

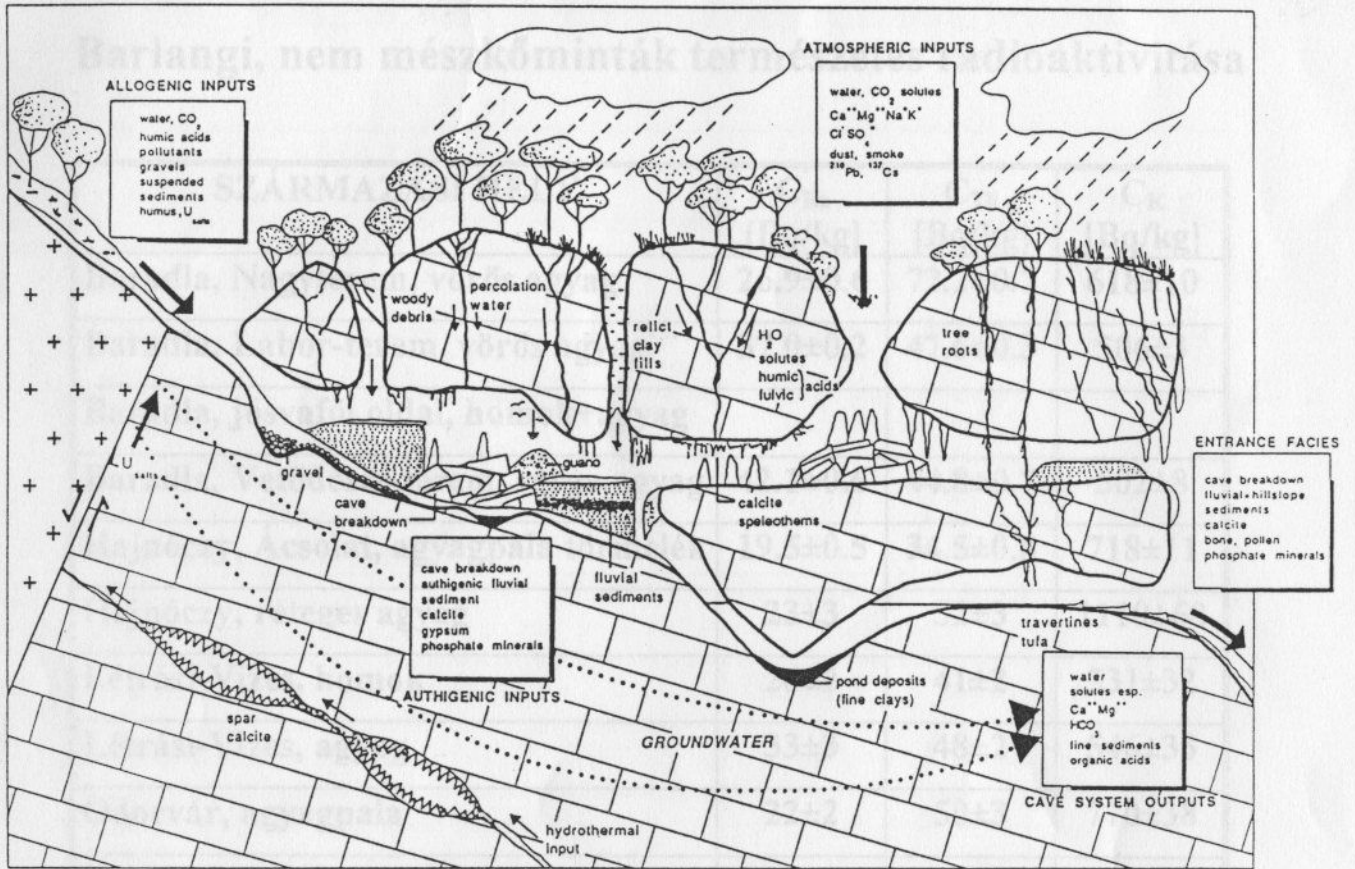
II. Karsztfejlődési Konferencia, Szombathely 2000. április 13-15.

BARLANGI RADON EREDETÉNEK VIZSGÁLATA

Dezső Zoltán

*Debreceni Egyetem
Izotópalkalmazási Tanszék*

Támogató: OTKA 023181



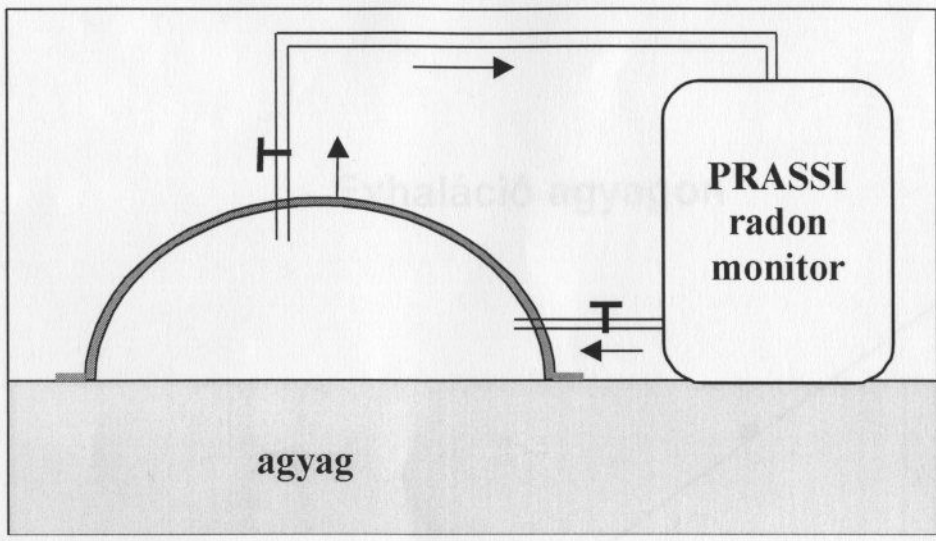
Barlangi, nem mészkőminták természetes radioaktivitása

SZÁRMAZÁSI HELY	C_{Ra} [Bq/kg]	C_{Th} [Bq/kg]	C_K [Bq/kg]
Baradla, Nagyterem, vörös agyag	26.9±0.6	72.2±0.7	618±10
Baradla, Labor-terem, vörös agyag	37.0±0.2	47.6±0.3	506±3
Baradla, jósvafői oldal, homok+agyag			
Baradla, Vetődéses-terem, sárga agyag	42.1±0.6	44.8±0.7	502±8
Hajnóczy, Ácsolat, agyagpala törmelék	19.5±0.5	34.5±0.8	718±11
Hajnóczy, réteges agyag	23±3	52±3	1110±68
Létrási-Vizes, homok	26±2	41±2	531±32
Létrási-Vizes, agyag	33±3	48±2	546±33
Odorvár, agyagpala	22±2	50±3	770±38
Szemlő-hegyi, budai márga	24±1	16±1	299±9

Szemlő-hegyi (lemezkes kalcit) 1.9±1.5 1.4±1.1 2.2±1.2

Mészkminták természetes radioaktivitása

SZÁRMAZÁSI HELY	C_{Ra} [Bq/kg]	C_{Th} [Bq/kg]	C_K [Bq/kg]
Baradla, Labor-terem (szürke alapkőzet)	1.7±0.2	1.3±0.2	15.6±0.6
Baradla, Labor-terem (vörös színű kiválás)	3.0±0.3	4.0±0.4	40.1±2.4
Baradla, Ferde-terem (sötétszürke alapkőzet)			
Hajnóczy, Vénusz (tűkristályos kiválás)	6.2±0.3	2.2±0.2	60±4
Hajnóczy, Vénusz (fehér színű kiválás)	6.2±0.5	2.0±0.3	43±4
Létrási-Vizes (vasas mészkő)	1.5±1.3	3±1	14±12
Létrási-Vizes	0.6±1	1.1±1.1	0±18
Létrási-Vizes (lemezes mészkő)	1.1±1.4	2.4±1.3	0±20
Odorvár (szürke alapkőzet)	8.6±0.5	3.1±0.3	55±2
Szemlő-hegyi (lemezes kalcit)	1.9±1.5	1.4±1.1	2.2±12



AC_{100'} Bq/m³

4000

3000

2000

1000

0

0

2

4

6

8

10

12

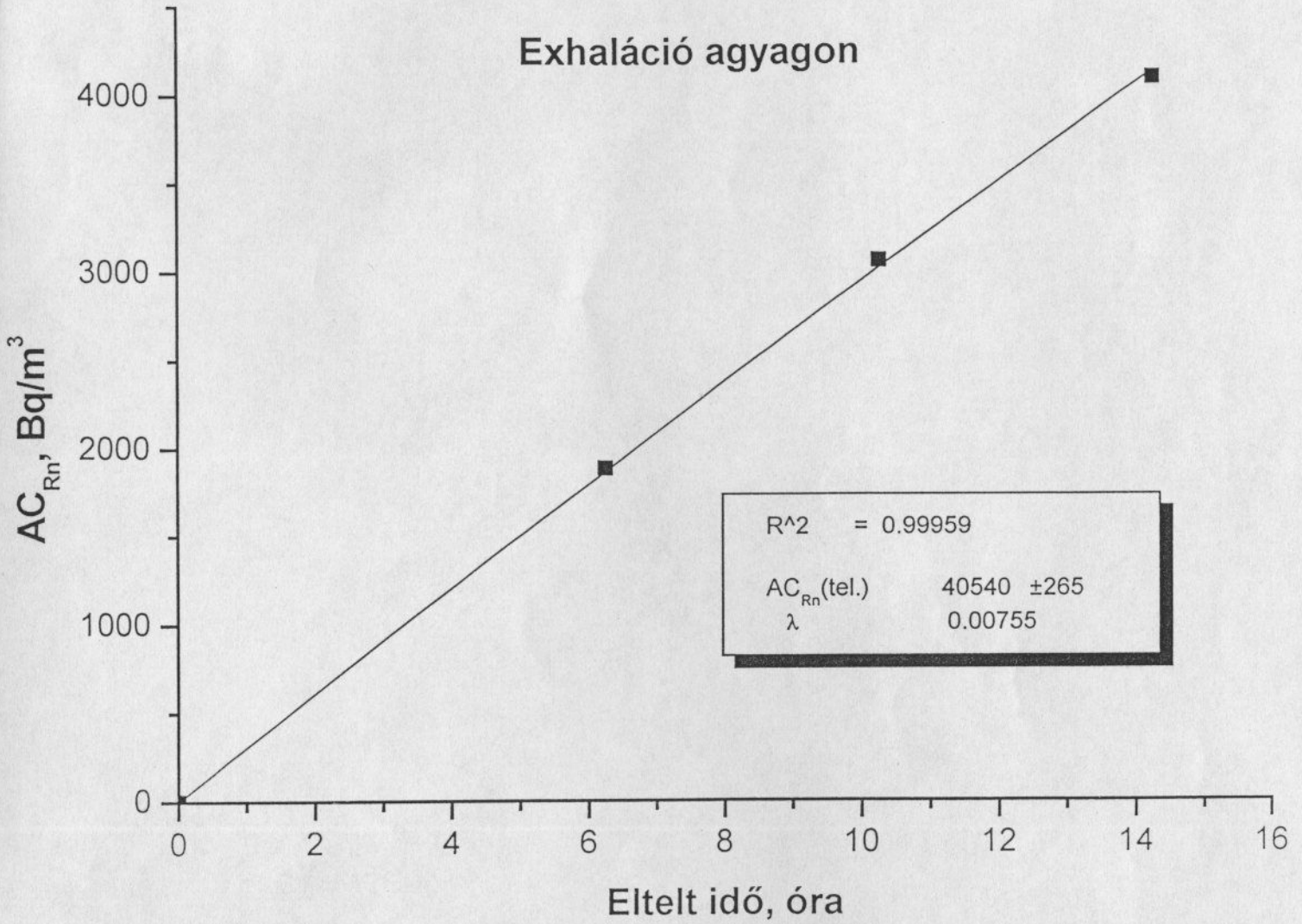
14

16

Előzetes 100 óra

AC _{100'}	4000
AC _{100'}	4000
AC _{100'}	4000

Exhaláció agyagon



BARLANGI KÖZETEK RADON EXHALÁCIÓJA¹DEZSŐ ZOLTÁN² - HAKL JÓZSEF³ - MOLNÁR LAJOS⁴²Debreceni Egyetem TTK-ATOMKI Környezetfizikai Tanszék,
4001 Debrecen Pf. 51. dezsoz@tigris.klte.hu³MTA ATOMKI, 4001 Debrecen, Pf. 51 jhaki@moon.atomki.hu⁴HBM ÁEÉÁ Regionális Laboratóriuma, 4002 Debrecen, Pf. 137.
molnarl@indigo2.oai.hu

Abstract: Sources of cave radon have been investigated in the Baradla-cave (Aggtelek, NE Hungary) using active radon detection technique. The exhalation of radon from clay deposits as well as from the limestone bedrock was measured in several experiments using specially designed exhalation chambers. The obtained radon concentration versus time profiles have been fitted to model calculations which were based on simple theoretical considerations on radon diffusion. The results show that under normal climatic conditions in caves, the effective diffusion length of radon in clay is large enough to play a significant role in feeding the cave atmosphere with radon gas. This is further enhanced by the relatively high radium-226 concentration and extremely small grain size of clay minerals. Limestone, in turn showed very weak emanation power which, together with its low radium content, resulted in two orders of magnitude less exhalation rate compared to clay. These results provide a clear evidence that the source of radon in karstic caves is clay deposit.

Bevezető

A barlangokra jellemző magas radonszint valamint ennek elsősorban az évszakos időjárással összefüggő jellegzetes változása meglehetősen régóta ismert tény. A radon, mint a levegő nyomjelzője fontos helyet foglal el a barlangi klímavizsgálatok eszköztárában (HAKL J. 1997), segítségével még a barlangi szerkezet kutatása is lehetséges (MOLNÁR L. 2000). Az egyes szerzők a barlangi radon forrását az alapkőzetben és a barlangi üledékekben egyaránt jelenlévő uránnal hozzák összefüggésbe. Nazaroff ide vonatkozó kompilációja szerint, pl. a mészkő átlagos rádium-226 tartalma 25 Bq/kg (NAZAROFF W. et al 1988), ami nagyjából megegyezik a talajokban erre az izotópra számos helyen és szerző által talált értékkel (UNSCEAR 1988). Talán ez a véletlen egybeesés az oka, hogy a forrás kísérleti vizsgálatával foglalkozó szakirodalom – legalábbis a barlangok viszonylatában – kifejezetten szegényes.

A szilárd mátrixban található rádiumból, annak elbomlása pillanatában keletkező radonnak diffúzió vagy áramlás révén kell kijutnia a kőzetből a barlang légtérébe. A diffúziós állandó szilárd anyagban (a tömör szemcsé-

¹ Készült a 023181 sz. OTKA, a 0146/1999 sz. MKM valamint a Karszt- és Barlang Alapítvány támogatásával

ben) azonban $< 10^{-32} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, azaz a radon onnan nem tud kijutni. Ha a kőzet porózus, akkor az ilyen anyagra érvényes 10^{-6} - $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ effektív diffúziós állandó mellett már ~ 20 cm megtételére is van lehetőség. Ha megfelelő nyomásgradiens is fellép az adott helyen, akkor áramlás révén még mélyebb rétegek is hozzájárulhatnak a radon koncentráció kialakításához. Michel szerint a viszonylag tömör barlangi üledékek, mint pl. az agyag, kis porozitásuk miatt a barlang radon háztartásához csak kevés járulékot adhatnak (MICHEL J. 1987). Ezzel összhangban látszik lenni Burkett kísérleti eredménye, amely szerint az agyag radon exhalációjával nem volt magyarázható a vizsgált barlangban mért radonszint (BURKETT C. 1993). Valószínűleg ezek a szakirodalmi adatok is hozzájárultak ahhoz, hogy barlangi környezetben forrásként az alapkőzetet tekintik meghatározónak, s erre építve próbálnak elméleti magyarázatot adni az egyes barlangokban tapasztalt radon koncentrációk kialakulására, ezzel is igyekezvén alátámasztani a barlangi klímával kapcsolatban tett megállapítások helyességét (GÉCZY G. 1988).

