

A Velencei-hegység természetes vizeinek magas szintű aktivitása  
és annak eredete

**HALÁSZ ISTVÁN**

**FIZIKA-MATEMATIKA-IRODALOM SZAKOS HALLGATÓ**

**SZAKDOLGOZAT**

**TÉMAVEZETŐK:**

**DEÁK FERENC**

**ELTE ATOMFIZIKAI TANSZÉK**

**HORVÁTH ÁKOS**

**ELTE ATOMFIZIKAI TANSZÉK**

**1999**

## TARTALOMJEGYZÉK

<i>Bevezetés</i> .....	1
<i>I. A Velencei-hegység — földtörténeti áttekintés</i> .....	4
<i>II. A radioaktív sugárzás és hatásai</i> .....	9
<i>II.1. A radioaktivitás felfedezése</i> .....	9
<i>II.2. A radioaktív sugárzások tulajdonságai</i> .....	10
<i>II.3. A radioaktív egyensúly és a radioaktív családok</i> .....	12
<i>II.4. A radioaktív sugárzások detektálása és mérése</i> .....	14
<i>III. Mérési módszerek</i> .....	18
<i>III.1. Vízminták radontartalmának meghatározása</i> .....	18
<i>III.1.1. A mintavétel</i> .....	20
<i>III.1.2. A vízminták mérése</i> .....	22
<i>III.2. A talajminták mérése</i> .....	23
<i>III.2.1. A gamma-spektroszkópia alapjai</i> .....	23
<i>III.2.2. Félvezető detektorok alkalmazása mag sugárzások</i> <i>mérésére</i> .....	26
<i>III.2.3. A mérési elrendezés</i> .....	27
<i>III.2.4. A mintavétel és a mérés</i> .....	28
<i>IV. A mérések kiértékelése</i> .....	29
<i>IV.1. A vízminták kiértékelése</i> .....	29
<i>IV.2. A talajminták kiértékelése</i> .....	32
<i>V. Eredmények</i> .....	45
<i>V.1. A vízminták eredményei</i> .....	45
<i>V.2. A talajminták eredményei</i> .....	50
<i>VI. Diskusszió</i> .....	61
<i>VII. Mellékletek</i> .....	64

## Bevezetés

A hetvenes—nyolcvanas években házak, lakások légtérének radioaktivitását vizsgálva több helyütt meglehetősen nagy aktivitás-koncentrációt tapasztaltak. Számos mérést végeztek erre vonatkozóan Svédországban, Kanadában, az Egyesült Államokban és Angliában. A nagy aktivitás-koncentráció a lakóterekben felhalmozódó radonnak tudható be. A földkéregben három bomlási sor kezdőeleme található meg eredendően; mindhárom bomlási sorban keletkezik radon. A radon nemesgáz, a keletkezését követően kidiffundálhat a talajból, illetve a talajgáz—felszíni légnyomás-különbség hatására kilép a légkörbe. A radon biológiai hatásának szempontjából legfontosabb izotópja a  $^{222}\text{Rn}$ , mivel ennek az egynek elegendően hosszú a felezési ideje (3,82 nap) ahhoz, hogy keletkezési helyétől nagy távolságra eljutva esetlegesen felhalmozódjék. Az élő szervezetbe jutva nem elsősorban a radon, hanem elsősorban rövid felezési idejű leányelemei (amelyek nehézfémek) azok, amelyek károsíthatják szervezetünket. Csak századunk elején vált világossá az, hogy a radon belégzése, a bomlásával létrejövő leányelemek növelik a tüdőrák kockázatát, mert a tüdő belső hámsejtjeit és a hörgőket közvetlenül sugározzák be. A jelenség már régóta ismert volt a bányászok esetében; *Agricola* (15. sz.) és *Paracelsus* (16. sz.) is leírta a bányászokat gyakran megtámadó súlyos tüdőbetegségeket.

A radon nagy mértékű felhalmozódása figyelhető meg például egyes fűtött házak esetén: a fűtés miatt a szobalevegő melegebb és könnyebb, feláramlása olyan szívóhatást kelt, amely a radont a lakószobába tereli; a ritkább szellőztetés ugyancsak a koncentráció növekedését segíti.

Svédországban a lakóterek nagy radon-koncentrációját elsősorban az építőanyagoknak és a gránit alapkőzetnek tulajdonítják, ugyanis a gránit viszonylag dús uránban.

Hazánkban az első szélesebb körű lakótéri radon-vizsgálatról 1988-ban számoltak be, ebben 122 magyarországi lakótér másfél éves

méréséből a radon éves aktivitás-koncentrációjának középértékére 55 Bq/m<sup>3</sup>-t kaptak. A RAD Lauder Labor által 1994 és 1998 között mért 11556 ház radonszintjének középértéke 140 Bq/m<sup>3</sup>. A mérések szerint az alacsony radon-koncentrációjú épületek, lakások vannak többségben, de nagy, 200—400 Bq/m<sup>3</sup>, sőt 1000 Bq/m<sup>3</sup> aktivitáskoncentráció-értéket is találtak a házak néhány, illetve néhány tized százalékában. Sajátos anomáliák is vannak: például Mátraderecskén olyan gázkiáramlás van, amely szén-dioxidon és metánon kívül radont is tartalmaz. Egyes mátraderecskei házakban 13—14 kBq/m<sup>3</sup> értéket is találtak.

