

**A PÁL-VÖLGYI-BARLANGRENDSZER BESZIVÁRGÓ VIZEI PERIODIKUS VISELKEDÉSÉNEK ELEMZÉSE**

**ANALYSIS OF PERIODIC BEHAVIOUR OF CAVE DRIP WATER IN PÁLVÖLGY CAVE**

FEHÉR KATALIN<sup>1</sup> – KOVÁCS JÓZSEF<sup>2</sup> – BORBÁS EDIT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ELTE TTK FFI Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék

<sup>2</sup>ELTE TTK FFI Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

1112 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c

*Abstract: A long-term monitoring was carried out in Pálvölgy Cave from October 2013 to January 2014. Different parameters of the drip water were measured on two sampling points in the cave. One of the measurement locations was in the Térképész-ág, the other in the Y-folyosó. Electrical conductivity, pH, redox potential, dissolved oxygen and water temperature were detected continuously by an Odeon Range monitor. The aim of our examination was to determine the properties of the time series using different mathematical methods. According to our measurements, pH and redox potential show daily periodicity in both locations. Electrical conductivity has periodic property only in the Y-folyosó.*

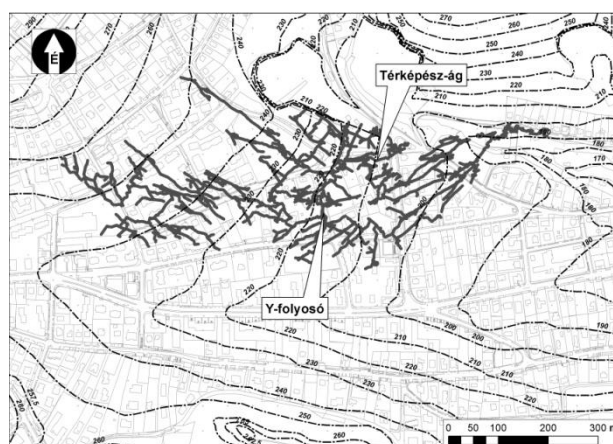
**Bevezetés**

A Pál-völgyi-barlangrendszerben évek óta folynak a beszivárgó vizek minőségére vonatkozó vizsgálatok időszakos mintavétel segítségével (TAKÁCS-NÉ BOLNER et al. 1989, SÁRVÁRY et al. 1992, MAUCHA 2001, FEHÉR 2011). 2011-ben a Térképész-ágban (BORBÁS–FEHÉR 2013), majd 2013-ban az Y-folyosóban (1. ábra) helyeztünk el olyan műszereket, melyek adatgyűjtő segítségével folyamatosan mérik a pH, redoxpotenciál, fajlagos vezetőképesség, valamint a hőmérséklet perces változásait.

A két mérőpont 2013 október és 2014 január közötti zavartalan, adathiánytól mentes időszakának adatelemző módszerekkel történő elemzését végeztük el, aminek célja a napi periódus meghatározása volt. Ennek sikerét azonban számos „probléma” akadályozta. Jelen dolgozatban röviden bemutatjuk a napi periodicitás meghatározásának folyamatát a vizsgált időszakban. További célként fogalmazzuk meg az egyes vizsgált paraméterek átlagos napi menetének meghatározását is.

Méréseink helyszíneit az előző évek vizsgálatai alapján választottuk ki. A Térképész-ág a Szépvölgy erősen összetöredezett zónájának a közelében, 40 m mélységben húzódik. A Pál-völgyi-barlang mérőpontjai közül itt tapasztalható a legnagyobb szennyezettség. Az Y-folyosó mérőpontja lankás

hegylábfelszín alatt, 60 méter mélységben található, antropogén hatástól kevésbé befolyásolt, az itt beszivárgó víz minimális szennyeződést mutat (FEHÉR 2011).



1. ábra: A mérőpontok elhelyezkedése a felszínhez viszonyítva  
Fig.1: Sampling locations in the Pálvölgy Cave.

