* 1998), illetve a Mogyorós-kút két forrását, melyek hidrológiai rendszere nem ismert.

A mintavételezés kétféle módon történt, a legtöbb helyen kézi mintavételezéssel, néhány helyen automata vízmintavevő berendezések segítségével. A vizsgálat során összesen 3118 db vízminta került begyűjtésre. A leghosszabb mintavétel a Kis-Tohonya-forrásnál (2014. május 20-tól 2014. július 22-ig, 459 db minta) és a Babot-kútnál (2014. május 20-tól 2014. július 6-ig, 515 db minta) történt.

Fluoreszkáló nyomjelzőkre a mintákat egy GGUN-FL típusú fluorométer segítségével helyben elemeztük, a bakteriofág-vizsgálatot pedig a kassai Állatfiziológia Intézet biológiai laboratóriuma végezte. A vízmintákon kontroll spektroszkópiai vizsgálatokat végeztünk (BME Atomfizikai Tanszékén Avantes AvaSpec-1024 Fiber Optic spektrométerrel).

A vízfestés eredményeinek kvantitatív kiértékeléséhez szükség volt a források vízhozamának ismeretére, melyeket az Észak-Magyarországi Vízügyi Igazgatóság és az ÉRV biztosította. A Szabó-kút és Mogyorós-kút esetében már meglévő, illetve általunk létesített Thomson-bukók segítségével határoztuk meg a vízhozamokat. A szlovákiai területre a nyomjelzéses vizsgálatok időszakában a Milada-barlangban lévő pataokban sikerült hoza-

mot regisztrálni, illetve további adatokat a Szlovák Hidrometeorológiai Intézet szolgáltatott.

5. Eredmények

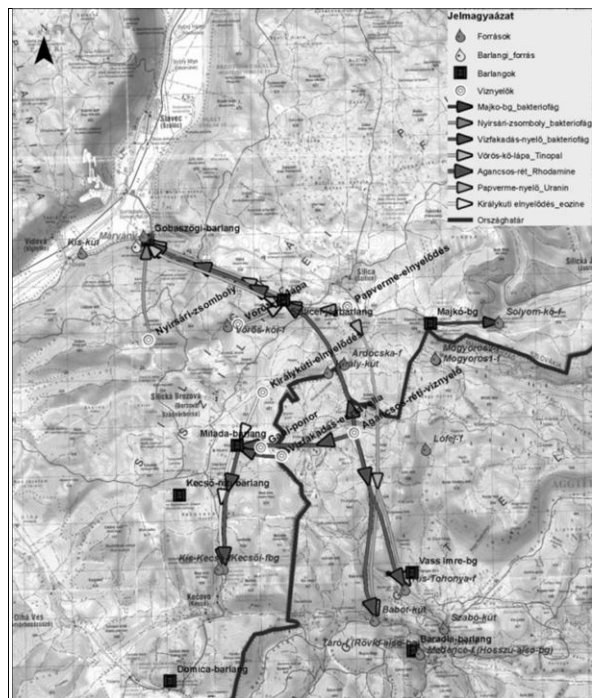
A nyomjelzéses vizsgálatok eredményei több feltételezett hidraulikai kapcsolatot is igazoltak a térségben, de nem várt eredményt is produkáltak.

II. táblázat
Table II:

Summary of the positive results
A pozitív vizsgálatok eredményeinek összefoglaló táblázata