Mivel a radon vízben is oldódik, nemcsak beléggzéssel, hanem az ivóvízzel is bekerülhet a szervezetünkbe. Számos országban vizsgálták már az ivóvizek, forrásvizek radontartalmát. Az ivóvízben megengedett radon-koncentráció az Egyesült Államokban 11 Bq/l, míg Angliában 100 Bq/l.

A vízben oldott radon ugyanakkor kedvezően hat a szervezet számos tevékenységére, a radontartalmú gyógyfürdők már régóta jelentős helyet foglalnak el a gyógyászatban és a fizioterápiában. Az orvosok szerint magának a <sup>222</sup>Rn-izotópnak minimális a szerepe, ugyanis ez az izotóp csupán  $\alpha$ -részecskéket bocsát ki, amelyeknek nagy többségét a víz elnyeli. Ám a leányelemek aktivitása a gyógykezelés után még fél—egy órán át hat a szervezetre. A radonfürdők számos betegség gyógyításában hasznosak: a szív- és érrendszeri, a bőr-, valamint az idegrendszeri megbetegedések gyógyításának hatékony eszközei. A radontartalmú vizek fogyasztása javasolt egyes emésztési bántalmak esetén.

Korábbi mérések a Velencei-hegység két forrásának vizében nagy radon-koncentrációt mutattak ki. Az egyik a Sukoró határában található Szücs-kút, a másik a tőle ÉNy-ra légvonalban másfél km-re lévő Angelika-forrás. 1995 tavaszán Béres László és Deák Nikoletta végzett méréseket a Szücs-kútnál és az Angelika-forrásnál, eredményei szerint az előbbi aktivitás-koncentrációja  $161,4 \pm 1$  Bq/l, utóbbié pedig  $166,7 \pm 1$  Bq/l. 1997 őszén Kiss Rózsa a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI)

felszín alatti vizeket vizsgáló programja keretében vizsgálta a Szűcs-kutat, mérései kiugróan magas,  $291 \pm 8 \text{ Bq/l}$  értéket mutattak. A *MÁFI* mérésorozatának célja egyébként az, hogy képet kapjanak a felszín alatti vizek geokémiájáról évszakos vonatkozásban: legalább egy hidrológiai ciklus alatt (11 év) végigkövetik egy-egy forrásvíz összetételének alakulását, negyedévenkénti mintavételekkel. A radontartalom természetesen csak egy a sokirányú vizsgálatok közül. Már a fenti két adat is mutatja, hogy komoly mértékű ingadozás lehet a forrásvizek aktivitásában a mintavétel idejétől függően.

Szakedolgozatomban a fent említett, figyelemre méltó eredményektől indítatva általánosabb képet szeretnék kapni a Velencei-hegység természetes vizeinek radon-aktivitásáról, valamint a források közelében vett talajminták gamma-spektroszkópiás vizsgálatával a talaj tórium-tartalmáról, illetve rádium-és urántartalmáról, amely első lehetséges oka a természetes vizek magas radontartalmának.

Négy alkalommal végeztem mintagyűjtést a hegység sukorói tömbjének forrásai közelében: 1998. októberében, 1999. februárjában, márciusában és áprilisában.

## I. A Velencei-hegység — földtörténeti áttekintés

A Velencei-hegység gránit alapkőzetének keletkezését a radiometriai vizsgálatok mintegy 300 millió évvel ezelőtre teszik. A paleo-mágneses mérések szerint a megszilárdulás a déli félgömb 15. szélességi fokán következett be, majd a Velencei-hegység — a Dunántúli-középhegység egészével együtt — az afrikai litoszféralemez (a Föld szilárd kérgének egy darabja, amelyet magával ragad az alatta áramló, olvadt asztenoszféra) tartozékként nem egyenletes sebességgel vándorolt észak felé. 35 millió évvel ezelőtt, amikor már az északi szélesség 27. fokán volt, andezitvulkánok léptek működésbe területén. A pannon tenger (mely az évmilliók során más és más területekre húzódott) aztán csaknem teljesen elborította, csak a pákozdi Tompos-hegy (241 m) és a nadapi Meleg-hegy (352 m) legmagasabb részei emelkedtek ki szigetként. A víz visszahúzódása után a tengeri üledék nagyrészt lepusztult.

A Velencei-hegység gránitja 700—800 °C-os olvadékból szilárdult meg, és már ekkor keletkeztek benne repedések (ld. fényképmelléklet), hiszen a lehülés egyenetlenségei nyomán nagy feszültségek ébredtek egyes tartományai között. A pannon tenger üledékének lepusztulása után felszínre kerülő gránit aztán tovább aprózódott a kémiai és fizikai mállás során: a víz redukáló, a levegő/talajgáz oxidáló hatású; a téli fagyok — a jég közreműködésével —, a nyári napsütés a sziklák felhevítésével kezdte ki a gránittömböket. Ezen hatásokra a gránit sok helyütt murvává aprózódott; ám néhány helyen ellenállt a kőzet: a hegység nevezetes geológiai jelenségei az ingókövek, amelyek olyan nagy szilárdságú gránittömbök, amelyek körül a mállott, lágyabb anyagot az eső és a szél tovahordta (pl. a Sukoró szélén található Gyapjaszsák, vagy a pákozdi ingókövek).

A talaj elsősorban ezen mállás eredményeként jött létre, összetételének kb. 80%-át az eredeti kőzetanyag adja. Az egyéb alkotók a

szél által a területre szállított porból, illetve a területen megtelepedő élet szervesanyag-termeléséből tevődnek össze.