Nyilvánvaló, hogy egy ilyen elképzelésben meghatározó szerepet kap a kőzet repedezettsége, s az áramlás a felszín és a barlangi tér közötti légcseré formájában is jelentkezhet. Tény, hogy karsztos területen a kőzet igen jó vízvezető, s egyebek között épp ennek köszönhető a térszín alatt húzódó barlangok gazdag formakincse. E karsztvíz azonban jelentősen befolyásolja a radon mozgását a repedésekben, elsősorban is segítve a radonnak a pórusterbe való bejutását (TANNER A. 1980). Másrészt azonban a jelentősebb víztartalom az exhaláció komoly gátló tényezőjévé válik, ugyanis a radon viszonylag jól oldódik vízben, a diffúziós hossz pedig kb. egy nagyságrenddel kisebb, mint porózus kőzetben. Fentiek alapján az is várható, hogy a csapadékviszonyok erősen befolyásolják a barlangi radonszintet. A tapasztalat azonban ezt az elvárást nem igazolja. Az elfogadott elmélet alapján az is meglepő, hogy a barlangi terekre jellemző, elég szűk határok között mozgó üregfelület/térfogat arány és az alacsony lég-csere ellenére a mért radon koncentrációk igen tág határok közé esnek.

Nagyszámú, hazai barlangokból gyűjtött különféle kőzet természetes radioaktivitásának vizsgálata alapján nemrégiben arra az eredményre jutottunk, hogy a mészkő radioaktivitása, s ezzel rádium tartalma is elenyészően kicsi az üledék döntő hányadát adó agyagéhoz képest (DEZSŐ Z. 2000). E hegységalkotó kőzet diagenézise ismeretében ez egyébként nem is meglepő. Ez, valamint a fenti tények alapos indokul szolgáltak arra, hogy a legfontosabb barlangi kőzeteket a radon forrása szempontjából részletes kísérleti vizsgálat alá vessük. Az alábbiakban ezek első eredményeiről számolunk be. Az *in situ* mérések helyszíne az aggteleki *Baradla-barlang* volt, ahol az ilyen vizsgálatokhoz szükséges technikai feltételek adottak voltak.

Kísérleti módszerek és eredmények

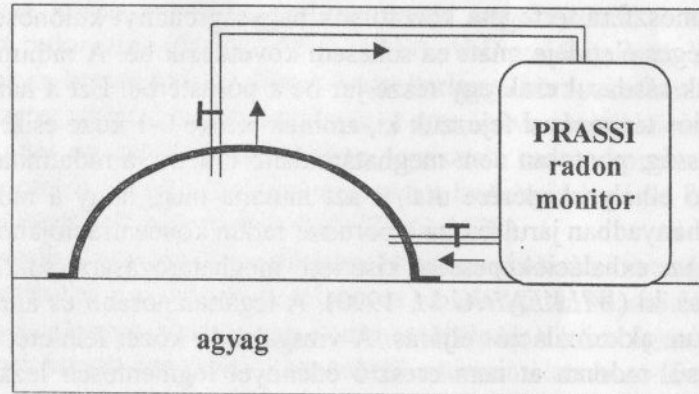
Egy kőzet radon exhalációján annak atmoszférával érintkező felület-egységén az időegység alatt kijutó radon aktivitást értjük. Ennek SI egysége Bq/m²s. Ez a fluxussűrűség jellegű mennyiség a forráserősség mértékét fejezi ki. Ezt elsődlegesen a kőzet rádium tartalma szabja meg. Az exhaláció hajtóereje az a koncentráció különbség, amely a környező levegő és a pórus-tér között fennáll. Ez nyilvánvalóan kiegyenlítődni igyekszik, azonban a pórusok és az atmoszféra térfogata közötti sok nagyságrendnyi különbség valamint a radon véges életideje miatt ez sohasem következik be. A rádiumból képződő radonnak ráadásul csak egy része jut be a pórustérbe. Ezt a hányadot az ún. emanációs tényezővel fejezzük ki, aminek értéke 0-1 közé esik. Az emanációs képesség, pontosan nem meghatározható módon, a rádiumnak a szemcsében való elhelyezkedésére utal, s azt mutatja meg, hogy a rádium tartalom milyen hányadban járul hozzá a pórustér radon koncentrációjához.

Az exhalációképesség kísérleti meghatározására sokféle módszert dolgoztak ki (WILKENING M. 1990). A legáltalánosabb és általunk is használt az ún. akkumulációs eljárás. A vizsgálandó kőzet felületét egy alkalmas kiképzésű, radonra át nem eresztő edénnyel légmentesen lezárjuk, s az itt kialakuló radon koncentrációt mérjük az idő függvényében. Könnyen belátható, hogy ez a t időnek egy $[1 - \exp(-kt)]$ szerint változó függvénye lesz. Ha a rendszer teljesen zárt, akkor a telítési érték egyértelmű függvénye a pórustérben uralkodó radon koncentrációnak (és a mérési geometriának). Az elérési időt a radon felezési ideje szabja meg, s így a telítési szint elvileg kb. 30 nap alatt alakul ki. Amennyiben a koncentráció ennél hamarabb állandóvá válik, akkor az a kísérleti rendszer tökéletlenségére utal.

Az általunk használt *in situ* mérési elrendezés az 1. ábrán látható. A radon mérésére egy PRASSI típusú, periodikus üzemmódban (ún. grab sampling) is működtethető készüléket használtunk. A 15 perces mintavétel (ekkor a levegő az ábrán nyilakkal jelzett irányban áramlik) után 3 órát vártunk, amíg kialakult a radioaktív egyensúly a radon és rövid életidejű leánytermékei között. (Erre a korrekt radon mérés miatt van szükség, ugyanis a detektor a bomlástermékek által kibocsátott alfa részecskéket is számlálja.) Az aktuális koncentráció meghatározására 1 óra mérési időt használtunk. A Róka-ág Labor-termében az agyag radon exhalációját közel két napon keresztül vizsgáltuk a fenti időrezsímben.

A mérési eredményeket a 2. ábrán a nyitott körök jelzik. Látható, hogy az alkalmazott felület/térfogat aránynál már néhány óra múlva könnyen mérhető magas radon koncentráció alakult ki, s az időben az elvárt módon emelkedett. A kísérlet ideje alatt a Labor-teremben egy AlphaGuard típusú, a

PRASSI-val összekalibrált készüléssel párhuzamosan is mértük a radon koncentrációját. A tapasztalat szerint ez mindvégig állandó, átlagosan (580 ± 20) Bq/m³ volt. A kísérleti adatokra illesztett görbe meredekségéből a lezárt felület és a búra térfogatának ismeretében az agyag exhalációja ki-számítható. A fluxus értékére 6.29 mBq/m²s adódott.



1. ábra. Exhalációs mérőberendezés vázlatja
Fig. 1. Sketch of exhalation experimental set up

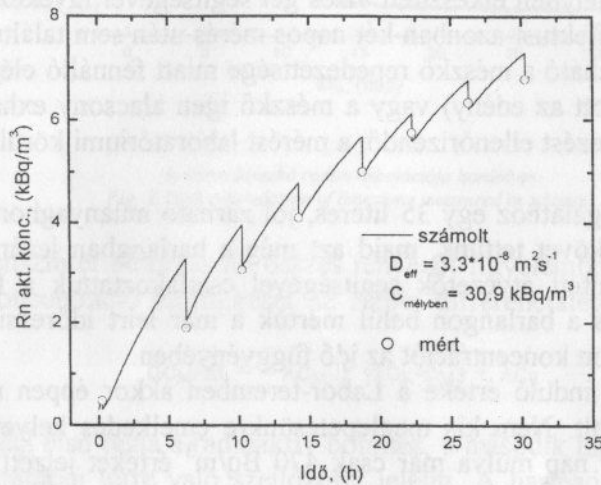
Mivel az alkalmazott geometria igen egyszerű volt, a fenti kísérletet modellszámítással is szimuláltuk. Ebből a radon ún. effektív diffúziós állandója és a telítési radon koncentráció számolható. Az agyagban a radon koncentráció időbeli változását az alábbi parciális differenciálegyenlet írja le:

$$\partial c / \partial t = \text{div}(D_{\text{eff}} * \text{grad}(c)) - \lambda c + \lambda c_{\infty},$$

ahol a jobb oldal első tagja a diffúziót, a második a radioaktív bomlást, a harmadik pedig a radon forrását jellemzi. Hengeres geometriájú modellünkben figyelembe vettük, hogy az edény térfogata a kísérlet során periodikusan változik. Feltételeztük továbbá, hogy az agyag homogén. A parciális differenciálegyenletet az adott kezdeti és peremfeltételek mellett véges elem módszerrel oldottuk meg a mérőedényt és a hozzá csatlakozó 0.5 m sugarú és 0.5 m mély agyagot magába foglaló régiót. Kezdeti feltételként vettük figyelembe, hogy c_k külső koncentráció a fent megadott mért érték és ehhez illesztettünk a z mélység szerint exponenciálisan változó kezdeti értékfeltételt. A régió szélső, ill. alsó peremén a radon fluxusát nullának tekintettük, mert már távol vagyunk a zavart okozó mérőedénytől.

don kon-
(580 ± 20)
a lezárt fe-
ki-számítható.

A modellszámítás eredménye az illesztési paraméterekkel együtt látható a 2. ábrán. A számított görbe fűrészfog jellege abból adódik, hogy a két mintavétel közötti időben csak a búra alatt változik a radon koncentrációja, s az összenyitáskor a hirtelen megnőtt térfogat miatt az leesik a két koncentráció érték térfogatokkal súlyozott átlagára. Az elmélet és kísérlet látható módon kitűnő egyezést mutat. A kapott paraméterekkel számolt exhaláció értéke $8.12 \text{ mBq/m}^2\text{s}$. A némileg magasabb érték oka az, hogy az első esetben a mintavétel idején bekövetkező koncentráció-esést az adatok értékelésénél nem vettük korrekcióba, így a valódi meredekséget alul-becsültük. Ez a kis különbség egyébként az ábrán szemmel is észlelhető.



2. ábra. Agyag helyszíni radon exhalációja
Fig. 2. In situ radon exhalation measurement on clay

A fenti kísérletben kapott fluxus adat alacsonyabb, mint az irodalomban a jóval porózusabb talajokra közölt $10\text{-}20 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ exhaláció (WILKENING M. 1985), azonban nem olyan kicsi, hogy elhanyagolható lehetne a barlang radonszintje szempontjából. Mivel a Róka-ág a Baradla-barlang egy önálló, a fő-ágtól elkülönülő része, elképzelhető, hogy a radon koncentrációját is csak az itt található kőzetek szabják meg. Felmérve az agyag teljes felületét valamint a terem térfogatát, becslést végeztünk a fenti fluxus értékkel a várható radonszintre. Eredményül 800 Bq/m^3 -t kaptunk, ami nincsen ellentmondásban a mért értékkel.

Hasonló *in situ* mérést folytattunk a Baradla fő-ágban a patakmederben lerakódott agyagon is. A körülmények itt nem tették lehetővé az időbeli változás mérését, csak a telítési értéket határoztuk meg két hónapos

exhalációs idő után. Ezért ebből a kísérletből csak a diffúziós állandó és a c_{∞} lehetséges kombinációira tudunk következtetni, ami a fluxusra egy tartományt ad eredményül. E mérés szerint az árvíz utáni rendkívül vizes agyagban a radon exhalációja $0.9 - 4.8 \text{ mBq/m}^2\text{s}$ között lehet, azaz a fluxus jelentősen kisebb, mint a Róka-ágban volt. E tapasztalat összhangban van azzal a már említett ténnyel, hogy vízben a radon diffúziós állandója kicsi. Nem kizárt, hogy a bevezetőben is hivatkozott Burkett negatív eredménye is a vizsgált agyag nagy nedvességtartalmának rovására írható.

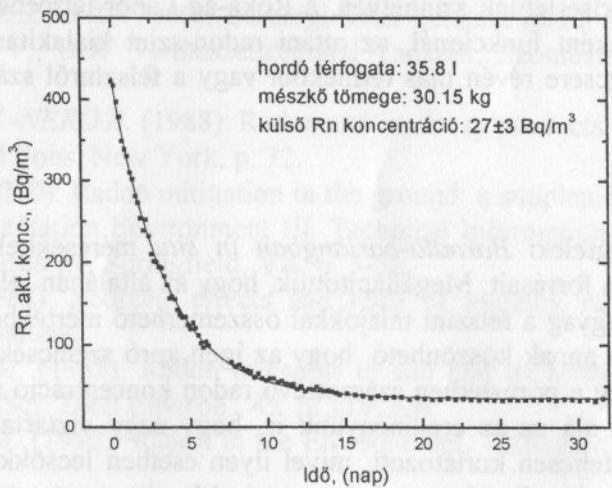
A mészkő radon exhalációját először a Róka-ág Labor-termében, egy leszakadt, kb. 2 m^3 térfogatú tömbön vizsgáltuk a fent már leírt módon és berendezéssel. Az exhalációs edény és az egészen sík törési felület közötti tömítést egy helyben elkészített vizes gél segítségével igyekeztünk biztosítani. Mérhető effektust azonban két napos mérés után sem találtunk, ami egyaránt magyarázható a mészkő repedezettsége miatt fennálló elégtelen zártsággal (kiszellőzött az edény) vagy a mészkő igen alacsony exhalációjával. Ez utóbbi feltételezést ellenőrizendő, a mérést laboratóriumi körülmények között is elvégeztük.

A vizsgálatához egy 35 literes, jól zárható műanyaghordóba 30.15 kg darabos mészkövet tettünk, majd azt még a barlangban lezártuk. A fedélen kiképzett tömített átvezetők segítségével csatlakoztattuk a PRASSI radon monitorhoz és a barlangon belül mértük a már leírt időrekszimbén a mérőedénybeli radon koncentrációt az idő függvényében.

Ennek induló értéke a Labor-teremben akkor éppen uralkodó szint, 700 Bq/m^3 volt. Nem kis meglepetésünkre emelkedés helyett a radonszint csökkent és 3 nap múlva már csak 470 Bq/m^3 értéket jelzett a készülék. A radon koncentráció időbeli csökkenésének üteme arra utalt, hogy vagy a mérőrendszer nem teljesen zárt radonra, vagy a mészkő exhalációja pótolja az elbomlott radon egy részét. A két lehetőség természetesen egymás mellett is fennállhatott.

A kérdés eldöntéséhez az összeállított kísérleti berendezést, annak megbontása nélkül kiszállítottuk a felszínre, majd további 1 hónapon át az egyetem laboratóriumában elhelyezve követtük a radonszint alakulását. Már néhány nap múlva látszott, hogy a görbe meredeksége megváltozott, meredeksége nagyobb volt, mint amit a radon bomlási állandója megszab. Bizonyossá vált, hogy a rendszer nem teljesen tömör. A kísérlet utolsó napjaiban a radon koncentráció már gyakorlatilag nem változott, s a külső, laboratóriumban mért értékre, vagy ahhoz nagyon közelire látszott beállni. A teljes kísérleti időre kapott radon koncentráció adatokat a 3. ábra mutatja.