Vízfestés helyszíne nyomjelző anyag	Nyomjelző anyag figyelése, vízmintavétel	Betáplálás időpontja	Az első megjelenés időpontja	Betáplálás és megjelenés között eltelt idő (óra, perc)	Távolság légvonalban
Nyírsáriszomboly Bakteriofág	Fekete-patak (Gombaszögi-barlang)	2014. 02. 10 13:30	2014. 02. 21	264	2800 m
Vízfakadás Bakteriofág	Milada-patak (Milada-barlang)	2014. 05. 20. 12:10-12:22	2014.05.22 20:00	56	1000 m
Agancsos-réti-víznyelő Rhodamin-WT	Szilicei-jegesbarlang	2014. 05. 20. 14:42-15:26	Értékelhetetlen eredmény*		3000 m
	Fekete-patak (Gombaszögi-barlang)		2014.05.24.21:00	101.50	6000 m
	Milada-patak (Milada-barlang)		2014.05.28. 0:00	176.55	2500 m
	Nagy-Kecső-forrás		2014.06.01. 4:00	276.55	5000 m
	Babot-kút		2014.06.06. 1:00	393.55	4000 m
	Kis-Tohonya-forrás		2014.06.06. 2:30	405	3500 m
Papverme-víznyelő Uranin	Szilicei-jegesbarlang	2014. 05. 20. 17:30-17:50	Értékelhetetlen eredmény*		1300 m
	Fekete-patak (Gombaszögi-barlang)		2014.05.24 16:00	94.20	4500 m
	Babot-kút		2014.06.06 21:00	411.20	6600 m
	Kis-Tohonya-forrás		2014. 06. 07 6:30	421	6000 m
Vöröskői-víznyelő Tinopal	Fekete-patak (Gombaszögi-barlang)	2014. 05. 23. 9:30 – 9:45	2014.05.24 12:00	26.25	2450 m
Királykúti-elnyelődés Eozin	Milada-patak (Milada-barlang)	2014. 05. 27. 15.18-15.30	2014.05.28. 0.00	8.50	1200 m
	Nagy-Kecső-forrás		2014.06.01 4:00	108.50	3700 m
Majko-barlang Bakteriofág	Sólyom-kő-forrás	2014. 07. 07. 15:10-15:25	2014.07.14 10:20	163	1400 m

*Automata vízmintavevő meghibásodása.



2. ábra: A nyomjelzéses vizsgálatok eredményeit szemléltető térkép
 Fig. 2: Map illustrating the results of the tracing experiments

5.1. Számolt paraméterek

Nyomjelző anyag visszanyerési aránya (Tracer recovery)

A visszanyerési arány számítása az adott forrás vízhozamának ismeretében történhet, segítségével megbecsülhető, hogy a betáplált nyomjelző anyagból mekkora mennyiség jelenik meg a megfigyelési pontban. Ezt az áttörési görbék alapján számoltuk, a mért koncentráció és vízhozam szorzatának integrálásával a nyomjelző első megjelenésétől a lecsengéséig tartó időintervallumra, az alábbi képlet felhasználásával (Hubbard et al, 1982):

$$M = \int_{t=0}^{\infty} c(t)Q(t)dt$$

ahol M - a visszanyert nyomjelző tömege; $c(t)$ - a nyomjelző anyag koncentrációja t időpontban; $Q(t)$ – a vízhozam t időpontban

Áramlási sebességek

A nyomjelzéses vizsgálat egyik fő célja a víz szállítási idejének és tényleges sebességének meghatározása. Mivel a felszín alatti víz áramlásának útja általában nem ismert, az effektív sebesség a nyomjelző anyag betáplálási pontja és a megfigyelési pont közötti legrövidebb távolság egy sík-

ra vetítve. Speciális esetekben, pl. karsztos területeken egyéb függőleges irányú komponenseket is figyelembe lehet venni. Az általánosan elfogadott képlet, mellyel az áramlás effektív sebessége számolható (Fischer, 1968):

$$v = \frac{x}{t} \text{ [távolság/idő]}$$

v = effektív sebesség (m/idő); x = a nyomjelző anyag befecskendezése és a megfigyelőpont közötti távolság (m); t = nyomjelző anyag szállítási ideje

Az előbbieken ismertetett áttörési görbét figyelembe véve a következő további paraméterek számolhatók (Fischer, 1968):

- a tracer első beérkezésének időpontjával számolt maximális effektív sebesség:

$$v_{max} = \frac{x}{t_{fa}}$$

- a maximális koncentrációhoz tartozó szállítási idővel számolt:

$$v_{peak} = \frac{x}{t_{peak}}$$

- az átlagos tartózkodási idővel (t_{mean} , mean transit time) számolt sebesség:

$$v_m = \frac{x}{3600 t_{mean}}$$

ahol:
$$t_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i c_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n c_i Q_i \Delta t_i}$$

t_i -a betáplálás és az egyes mintavételek között eltelt időintervallum,
 c_i - a nyomjelző anyag koncentrációja az egyes mintavételezések időpontjában,

Q_i – a vízhozam a mintavételezésekkor.

Mivel a betáplálási és a megfigyelési pontok közötti távolság nem ismert pontosan, az átlagos tartózkodási idővel számolt sebesség valamivel nagyobb, mint a nyilvánvaló sebesség, mivel nem veheti figyelembe a felszín alatti vízáramlás karsztra jellemző meanderező jellegét, a valóságban sokkal hosszabb utat. Ahol lehetséges, mégis hasznos kiszámolni, mert egy általános képet kaphatunk a felszín alatti áramlás sebességéről, az áramlási feltételekről, valamint a diszperzió jellemzőiről.