A tömör gránitban a radon természetesen lassan diffundál, kijutása elsősorban a repedéseknél történhet meg. Feltehetjük tehát, hogy a kiszabaduló radon mennyisége nő a gránittömb/szemcse felület—térfogat arányával. A nagymértékű aprózódás eredményeként keletkező gránitmurva esetén ez meglehetősen nagy lehet.

A vizek megjelenési formái közül számunkra a gránitfennsíkok talajvizei a legfontosabbak. A hegység jelentős részét borító gránitmurva-lepel jól vezeti a talajvizet, a vízzáró általában maga a gránit. Ezért fordulnak elő egészen magas területeken (gyérvizű) források.

A gránit alapkőzetben elsősorban a telérek (a mélyből a gránitba nyomult, ott megszilárdult olvadékok helyei) és az ÉNy—DK irányú haránttörések vezetik jól a vizet; haránttörések táplálják például az általunk is vizsgált Csöntör-hegyi forrásokat.

Egy a *MÁFI* adattárában található jelentés szerint az ötvenes évek végén radiohidrológiai felmérést végeztek a területen, amelynek megállapítása szerint a gránit hasadékvizei radonos jellegű radioaktív vizet adnak, bár az urántartalom nem mutat anomáliát. Scserbakov szerint: „a savanyú, uránt normális, szétszórt állapotban tartalmazó magmás kőzetek intenzív vízcseréjű övéhez tartozó vizek, melyek oxidációs geokémiai közegben mozognak, radonos radioaktív víztípust adnak, aminek oka az, hogy a gránit törései mentén a rádium egyrészt a repedések falán kijut, másrészt szulfidok oxidációs termékein abszorbeálódik, s ez erősen emanáló kollektorok képződéséhez vezet.”

A hatvanas évek második felében a Mecseki Érckutató Vállalat elkészítette a hegység aero-geofizikai felvételét. A mérés során 50 méteres repülési magasságból 100 méteres szelvényekben végezték a méréseket. Az így kapott eredményekből 1:50 000 léptékű K-, Th-, és össz- $\gamma$ - eloszlás térképeket szerkesztettek. A keleti terület (Sukoró

környéke, az általunk vizsgált terület) ezen mérések szerint magasabb radioaktivitású, mint Pákozd környéke.

### *A vizsgált források*

A MÁFI rendelkezésemre bocsátotta néhány vizsgált kút vizének kémiai összetételét (I.1. táblázat). Az elemzések 1958-ban készültek.

	Angelika-forrás	Felső-Csöbögő-forrás	Szücs-kút
K <sup>+</sup>	5,5	4,5	4
Na <sup>+</sup>	9,8	21,0	18,0
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,0	0,0	0,0
Ca <sup>2+</sup>	19,6	53,3	37,6
Mg <sup>2+</sup>	5,3	20,4	10,7
Fe <sup>2+</sup>	0,0	0,0	0,0
Mn <sup>2+</sup>	0,0	0,0	0,0
Cl <sup>-</sup>	1,3	7,9	5,7
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	48,8	197,9	146,4
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,0	0,0	5,7
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,0	0,0	0,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	53,1	84,7	51
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0,0	1,3	1,3
Összkeménység (nkf.)	3,98	12,14	7,74
kémhatás	savas	savas	savas
víz hőmérséklet (°C)	11	10	11
vízhozam (l/perc)	30	4	3
tengerszint feletti magasság (m)	235	190	180
a vízáadó réteg kora, jellege	gránit (repedezett)	gránit	holocén völgytörmelék
megjegyzés	4 db ÉNy—DK-i elrendeződésű fakadási hely	hasadék mentén fakad	kúttá foglalva

*I.1. táblázat. Néhány vizsgált forrás vizének  
vegyi elemzései*

A Hurka-völgyi Barlang-kút 165 m tengerszint feletti magasságú, a völgytalp szintjén található, vízadó képződménye gránit.

#### *A talaj összetétele*

A talajminták összetételét ugyancsak a *MÁFI* által a környék több pontján végzett vizsgálataiból vettem (*I.2. táblázat*). A környék öt pontján vett talajminta súlyszázalékait átlagolva jutottam a minden talajminta esetén a számításokban használt közelítő összetételhez.

	1.	2.	3.	4.	5.
SiO <sub>2</sub>	73,2	77,2	73,1	65,9	66,7
TiO <sub>2</sub>	0,31	0,04	0,08	0,56	0,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,1	11,9	15,0	14,0	14,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,75	0,70	0,85	0,65	0,28
FeO	1,57	0,41	0,08	4,25	3,92
MnO	0,065	0,033	0,04	0,20	0,20
CaO	1,52	0,92	0,67	2,44	1,25
MgO	0,61	0,14	0,24	1,44	1,20
Na <sub>2</sub> O	2,86	2,82	2,66	3,94	4,07
K <sub>2</sub> O	4,52	4,59	6,20	3,77	4,09
<sup>+</sup> H <sub>2</sub> O	1,27	0,88	1,10	1,94	1,59
<sup>-</sup> H <sub>2</sub> O	0,13	0,05	0,08	0,24	0,23
CO <sub>2</sub>	<0,02	<0,02	0,26	1,22	0,68
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,02	0,05	0,17	0,15

1. Gránit; Sukoró, Rigó-hegy
2. Aplit; Sukoró, Kastélykert
3. Aplit; Mélyszeg, új útbevágás
4. Gránitporfir (idős); Sukoró
5. Gránitporfir (fiatal); Sukoró

*I.2. táblázat. Talajminta-elemzések a Velencei-hegység  
sukorói tömbjének területéről*

## II. A RADIOAKÍV SUGÁRZÁS ÉS HATÁSAI

### II.1. A radioaktivitás felfedezése

A múlt század utolsó éveiben meglepő és alapvető kísérleti felfedezések mutattak rá a fizika addigi világképének korlátaira, hiányosságaira.