... és a C_{∞}
 egy tartó-
 vizes agyag-
 fluxus jelentő-
 ban van azzal a
 oja kicsi. Nem ki-
 edménye is a víz-
 r-termében, egy
 módon es
 közötti



3. ábra: Mészko radon exhalációja hordóban
 Fig. 3. Radon exhalation of limestone measured in a barrel

A radonszintet befolyásoló összes tényezőt figyelembe véve a mérőedényben a koncentráció időfüggését az alábbi differenciálegyenlettel lehet leírni:

$$dc_M/dt = -\lambda c_M + \gamma(c_K - c_M) + \lambda c_F,$$

ahol a jobb oldal első tagja a radioaktív bomlást, a második tag a rendszer c_K külső koncentrációjú térre való szellőzését jelenti. A harmadik tag a radon mérőedényben belüli forrását írja le, ami jelen esetben a mészko exhalációjával arányos forrástag. Az egyenletből következik, hogy az edényben belül a radonszint $\exp[-(\lambda+\gamma)t]$ szerint közelít a c_M egyensúlyi koncentrációhoz, így az időállandó mérésével a γ meghatározható. Ezután, mivel $dc_M/dt = 0$ és γ ismert, c_F egyszerűen kiszámítható.

A fentiek szerint meghatározott szellőzési tényezőre $\gamma = 0.1196 \text{ nap}^{-1}$ értéket, egyensúlyi radon koncentrációra pedig $c_M = 32.3 \text{ Bq/m}^3$ -t kaptunk. Mivel a laboratóriumban a radon koncentrációja mérésünk szerint mind-össze $27 \pm 3 \text{ Bq/m}^3$ volt, a hordón belüli forraserősséget a $c_F = 35 \text{ Bq/m}^3$ érték jellemzi. Ez a hordó teljes térfogatára számítva 1.25 Bq forrás aktivitásnak felel meg. Egységnyi tömegű mészko tehát csak 0.042 Bq radon emanációjára képes. Figyelembe véve a mészko sűrűségét (2710 kg/m^3), ez 112 Bq/m^3 koncentrációnak felel meg. Az eredmény azt jelenti, hogy egy ilyen kőzetben képződött üregben, ha ott más, radon exhalációra képes anyag nincsen, akkor ennél magasabb radonszint semmiképpen nem alakul-hat ki. Ez egyben azt is

jelenti, hogy kísérletünk színhelyén, a Róka-ág Labor-termében a mészkő a radon nyelőként funkcionál, az ottani radon-szint kialakításában csak az agyag, ill. légcseréje révén más termékből vagy a felszínről származó levegő vesz részt.

Összefoglaló

Az aggteleki *Baradla-barlangban in situ* mérésekkel vizsgáltuk a barlangi radon forrásait. Megállapítottuk, hogy az általában jelentősebb rádium tartalmú agyag a felszíni talajokkal összemérhető mértékben exhalál. Ez nyilvánvalóan annak köszönhető, hogy az igen apró szemcsékből álló kőzet jól emanál, így a pórustérben számottevő radon koncentráció tud kialakulni. Ezt támasztja alá az az eredményünk is, hogy nagy víztartalom esetén az exhaláció erőteljesen korlátozott, mivel ilyen esetben lecsökken az effektív diffúziós állandó. Ezzel szemben a mészkő alig mutatott hajlamot az exhalációra. Mivel ennek a kőzetnek a rádium tartalma igen alacsony, még nagy emanáló képesség esetén sem tudná felülmúlni az agyag exhalációját.

Úgy tűnik tehát, hogy a barlangi radon forrása az agyag, az alapkőzet ezzel szemben inkább nyelőként funkcionál. Jóllehet üledékként az agyag szinte mindenhol jelen van, forrásként igazán ott szerepel, ahol mennyisége számottevő. Mivel ilyen értelemben az agyag eloszlása a barlangban nagyon inhomogén, ez egyben azt is jelenti, hogy a radon forrása lokalizálható. Ez a tény felhasználható új barlangi részek felderítésére, ill. ismert járatok szellőzésének időbeli vizsgálatára.

IRODALOM

- BURKETT C. (1993): Radon levels in limestone caves in central Pennsylvania. - B.Sc. Thesis, University Park, Pennsylvania State University, Pa.
- DEZSŐ Z. (2000): A barlangi radon eredetének vizsgálata, II. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely, 2000. ápr. 13-14, előadás.
- GÉCZY G.-CSIGE I.-SOMOGYI G. (1988): Air circulation in caves traced by natural radon. - In: Proc. of the 10th Int. Congress of Speleology, Hung. Speleological Society, Budapest, 2, p. 615-617.
- HAKL J.-HUNYADI I.-VÁRHEGYI A. (1997): Radon monitoring in caves. - In: S.A. Durrani, R. Ilic (szerk.), Radon measurements by etched track detectors. - Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment. World Scientific Publishing Co., Singapore, p. 261-283.
- MICHEL J. (1987): Sources. In: : C.R. Cothorn, J.E. Smith Jr. (szerk.), Environmental radon. Plenum Press, New York, p. 98-108.

mészke a
ban csak az
armazó levegő
ekkel vizsgáltuk a
alentősebb rádi-
exhalál. Ez
ko kőzet
lthi.

MOLNÁR L.-DEZSŐ Z. (2000): Barlangi terek kutatása radon segítségével - Karsztfeljlődés V., BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely, p. 283-291.

NAZAROFF W.-NERO A. (1988): Radon and its decay products in indoor air, John Wiley and Sons, New York, p. 72.

TANNER A. (1980): Radon mitigation in the ground: a supplementary review - In: Natural Radiation Environment III. Technical Information Center, U.S. Department of Energy, Springfield, VA, p. 5-56.

UNSCEAR (1988): Sources, effects and risks of ionizing radiation, New York, United Nations.

WILKENING M. (1985): Radon transport in soil and its relation to indoor radioactivity, - Sci. Total Environ., 45, p. 219-226.

WILKENING M. (1990): Radon in the Environment. - Elsevier, Amsterdam, p. 50-53.

Barlangkutatás radonnal

Dezső Zoltán és Molnár Lajos

Debreceni Egyetem Izotópalkalmazási Tanszék, 4010 Debrecen, Pf. 8.

Bevezetés

A barlangokban végzett radon vizsgálatok hazai és nemzetközi irodalmából ismeretes, hogy a szerzők általában homogén és barlangon kívüli radon forráseloszlást feltételeznek, s a radon koncentráció hely- és időfüggését (pl. évszakos változásait) alapvetően a barlang és a felszín kapcsolatával magyarázzák [1]. Végző soron a radon adatok analizálásával csak az adott barlang légkörzési sajátosságait derítik fel, azaz mint a levegő áramlásának nyomjelzőjét használják a radont. Nem túl nagyméretű, huzatos barlangok esetében várható is, hogy egy ilyen egyszerű modell alapján megérthető az adott helyen a barlangi radon viselkedése. Különösen igaz ez olyan helyzetben, amikor a méréseket ún. integráló (passzív) módszerrel végzik, s így csak viszonylag durva időfelbontású adatsorok állnak rendelkezésre, ill. várnak értelmezésre. Nagyméretű, kevés felszíni kapcsolattal rendelkező barlangoknál, amilyen pl. a Baradla-barlang is, a fenti egyszerű modell azonban már nem használható. Szerencsés esetben ugyan a bejáratok környezetében még esetleg értelmezhetők vele a mérési adatok, de ezektől távoli helyeken, különösen bonyolultabb járat-rendszereknél már csődöt mond. Ilyenkor akár téves következtetések levonása is előfordulhat.

E konferencián elhangzott másik előadásunkban megmutattuk, hogy a Baradla-barlang hossz-szelvénye mentén a barlangi levegő radon-tartalma igen sajátosan változik. A barlang igen nagy mérete valamint az a tény, hogy az ún. hosszú túra útvonala mentén végzett radon méréseinket mindössze két nap alatt - gyakorlatilag teljesen állandó külső időjárási feltételek mellett - végeztük el, lehetővé teszi, hogy az észlelt radon-profil a barlang szerkezetével, eddig fel nem kutatott, ill. nem ismert radon forrásaival hozzuk összefüggésbe. A radon forrásaival kapcsolatban itt utalunk arra, hogy a több hazai barlangra kiterjedő, az azokban fellelhető kőzeteken elvégzett természetes radioaktivitás mérések eredménye alapján nemrégiben arra a következtetésre jutottunk, hogy a barlangi radon alapvető forrása az agyag [2]. Itt elsősorban a barlangi üledék kategóriába sorolt, azaz a víz által beszállított, ill. a kőzet-repedéseken át vizes szuszpenzió formájában már befolyt és a termekben, folyosókon helyenként hatalmas mennyiségben felhalmozott agyagra, s nem a repedéseket kitöltő, a karszt „lélegzését” elzáró agyagra gondolunk.

Mivel a Jósvalői bejáratához igen közeli Labirintusban a Baradlával foglalkozó kutatók közül már többen is beszámoltak váratlan és érdekes mérési tapasztalataikról. Ezek legismertebbike az állandóan magasabb hőmérséklet (kb. 11.4 C°, a barlang más helyein 9.5-10.4 C°). Évekkel ezelőtt Hakl ezen a helyen rövid idejű, ún. radon-pöff megjelenését észlelte [3], Végh pedig szokatlanul nagy CO₂-koncentrációt mért ugyanitt [4]. Ugyanakkor egy alsó barlangon keresztüli légcirkulációra utaltak már az integráló radon mérések eredményei is [5]. Ezek, valamint a Jósvaló-forrás közelsége már korábban felvetette, hogy esetleg ezen a helyen lehetne megkísérelni a régóta keresett Hosszú-Alsó-barlangba való lejutást. A kapcsolat azonban csak feltételezés, a meggyőző bizonyíték még hiányzik. Így komoly próbálkozás eddig nem történt, mert az igen omladékos terepen várhatóan csak nagy nehézségek árán és lassan lehetne lejutni.

Eredmény A fenti információk nyomán, élve a rendelkezésünkre álló nagy érzékenyséű és aktív radon detektálási lehetőséggel, még 1999 őszén mi magunk is végeztünk egy rövid idejű (1 óras) radon mérést a Labirintusban. Legnagyobb meglepetésünkre úgy tűnt, éppen ismét „pöffent” itt a barlang, hiszen a 7500 Bq/m³ –es érték messze a legnagyobb volt minden azt megelőző, a Baradla-barlangban gyűjtött mérési eredményünknél. Nyilvánvaló, hogy a fenti ismeretek és a frissen szerzett tapasztalatok ráirányították figyelmünket a barlang ezen részére, s ideai kutatási munkánk egyik fő célja lett annak kiderítése, hogy honnan ered és milyen időbeli trendet mutat e nagy radon koncentráció.

Méréstechnika

Ha egy helyiségben, teremben a radon koncentrációját kívánjuk megmérni, akkor a megfelelő mérőeszköz kiválasztásán túl a mérésre alkalmas, az uralkodó koncentrációt legjobban reprezentáló helyet, mérési pozíciót is gondosan kell megválasztani. Ennek különösen nagy a jelentősége akkor, ha a radonnak lokális forrása(i) és nyelője van(nak). A Labirintusnál, amint arra Hakl is rámutatott [3], ez elsőrendű kérdés, mert itt a felszínre vezető kijárat nagyon közel van, s a külső hőmérséklettől függően esetenként erőteljes konvekció lép fel. A rendszeres és sokszor nagy létszámmal jellemezhető látogató forgalom is befolyásolja ezen a helyen a hőmérsékletet, az áramlási viszonyokat. Ha nem folyamatos, hosszú idejű monitorozást végzünk, hanem esetenkénti hosszabb-rövidebb idejű mérések alapján kívánjuk (vagy tudjuk csak) felderíteni az uralkodó radon-viszonyokat, akkor a fenti tényezőknek még jelentősebb szerepe lehet. Ilyen megfontolásokat is figyelembe véve, a méréseket mélyen a Labirintusban és mindig ugyanazon a helyen végeztük.

A radon detektálására minden estben ugyanazt a készüléket, egy AlphaGUARD PQ2000 típusú (Genitron GmbH, Németország), ionizációs kamrás berendezést használtunk.

Mivel a mérőkamra feltöltése diffúzió útján történik, vagyis viszonylag lassan reagál a radon koncentráció változásaira, mérési időnek 1 órát választottunk, s minden alkalommal legalább 12 órán keresztül végeztük az adatgyűjtést. Az alkalmazott radon monitor nagy érzékenységgű hőmérőt valamint precíziós nyomásmérőt is tartalmaz, így ezen környezeti paraméterek mérésére és regisztrálására is lehetőségünk nyílt. A radon idősorok értelmezéséhez különösen a beépített barométer nyújt nagy segítséget, hiszen a légnyomás tipikusan az a paraméter, amelynek hirtelen változása azonnal befolyásolja a radonnak a pórustérből való kijutási lehetőségét. A radon adatok mérési bizonytalansága (véletlen hiba) tipikusan 1-5 %. A szisztematikus hiba nagysága pontosan nem ismeretes ugyan, de ennek nincs is jelentősége, hiszen az ugyanazzal a készülékkel különböző időben és egyes esetekben különböző mérési helyeken mért értékek összehasonlítása alapján vonjuk le következtetéseinket.

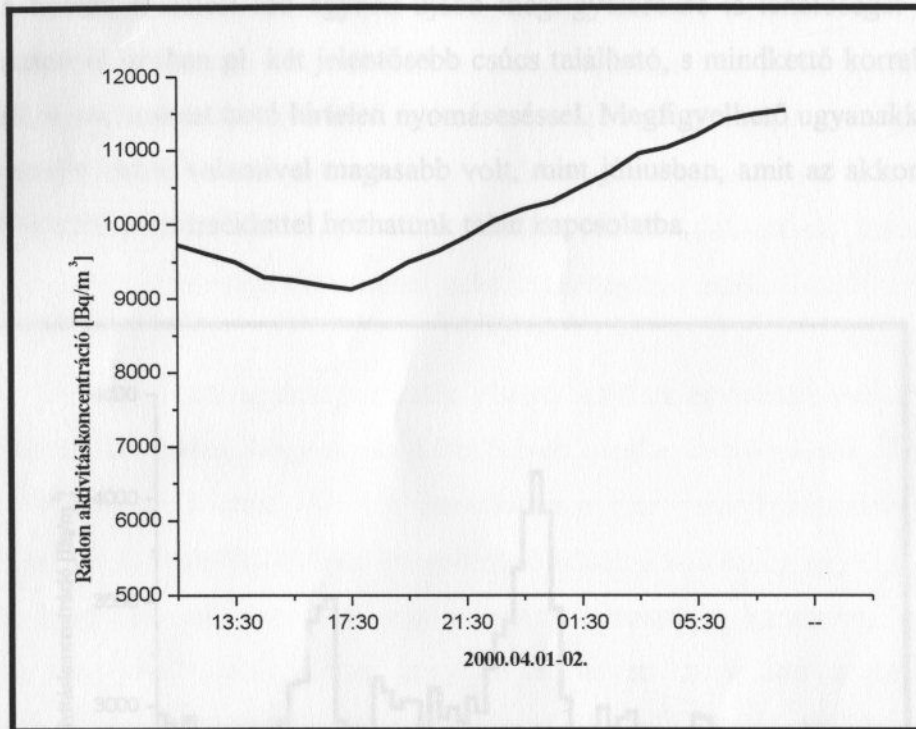
Eredmények

A bevezetőben említett legelső (1999. okt.) mérés után először 2000. márciusában végeztünk radon mérést a Labirintusban, ez azonban még szintén csak rövid idejű volt, s valójában ekkor került sor a végleges mérési hely kiválasztására. Nem kis meglepetésünkre a radonszint ugyanakkorának adódott mint az első alkalommal, s ez máris kétségessé tette a „pöffel” kapcsolatos hipotézis fenntarthatóságát. Az ekkor gyűjtött 10 db 10 perces mérési adat ugyanakkor határozott trendet, éspedig kb. 1000 Bq/m³/óra emelkedést mutatott. Ez az érték azt sejteti, hogy itt valószínűleg a korábban feltételezettnél is jóval magasabb, a Baradla-barlangban eddig nem ismert magas radonszint a jellemző.