A diszperzió jellemzői

Az áttörési görbék alakja utalhat a nyomjelző anyag longitudinális diszperziójára, a szállítás alatti sebességváltozásokra, és tükrözi a felszín alatti áramlás heterogenitásának mértékét.

A t_{mean} ismeretében kiszámolható a nyomjelző anyag szállítási idejének standard deviációja (σ_t), avagy az időbeni szórás (Fischer, 1968):

$$\sigma_t = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{mean})^2 c_i \Delta t_i Q_i}{\sum_{i=1}^n c_i \Delta t_i Q_i} \right]^{0.5} \text{ [idő]}$$

Ez nem más, mint a festékanyag mennyiség diszperziójának mértéke a szállítás időtartama alatt. Segítségével megszerkeszthető a dimenziómentes visszanyerési görbe, valamint kiszámolható a szóródási együttható (dispersion coefficient).

Az longitudinális szóródási együttható (D) a betáplált koncentrált festékanyag vízáramlási pályák mentén való szétterülésének, szóródásának időbeli változásának mértékét hivatott kifejezni (Fischer, 1968). A longitudinális azt jelzi, hogy az áramlási pályák mentén, a diszperzió pedig terjedést jelent. Becsléséhez az alábbi egyenletet használtuk (Fischer, 1968):

$$D = \frac{3600}{2} v_m^2 \frac{\sigma_t^2}{t_{mean}} \quad [\text{terület/idő}]$$

5.2. Kvantitatív kiértékelés

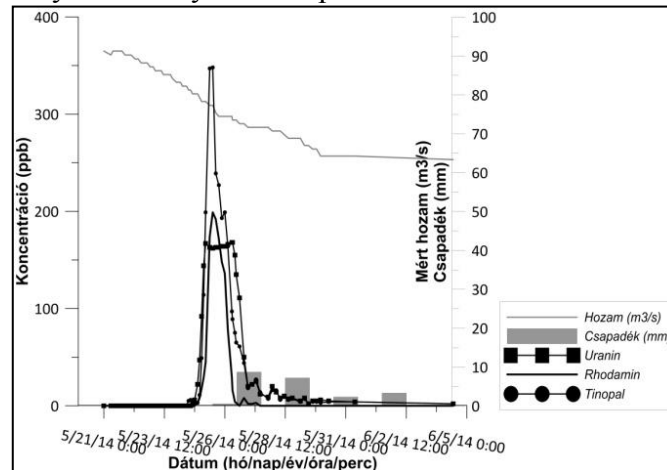
Fekete-patak (Gombaszögi-barlang)

A Fekete-patakban a három nyomjelző Tinopal (injektálás után 26 órával), Uranin és a Rhodamin WT, ugyanazon a napon pár óra különbséggel jelent meg (3, 4. ábra). A leghamarabb a Tinopal, ezt követően, négy óra elteltével az Uranin, és 9 óra elteltével a Rhodamin WT. Ami azt jelentheti, hogy a víztömegek, a Szilicei-jégbarlang előtt egy adott pontban találkoztak, és egymásra lökést gyakorolva együttesen haladtak tovább. A legrövidebb utat a Tinopal tette meg, 100 m/óra sebességgel érte el a Gombaszögi-barlangot. Maximális koncentrációját a betáplálástól 50 óra múlva vett vízmintában mértük, kiürülése 10 nap alatt történt. Maximum koncentrációval számolt sebessége 52 m/óra. Az intenzitási görbe viszonylag keskeny alapú és közepesen meredek lefutású. A görbe alakja felszínalatti medencéket tartalmazó medertípus jellegű járatra utal (JAKUCS 1995). Ezt látszik alátámasztani a lefutási szakaszban a kis másodlagos csúcsok jelentkezése is, amit a kisebb medencékben keringő vízmozgás okozhat. Az intenzitási görbe keskeny alapja, azaz a festék észlelésének viszonylag rövid ideje és a közepesen meredek lefutási görbe azt feltételezi, hogy a festéket tartalmazó víztömeg feltételezhetően egy tömbként haladhatott a Vörös-kői nyelő folytatását jelentő járatban, kis mértékű széthúzással. Ezt tükrözi a nagyon magas diszperzió érték is (17800 m²/óra). A Tinopal visszanyerési aránya 32%-os.