A 19. század folyamán a vegyészek és fizikusok egyre inkább elfogadták az atomok létezését. Az első lépést *John Dalton* tette meg — a kémiai elemek és vegyületek tulajdonságai alapján felújította és átfogalmazta a görög filozófusok atomhipotézisét. *Proust*, *Gay-Lussac* és *Avogadro* erőfeszítései nyomán erősödött meg az atomkép; különült el az atom és a molekula fogalma. 1894-ben *Stoney* és *Helmholtz* az elektrolízis törvényeinek alapján arra következtetett, hogy az elektromosság is atomos szerkezetű. *Thomson* katódsugárcsöves kísérletei már lehetővé tették a szóbanforgó részecske — az elektron — tömegének meghatározását is (1897).

*Wilhelm C. Röntgen* katódsugarakkal végzett kísérletei során a kisülési csövet teljesen átlátszatlan fekete papírral burkolta be, hogy a katódsugarak által keltett gyenge fluoreszkáló fényt is láthassa. Azt tapasztalta, hogy a közelben elhelyezett fluoreszkáló só mindannyiszor élénken világít, ahányszor a kisülési csövet bekapcsolja, annak ellenére, hogy semmiféle látható fény — még kevésbé a katódsugarak — nem érhetette közvetlenül. Az új, láthatatlan sugárzás megfigyelése szerint az üvegcső falának arról a helyéről indul ki, ahová a katódsugarak becsapódnak; miközben a becsapódás helyén az üveg erősen fluoreszkál (1895).

*Henri Becquerel* az uránsók fluoreszcenciájával foglalkozott, így érthető, hogy a röntgensugarak felfedezését kapcsolatba hozta a fluoreszcencia jelenségével: felvetette azt, hogy mindkettőnek azonos oka van. Feltevését igazolandó egy alaposan beburkolt fényképezőlemezre uránsót helyezett, majd az egész elrendezést napsütés hatásának tette ki, hogy a só fluoreszkáljon. A lemez előhívása után igazolva látta feltevését: feketedést észlelt az uránkristály alakjának megfelelően. Ám egy véletlen körülmény (*Becquerel* megfigyelése szerint a só napfény-megvilágítás nélkül is nyomot hagy a lemezen), és az azt követő vizsgálatok világosan bizonyították, hogy az uránsó sugárzásának semmi köze a fluoreszcencia jelenségéhez, kizárólag az urán jelenlétével van kapcsolatban. Az uránsó aktivitása egy év elteltével sem csökkent észrevehetően; a sugárzásról pedig elektroszkóppal kimutatta, hogy ionizálja a levegőt.

*Marie Curie-Sklodowska* vizsgálatai szerint a tórium is hasonló sugarakat bocsát ki, amiből arra következtetett, hogy az általa *radioaktivitás*nak elnevezett jelenség az anyag általános tulajdonsága. Több tonna uránszurokércből különítették el az uránnál négyszázszor aktívabb polóniumot és a kilencszázszoros aktivitású rádiumot (1898).

*Rutherford* fedezte fel a radioaktív bomlás exponenciális törvényszerűségét.

## **II.2. A radioaktív sugárzások tulajdonságai**

Egyes atommagok nagy energiájú sugárzást bocsátanak ki, miközben más atommaggá alakulnak át. A radioaktív sugárzásoknak három fő típusa van. Az  $\alpha$ -bomláskor az atommag rendszáma kettővel, tömegszáma pedig négyel csökken.  $\beta$ -bomláskor a rendszám eggyel változik, míg a tömegszám változatlan marad. A  $\gamma$ -sugárzás kibocsátásakor sem a rendszám, sem a tömegszám nem változik.

Radioaktív sugárzás kibocsátásakor (a  $\gamma$ -sugárzás kivételével) tehát új atommag keletkezik. Ha a keletkezett atommag ismét instabil, akkor a bomlás tovább folytatódik. Több egymást követő bomlás sorozatát radioaktív bomlási sornak nevezzük, amelyben általában a fent említett három fajta sugárzás követi egymást. Az  $\alpha$ -,  $\beta$ - és  $\gamma$ -bomlások során a tömegszám vagy 0-val, vagy 4-gyel változik, ezért négy bomlási sort különböztetünk meg aszerint, hogy a bomlási sorban lévő elemek tömegszáma négyfel osztva milyen maradékot ad.

A radioaktív bomlás valószínűségére vonatkozóan csak statisztikus törvényt állapíthatunk meg, az egyes magok átalakulásának időpontját nem jósolhatjuk meg.

Az időegység alatt bekövetkező bomlások számát nevezzük aktivitásnak:

$$A = -\frac{dN}{dt}, \quad (1)$$

ahol  $N$  a bomlásra képes atomok száma a preparátumban.  $A$  mértékegysége az egy Bq (Becquerel), ami egy bomlást jelent másodpercenként.

A radioaktív forrás aktivitása egyenesen arányos a forrásban lévő bomlásképes atommagok számával, mert azok függetlenek egymástól:

$$A = \lambda \cdot N, \quad (2)$$

$\lambda$  a bomlásállandó, mértékegysége 1/s.