## Anyag és módszer

### *Vizsgált paraméterek, alkalmazott mérőműszer*

A *pH*-t és a *redoxpotenciált* NEOTEK-PONSEL PHRTA pH/redox/hőmérséklet szenzorral mértük. Mindkét paraméter nemcsak térben, de időben is erősen változékony, befolyásolják az ásványok oldhatóságát és a biológiai aktivitást (SZALAI 2011). Az *oldott oxigén* méréséhez PODOA oxigén/hőmérséklet szenzort alkalmaztunk. Mennyisége szoros összefüggésben van a redoxpotenciállal, valamint a lejátszódó kémiai és biológiai folyamatokkal. A *fajlagos vezetőképesség* méréséhez PC4EA vezetőképesség/hőmérséklet szenzort használtunk. Értéke az oldat összetételének, koncentrációjának függvénye.

A mért paramétereket Odenon Range típusú, Neotek –Ponsel gyártmányú adatgyűjtő műszer segítségével regisztráltuk.

### *Alkalmazott matematikai módszerek*

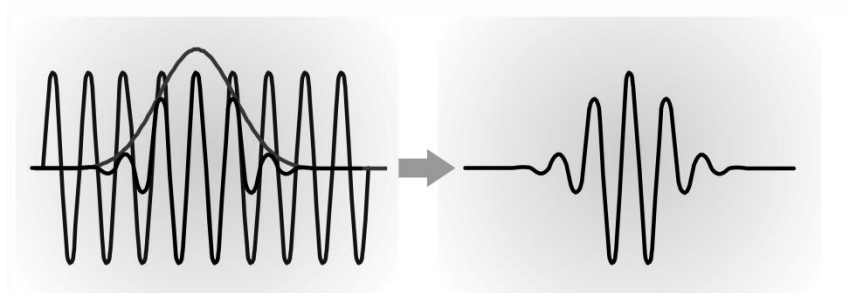
Egy adott idősorban meglévő periódus meghatározására számos becslési módszer alkalmas. Ezek némelyike ahhoz is segítséget nyújt, hogy meghatározzuk, egy adott periódus milyen időintervallumban van meg egy jelben, illetve mikor hiányzik. Ilyen módszer például a „*Short Term Fourier*

*Transform*” (STFT) amely Gauss ablakozás esetén ekvivalens a Gábor-transzformálttal, illetve a "multiresolution analysis" valamint az STFT továbbfejlesztésének is tekinthető *wavelet analízis*. Mivel egy adott periódus (1napos jel) vizsgálatáról van szó, a multiresolution analysis nem szolgálja közvetlenül céljainkat. Az STFT kapcsán pedig azt kell megjegyeznünk, hogy ennek felbontása rögzített, az ablakfüggvény szélessége alapján reprezentáljuk a jelet, és ez meghatározza, hogy milyen egymáshoz közeli frekvenciák különíthetők el (frekvenciafelbontás), illetve azt, hogy milyen hosszúságú időintervallumban megváltozó frekvenciák detektálhatók (időbeni felbontás). Egy széles ablak jó frekvenciatartománybeli, de gyenge időbeni felbontást ad. Egy keskenyebb ablak időbeni felbontása jobb, míg frekvenciában gyengébb. Ennek kiegyensúlyozása volt az egyik oka a wavelet transzformáció megalkotásának, és a jelen tanulmányban mi is ezért döntöttünk a wavelet analízis felhasználása mellett.