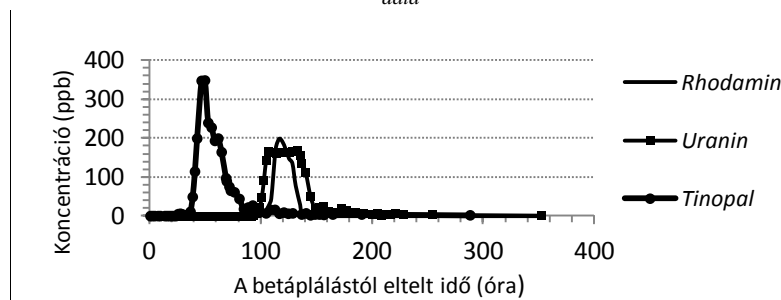
A Tinopal megjelenését időrendben az Uranin követte, a betáplálás után 94 órával. Sebessége az első megjelenéssel számolva 47.8 m/óra. Az Uranin legmagasabb koncentrációban (168 ppb), a beöntés után 5 nappal vett mintában jelent meg, majd június 4-ig (10 nap) lecsengett, ekkor már csak 2 ppb koncentrációban volt jelen. Sebessége maximum koncentrációval

számolva 41.28 m/óra. Az áttörési görbe majdnem szimmetrikus és keskeny alapú, ami felszín alatti közvetlen járat meglétére utalhat, furcsasága, hogy nem egy prominens maximum, és egy ezt követő határozott csökkenés jellemzi, hanem a magas koncentráció értékek kisebb változásokkal, 1 napon keresztül észlelhetőek, mintha a járatot valahol egy agyagdugó zárná el, lassítva a kiürülést. Az Uranin visszanyerési aránya jónak tekinthető 40%.

A Rhodamin WT a betáplálást követően 101 óra elteltével jelent meg a Gombaszögi barlang Fekete-patakjában egy elég határozott maximummal, 199 ppb. A teljes lecsengés 1 nap múlva következett be. Az áramlás sebessége az első megjelenéssel számolva 59 m/óra, a maximum koncentrációval pedig 51.72 m/óra. Áttörési görbéje nagyon hasonló lefutású a Tinopáléhoz, ami úgyszintén felszínalatti medencét tartalmazó medertípus jellegű járatra utal. Visszanyerési aránya ezen a ponton mindössze 5.57%.



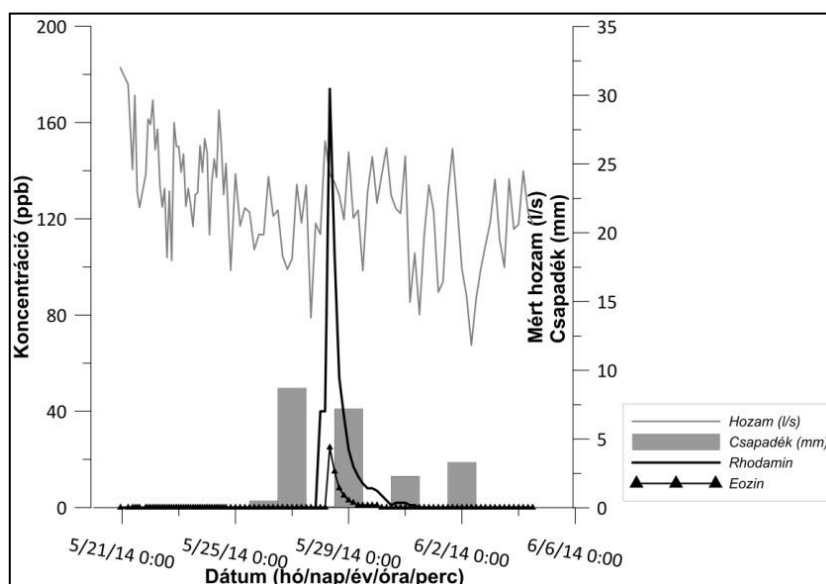
3. ábra: A Fekete-patakban megjelent nyomjelző anyagok koncentrációváltozása az idő függvényében a mért hozam- és napi csapadék adatokkal
 Fig. 3: Released tracer concentration variations in Fekete Stream correlated with yield and daily precipitation data



4. ábra: A Fekete-patakban megjelent nyomjelző anyagok koncentrációváltozása a betáplálástól eltelt idő függvényében
 Fig. 4: Concentration changes of released tracer in Fekete Stream as a function of input and elapsed time