(1) és (2) alapján az aktivitás időfüggésére a következő exponenciális összefüggést kapjuk (bomlástörvény):

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

valamint a forrásban lévő bomlásra képes atommagok számára hasonlóan:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

Azt az időtartamot, amely alatt a mintában a bomlásra képes magok száma, és így az aktivitás is felére csökken, *felezési idő*nek nevezzük ( $T_{1/2}$ ). A felezési idő és a bomlásállandó között a következő összefüggés áll fenn:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

### II.3. A radioaktív egyensúly és a radioaktív családok

A természetben megtalálható három bomlási család anya- és leányelemei között egyes esetekben radioaktív egyensúly alakulhat ki.

Legyen  $A_a(t)$  az anyaelem aktivitása a  $t$  időpontban,

$A_{l1}(t)$  az első leányelem aktivitása a  $t$  időpontban,

$A_{l2}(t)$  a második leányelem aktivitása a  $t$  időpontban,

•

•

•

$A_{lN}(t)$  az N-edik leányelem aktivitása a  $t$  időpontban.

Ha bármely  $t > t_0$ -ra

$$R - \varepsilon < \frac{A_{ln}(t)}{A_a(t)} < R + \varepsilon,$$

ahol  $\varepsilon$  tetszőlegesen kicsiny pozitív szám, akkor azt mondjuk, hogy az anya- és leányeleme között radioaktív egyensúly állt be. Három esetet különböztethetünk meg:

#### 1. Nem alakulhat ki egyensúly,

ha  $T_a < T_l$  ( $T_a$  az anyaelem,  $T_l$  a leányelem felezési ideje), mivel ilyenkor az anyaelem gyorsan elbomlik.

#### 2. Tranziens (mozgó) egyensúly,

ha  $T_a > T_1$ . Ilyenkor a leányelem keletkezési sebessége és bomlási sebessége nem egyenlő, de számarányuk egy idő után állandó, minek következtében aktivitásuk aránya is az.

### 3. Szekuláris egyensúly

akkor alakul ki, ha  $T_a \gg T_1$ . Ebben az esetben a bomlási sor tagjainak aktivitása egyenlő.

A természetes radioaktív bomlási családokban a sorozat első tagjának felezési ideje több nagyságrenddel nagyobb, mint bármelyik leszármazottjáé, ami azt jelenti, hogy az anyaelem valamennyi leányelemével egyensúlyban van. Ha tehát az uránt vagy a tóriumot tartalmazó ásványban keletkezése óta együtt vannak anya- és leányelemei, akkor aktivitásaik megegyeznek. Előfordulhat azonban az is, hogy valamelyik leányelem más fizikai folyamatok során távozik, azaz nem bomlással. Például a gáz halmazállapotú radon belediffundálhat az ásvány légzárvaiba, a levegőbe, vagy az ásványt esetlegesen körülvevő folyadékba. Az új közegben új, radon-anyaelemű bomlási sor sarjadhat.

Tekintsük át a  $^{222}\text{Rn}$ -nak és leányelemeinek felezési idejeit (II.1. táblázat)!

RADIOAKTÍV IZOTÓP	FELEZÉSI IDŐ	BOMLÁS	ENERGIA (MAX.ENERGIA)
$^{222}\text{Rn}$	3,82 nap	$\alpha$	5,49 MeV
$^{218}\text{Po}$	3,05 perc	$\alpha$	6 MeV
$^{214}\text{Pb}$	26,8 perc	$\beta$	672 keV
$^{214}\text{Bi}$	19,9 perc	$\beta$	3270 keV
$^{214}\text{Po}$	164 $\mu\text{s}$	$\alpha$	7,69 MeV
$^{210}\text{Pb}$	22,26 év	$\beta$	16 keV
$^{210}\text{Bi}$	5 nap	$\beta$	1163 keV
$^{210}\text{Po}$	138,4 nap	$\alpha$	5,3 MeV
$^{206}\text{Pb}$	stabil		

II.1.táblázat. A  $^{222}\text{Ra}$  és leányelemei

A  $^{210}\text{Pb}$  hosszú felezési ideje miatt azt mondhatjuk, hogy a  $^{222}\text{Rn}$  bomlási sora itt megakad, ám ha csak a radont és az azt követő négy izotóp aktivitását tekintjük, láthatjuk, hogy néhány óra alatt beáll köztük az egyensúly.

#### **II.4. A radioaktív sugárzások detektálása és mérése. Dozimetriai alapfogalmak**

A radioaktív sugárzásokat érzékszerveinkkel nem foghatjuk fel, ugyanakkor a tapasztalat szerint komoly hatással vannak az élő szervezetre. Az anyaggal kölcsönhatásba lépő sugárzás részecskéi átadott energiájukkal gerjeszthetik, ionizálhatják a közeg atomjait, molekuláit. Az ionizáló hatás szempontjából a sugárzásokat két nagy csoportra oszthatjuk. Az elektromosan töltött részecskék alkotta sugárzások ( $\alpha$ - és  $\beta$ -sugarak) részecskéi az anyagban mozogva közvetlenül ionizálnak, míg az elektromosan semlegesek (röntgen-,  $\gamma$ - és neutronsugarak) csak közvetett módon: először valamilyen töltött részecskével lépnek kölcsönhatásba (az elektromágneses sugárzások általában az elektronokkal), energiájuk több-kevesebb részét átadják neki, s azután ez a meglökött részecske ionizál tovább.

A detektorok egy része láthatóvá teszi az ionizáló részecskék útját (ködkamra, buborékkamra, fotoemulzió, szilárdtest-nyomdetektorok), más detektorok pedig a beérkező részecskék számát állapítják meg (ionizációs kamra, Geiger—Müller-számláló, szcintillációs számláló, termolumineszcens dózismérő, félvezető-detektor).