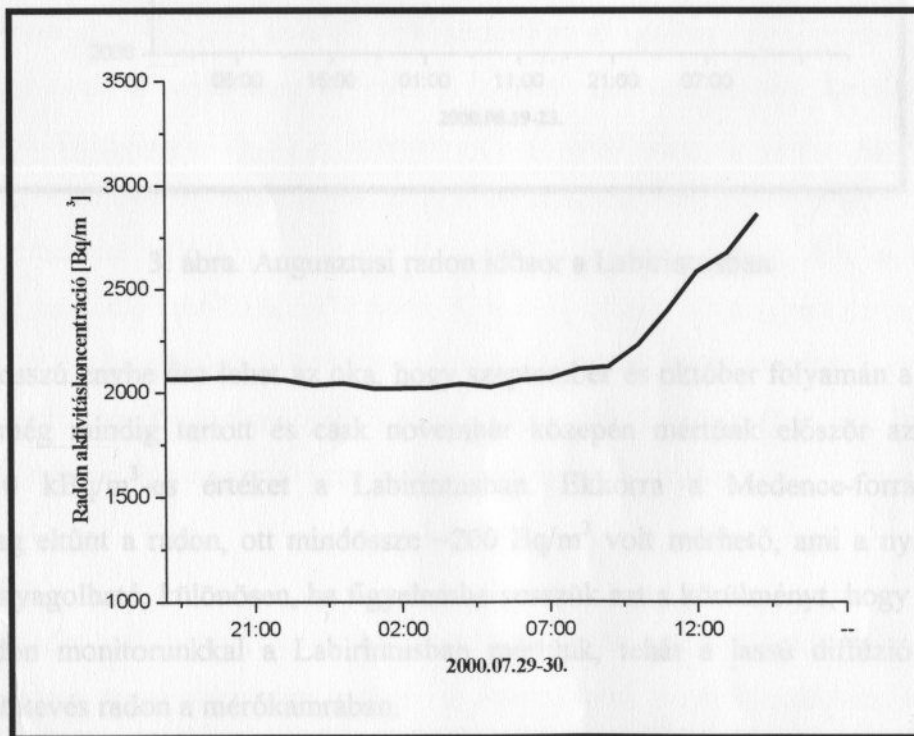
Az április első napjaiban, egyébként még kellemetlenül hideg időben végzett hosszú idejű mérési kampányunk a fenti várakozásnak megfelelő eredményt hozott. Az 1. ábrán bemutatott adatsor szerint itt már kezdetben 9-10 kBq/m³ volt a radon koncentrációja, amely a folyamatosan csökkenő légnyomás hatására másnap további 20 %-ot emelkedett még. A barlangi radon eredetéről vallott nézetünk, a helyszín omladékos, bár helyenként foltokban agyagot is tartalmazó volta nehezen engedi meg, hogy e nagy radon koncentrációt egy közeli, a Labirintusban keresendő forrással magyarázzuk. A felszálló meleg áramlat jelenléte is támogatja azt az elképzelést, hogy a forrás valahol a mélyben (alsó barlang?) keresendő.

A következő, szintén egy napos mérési sorozatra július végén került sor. Ekkor a barlang már nyilvánvalóan a nyári „üzemmódnak” megfelelően viselkedett, ami itt a Labirintusban a 2. ábrán láthatóan a télihez képest lényegesen kisebb radonszinttel jellemezhető. Érdekes ugyanakkor, hogy az utolsó 6 órában tapasztalható egyre meredekebb emelkedés a légnyomás emelkedését követi, bár ahhoz képest egy kicsit késik. Hová tűnt a radon? Egy lehetséges válasz: talán a hideg barlangi levegővel kifolyik a Hosszú-Alsó-barlangból távozó

víz mellett, ha van megfelelő légtér. Itt, a Medence-forrás tárójában meg is találtuk a keresett radont! Az első szifon közeléig követtük, a mért koncentráció 5 kBq/m^3 volt.

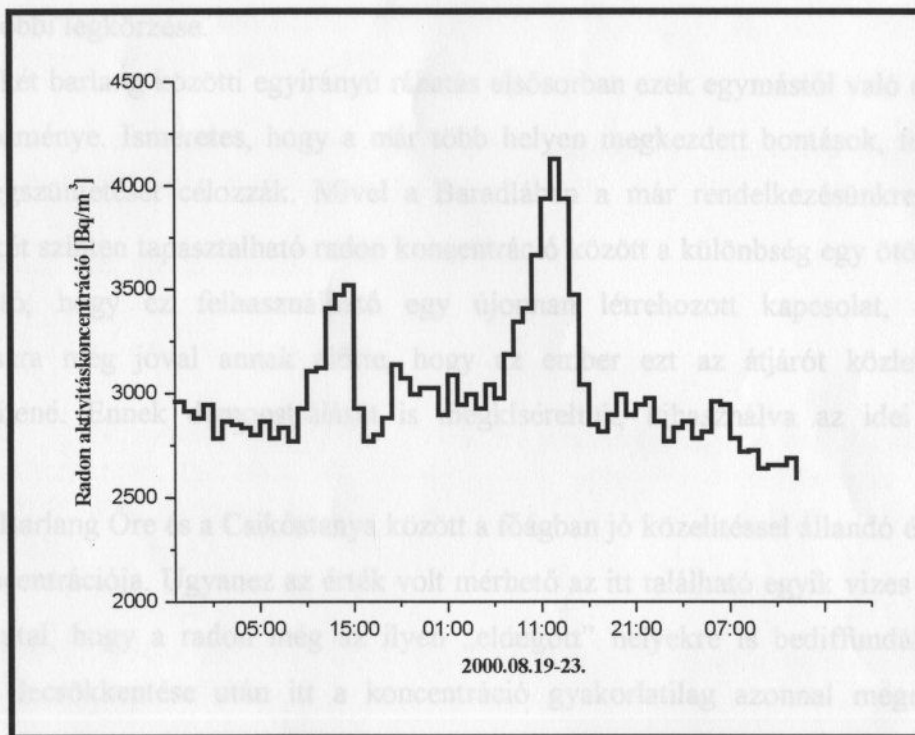


1. ábra. Téli trendnek megfelelő radon koncentráció a Labirintusban



2. ábra. Nyári trendnek megfelelő radon koncentráció a Labirintusban

A júliusi, meglepő adatsort reprodukálendő augusztusban közel három napon át végeztünk újabb méréseket a megszokott helyen. Az eredmények alapvetően hasonlóak voltak, de a hosszú észlelési idő egyben újabb megfigyelésekre is lehetőséget adott. A 3. ábrán bemutatott idősorban pl. két jelentősebb csúcs található, s mindkettő korrelációt mutat egy-egy 6, ill. 4 óra hosszát tartó hirtelen nyomáseséssel. Megfigyelhető ugyanakkor, hogy az átlagos radonszint ekkor valamivel magasabb volt, mint júliusban, amit az akkorihoz képest alacsonyabb felszíni hőmérséklettel hozhatunk talán kapcsolatba.



3. ábra. Augusztusi radon idősor a Labirintusban

A hosszú enyhe ősz lehet az oka, hogy szeptember és október folyamán a fenti, nyári üzemmód még mindig tartott és csak november közepén mértünk először az áprilisihoz hasonló, 10 kBq/m³-es értéket a Labirintusban. Ekkorra a Medence-forrás tárából gyakorlatilag eltűnt a radon, ott mindössze ~200 Bq/m³ volt mérhető, ami a nyári értékhez képest elhanyagolható, különösen, ha figyelembe vesszük azt a körülményt, hogy a megelőző éjszaka radon monitorunkkal a Labirintusban mértünk, tehát a lassú diffúzió miatt még maradhatott kevés radon a mérőkamrában.

A kialakult kép tehát világos, egyértelműen magyarázható a már ismert elvi alapokon. Azaz – legalábbis az ún. Szenthe-féle táró kihajtása óta – a keresett alsó barlang a hőmérsék-

letnek, mint kontroll-paraméternek a hatása alatt „lélegzik”. Ha a további, a téli rezsimre vonatkozó vizsgálatok eredménye állandó, az időjárástól független radon koncentrációt mutat, akkor ezt a barlangot a légkörzés alapján elég szigorúan egy bejáratos barlangnak kell tekinteni. Ez azt jelenti, hogy itt ki tud alakulni a barlang mérete és a benne található forrás mennyisége által determinált maximális radon koncentráció. A minimumot azonban nem egyedül a legnagyobb elképzelhető külső hőmérséklet szabja meg, hanem arra hatással van az alsó és felső (a jelenleg járható) barlangok közötti összeköttetések keresztmetszete, elhelyezkedése valamint a magasabban elhelyezkedő barlangban uralkodó radon viszonyok is, azaz ez utóbbi légkörzése.

A két barlang közötti egyirányú ráhatás elsősorban ezek egymástól való elzártságának a következménye. Ismeretes, hogy a már több helyen megkezdett bontások, feltárások épp ennek megszüntetését célozzák. Mivel a Baradlában a már rendelkezésünkre álló adatok szerint a két szinten tapasztalható radon koncentráció között a különbség egy ötös faktort tesz ki, várható, hogy ez felhasználható egy újonnan létrehozott kapcsolatot, összeköttetés bizonyítására még jóval annak előtte, hogy az ember ezt az átjárót közlekedési céllal megközelítené. Ennek demonstrálását is megkíséreltük, kihasználva az idei igen száraz időjárást.

A Barlang Őre és a Csikóstanya között a főágban jó közelítéssel állandó és 2 kBq/m^3 a radon koncentrációja. Ugyanez az érték volt mérhető az itt található egyik vizes szifonban is, ami arra utal, hogy a radon még az ilyen „eldugott” helyekre is bediffundál. A vízszint megfelelő lecsökkentése után itt a koncentráció gyakorlatilag azonnal megemelkedett 6 kBq/m^3 -re. Erre semmilyen más magyarázatot nem találtunk, mint azt, hogy itt közvetlenül az alsó üreg-rendszerrel való kapcsolat jött létre. Másnap a szifon még mindig nyitva volt, ekkorra a koncentráció már 7 kBq/m^3 -t ért el. A további növekedés magyarázható azzal, hogy egy enyhe konvekció is beindult, ami további radon feljutását eredményezte. Úgy gondoljuk, hogy ez az eredmény elég meggyőzően bizonyítja feltevésünk helyességét, azaz itt a Baradla-barlangban a radon a barlangi szerkezet felderítésére is felhasználható.

Összefoglalás

A Baradla-barlang ún. Labirintus termében a barlang más ismert részeinél mérthez képest lényegesen magasabb radon koncentrációt észleltünk a téli időszakban. Az évszakos változások felmérésének eredménye felvetette annak lehetőségét, hogy ez a sajátos trend a Hosszú-Alsó-barlang jelenlétével és ennek önálló légkörzésével magyarázható. Ezzel kapcsolatosan ezért a Szenthe-féle táróban is megvizsgáltuk a radon viszonyokat. Az itt

kapott mérési eredmények megerősítették fenti feltételezésünket. Az így összeálló kép alapján úgy gondoljuk, hogy a magas radon szintek szifonos helyeken történő keresése, ill. észlelése a keresett alsó szintre történő lejutás lehetőségének felmérésére megbízható előrejelzést képes adni.

Irodalom

- [1] Hakl J., Hunyadi I. and Várhegyi A.: *Radon monitoring in caves*. In: Radon measurements by etched track detectors. Applications in radiation protection, Earth sciences and the environmental. Eds: S. A. Durrani, R. Ilic., World Scientific Publishing Co., Singapore, 261-283.,1997.
- [2] Dezső Z., *A barlangi radon eredetének vizsgálata*, II. Karsztfejlődés Konferencia, Szombathely 2000. április 13-15.
- [3] Hakl J., személyes közlés
- [4] Végh Zs., személyes közlés
- [5] Hakl J., Hunyadi I., Törőcsik I.: *Radon measurements in the Baradla cave*. In: Conference on the karst and cave research activities of educational and research institutions in Hungary. Jósvafő, 17-19 May 1991. Eds: L. Zábó, M. Veres. MKBT, Budapest, 109-115., 1993.

Ezt a munkát a Karszt és Barlang Alapítvány anyagilag is támogatta, amiért a szerzők ezúton is köszönetet mondanak.

Radon koncentráció és barlangi klíma kapcsolata

Dezső Zoltán és Molnár Lajos

Debreceni Egyetem TTK-MTA Atomki Környezetfizikai Tanszék

A konferencián elhangzott számos előadásból is kiderült, hogy a barlangi levegő légzőrendszerre gyakorolt jótékony hatása valamilyen úton, módon a barlangi klímával lehet kapcsolatos. Jelenlegi tudományos ismereteink alapján azonban nem tudjuk megmondani, hogy a klíma paraméternek tekintett, és többnyire számszerűsített mutatók közül melyek és milyen értékhatárok között bírnak meghatározó jelentőséggel, ill. felelősek a kuratív hatásért. A legismertebb és a kezdetek óta legrészletesebben vizsgált ilyen paraméterek a hőmérséklet és a páratartalom. Ezek azonban jószerivel állandónak tekinthetők a barlangokban, sőt pl. egy olyan ország esetében, mint Magyarország, még barlangról barlangra sem mutatnak jelentős különbséget, legalábbis az esetleges terápiás hatás szempontjából nem. Talán ez is oka annak, hogy a barlangok légközésének általában fontos jelentőséget tulajdonítunk, mert úgy hisszük, ez befolyásolja más, kevésbé tanulmányozott vagy ismert paraméterek értékét, amelyek másrésztől elengedhetetlen kellékei a gyógyulásnak.

Ebben a körben bizonyára ismert, hogy a 20. század elején a speleoterápia elterjedése, fellendülése igen szoros kapcsolatban volt a radioaktivitás és az ionizáló sugárzások felfedezésével. Már a kezdeti kutatások kimutatták a levegő állandó természetes radioaktivitását, s az is kiderült, hogy ennek mértéke barlangokban jelentősen meghaladja a szabad levegőben mérhető értéket. Már akkor megállapították, hogy ezért az ún. rádium emanáció, mai ismert nevén a radon a felelős. Ahogyan a rádiumot tartalmazó cseppek és italok elterjedtek, úgy vált igen gyorsan népszerűvé a barlangok gyógyulás érdekében történő látogatása. Abban az időben az ionizáló sugárzás biológiai hatása még nem volt ismert, a sugárzásnak tulajdonított kuratív erő pusztán a spekuláció eredménye volt. Hatása azonban a mai napig érezhető. Ma is működik olyan gyógybarlang, ahol az ún. radon kúra is része egyes kezeléseknak. A tudományos közvélemény e kérdésben még ma sem egyhangúlag vélekedik. Legszélesebb körben az a nézet az elfogadott, miszerint a radon, pontosabban az ott mindig jelenlévő radon leánytermékek belégzése a koncentrációtól függetlenül kockázatot jelent. Más elképzelések szerint egy bizonyos sugárdózis jótékony hatású is lehet, mert állandó működésben tartja a szervezet védekező, ún. repair rendszerét. E dózis nagysága azonban még közelítőleg sem ismert, így erre terápiát sem lehet alapozni.