Milada-barlang

A Milada-barlang vízfolyásában először a Vízfakadásba táplált bakteriofágok jelentek meg, 56 órával a betáplálást követően (5. ábra). A legmagasabb koncentrációban a 2014. május 23-án vett mintákban jelentek meg, számuk 28-93 PFU/1 ml között mozgott. Ezután a fágok száma szignifikánsan csökkent. Az utolsó pozitív mintát a Milada-barlangban 2014. május 26-án 12:00 órakor gyűjtöttük. A víz átlagos hozama a Milada-barlangban a nyomjelzés idején 22 l/s. A betáplálás helyszíne és a Milada-barlang közötti távolság 977 m, a számított maximális áramlási sebesség 17 m/óra, a dominás (maximum koncentrációval számított) sebesség pedig 14 m/óra. Az áttörési görbe alakja gyors átfutásra és közvetlen felszínalatti kapcsolatra utal.



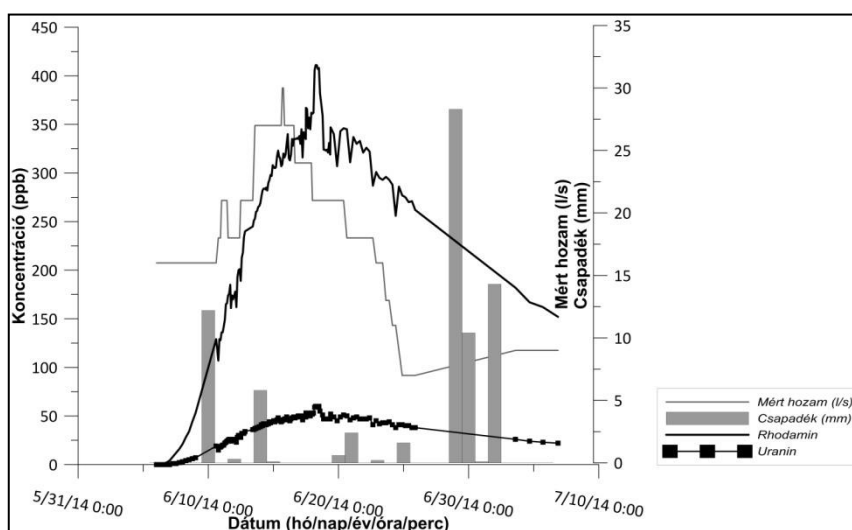
5. ábra: A Milada-patakban megjelent nyomjelző anyagok koncentrációváltozása az idő függvényében a mért hozam- és napi csapadék adatokkal

Fig. 5: Released tracer concentration variations over elapsed time in Milada Stream correlated with yield and daily precipitation data

Az Agancsos-réti víznyelőben végzett betáplálást követően, 177 óra elteltével jelent meg a Rhodamin festékanyag a Milada-patak vizében, a regisztrált maximum 174 ppb volt, mely három nap alatt teljesen lecsengett. Az eredmények alapján a felszín alatti vízáramlás effektív sebessége 13,07 m/óra. Az áttörési görbe meredek felszálló és leszálló ága, keskeny alapja, azaz a festék észlelésének viszonylag rövid ideje egy nagyobb felszín alatti járat jelenlétére utalhat, ennek ellentmond azonban a kis áramlási sebesség és diszperzió érték (73 m²/óra). Nagyon alacsony a visszanyerési arány is,

3,73%. Valószínűbb, hogy a nyelő folytatásában, több irányban is, szűk, fejletlen és jórészt üledékkel kitöltött járatrendszer található.

A nyomjelzőként használt Eozin a Király-kúti pataknál május 27-én történő betáplálást követően közel 9 óra elteltével érkezett a Milada-barlangba. Az Eozin legmagasabb koncentrációja mindössze 25 ppb volt május 28-án 8:00 órakor, két nap múlva pedig teljesen lecsengett. Az Eozin visszanyerődés 4,2%.