Az ionizáló sugárzások nemcsak az élő anyagot károsítják, hanem a közeg részecskéinek ionizálásával mindenféle anyagban fizikai

változásokat, károsodásokat okozhatnak. Természetesen a biológiai károsodás első lépcsője is fizikai folyamat.

### *Fizikai és biológiai dózisfogalmak*

Az *elnyelt dózis* az anyagban tömegegységenként elnyelt energia, jele  $D$ , egysége a Gy (gray = J/kg) .

A *dózisegyenérték* a sugárzások biológiai hatását is figyelembe vevő mennyiség. Biológiai szempontból egyenértékűnek tekintjük azokat a dózisokat, amelyek azonos biológiai hatást váltanak ki. A dózisegyenérték jele  $H$ , mértékegysége a sievert (Sv). Kiszámítása:

$$H = D \cdot Q \cdot N,$$

ahol  $D$  az elnyelt dózis (Gy),  $Q$  a sugárzásra jellemző biológiai minőségi tényező,  $N$  pedig minden egyéb módosító tényező szorzata. A  $Q$  és az  $N$  viszonyszámok, mértékegységük nincs. Ezért a dózisegyenérték mértékegysége is  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ . A  $Q$  tényező a röntgen-, elektron- és gamma-sugárzásra (definíció szerint) 1, termikus neutronokra 2-3, gyors neutronokra 10, alfa-sugarakra 20.  $N$  értékét a sugárvédelmi gyakorlatban 1-nek szokás venni.

A sugárzásoknak kétféle hatása lehet: nagy sugárdózisok esetén alakul ki a közvetlen hatás, amely akut sugárbetegséget okoz; kisebb dózisok esetén egy késői hatás, amely bizonyos megbetegedések kockázatát növeli meg. Itt az előfordulási gyakoriság függ a kapott dózistól, a betegség súlyossága, illetve kimenetele független tőle (sztochasztikus hatás).

Az *effektív dózisegyenérték* a különböző szövetek eltérő kockázatnövelő hatását figyelembe vevő biológiai dózisfogalom. A sugárzások késői, sztochasztikus hatásainak leírására szolgál. Jele  $H_E$ , egysége a Sv. Kiszámítása:

$$H_E = \sum_T w_T H_T,$$

ahol  $H_T$  az átlagos dózisegyenérték a  $T$  szövetben,  $w_T$  pedig egy súlyozó tényező, amely a  $T$  szövetből származó sztochasztikus hatás kockázatának hányadát jelenti az egyenletes egésztest-besugárzástól eredő kockázathoz viszonyítva. Néhány súlyfaktor a leggyakoribb megbetegedésekre vonatkozóan: emlőrák - 0,15; tüdőrák - 0,12; fehérvérűség - 0,12; öröklődő egészségkárosodás az utódokban - 0,25.

#### *A dóziskorlátozások rendszere*

A dóziskorlátok rendszerében megkülönböztetik a lakosságot a foglalkozásszerűen sugárveszélyes tevékenységet végzőktől. Azok az egészséges felnőtt emberek, akik munkájuk során rendszeresen vagy időszakosan sugárveszélynek vannak kitéve, évente legfeljebb  $50\text{ mSv}$  effektív dózisegyenérték terhelést kaphatnak. A lakosságra vonatkozóan az effektív dózisegyenérték-korlát évi  $5\text{ mSv}$ . Ezen korlátok kifejezetten a nukleáris tevékenységből eredő lakossági többletterhelésre vonatkoznak, tehát nem tartalmazzák a természetes és az orvosi eredetű diagnosztikai vagy terápiás dózisokat.

#### *A természetes és mesterséges sugárterhelés*

A Földet kialakulása óta érik különböző eredetű ionizáló sugárzások. Az emberi tevékenységtől független sugárterhelést *természetes sugárterhelésnek* nevezzük. Lényegében ez is két csoportra bontható: *külső* és *belső* sugárterhelésre.

A természetes sugárterhelés egy részét a kozmikus sugárzás adja, mely részben a Napból, részben a naprendszeren kívülről záporozik Földünkre. Nagy részük nagy energiájú proton, de alfa-részecskék és

röntgen-fotonok is előfordulnak közöttük. A légkör felső rétegeiben magreakciókat válthatnak ki, melyek következtében egy sor radioaktív elem keletkezik ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{14}\text{C}$ ). Ezek a légkörkeveredése révén lekerülnek a Föld felszínére, vagy az eső bemossa őket a földre. Így kerül például a trícium a vizekbe, de hasonló a helyzet a kormeghatározásban használatos radioaktív szén-izotóp esetén is.

Magyarországon a lakosság évente átlagosan 0,3—0,35 mSv dózisegyenértékű sugárterhelést kap a kozmikus sugárzástól.

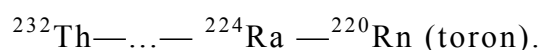
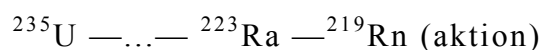
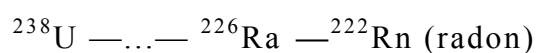
A kozmikus eredetű radioizotópokon kívül vannak a földben olyan radioizotópok is, amelyek még abból a szupernova-robbanásból származnak, amelyben a Föld anyaga keletkezett, s amelyek felezési ideje hosszabb a Föld életkoránál ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  és bomlási sora,  $^{232}\text{Th}$  és bomlási sora). A földi eredetű sugárterhelés legnagyobb részét ezen izotópok gamma-sugárzása adja.