Egy jel teljesítménysűrűség spektruma akkor jól értelmezhető, ha a jel tágabb értelemben stacionárius, azaz ha első és második momentumai (középérték és variancia) időben állandóak. Ez a feltétel a középértékre azt a korlátozást jelenti, hogy az konstans, a kovariancia (korreláció) esetén pedig azt, hogy az csak a  $t_1 - t_2$  különbségtől függ, tehát elegendő egy változó szerint indexelni.

$$E\{x(t_1)x(t_2)\} = R_x(t_1, t_2) = R_x(t_1 + \tau, t_2 + \tau) = R_x(t_1 - t_2, 0) \quad \forall \tau \in R$$

Emiatt a stacionárius jelek könnyen kezelhetők. A természeti folyamatok azonban ritkán stacionáriusak, ezért szükség van a nem stacionaritással megküzdő teljesítménysűrűség-becselő eljárásra, azaz idő-frekvencia felbontásra (time-frequency mapping). Kezdeti próbálkozásként a „*Short Term Fourier Transform*” került alkalmazásra, majd a fentebb említett előnytelen tulajdonságai miatt wavelet analízist alkalmaztunk. A módszer azt feltételezi, hogy az oszcilláló komponensek folyamatosan jelen vannak az idősorban. A wavelet-módszer időben (térben) és skálában (frekvenciában) lokalizált. Ez a megközelítés idő-skála (idő-frekvencia) felbontást eredményez, így ezzel lehetővé válik, hogy a jelnek időben változó jellegzetességeit megragadja. Lokalizált „*wavelet*”-eket alkalmaz, ezekre bontja fel a jelet, amelyeknek gyakran használt képviselője a már ugyancsak említett Gábor transzformált általánosításával megalkotott Morlet wavelet, amit számításainknál mi is használtunk (2. ábra).



2. ábra: A Morlet-wavelet függvény képe

(<http://paos.colorado.edu/research/wavelets/wavelet2.html> alapján)

Fig.2: Morlet wavelet transform

A periodicitás meghatározásához nem célszerű trenddel "szennyezett" idősort használni, mivel a trendek meghamisítják a Fourier transzformáltban az amplitúdót. A nem stacionárius idősorok esetén a trend eltávolítását a „hagyományos” (polinomiális, harmonikus stb.) függvényekkel nem lehetett elég pontosan megvalósítani, ezért szükségessé vált egy, a trendszerű változásokhoz minden esetben illeszkedő módszer alkalmazása. Ezt esetünkben egy helyileg súlyozott mozgóátlag simítás (LOESS) használatával (CLEVELAND 1979, CLEVELAND – DEVLIN 1988) értük el.

### Eredmények és diszkusszió

A wavelet spektrum analízis lehetővé tette annak vizsgálatát, hogy a napi (24 órás) periódus a vizsgált időszak mekkora részében van meg és mekkora részében hiányzik. A 1. táblázat a barlang mind a két mintavételi pontján jeleníti meg az eredményeket, mutatva, hogy a mérési időtartam hány százalékában találtuk meg az egyes paraméterek mért értékeiben a napi periódust.

A LOESS használatával lényegesen precízebben el lehet távolítani egy mért jelből a nagy ingadozásokat, mint egy polinomiális trend alkalmazásával. Erre mutat egy mért idősori részletet a 3. ábra. Megfigyelhető, hogy az illesztett LOESS a rövid változásokra gyorsan tud reagálni, azt érzékenyen tudja követni.

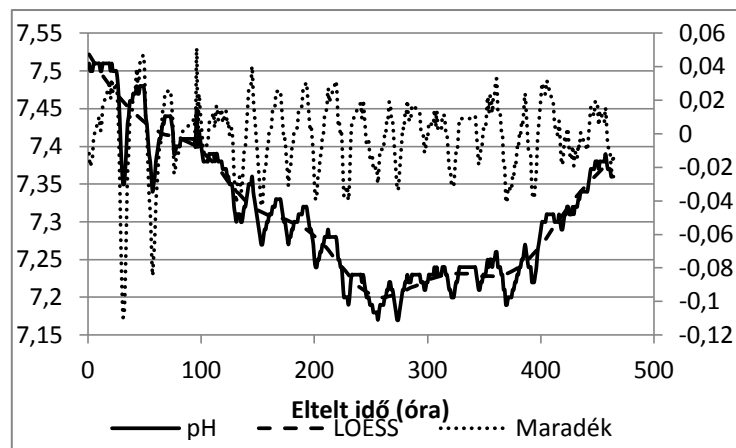
A LOESS és a mért adat különbségét képezve olyan maradékot képeztünk, amiben csak a nagy fluktuáció mintát távolítottuk el, de az éppen vizsgálni kívánt folyamat, a napi ingadozás még megmaradt.