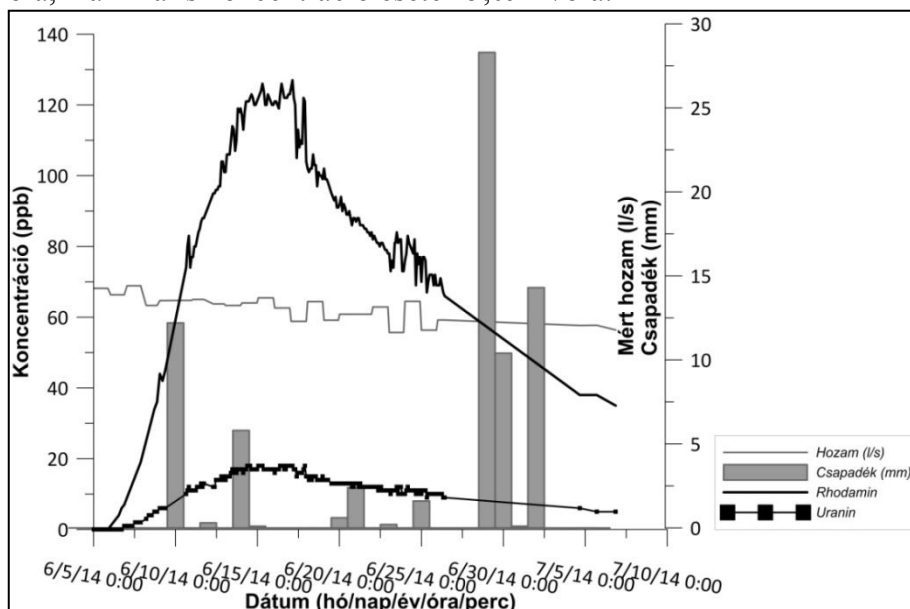
6. ábra: A Kis-Tohonya-forrásban megjelent nyomjelző anyagok koncentrációváltozása az idő függvényében a mért hozam- és csapadék adatokkal

Fig. 6: Released tracer concentration variations over elapsed time in Kis-Tohonya Spring correlated with yield and precipitation data

Kis-Tohonya-forrás

A Kis-Tohonya-forrásban 2014. június 6-án 12:30 perckor megjelent Rhodamin bizonyította a kapcsolatot a forrás és az Agancsos-réti víznyelő között. A koncentráció növekedése nem volt folyamatos, kisebb, pulzáló emelkedések és csökkenések előzik meg a határozott maximumot (6. ábra). A forrásnál mért hozam a vizsgált egy hónap alatt 7-30 l/s között változik. A Rhodamin koncentrációjának változása ezt 1-2 nappal eltolódva követte. A csapadékmennyiség által vezérelt hozamváltozás tehát okozhatja az említett pulzáló emelkedéseket és csökkenéseket a Rhodamin koncentrációjának változásában, mely szerint: a felszín alatt nem egy adott csatornarendszeren, hanem egy összetett repedéshálózaton keresztül történik a vízáramlás. Ennek ellenére a Rhodamin visszanyerődés 49,9 %. A számított alacsony diszperzió ($448,05 \text{ m}^2/\text{óra}$) megerősíti, hogy a szállított festékanyag bonyolult repedéshálózaton keresztül halad a felszín alatt. A számítások alapján a

Rhodamin festékanyagot szállító felszín alatti víz effektív sebessége 4,77 m/óra, maximális koncentráció esetén 5,09 m/óra.



7. ábra: A Babot-kútban megjelent nyomjelző anyagok koncentrációváltozása az idő függvényében a mért hozam- és csapadék adatokkal

Fig. 7: Released tracer concentration variations over elapsed time in Babot Well correlated with yield and precipitation data

Nem várt eredmény volt az Uranin megjelenése a Kis-Tohonya-forrásban a betáplálást követő 421. órában, mellyel bizonyítást nyert a forrás és a Papverme-víznyelő kapcsolata. A Kis-Tohonya-forrásnál az Uranin a vízfestést követő 18. napon 1 ppb koncentrációban jelentkezett, majd folyamatosan nőtt, a június 18-án vett mintákban 60 ppb értékre. A festékanyag kiürülésének ideje a maximális koncentrációtól számítva 5 hét volt. Az áttörési görbe elnyúló jellege mind a felszálló, mind a leszálló ágban, a felszín alatti lassú vízáramlásra (átlagos sebesség 8,22 m/óra), a dolomit összletben bonyolult repedéshálózatra utal. Az Uranin visszanyerődés 27,49%.

Babot-kút

A 2014. június 6-án 1:00 órakor megjelent Rhodamin bizonyította a forrás és az Agancsos-réti víznyelő közötti kapcsolatot. A koncentráció növekedése nem volt folyamatos, kisebb, pulzáló emelkedések és csökkenések előzik meg a határozott maximumot. A forrásnál mért hozam 11,6-14,4 l/s között változik (7. ábra). A Rhodamin visszanyerődés 12,06 %. A számított alacsony diszperzió (760,70 m²/óra) megerősíti, hogy a szállított festékanyag,

diffúz módon, bonyolult repedéshálózaton keresztül halad a felszín alatt. A számítások alapján a felszín alatti víz átlagos sebessége 5,43 m/óra, maximális koncentráció esetén 6,49 m/óra.