A kozmikus és földi eredetű sugárterheléseket összegezve a lakosságot évente kb. 2 mSv dózisegyenérték természetes eredetű sugárterhelés éri, ami a lakosság évi teljes sugárterhelésének hozzávetőlegesen 68%-át teszi ki.

A mesterséges, emberi tevékenységből eredő sugárzások közül a legnagyobb terhelést az orvosi vizsgálatok és kezelési eljárások okozzák; részesedésük a lakosság teljes évi sugárterheléséből kb. 30%. A fennmaradó nagyjából két százalék a nukleáris energiatermelés, a nukleáris ipar és a fegyverkísérletek nyomán keletkező sugárzásnak tudható be.

## A radon

A földkérgi eredetű radionuklidok három bomlási sorának mindegyikében képződik radon, amely nemesgáz:



Ezek a radon-izotópok, akárcsak a  $^{40}\text{K}$  bomlástermékeként keletkező  $^{40}\text{Ar}$ , kidiffundálnak a talajból. A radon atommagja keletkezésének pillanatában kb. 100 keV-nyi visszalökődési energiát kap, ami elegendő ahhoz, hogy a közet kristályszemcséiből kijusson, majd a pórusokon átdiffundálva szabaddá váljon. Az aktion kiáramlása rövid felezési ideje (3,9 s), valamint a természetes uránban való igen kis koncentrációja ( $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,00725$ ) miatt elhanyagolható a másik két izotópé mellett. A diffúzió időigénye miatt végül is mintegy százszor annyi radon van a levegőben, mint toron.

A földfelszínen át kikerülő radon a szabad levegőn gyorsan felhígul. Ám ha a radon jól körülhatárolt térfogatba, például föld alatti bányák, vagy házak légterébe jut, ott jelentősen feldúsulhat. A külső levegő mintegy 8—10 Bq/m<sup>3</sup> aktivitásával szemben a lakások világátlagos 40 Bq/m<sup>3</sup>, egy átlagos magyar földszintes házáé 130 Bq/m<sup>3</sup>, de egyes esetekben 1000—2000 Bq/m<sup>3</sup> is előfordul.

A légterbe került radon bomlástermékei nagy kémiai affinitású fém-ionok, amelyek így nagy valószínűséggel kötődnek a levegő nem üledéző szilárd mikrorészecskéihez, az aeroszolokhoz. Ezeket belélegezve a tüdőben megtapadnak a hörgők hámsejtjein, ahol 6—8 MeV-os alfa-sugárzásuk révén sejtroncsolást okozhatnak, DNS-sérülésekhez vezethetnek. Feltételezhető, hogy elsődlegesen ezek a jelenségek vezethetnek tumor kialakulásához, de meg kell jegyezni, hogy a sugárzások biológiai hatása igen bonyolult és szerteágazó.

### **III. Mérési módszerek**

#### **III.1. Vízminták radontartalmának meghatározása**

A vízminták radontartalmának meghatározását folyadékszcintillátoros mérőműszerrel végeztem.

### *A folyadékszintillációs mérés technika alapelve*

A szintillációs detektálási módszer lényege az, hogy egyes anyagokban radioaktív sugárzás hatására fényfelvillanás lép fel, vagyis a radioaktív sugárzás energiája adott hatásfokkal fényenergiává alakul át.

Másik módszer a vizek radontartalmának meghatározására a kiborékoltatás, amelyet elsősorban kis aktivitások és nagyobb mennyiségű vízminták mérésére alkalmas.

A szintillációs folyadék (a koktél) általában három komponensből tevődik össze. Ezek: az oldószer (szolvens), a primer és a szekunder szintillációs anyagok (foszforok). A szintillátor és a radioaktív sugárzás kölcsönhatásának mechanizmusa két lépésből áll:

1. A belépő radioaktív sugárzás energiát ad át a szintillátornak, miáltal a molekulák gerjesztett állapotba kerülnek.
2. A szintillátorban a gerjesztett állapotban lévő molekulák foton kibocsátásával ismét alapállapotba mennek át.

A minta által emittált részecske energiáját a koktélban döntő többségben lévő oldószer molekulái abszorbeálják, s ennek következtében ők maguk is gerjesztődnek. A gerjesztett oldószer-molekula átadhatja energiáját egy másik társának, vagy az oldott anyagként jelen lévő (primer) szintillátornak, amit így gerjeszthet. Az alapállapotba visszajutó (primer) szintillátor fotont bocsát ki. Gyakran a primer szintillátor által kibocsátott fény spektruma nem illeszkedik jól a szintillátort figyelő fotoelektron-sokszorozó érzékenységi tartományához, s a detektálási hatásfok növelése érdekében szükséges egy újabb folyamatot közbeiktatni. A szekunder szintillátorral a koktél által kibocsátott fény spektrumának maximumát az elektronsokszorozó fotokatódjának érzékenységi maximumába tolhatjuk el.

A koktélban keletkező kis felvillanásokat *fotoelektron-sokszorozó* segítségével lehet detektálni, felerősíteni, és elektromos impulzussá

alakítani. A fotoelektron-sokszorozóban lévő fotokatódra érkező kis intenzitású fény — esetünkben a szcintilláció — elektronokat üt ki fotokatódból. A kilépő elektronokat magához vonzza egy fémelektróda (dinóda), mely pozitív potenciálra van kapcsolva. Mivel a fotoelektronsokszorozó-csőben vákuum van, az elektronok gyorsulva repülnek a dinóda felé, majd becsapódásuk megnövekedett energiájával egyenként több elektront váltanak ki, melyek aztán a következő, még nagyobb potenciálra kapcsolt dinóda felé repülnek. Egy fotoelektron-sokszorozóban 10—14 dinódát alkalmaznak, ami körülbelül  $10^6$ — $10^7$ -szeres erősítést jelent. A fotoelektron-sokszorozó által szolgáltatott elektromos impulzus nagysága arányos a fotokatód felületére érkező fotonok számával.