I. táblázat

Table I.

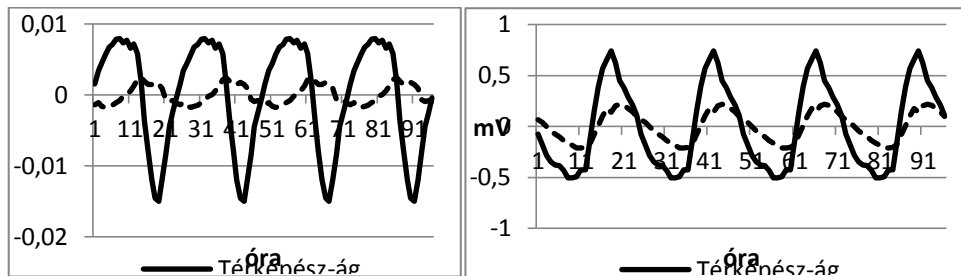
Az egyes paraméterekben megjelenő 24 órás periódus a vizsgált időintervallum százalékában  
The presence of the 24-hour period in the components

Térképész-ág			
pH	Redox potenciál (mV)	Vezetőképesség (μS/cm)	Hőmérséklet (°C)
62 %	56 %	21 %	26 %
Y-folyosó			
pH	Redox potenciál (mV)	Vezetőképesség (μS/cm)	Hőmérséklet (°C)
65 %	60 %	56 %	21 %
	Oldott oxigén (mg/l)	Oxigén telítettség %	
	58 %	56 %	



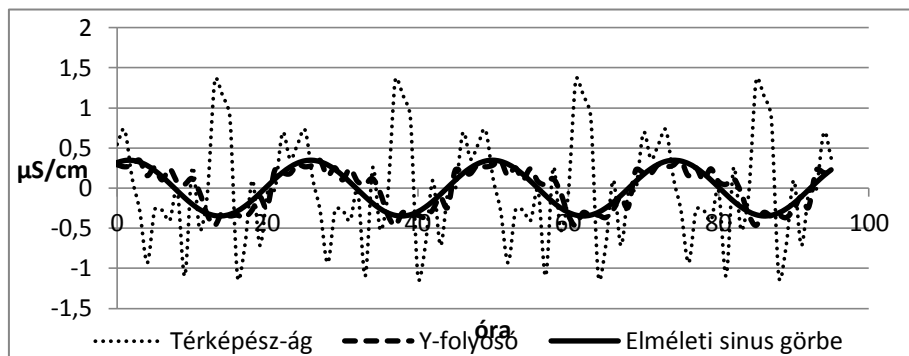
3. ábra: A Térképész-ágban mért pH-értékekre illesztett LOESS, ill. maradékok  
Fig.3: LOESS fitting and the residuals for pH values measured in the Térképész-ág

Az így kapott maradék lehetőséget adott arra, hogy a paramétereknek, természetesen a vizsgált időtartamra vonatkozóan, megadjuk/megvizsgáljuk a napi menetét, amit az azonos órák értékeinek átlagaként adunk meg. A jobb szemléltetés miatt némely esetben célszerű több napi menetet megszoorozni és egymás mellé „illeszteni”. Ilyen eseteket mutat be a pH és a redoxpotenciál vonatkozásában a 4. ábra.