Bármelyik nézet is legyen igaz, úgy tűnik, a barlangokban uralkodó radon koncentrációt érdemes mérni, ill. ismerni, s ezt a paramétert a barlangi klíma részének kell tekinteni. A kapcsolat persze nem ennyiből áll, nem ilyen egyszerű. Nyilván részben éppen az előbb elmondottak vezettek oda, hogy az elmúlt évtizedekben kiterjedt radon méréseket folytattak sok ország számos barlangjában. Ezek egyik ismert általános eredménye a radon koncentráció szezonális, évszakos változásának felismerése. Mivel a felszínen az évszakok változása alapvetően az uralkodó hőmérsékletekkel jellemezhetőek, kézenfekvő volt arra gondolni, hogy a barlangi radon valamilyen módon összefügg az adott barlang légközésével, azaz a felszíni és barlangi levegő ki-, ill. beáramlásával, a barlang légcserejével. A radon transzport elméleti és kísérleti vizsgálata, továbbá a hosszú idejű barlangi radon mérések elemzése alapján kialakult egy elmélet, amely jószerivel minden hegyoldalra nyíló barlangra alkalmazhatónak bizonyult, és segítségével a radon koncentrációjában tapasztalt évszakos tendencia alapján az adott barlang jellemző légközését meg lehetett határozni.

Az elmélet alkalmazása jól követhető pl. a budapesti Szemlő-hegyi-barlang esetén, ahol mint ismert, barlangterápiás részleg is működik. Az első ábra a barlang metszeti képét

mutatja, a piros színű kereszt a terápiás céllal is használt termet jelöli. Látható, hogy a barlang ma 3 bejárattal rendelkezik, amelyek közül ez itt a jobb oldalon egy mesterségesen kialakított, a turizmust és a pacientúrát kiszolgáló, a fogadóépületből nyíló lejtaknás bejárat, amelyet a hegy oldalában alakítottak ki. A függőleges akna szintén mesterséges bejárat, valójában egy liftakna, amely azonban teljesen nem készült el, jelenleg le van fedve. A barlang ismert természetes bejárata a barlang legmagasabb pontja, ezen a helyen.

A barlangban több mint egy tucat helyen, éveken át végzett radon mérések szerint télen a radonszint többnyire alacsony. Az elmélet szerint ennek az az oka, hogy télen a hideg felszíni, radonmentes levegő a legalacsonyabban elhelyezkedő bejáraton befolyik a barlangba, míg a meleg barlangi levegő a kéményhatás miatt a kőzet repedésein keresztül a piros nyílakkal jelzett irányban távozik. A következő ábrán a nyári viszonyok láthatók. Ilyenkor a barlangi levegő hőmérséklete az alacsonyabb, ezért a levegő kifolyik a hegyoldali bejáraton. Helyére a kőzet repedésein keresztül radondús levegő áramlik be. Ennek eredményeként nyáron lényegesen magasabb radon koncentráció mérhető a barlangban mindenhol. Látható, hogy a levegő hőmérséklettől függő sűrűségén kívül az elmélet alapvetően arra épít, hogy a radon forrása a barlangot magába foglaló kőzetben van. A nagy koncentráció tehát a kőzeten keresztül a barlang felé áramló levegővel érkezik.

Ha az elmélet tényleg igaz, akkor a 4. ponttal jelölt helyen nyáron is alacsony koncentrációt kellene mérni, mert itt szinte akadálytalanul áramlik be a felszíni radonmentes levegő, ha a mesterséges bejáraton keresztül számottevő levegő kiáramlás van. Ezzel szemben az 1. 2. és 3. helyeken azonos koncentrációt illene mérni, hiszen ezek a radon beáramlása szempontjából nem különböznek. A mérések eredményei azonban mást mutatnak. Látható, hogy a bejáratától legtávolabbi ponton a legmagasabb az érték, s ez fokozatosan csökken a 4. pontig, majd innen állandónak tűnik a koncentráció. Kérdés, hogy milyen viszony van vajon a repedéseken nagy ellenállással átszűrődő és a felső, viszonylag nagy keresztmetszetű bejáraton át befolyó levegő mennyisége között? Nem valószínű, hogy ezek összemérhetőek lennének. Ha a levegő zöme akadálytalanul jut le a barlangba, akkor mi okozza a magas radonszintet? Az itt feltüntetett radon adatok szerint a forrás, legalábbis részben, inkább valahol errefele, az ember által még nem járt részen keresendő.

Látható tehát, hogy ez az ismert modell ebben az esetben nem ad kielégítő magyarázatot a tapasztalt klímára. Úgy tűnik, hogy a forrástag azonosítása itt kardinális kérdés. A radon a rádium bomlásterméke, ezért a barlangi kőzetek rádium tartalma lényeges támpont lehet. A következő táblázat néhány barlangi kőzet természetes radioaktivitásának mérési eredményeit mutatja. Az anyagok mind az Aggteleki Baradla-barlangból valók. Az első oszlop az egyes minták rádium koncentrációját tartalmazza. Az adatok két teljesen elkülönülő csoportot alkotnak. Megfigyelhető, hogy míg az agyag, ill. agyagos törmelék számottevő rádiumot tartalmaz, addig a mészkő csak ennek mintegy tizedét, huszadát. Hasonlóan alakulnak a többi radioelemek koncentrációi is. Itt nyilván arról van szó, hogy a magmás kőzetek által a felszínre hozott urán és tórium főként a mállás eredményeként képződő agyagba épül be, ahonnan a víz csak csekély mennyiséget képes elhordani a tengerekbe, óceánokba. Így az itt építkező lények, ill. a belőlük képződött tengeri üledék is csak nyomokban tartalmazza ezeket az izotópokat. Sok, más hazai barlangból gyűjtött kőzet és üledék minta analízise is ugyanezt az eredményt adta. Ezek alapján feltételezhető, hogy a barlangi radonszint kialakításában fontos, ha nem meghatározó szerepet játszik az agyag, amely anyag a barlangokban egyébként mindenütt előfordul, mint a víz által beszállított üledék.

E feltevés igazolására nemrégiben ún. radon exhalációs méréseket végeztünk in situ körülmények között a Baradla-barlangban. A kísérletek részleteinek bemutatására itt nincsen elegendő idő, ezért csak azok eredményét ismertetem. A következő ábra az agyagra kapott adatokat mutatja. Látható, hogy közel másfél napon át mértük az agyag fölé helyezett búra alatt kialakuló radon koncentrációt. A várakozásnak megfelelően egy exponenciálisan emel-

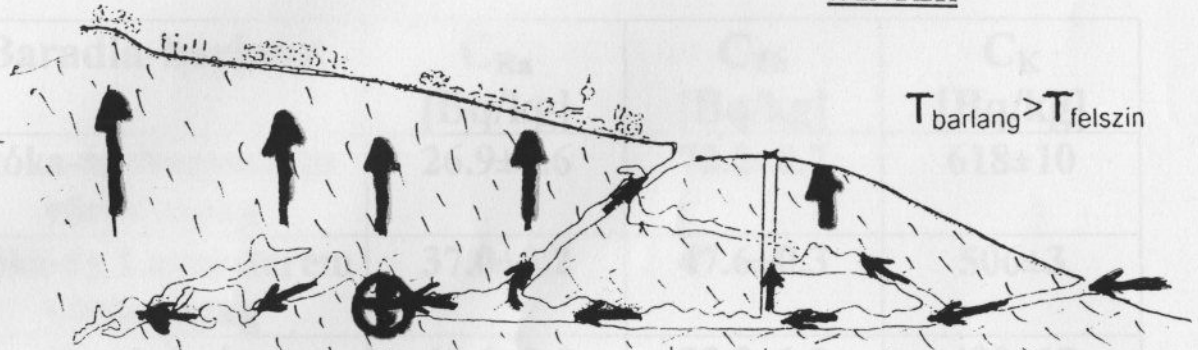
kedő, telítési jellegű görbe mentén helyezkednek el a kísérleti pontok. Figyeljük meg, hogy már egy nap múlva $6000 \text{ Bequerel/m}^3$ volt a koncentráció! A mérési eredményekhez igen jól illeszthető az elméletileg várható függvény, amelynek kezdeti meredekségéből az agyag radon exhalációja, azaz radon termelő képessége meghatározható volt. Ennek értékére $F = 7$ milli-Bequerel/ $\text{m}^2/\text{secundum}$ adódott. Ezt a kísérletet a barlangterápiás felhasználásra tervezett róka-ági Labor-teremben végeztük. Itt lehetséges volt az agyagfelület és a terem mérete alapján azt is megbecsülni, hogy az adott exhalációs érték mekkora radonszintet eredményez, ha feltételezzük a terem légcseréjének teljes hiányát. Erre 700 Bequerel/m^3 -t kaptunk, ami elég jól egyezik az ebben az időszakban általában itt tapasztalt radon koncentrációval.

Egy másik kísérletben a mészkő exhalációját vizsgáltuk. A 30 kilónyi kőzet darabokat egy jól zárható műanyagbordóba zártuk a barlangban, majd itt 3 napig folyamatosan mértük a radon koncentrációját a hordóban. A barlangban 700 Bequerel/m^3 volt mérhető végig, ennyi volt a hordóban is az induló érték. Ha a mészkő is jelentős mértékű exhalációra képes, akkor akár koncentráció-emelkedés is elképzelhető, esetleg egy idő után az indulónál alacsonyabb értéken stabilizálódik a radonszint. Az eredményeket bemutató ábrán látszik, hogy az idő függvényében exponenciálisan csökkent a koncentráció, hiszen közel egy egyenesen fekszenek a logaritmikus skálán ábrázolt adatok. Piros színnel feltüntettük a radon bomlási állandójának megfelelő csökkenési ütemet is. Látható, hogy ehhez képest valamivel lassúbb az ütem, ugyanakkor semmi jele annak, hogy egy alacsonyabb szinten állandósulna a radon koncentrációja. A kisebb meredekség minden bizonnyal azzal magyarázható, hogy nem teljesen hermetikus az edény, kismértékben ugyan, de beereszt. Ezt is eldöntendő, 3 nap után az egész kísérleti berendezést, annak megbontása nélkül kiszállítottuk a barlangból és a laboratóriumban normál környezeti körülmények között folytattuk a méréseket. Amint látható, a csökkenés továbbra is exponenciális, most azonban a meredekség nagyobb, mint a barlangban. A laboratóriumban ugyanis a radon koncentrációja csak 30 Bequerel/m^3 volt, tehát az inhermetikusság a radon egy részének kiszökését eredményezte. A fennálló koncentráció különbség miatt. 3 hét után a radonszint változása megállt és gyakorlatilag a külső koncentráció értékét vette fel. Ez úgy értelmezhető, hogy a mészkő számottevő radon exhalációjára nem képes. A mérési bizonytalanságok alapján egy lehetséges felső határ kiszámítható, ennek értéke azonban olyan kicsi, hogy barlangi környezetben, az ott az agyag exhalációja miatt kialakuló koncentrációt csak csökkenteni képes, tehát a radon nyelőjeként működik, ugyanis a pórusterben elképzelhető legnagyobb koncentráció is messze alatta van a barlangban mérhető legkisebb értéknek.

A korábban megfogalmazott feltételezésünk tehát bizonyítást nyert, sőt kiderült, hogy a befoglaló kőzet, legalábbis ha az mészkő, nem ad járulékot a barlangi radon koncentrációjához. A vázolt elmélettől tehát nem is várható, hogy magyarázattal szolgál a mért radon viszonyok kialakulására. Eredményünk egyben azt is jelenti, hogy a barlangon belül a radonnak lokális forrásai vannak, ezért a barlangi légkörzés koncentráció gradiens kialakulásához vezethet. Ezek kimérése, ill. időbeli változásainak követése lehetővé teszi más módszerekkel nem érzékelhető kismértékű légmozgások kimutatását. Szerencsés esetben egyes, pl. barlangterápiás szempontból fontos termék légcseréjének mértéke meg is határozható. A radon koncentráció hely- és időfüggésének ilyen célú vizsgálata elegendően érzékeny valós idejű radon mérő készülékek segítségével oldható csak meg. Ilyen, ún. aktív radon detektálási technikát alkalmazó barlangi vizsgálatainkat elsősorban az odorvári Hajnóczy-barlangban és itt a Baradla-barlangban folytattuk az elmúlt években. A barlangi radon forrására vonatkozó itt bemutatott eredményünket felhasználva igen sok, korábban mért radon idősor értelmezését sikerült megoldanunk. Ezek közül néhányat, amelyek a barlangi klímával is szorosabb kapcsolatot mutatnak, a következő előadásban be is mutatunk.

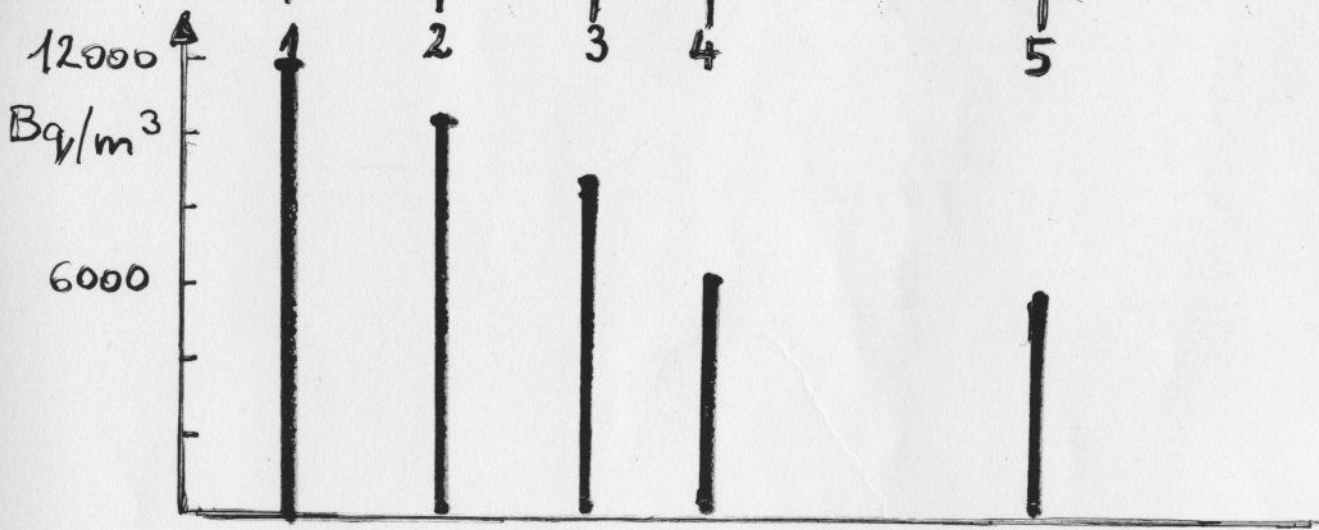
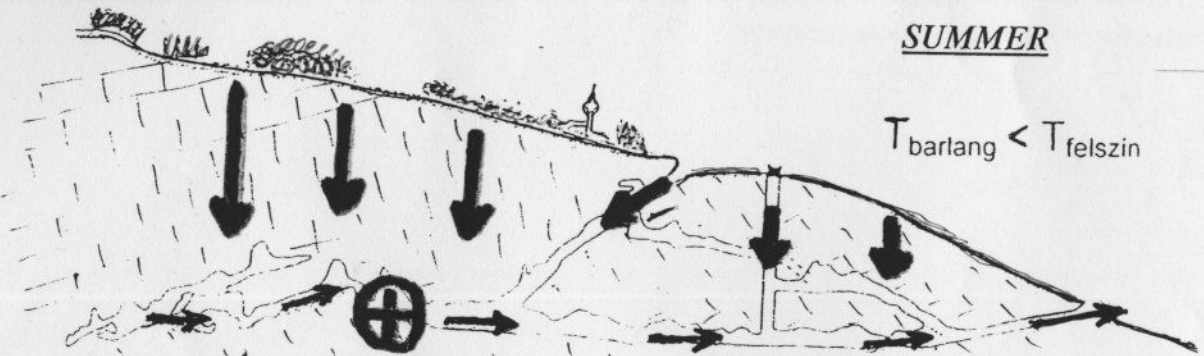
Barlangi kőzet természetes radioaktivitása