Ahogy a Kis-Tohonya-forrásnál, nem várt eredmény volt az Uranin megjelenése a Babot-kútban a betáplálást követő 412. órában, kezdetben 1 ppb koncentrációban, mely folyamatosan növekedett 18 ppb értékre (június 14.). Ezt követően a koncentráció folyamatosan csökkent, a festékanyag kiürülésének ideje a maximális koncentrációtól számítva 5 hét volt. Az áttörési görbe elnyúló jellege a felszín alatti lassú vízáramlásra (átlagos sebesség 8,91 m/óra), a telített dolomit összletben bonyolult repedéshálózatra, repedettségére utal. Az Uranin visszanyerődés 6,54%.

III. táblázat
Table III.

Summary of the quantitative evaluation
Kvantitatív eredmények összessége

Számolt paraméterek	Mért.	Fekete-patak			Mílada		
		Rhodamin	Uranin	Tinopal	Rhodamin	Eozin	Fág
Átlagos szállítási idő (t_m)	óra	121	134.5	66.2	191.31	23.10	
Effektív áramlási sebesség (v)	m/óra	49.55	33.46	39.3	13.07	51.93	
Maximális áramlási sebesség, megjelenés idejével számolva (V_{max})	m/óra	59.41	47.8	100	14.12	133.33	17.97
Domináns sebesség, max. koncentrációval számolva (V_d)	m/óra	51.72	41.28	52	13.51	75	14.79
Szigma (σ)	óra	7.85	41	39.1	12.86	9.11	
Diszperzió (D)	m ² /óra	625	7070	17800	73.89	4846.42	
Recovery (R)	%	5.57	40	32	3.73	4.2	
Recovery (R)	g	1050	2000	2270	187	21	
Számolt paraméterek	Mért.	Babot-kút		Kis-Tohonya			
		Rhodamin	Uranin	Rhodamin	Uranin		
Átlagos szállítási idő (t_m)	óra	735.49	740.13	732.41	729.40		
Effektív áramlási sebesség (v)	m/óra	5.43	8.91	4.77	8.22		
Maximális áramlási sebesség, megjelenés idejével számolva (V_{max})	m/óra	10.15	16.6	8.64	14.29		
Domináns sebesség, max. koncentrációval számolva (V_d)	m/óra	6.49	11.16	5.09	8.77		
Szigma (σ)	óra	194.5	196.6	169.53	168.72		
Diszperzió (D)	m ² /óra	760.70	2076.46	448.05	1320.42		
Recovery (R)	%	12.06	6.54	49.9	27.49		
Recovery (R)	g	2290	327	9480	1370		

6. Összefoglalás

A Papverme-víznyelő nyomjelzése újfent bizonyította a Szilicei-jegesbarlang és a Gombaszögi-barlang közötti, föld alatti patakkal összekötött járatrendszer meglétét. A korábbi feltételezéseket igazolta a Nyírsárizsomboly bakteriofággal történt nyomjelzése, hogy a zsomboly kapcsolódik a Papverme-víznyelő – Gombaszögi-barlang felszín alatti vízrendszeréhez. Bebizonyosodott, hogy a hidrológiai rendszer része a Vöröskői-víznyelő és a Magyarország területén lévő Agancsos-réti víznyelő is. Negatív eredmények születtek a víznyelőtől K-re és DK-re lévő forrásokban: Sólyom-kő, Mogyorós-kút, valamint a Lófej-forrásban.

Az Agancsos-réti víznyelőnél betáplált Rhodamin WT festékanyag hat mintavételi helyszínen jelent meg, mellyel valószínűleg egy trifurkációs hidrológiai rendszert sikerült kimutatnunk. Elsőként a Szilicei-jégbarlangban, majd a Gombaszögi-barlang Fekete-forrásában jelentkezett, majd a Milada-patak vizében mutattuk ki és a Nagy-Kecső-forrásban távozott a rendszerből, igen lecsökkent koncentrációval. Meglepő eredmény volt a festékanyag megjelenése a betáplálást követő 18. napon először a magyarországi Babot-kútban, majd 10 óra múlva a Kis-Tohonya-forrásban. A kvantitatív kiértékelések eredményeképpen, minden egyes forrásban, ahol a Rhodamint kimértük, a felszínalatti áramlás sebessége, valamint a diszperzió elég alacsony értékekkel jelentkezett, amiből arra lehet következtetni, hogy a nyelő folytatásában, több irányban is, szűk, fejletlen és jórészt üledékkel kitöltött járatrendszerre lehet számítani. A legtágabb járatok a Fekete-patak irányában húzódnak.