4. ábra: A két mérőpont pH (bal oldal) és redoxpotenciál (jobb oldal) maradékértékeinek napi menete  
 Fig.4: Daily change of pH (left side) and redox potential (right side) residuals

A pH esetében jól megfigyelhető, hogy a folyamat napi járása periodikus. Ugyanakkor jelentős eltérések vannak a Térképész-ágban és az Y-folyosóban megjelenő napi menet között. Az egyik szembetűnő jelenség, hogy a két amplitúdó nagysága nagymértékben eltér egymástól, a másik, hogy a két ágban napi maximumok és minimumok között több óras eltolódás van. A redoxpotenciál esetében csak az amplitúdók különbsége figyelhető meg, az időbeli eltolódás nem. A két mérőpont adatai közötti eltérés annak tudható be, hogy a Térképész-ágban a kisebb mélység és az erősen tektonizált zóna miatt gyorsabban, szélesebb repedés-törési rendszeren keresztül jut le a víz. Az Y-folyosó esetében lassúbb, egyenletesebb beszivárgást feltételezhetünk.

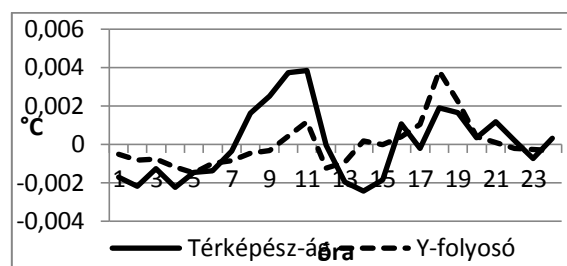


5. ábra A fajlagos vezetőképesség maradékértékeinek napi menete egy elméleti görbével  
 Fig.5: Daily change of Electrical conductivity using a theoretical curve

A fajlagos vezetőképesség esetében a napi járás ábrán történő megsokszorozása olyan esetben, amikor nincs a jelben periodikus komponens, félvezető is lehet (5. ábra). Jól látszik, hogy Térképész-ágban a napi menetben előforduló legnagyobb és legkisebb értékek periodikus hatást kelte-

nek. Azonban ha egy elméleti szinusz-görbét is bemutatunk az ábrán, érzékelhető, hogy a periódus csak az Y-folyosóban van meg. Ebben az esetben az értékek természetes karsztos folyamatokat mutatnak, míg a Térképész-ágnál az antropogén szennyező anyag bejutása elfedi ezeket.

A 6. ábrán a barlangi hőmérséklet napi menetének maradék értékeit mutatjuk be a „megsokszorozás” nélkül. A wavelet spektrum analízis alacsony százalék értékei is azt jelezték, hogy itt nem tapasztalható napi periódus, a maradékértékek ábrázolása ezt alátámasztja.



6. ábra A hőmérséklet maradékértékeinek napi menete  
Fig.6: Daily change of temperature residuals

A különböző paraméterekben meglévő napi periódus meglétének egyik oka a felső talajrétegben kialakuló biológiai aktivitás hatása lehet. Erre a jelenségre már régebben is felfigyeltek, JAKUCS (1971) a talajatmosfera vizsgálatát vizsgálva a széndioxid-kibocsátásban mutatott ki napi periodicitást különböző bio- és klímaspecifikus karsztos mikroterekben. Karsztkorróziós talajhatást vizsgálva ZÁMBÓ és TELBISZ (2000) kimutatta, hogy a fedett karrban „*egyenletes, elnyújtott beszivárgás idején a karbonát koncentráció napi periódus szerinti változást mutat*”. A hidrogén-karbonátos oldódás döntő faktorát, a beszivárgó víz CO<sub>2</sub>-tartalmát a talajhatás egyik összetevőjeként tekintették, függetlenül attól, hogy ennek forrása a mikrobiális mállás, a növényi légzés vagy a mikroklimatikus tér.