WINTER



Barlang	C ₁₃	C ₁₄	C _k
Róka-ág	40.1 ± 2.4	33.3 ± 1.2	15.6 ± 0.6
Labor-terem	3.0 ± 0.3	4.0 ± 0.4	1.7 ± 0.2
vörös mélykút			

SUMMER

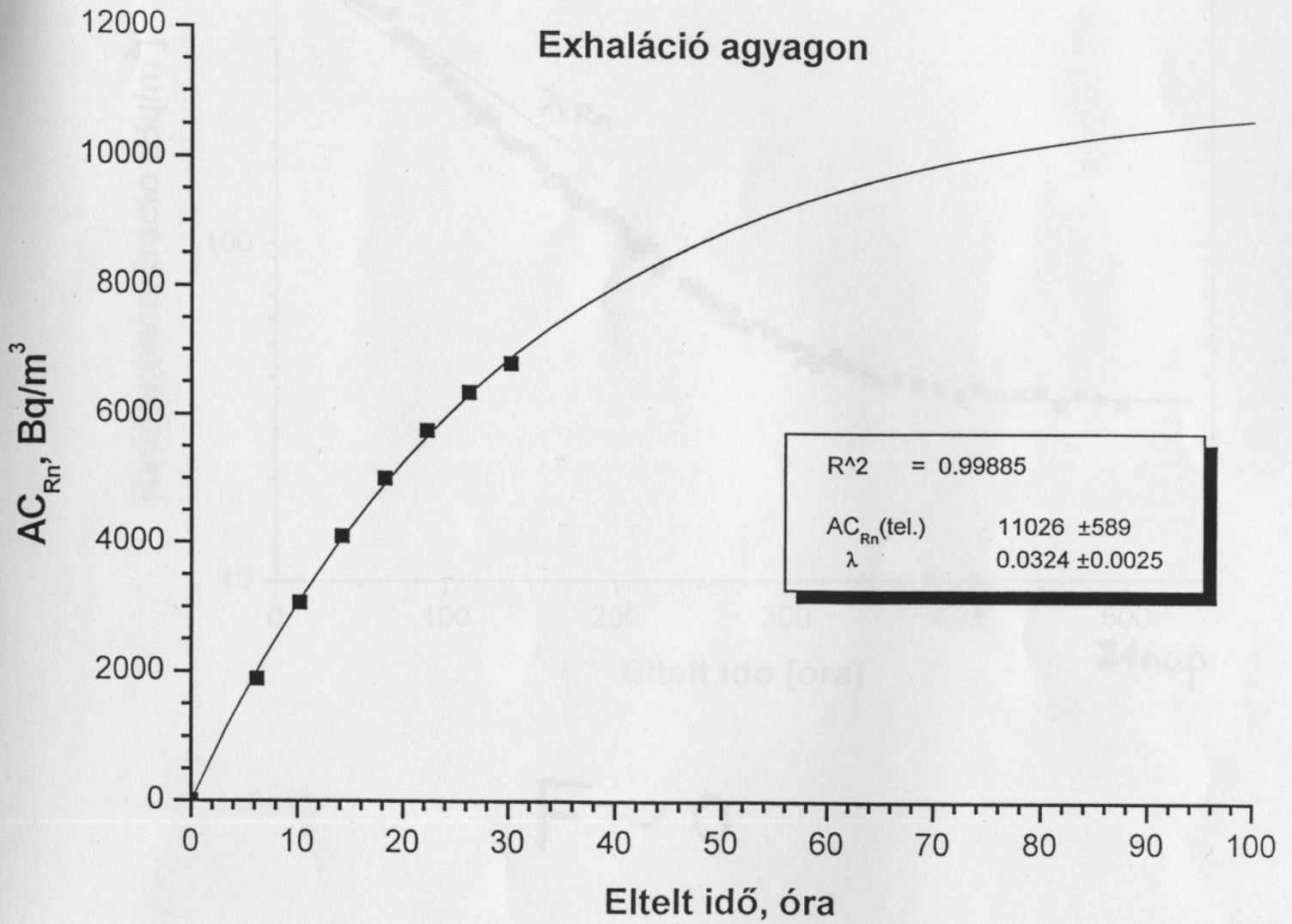


Barlangi kőzetek természetes radioaktivitása

Baradla-barlang	C_{Ra} [Bq/kg]	C_{Th} [Bq/kg]	C_K [Bq/kg]
Róka-ág Nagyterem vörös agyag	26.9 ± 0.6	72.2 ± 0.7	618 ± 10
Róka-ág Labor-terem vörös agyag	37.0 ± 0.2	47.6 ± 0.3	506 ± 3
Denevér-ág törmelék	40.6 ± 0.4	33.3 ± 1.2	490 ± 17
Róka-ág Labor-terem szürke mészkő	1.7 ± 0.2	1.3 ± 0.2	15.6 ± 0.6
Róka-ág Labor-terem vörös mészkő kiválás	3.0 ± 0.3	4.0 ± 0.4	40.1 ± 2.4

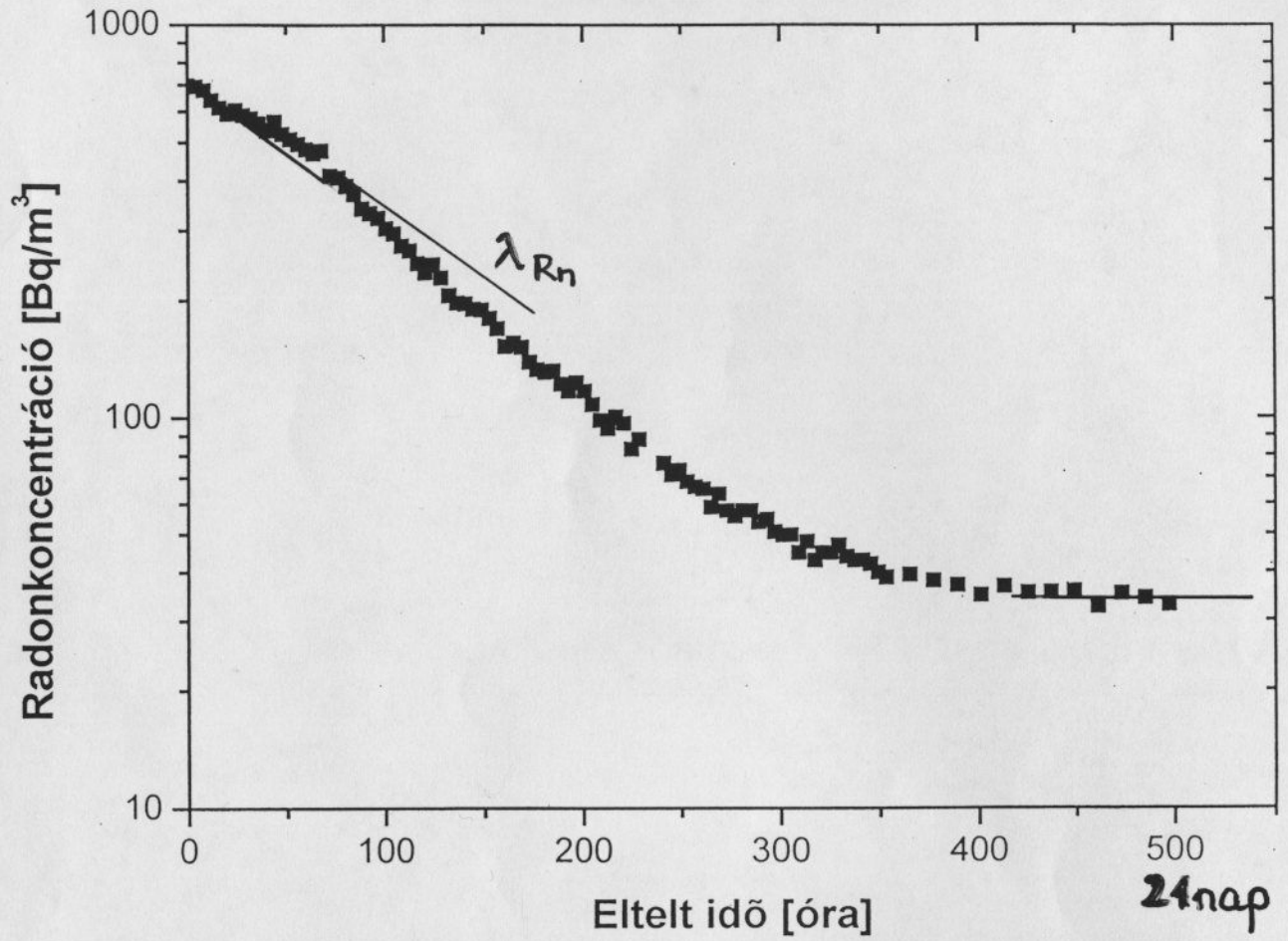
$$F = 7 \text{ mBq/m}^2 \text{ s}$$

Exhalációs kísérlet mészkövön



$$F = 7 \text{ mBq/m}^2\text{s}$$

Exhalációs kísérlet mészkövön



$$F \sim 0$$

Bartlangi klíma- és radonviszonyok kapcsolata

Dezső Zoltán és Molnár Lajos

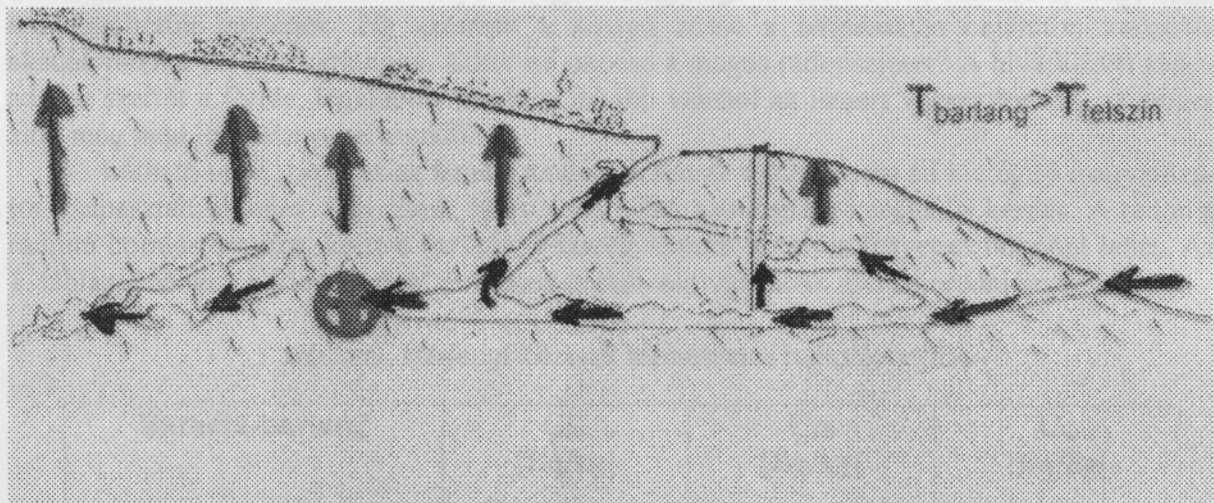
Számos szerző szerint a bartlangi levegő légzőrendszerre gyakorolt jótékony hatása valamilyen úton-módon a bartlangi klímával lehet kapcsolatos. Jelenlegi tudományos ismereteink alapján azonban nem tudjuk megmondani, hogy a klíma paraméternek tekintett, és többnyire számszerűsített mutatók közül melyek és milyen értékhatárok között bírnak meghatározó jelentőséggel, ill. felelősek a kuratív hatásért. A legismertebb és a kezdetek óta legrészletesebben vizsgált ilyen paraméterek a hőmérséklet és a páratartalom. Ezek azonban jószerivel állandónak tekinthetők a bartlangokban, sőt pl. egy olyan ország esetében, mint Magyarország, még bartlangról bartlangra sem mutatnak jelentős különbséget, legalábbis az esetleges terápiás hatás szempontjából bizonyosan nem. Talán ez is oka annak, hogy a bartlangok légkörzésének általában fontos jelentőséget tulajdonítunk, mert úgy hisszük, ez befolyásolja más, kevésbé tanulmányozott vagy ismert paraméterek értékét, amelyek másrésztől elengedhetetlen kellekei a gyógyulásnak.

A 20. század elején a speleoterápia elterjedése, fellendülése igen szoros kapcsolatban volt a radioaktivitás és az ionizáló sugárzások felfedezésével. Már a kezdeti kutatások kimutatták a levegő állandó természetes radioaktivitását, s az is kiderült, hogy ennek mértéke bartlangokban jelentősen meghaladja a szabad levegőben mérhető értéket. Már akkor megállapították, hogy ezért az ún. rádium emanáció, mai ismert nevén a radon a felelős. Ahogyan a rádiumot tartalmazó cseppek és italok elterjedtek, úgy vált igen gyorsan népszerűvé a bartlangok gyógyulás érdekében történő látogatása. Abban az időben az ionizáló sugárzás biológiai hatása még nem volt kellően ismert, a sugárzásnak tulajdonított kuratív erő pusztán a spekuláció eredménye volt. Hatása azonban a mai napig érezhető. Ma is működik olyan gyógybartlang, ahol az ún. radon kúra része egyes kezeléseknél. A tudományos közvélemény e kérdésben még ma sem egyhangúlag vélekedik. Legszélesebb körben az a nézet az elfogadott, miszerint a radon, pontosabban az ott mindig jelenlévő radon leánytermékek belégzése a koncentrációtól függetlenül kockázatot jelent. Más elképzelések szerint egy bizonyos sugárdózis jótékony hatású is lehet, mert állandó működésben tartja a szervezet védekező rendszerét. E dózis nagysága azonban közelítőleg sem ismert, így erre terápiát sem lehet alapozni.