A Vízfakadásba betáplált bakteriofágok egyetlen helyszínen jelentek meg, a Milada-barlang patakjában, bizonyítva, hogy – normál telítettségi viszonyok között – a Vízfakadás is a borzova-kecsői föld alatti vízrendszer egységét. Negatív eredmények születtek az összes Magyarországon figyelt forrásnál (Babot-kút, Jósza-forrás, Szabó-kút, Kis-Tohonya). Ezúttal sem bizonyosodott be újfent a Milada-barlang és a Vass Imre-barlang kapcsolata.

Hasonló eredményeket hozott a Király-kúti-patak nyomjelzése is. A nyomjelzőként használt Eozin a betáplálást követően közel 9 óra elteltével érkezett a Milada-barlangba, majd a betáplálástól számított 108 óra elteltével, várható módon a nyomjelző a Nagy-Kecső-forrásban is megjelent.

IRODALOM

- FISCHER, B. H.* (1968): "Dispersion predictions in natural streams." – J. Saint. Eng. Div., ASCE, 94(5), p. 927-943.
- GAÁL, L.* (2008): Geodynamika a vývoj jaskýň Slovenského krasu – Liptovský Mikuláš, 166 p.
- GRUBER P.* – *GAÁL L.* szerk. (2014): A Baradla–Domica-barlangrendszer – A barlang, amely összeköt (monográfia) – Aggteleki Nemzeti Park Igazgatóság, 512 p.
- HAVIAROVÁ, D.* – *GRUBER, P.* (2006): Stopovacia skúška v jaskyni Milada. – Aragonit, 11, pp. 43–45.
- HUBBARD, E. F., F. A. KILPATRIK, L. A. MARTENS, J. F., WILSON, JR.* (1982): Measurement of time of travel and dispersion in streams by dye tracing. Techniques Of Water-Resources Investigations, Book 3., U.S. Geological Survey, Washington, DC., pp. 1-152.
- IZÁPY G.* – *MAUCHA L.* (1998): Az Aggteleki-hegység karszthidrológiai kutatási eredményei és zavartalan hidrológiai adatsorai. 1958-1993. - A VITUKI RT. Hidrológiai Intézet kiadványa. Budapest, p. 1-414.
- JAKUCS L.* (1995): Általános Természeti Földrajzi Gyakorlatok – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 243 p.
- KRUPÁR, Z.* (1946): Niekoľko poznámok o Juhoslovenskom krase. – Krásy Slovenska, 24, p. 2–3, 45–57.
- KRUPÁR, Z.* (1947): Nové jaskyniarske nádeje v oblasti Brezovsko-Kečovskej na základe hydrologických pomerov južnej časti Silickej planiny – Krásy Slovenska, 24, 5, pp. 128–132, 159–161.
- MAJKO, J.* (1958): Výskumy a objavy v jaskynnej sústave Silicko-brezovsko-kečovskej v Juhoslovenskom krase – Krásy Slovenska, 35 (3) pp. 113–117.
- MAJKO, J.* (1959a): Sporné morfológické problémy v Silickobrezovsko-kečovskej jaskynnej sústave vyriešené – Krásy Slovenska, 36 (10) pp. 374–375.
- MAJKO, J.* (1959b): Výskumy a objavy v druhej časti Silicko-brezovsko-kečovskej jaskynnej sústavy – Krásy Slovenska, 36 (4) pp. 140–142.
- MAJKO, J.* (1961): Najnovší prieskum v Silicko-Brezovskej Bezodnej ľadnici. Krásy Slovenska, 38 (1) p. 39.
- MAUCHA. L.* (1975): Jelentés a Papp Ferenc Barlangkutató Csoport 1975. évi tevékenységéről. 19 p.
- ORVAN, J.* (1994): Podzemné vody. In *ROZLOŽNÍK, M.* – *KARASOVÁ, E.* (Eds.): Slovenský kras, Chránená krajinná oblasť – biosférická rezervácia. Osveta, Martin, p. 225–234.

SÁRVÁRY I. (1965): Sikeres kísérlet a Vass Imre-barlangnál Karszt és Barlang, 2, p. 64.