A biológiai aktivitást a meteorológiai-hidrológiai körülmények mellett a geológiai-geográfiai, tektonikai viszonyok is jelentősen befolyásolják. A beszivárgás-lefolyás aránya, ezáltal a kőzetbe bejutó víz mennyisége a felszín morfológiai viszonyainak egyik függvénye. A beszivárgott víz mozgása, sebessége, megtett távolsága a kőzettömeg tulajdonságai (összetétel, kőzetdőlés, tektonikai) által erősen befolyásolt, így a karsztos folyamatokra is hatással van.

A fent felsorolt természetes folyamatokat a felszín beépítettsége miatt az antropogén hatások – ahogy a Térképész-ág vezetőképesség értékeinél láthattuk – „*elmoshatják*”.

## Összefoglalás

A Pál-völgyi-barlang két mintavételi pontján folyamatos adatgyűjtő segítségével vizsgáltuk a beszivárgó víz változásait. A pH és a redoxpotenciál értékeinél mindkét ponton napi periodicitást mutatunk ki. A bemutatott eredmények alapján látszólagos ellentmondás érzékelhető. Azok a paraméterek, amelyek a vizsgált időtartamban a napi átlagos menet vonatkozásában periodikusak, a wavelet spektrum felbontás eredményeként csak a vizsgált időtartam közel 60%-ban mutatnak periodikus viselkedést. Ennek oka, hogy az átlagos periodikus viselkedés nem jelenti azt, hogy egy paraméter a vizsgált időtartam teljes hosszában mindig periodikus.

A mért paraméterek közül a pH és a redoxpotenciál amplitúdója a mélyebben lévő, egyenletesebb beszivárgást mutató Y-folyosónál kisebb, mint a Térképész-ágnál. A pH esetében a két mérőhely adatsora között több óras eltolódás van a napi maximumoknál és minimumoknál. A redoxpotenciálnál ez nem tapasztalható. A fajlagos vezetőképesség értékeinél csak az Y-folyosónál van meg a napi periodicitás. A Térképész-ág esetében ez, a természetes folyamatokra utaló tendencia nincs, ezt az antropogén hatások felülírják.

## IRODALOM

- BORBÁS E. – FEHÉR K.* (2013): Monitoring vizsgálatok a Pál-völgyi-barlangrendszerben – Karsztfejlődés XVIII, pp 23-36.
- CLEVELAND, W.S.* (1979): Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, – Journal of the American Statistical Association 74 pp. 829–836.
- CLEVELAND, W.S.–DEVLIN, S.J.* (1988): Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting – Journal of the American Statistical Association 83 pp. 596–610.
- FEHÉR K.* 2011. Újabb adatok a budai termálkarszt beszivárgó vizeinek minőségéről – Karsztfejlődés XVI, pp 203-221.
- JAKUCS L.* (1971): A karsztok morfofenetikája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 310 p.
- MAUCHA L.* (2001): Lakott területek alatt húzódó, fokozottan védett barlangok vizeinek vizsgálata – Jelentés. A Duna-Ipoly Nemzeti Park megbízásából készítette a Magyar Karszt és Barlangkutató Társulat, kézirat: Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság Adattár Budapest. pp. 1-20.
- SÁRVÁRY I.–MAUCHA L.–IZÁPY G.* (1992): Vízkémiai, mikrobiológiai és izotóp vizsgálatok, VII. feladat. Beszámoló jelentés. – In: PHARE PRO-



JECT, 134/2. Komplex geológiai vizsgálatok és fúrások a Rózsadomb környezetében. Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, Budapest.  
*TAKÁCSNÉ BOLNER, K.–TARDY, J.–NÉMEDI, L.* (1989): Evaluation of the environmental impacts in Budapest's caves on the basis of the study of the dripping waters – 10th International Congress of Speleology, UIS pp. 634-639.

*ZÁMBÓ L. – TELBISZ T.* (2000): A karsztkorróziós talajhatás érvényesülése a karrfejlődésben – Karsztfelődés V, pp 103-114.

*SZALAI Z.*(szerk., 2011): Bevezetés a talajtanba környezettanósoknak – EL-TE ISBN 978-963-279-549-2. pp. 95-96.