Bármelyik nézet is legyen igaz, úgy tűnik, a bartlangokban uralkodó radon koncentrációt, az ionizáló sugárzás intenzitását érdemes mérni, ill. ismerni, s ezeket a paramétereket a bartlangi klíma részének kell tekinteni. A kapcsolat persze nem ennyiből áll, nem ilyen egyszerű. Nyilván részben éppen a fentiek vezettek oda, hogy az elmúlt évtizedekben kiterjedt radon méréseket folytattak sok ország számos bartlangjában. Ezek egyik ismert általános eredménye a radon koncentráció szezonális, évszakos változásának felismerése. Mivel a felszínen az évszakok változása alapvetően az uralkodó hőmérsékletekkel jellemezhetőek, kézenfekvő volt arra gondolni, hogy a bartlangi radon valamilyen módon összefügg az adott bartlang légkörzésével, azaz a felszíni és bartlangi levegő ki-, ill. beáramlásával, a bartlang légcserejével. A radon transzport elméleti és kísérleti vizsgálata, továbbá a hosszú idejű bartlangi radon mérések elemzése alapján kialakult egy elmélet, amely jószerivel minden hegyoldalra nyíló bartlangra alkalmazhatónak bizonyult, és segítségével a radon koncentrációjában tapasztalt évszakos tendencia alapján az adott bartlang jellemző légkörzését meg lehetett határozni.

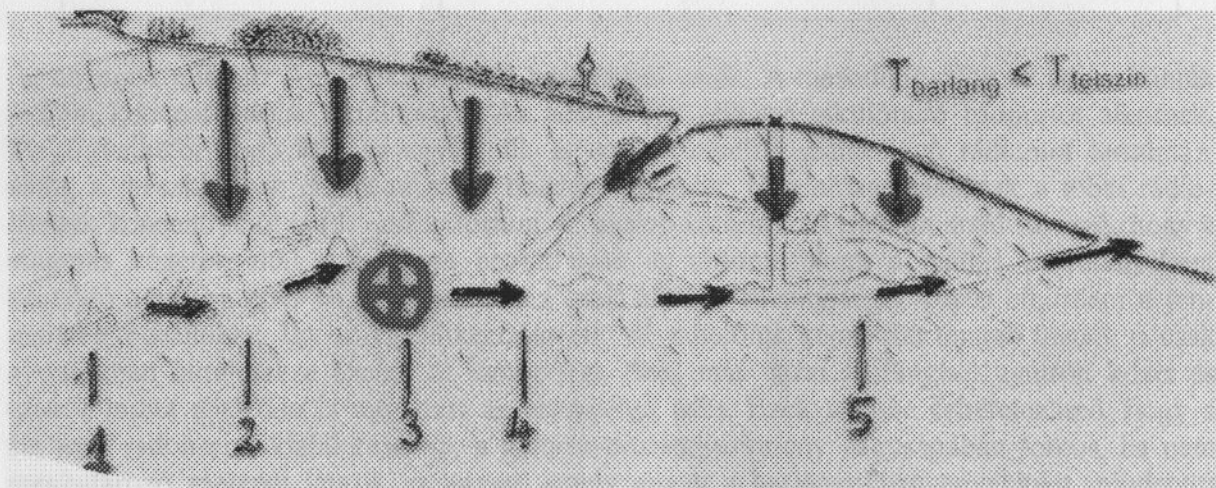
Az elmélet alkalmazása jól követhető és széles körben ismert, pl. a budapesti Szemlőhegyi-bartlang esetén, ahol évek óta bartlangterápiás részleg is működik. Az 1. ábra a bartlang metszeti képét mutatja, a kereszt a terápiás céllal is használt termet jelöli. Látható, hogy a bartlang ma három bejárattal rendelkezik, amelyek közül a jobb oldali egy mesterségesen kialakított, a turizmust és a páciéntúrát kiszolgáló, a fogadóépületből nyíló lejtaknás bejárat, amelyet a hegy oldalában alakítottak ki. A függőleges akna szintén mesterséges bejárat, való-

jában egy liftakna, amely azonban eddig még nem készült el teljesen, s jelenleg le van fedve. A barlang ismert természetes bejárata a barlang legmagasabb pontján van.



1. ábra Téli légkörzés a Szemlő-hegyi-barlangban.

A barlangban több mint egy tucat helyen, az Atomki által éveken keresztül végzett radon mérések szerint [1] télen a radonszint többnyire alacsony. Az elmélet szerint ennek az az oka, hogy ilyenkor a hideg, felszíni radonmentes levegő a legalacsonyabban elhelyezkedő bejáraton befolyik a barlangba, míg a barlangi levegő a kéményhatás miatt a kőzet repedésein keresztül a jelzett irányban távozik el onnan. A 2. ábrán a nyári viszonyok láthatók. Ilyenkor a barlangi levegő hőmérséklete az alacsonyabb, ezért az kifolyik a hegyoldali bejáraton. Helyére a kőzet repedésein keresztül radondús levegő áramlik be. Ennek eredményeként nyáron lényegesen magasabb radon koncentráció mérhető a barlangban mindenhol. Nyilvánvaló, hogy a levegő hőmérséklettől függő sűrűségén kívül az elmélet alapvetően arra épít, hogy a radon forrása a barlangot magába foglaló kőzetben van. A nagy koncentráció tehát a kőzeten keresztül a barlang felé áramló levegővel érkezik.



2. ábra Nyári légkörzés a Szemlő-hegyi-barlangban.

Ha az elmélet tényleg igaz, akkor a 2. ábrán 4. ponttal jelölt helyen nyáron is alacsony koncentrációt kellene mérni, mert itt szinte akadálytalanul áramlik be a felszíni radonmentes levegő, amennyiben a mesterséges bejáraton keresztül számottevő levegő kiáramlás van. Ezzel szemben az 1. 2. és 3. helyeken azonos koncentráció várható, hiszen ezek a radon beáramlása szempontjából nem különböznek egymástól. A mérések eredményei azonban mást mutatnak [1]. A bejáratától legtávolabbi 1. ponton a legmagasabb az érték, s ez fokozatosan

csökken a 4. pontig, majd innen állandónak tűnik a koncentráció. Kérdés, hogy milyen viszony van vajon a repedéseken nagy ellenállással átszűrődő és a felső, viszonylag nagy keresztmetszetű bejáraton át befolyó levegő mennyisége között? Nem valószínű, hogy ezek összemérhetőek lennének. Ha azonban a levegő zöme a természetes bejáraton keresztül akadálytalanul jut le a barlangba, akkor mi okozza a magas radonszintet? A hivatkozott radon adatok szerint a forrás, legalábbis részben, inkább valahol az ismert végponton túl, az ember által még nem járt részen keresendő.

Látható tehát, hogy ez az ismert modell ebben az esetben nem ad kielégítő magyarázatot a tapasztalt klímára. Úgy tűnik, hogy a forrástag azonosítása kardinális kérdés. A radon a rádium bomlásterméke, ezért a barlangi kőzetek rádium tartalma lényeges támpont lehet. Az 1. táblázat néhány barlangi kőzet természetes radioaktivitásának mérési eredményeit mutatja.

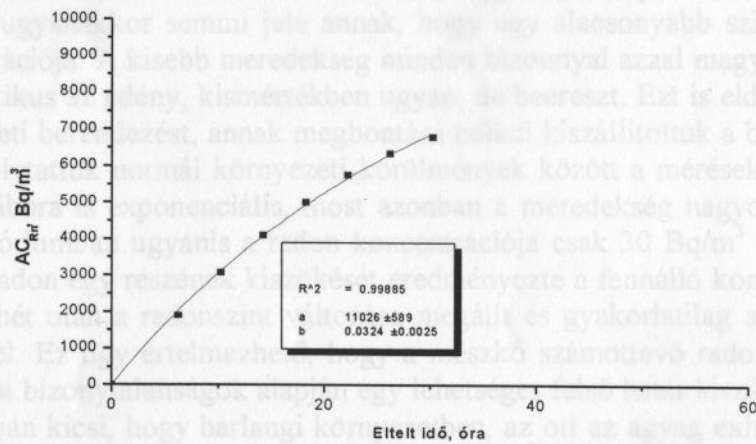
1. táblázat. Barlangi kőzetek természetes radioaktivitása

Baradla-barlang	C_{Ra} [Bq/kg]	C_{Th} [Bq/kg]	C_K [Bq/kg]
Róka-ág Nagyterem vörös agyag	26.9±0.6	72.2±0.7	618±10
Róka-ág Labor-terem vörös agyag	37.0±0.2	47.6±0.3	506±3
Denevér-ág törmelék	40.6±0.4	33.3±1.2	490±17
Róka-ág Labor-terem szürke mészkő	1.7±0.2	1.3±0.2	15.6±0.6
Róka-ág Labor-terem vörös mészkő kiválás	3.0±0.3	4.0±0.4	40.1±2.4

Az anyagok mind az Aggteleki Baradla-barlangból valók. A második oszlop az egyes minták rádium koncentrációját tartalmazza. Az adatok két teljesen elkülönülő csoportot alkotnak. Megfigyelhető, hogy míg az agyag, ill. agyagos törmelék számottevő rádiumot tartalmaz, addig a mészkő csak ennek mintegy tizedét, huszadát. Hasonlóan alakulnak a többi radioelemek koncentrációi is (3. oszlop:tórium, 4. oszlop:kálium). Itt nyilván arról van szó, hogy a magmás kőzetek által a felszínre hozott urán és tórium főként a mállás eredményeként képződő agyagba épül be, ahonnan a víz csak csekély mennyiséget képes elhordani a tengerekbe, óceánokba. Így az itt építkező lények, ill. a belőlük képződött tengeri üledék is csak nyomokban tartalmazza ezeket az izotópokat. Sok, más hazai barlangból gyűjtött kőzet és üledék minta analízise is ugyanezt az eredményt adta. Ezek alapján feltételezhető, hogy a barlangi radonszint kialakításában, a gamma-dózisteljesítmény nagyságában fontos, ha nem meghatározó szerepet játszik az agyag, amely anyag a barlangokban egyébként mindenütt előfordul, mint a víz által beszállított üledék.

E feltevés igazolására ún. radon exhalációs méréseket végeztünk in situ körülmények között a Baradla-barlangban [2]. A kísérletek részleteinek mellőzésével a 3. ábra az agyagra kapott adatokat mutatja. Látható, hogy közel másfél napon keresztül mértük az agyag fölé helyezett búra alatt kialakuló radon koncentrációt. A várakozásnak megfelelően egy exponenciálisan emelkedő, telítési jellegű görbe mentén helyezkednek el a kísérleti pontok. Már egy nap múlva 6000 Bq/m³ volt a koncentráció. A mérési eredményekhez igen jól illeszthető

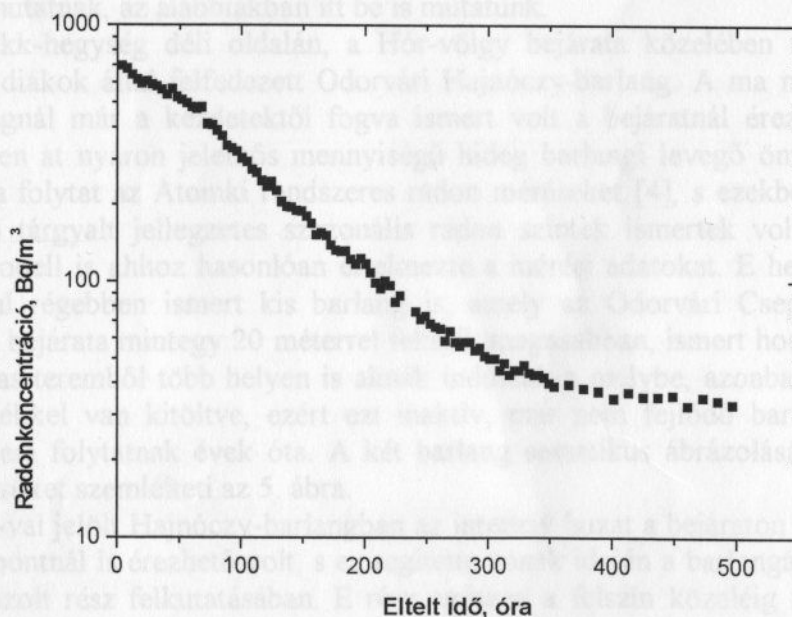
az elméletileg várható függvény, amelynek kezdeti meredekségéből az agyag radon exhalációja, azaz, radon termelő képessége meghatározható volt. Ennek értéke $F = 7 \text{ mBq/m}^2/\text{sec}$



3. ábra Radon exhaláció agyagon

adódott. Ezt a kísérletet a barlangterápiás felhasználásra tervezett róka-ági Labor-teremben végeztük. Itt lehetséges volt az agyagfelület és terem méretek alapján azt is megbecsülni, hogy az adott exhalációs érték mekkora radonszintet eredményez, ha feltételezzük a terem légcseréjének teljes hiányát. Erre 700 Bq/m^3 -t kaptunk, ami elég jól egyezik az ebben az időszakban általában itt tapasztalt radon koncentrációval [3].

Egy másik kísérletben a mészkő exhalációját vizsgáltuk. A 30 kilónyi kőzet darabokat egy jól zárható műanyaghordóba zártuk a barlangban, majd itt 3 napig folyamatosan mértük a radon koncentrációját a hordóban. A barlangban 700 Bq/m^3 volt mérhető végig, ennyi volt a hordóban is az induló érték. Ha a mészkő is jelentős mértékű exhalációra képes, akkor akár koncentráció-emelkedés is elképzelhető, esetleg egy idő után az indulónál alacsonyabb értéken stabilizálódik a radonszint. Az eredményeket bemutató 4. ábrán látszik, hogy az idő függvényében exponenciálisan csökkent a koncentráció, hiszen közel egy egyenesen fekszenek a



4. ábra Radon exhaláció mészkövön

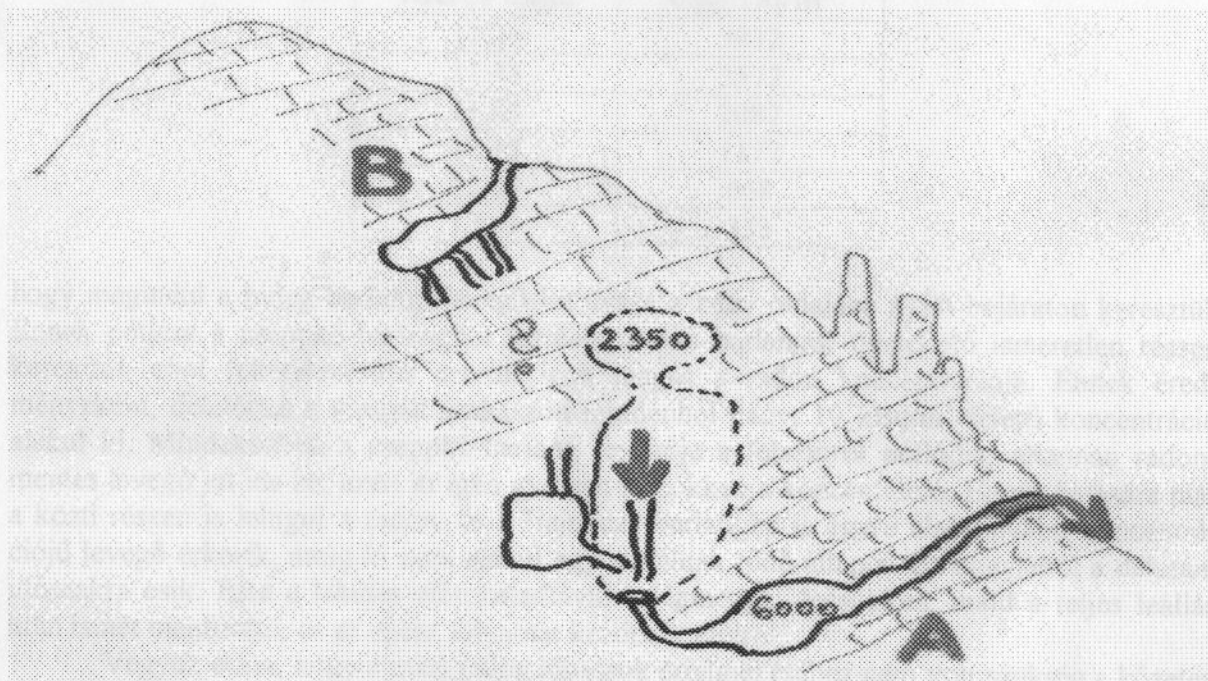
logaritmikus skálán ábrázolt adatok. Folytonos vonallal feltüntettük a radon bomlási állandójának megfelelő csökkenési ütemet is. Látható, hogy ehhez képest valamivel lassabban változott a szint, ugyanakkor semmi jele annak, hogy egy alacsonyabb szinten állandósulna a radon koncentrációja. A kisebb meredekség minden bizonnyal azzal magyarázható, hogy nem teljesen hermetikus az edény, kismértékben ugyan, de beereszt. Ezt is eldöntendő, 3 nap után az egész kísérleti berendezést, annak megbontása nélkül kiszállítottuk a barlangból és a laboratóriumban folytattuk normál környezeti körülmények között a méréseket. Amint látható, a csökkenés továbbra is exponenciális, most azonban a meredekség nagyobb, mint a barlangban. A laboratóriumban ugyanis a radon koncentrációja csak 30 Bq/m^3 volt, tehát az inheretikus a radon egy részének kiszökését eredményezte a fennálló koncentráció különbség miatt. Három hét után a radonszint változása megállt és gyakorlatilag a külső koncentráció értékét vette fel. Ez úgy értelmezhető, hogy a mészkő számottevő radon exhalációjára nem képes. A mérési bizonytalanságok alapján egy lehetséges felső határ kiszámítható, ennek értéke azonban olyan kicsi, hogy barlangi környezetben, az ott az agyag exhalációja miatt kialakuló koncentrációt csak csökkenteni képes, tehát a radon nyelőjeként működik, ugyanis a pórusterben elképzelhető legnagyobb koncentráció is messze alatta van a barlangban mérhető legkisebb értéknek.

Korábban megfogalmazott feltételezésünk tehát bizonyítást nyert, sőt kiderült, hogy a befoglaló közeg, legalábbis ha az mészkő, nem ad járulékot a radon koncentrációjához. A fent vázolt elmélettől tehát nem is várható, hogy magyarázattal szolgál a mért radon viszonyok kialakulására. Eredményünk egyben azt is jelenti, hogy a barlangon belül a radonnak lokális forrásai vannak, ezért a barlangi légkörzés koncentráció gradiens kialakulásához vezethet. Ezek kimérése, ill. időbeli változásainak követése lehetővé teszi más módszerekkel nem érzékelhető kismértékű légmozgások kimutatását. Szerencsés esetben egyes, pl. barlangterápiás szempontból fontos termek légcseréjének mértéke meg is határozható. A radon koncentráció hely- és időfüggésének ilyen célú vizsgálata elegendően érzékeny valós idejű radon mérő készülékek, ill. gamma dózisteljesítmény mérők segítségével oldható csak meg. Ilyen, ún. aktív detektálási technikát alkalmazó barlangi vizsgálatainkat elsősorban az odorvári Hajnóczy-barlangban és a Baradla-barlangban folytattuk. A barlangi radon forrására vonatkozó bemutatott eredményünket felhasználva igen sok, korábban mért radon idősor értelmezését is sikerült megoldanunk. Ezek közül néhányat, amelyek a barlangi klímával is szorosabb kapcsolatot mutatnak, az alábbiakban itt be is mutatunk.

A Bükk-hegység déli oldalán, a Hór-völgy bejárata közelében található a 30 éve tiszaföldvári diákok által felfedezett Odorvári Hajnóczy-barlang. A ma már 2 km hosszban feltárt barlangnál már a kezdetektől fogva ismert volt a bejáratnál érezhető igen intenzív huzat, amelyen át nyáron jelentős mennyiségű hideg barlangi levegő ömlik a szabadba. Itt már 1978 óta folytat az Atomki rendszeres radon méréseket [4], s ezekből a Szemlő-hegyi-barlangnál is tárgyalt jellegzetes szezonális radon szintek ismertek voltak. A kidolgozott légkörzési modell is ahhoz hasonlóan értelmezte a mérési adatokat. E hegyoldalon van egy másik, sokkal régebben ismert kis barlang is, amely az Odorvári Cseppkő-barlang nevet viseli. Ennek bejárata mintegy 20 méterrel fekszik magasabban, ismert hossza mindössze 210 méter. A tágas teremből több helyen is aknák indulnak a mélybe, azonban ezek mindegyike teljesen üledékkel van kitöltve, ezért ezt inaktív, már nem fejlődő barlangnak tekintik, s kutatást itt nem folytatnak évek óta. A két barlang sematikus ábrázolását, egymáshoz való elhelyezkedésüket szemlélteti az 5. ábra.

Az A-val jelölt Hajnóczy-barlangban az intenzív huzat a bejáraton kívül még az ábrán jelölt csomópontnál is érezhető volt, s ez segítette annak idején a barlangászokat a szaggatott vonallal ábrázolt rész felkutatásában. E rész egészen a felszín közeléig nyúlik fel, ezért itt keresték éveken keresztül a felszíni kapcsolatot is. Radon méréseink szerint ugyanakkor, itt az Óriás-teremben a koncentráció nyáron csak 2350 Bq/m^3 és a nap folyamán egyáltalán nem

változik. Ezzel szemben a két nyíllal határolt szakaszon a nappal mérhető jellemző radon koncentráció 6000 Bq/m^3 . Lényeges továbbá, hogy e szint érdekes napi menetet mutat.



5. ábra Az odorvári-barlangok sematikus ábrázolása

A 2. táblázat erre mutatja egy rövid idejű mérési sorozat eredményeit. Alig 2 óra alatt a koncentráció a felére csökkent, és látszik, hogy a délutáni órákra egy stabil szint áll be. Meg kell jegyezni, hogy a mérések idején azon a nyáron igazi kánikulai idő volt, és nyilvánvalóan a barlangi légkörzésre is a tiszta nyári rezsim volt a jellemző. Ugyanebben a napszakban ekkor első alkalommal végeztünk radon mérést a B-vel jelölt cseppkő-barlangban is. Az alig 1 órás mérési ciklus adatai meglepő eredményt hoztak. Amint a 3. táblázat adataiból is látszik, a változás iránya megegyezik az előbb is látottal, azonban az induló érték csak fele annak, továbbá a változás üteme lényegesen nagyobb, s a radon gyakorlatilag eltűnni látszik ebből a barlangból. Mi lehet vajon ennek az oka?

2. táblázat. Radon aktivitáskoncentráció a Hajnóczy-barlang Rom-termében

Mérés ideje	$C_{Rn}, \text{Bq/m}^3$
11:45	11174
12:00	8429
12:15	7773
12:30	7092
12:45	6639
13:00	6104
13:15	6168

Figyelembe véve a radon forrásával kapcsolatban fent leírtakat, az alábbi magyarázat látszik kézenfekvőnek a tapasztaltakra. Éjszaka a felszíni levegő hőmérséklete erőteljesen lehül, az ábrán nyilakkal jelzett légmozgás leáll. A cseppkő-barlangból a bejárat környékéről megindul a levegő feláramlása, amit a Hajnóczy-barlang levegője pótol. A két barlang közötti ismeretlen térben jelentős lehet a radon lokális forrása, így a felső barlang levegőjében hajnalig emelkedik a radon koncentrációja. Reggel a hőmérséklet gyors emelkedése arra vezet,

3. táblázat. Radon aktivitáskoncentráció az Odorvári Cseppkő-barlangban

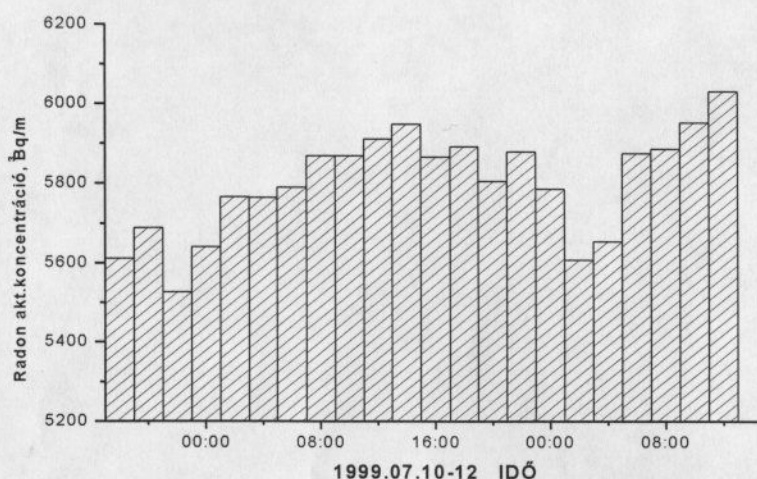
Mérés ideje	C_{Rn} , Bq/m ³
11:28	5832
11:43	2572
11:58	2087
12:13	1177
12:28	668
12:43	333

hogy megindul a hideg barlangi levegő kifolyása a hegy oldalába nyíló bejáraton keresztül. Ennek pótlása a cseppkő-barlangból történik, a két barlangot összekötő ismeretlen részen keresztül, ahol feltételezésünk szerint igen magas a radon koncentrációja. Ennek eredményeként, délelőttre a vizsgált szakaszon mindenhol nagy, 10 kBq/m³ feletti koncentráció alakul ki. Mindeközben a cseppkő-barlang levegője a felszínről pótlódik, ahonnan radonmentes levegő jut ide be, ezért itt igen gyorsan lecsökken a koncentráció. Ennek hatására már a közti részen is lehígul a radon, és a Hajnóczy-barlangba is egyre alacsonyabb koncentrációjú levegő érkezik, amíg ki nem alakul egy stabilnak tűnő állapot. Ez nagyjából a délutáni időszakra esik. Este a lehűlés előrehaladtával a légmozgás lecsökken, majd a teljes leállás után ismét megfordul, és az egész folyamat kezdődik előlről.

Vegyük észre, hogy a mért radon idősorok értelmezéséhez nem volt szükség a kőzetten keresztül történő radon transzportra, ugyanakkor a szintekben tapasztalt változások kielégítően magyarázhatók egy jelentősebb lokális forrás feltételezésével. További megerősítést ad az a tény, hogy a legtöbbit tanulmányozott ezen járat szakasz más alkalmakkor is hasonlóan viselkedett, azonban az itt mért radonszintek nagyságát erőteljesen befolyásolta a külső hőmérséklet nagysága. Szeptemberi, viszonylag hűvösebb időben például a koncentráció csak 5 kBq/m³ körül mozgott.

A bemutatott légköri modellt támasztja alá, bár némileg indirekt módon az 5. ábrán nyíllal jelzett csomópont mellett, a már említett Galéria kiindulópontjánál, az ún. Ácsolatnál végzett közel két napos mérés is. A 6. ábrán jól látszik, hogy a radonszint napi menete éppen fordítottan alakul. Nagyjából délig emelkedik, majd az ezt felváltó lassú csökkenést éjfél körül egy jóval alacsonyabb szint követi. Ez a hely mindössze 2-3 méterre van az ismeretlen térből történő levegő beáramlás helyétől, a Mandula hatalmas cseppkövétől. Az itt bezúduló radon diffúzió révén eljut az Ácsolatba is, ezért reggeltől lassan de biztosan állandóan emelkedik itt a szint. Késő délutánra kialakul egy olyan helyzet, amelyben a Mandulából érkező levegő radon koncentrációja már alacsonyabb, mint ami az Ácsolatnál van, tehát a koncentráció gradiens éppen előjelet vált. Ezért most a radon diffúzióval a Mandula fele mozog. Később, amikor éjfél körül megindul a feláramlás a Mandulánál, rövid ideig itt is érvényesül a szívóhatás, ezért egy kis nyomáskülönbség lép fel a Galéria irányába, ahonnan radonban igen szegény levegő áramlik, s ez okozza az ilyenkor tapasztalt jelentősebb koncentrációesést. Ez egyben azt is jelenti, hogy a szaggatottal jelzett barlangi rész az ismertett légköri részben csak alárendelt szerepet kap, a barlangászok korábbi feltételezése nem nyert megerősítést.

Tavaly nyáron újabb méréseket terveztünk a barlang most tárgyalt részein, azzal a nem titkolt céllal, hogy a részletesebb radon idősorok, valamint újabb mérési helyek bevonása segítheti a még nem ismert, de az elmondottak szerint feltételezett barlangrészek felkutatását. Legnagyobb meglepetésünkre azonban a Mandulánál eltűnt a már jól ismert huzat, az itt elvégzett 2 napos radon mérés közel állandó, és mindössze 5400 Bq/m³ értéket adott. Mi okozta a légköri megváltozást? Egy év alatt ekkora változás szinte elképzelhetetlen! Ezen a nyáron a helyzet még mindig a tavalyinak megfelelő volt. Úgy tűnik tehát, hogy valami jelentős változás történt valahol a hegy belsejében.



6. ábra Diurnális radonszint változás az Ácsoltnál

Ennek kiderítésére az idei nyáron újabb mérést végeztünk a Cseppkő-barlangban. Legnagyobb meglepetésünkre kiderült, hogy ebből a barlangból gyakorlatilag eltűnt a radon. Az 7. ábrán bemutatott radon idősorból látszik, hogy bár továbbra is észlelhető a várt napi menet, azonban a koncentráció értékek gyakorlatilag semmiben nem különböznek egy panellakásban mérhető radonszinttől. A nappali adatok közel vannak a kültéren bárhol tapasztalható értékhez. Egyetlen magyarázat adódik erre: a két barlang között korábban meglévő átjáró egyszerűen teljesen eldugult, betömődött. Ezt a tényt megerősíti a Mandulánál elvégzett hosszabb mérés eredménye is. A 8. ábrán látható, hogy a nagy dinamikát mutató napi menet is hiányzik már. Sőt, a szélső értékek ideje is felcserélődött, a most mért menet jellegében és szintjében is közelebb áll a korábban az Ácsoltnál mérthez. Ez utóbbi helyen pedig a napi menet jellegének megmaradása mellett a radon szintje mintegy 30 %-kal magasabbnak adódott. Úgy tűnik tehát, hogy a barlang légkörzése teljesen megváltozott. A hideg barlangi levegő nappali kifolyását természetesen csak a bejárat teljes lezárása képes megakadályozni, ezért a levegő utánpótlását más módon oldja meg a természet. A valós idejű radon mérésekkel eddig és itt elért eredmények jó alapot adnak az új légkörzés felderítésére. Nem kizárt, hogy a jövőre tervezett ilyen vizsgálatok esetleg újabb barlangi részek felfedezését is eredményezik.

Irodalom

- [1] Szűcs N. *A felszín és a barlang kölcsönhatásának vizsgálata a Szemlő-hegyi-barlangban*. Szakdolgozat, MTA Atomki, Debrecen, 2001.
- [2] Dezső Z., Hakl J. és Molnár L. *Barlangi kőzetek radon exhalációja*. III. Karsztfejlődés konferencia, Szombathely, 2001. április 6-7.
- [3] Dezső Z., Hakl J. és Molnár L. *Radon mérések a Baradla-barlang Róka-ágában*. Kutatási jelentés (kézirat), Debrecen, 1999.
- [4] Hakl J., Hunyadi I. és Várhegyi A. *Radon monitoring in caves*. In: Radon measurements by etched track detectors. – Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment. Eds: S.A. Durrani, R. Ilic, World Scientific Publishing Co., Singapore, pp. 261-283.