### III.1.1. A mintavétel

Ha a víz felszíne levegővel érintkezik, a benne oldott radon ki-diffundálhat belőle, így a mintavételkor a vízmintát speciális módon kell alkalmassá tenni a szállításra, hogy a laboratóriumban mért eredmények minél inkább tükrözzék a valóságot.

A mintatartó üvegcsékbe (küvetákba) a mintavétel előtt 10 ml *Optifluor*—*O* szcintillációs folyadékot, ún. *koktél*t töltöttem, amely sűrűségénél és oldódási tulajdonságainál fogva nem keveredik el a küvetába töltött vízzel. A mintavételkor injekciós fecskendővel juttattam pontosan 10 ml mennyiségű mérendő vízmintát a koktél alá, majd a két folyadékkomponenst a teflon-borítású kupak visszahelyezése után alaposan összeráztam, hogy a radon beleoldódhasson a koktélba. A mintavétel idejét pontosan fel kell jegyezni, hogy a kiértékeléskor figyelembe vehessük a mintavétel és a mérés között eltelt időben történt koncentráció-csökkenést.

*A mintavételek*

A Velencei-hegység turistatérképén feltüntetett összes forrásból igyekeztünk vízmintát venni; ezek jórészt Sukoró falutól É—ÉNy-ra találhatóak.

**1998. október 27-én** 10 vízmintát gyűjtöttünk, a Felső-Csepegő-, az Alsó-Csepegő- és az Angelika-forrástól kettőt-kettőt, a Szűcs-kúttól egyet. A Felső-Csöpögő-forrás közelében lévő kert csapjából, valamint a faluban két utcai ivóvíz-kút vizéből is vettünk mintát. Sajnos nem találtuk meg sötétedés előtt a Barlang-kutat, így abból nem tudtunk mintát venni.

**1999. február 12-én** félméteres hó volt, ami igencsak megnehezítette a mintavételt. Mindössze három vízmintát vettünk, egyet a Szűcs-kútból, kettőt pedig az Öreg u. 13. ásott kútjából. A kútban kb. másfél méter magasságú volt a vízoszlop, az egyik küvétát fél, a másikat egy-másfél méter mélységből felhúzott vízzel töltöttük meg.

**Március 26-án** az első mintavétel az őszel nem talált Barlang-kútból történt. Két mintát vettünk: egyet közvetlenül a víz kifolyásánál, egyet pedig a kifolyásnál egy természetes kömedencében felgyülemlő, „pangó” vízből. A téli nagy hó olvadása után meglehetősen nagy volt a nedvesség, olyannyira, hogy az Angelika-forrás felett egy újabb vízért találtunk, amelynek eredetét keresve a fennsíkon a forrástól kb. 250 m-re egy nagy vízfelületet találtunk; onnan szivárgott a víz az Angelika-forrás felé. A Szűcs-kút felett is megjelent egy újabb vízkitörés, kb. 15 m-rel feljebb. Mindkettőből vettünk vízmintát, akárcsak az Alsó- és Felső-Csepegő-forrásokból. A visszaindulás előtt még volt négy üres küvetta; ezekbe a Szűcs-kút vizéből fakadó patakból vettem mintákat, a kúttól egyre távolodva (2, 13, 26, 33 m-re).

Az **április 25-i** mintagyűjtés egy meglehetősen csapadékos időszakot követően történt. A márciusi eredmények azt mutatták, hogy a Barlang-kút pangó vizében nagyobb volt a radon-koncentráció, mint közvetlenül a kifolyásnál. Ezt ellenőrizendő ismét több mintát vettem (a kifolyó és a pangó vízből is), de nemcsak a Barlang-kútnál, hanem az

Angelika-forrásnál is. A Csepegő-forrásoknál nem található a víz eredete, valószínűleg több kis járaton és/vagy a kis medence alján szivárognak a víz. Vettem mintát a Hurka-völgy patakjából, és a Szücs-kútból is.

### III. 1. 2. A vízminták mérése

A küvetákban szállított vízminták radonkoncentráció-mérését a PACKARD TRI-CARB 1000A folyadékszintillációs spektrométerrel végeztem. A berendezésben kettő, egymással szemben elhelyezett fotoelektron-sokszorozó figyeli a mintában történő felvillanásokat. A detektorokról érkező jeleket koincidencia-áramkör szűri, majd egy analóg—digitál átalakító sokcsatornás analizátorra küldi. Az analizátor a jeleket nagyságuk szerint 4000 csatornába válogatja szét. A gép bekapcsolása után ismert radioaktív izotóp segítségével kalibrálhatjuk a műszert: esetemben  $^{14}\text{C}$ -gyel történt a kalibrációs mérés (SNC: Self Normalization Counting), amellyel az egyes csatornához tartozó energiát állapítja meg a műszer.

A TRI-CARB spektrométer különböző mérési eljárásokat (protokoll) tárolhat, így például a radon-koncentráció meghatározására alkalmas beállítást is. A mi esetünkben a beütésszámot három csatornában gyűjti a gép. A minta mérési eredményeit nyomtatón keresztül jelenítette meg a műszer. Egy-egy minta adatsora a mérési mód (protokoll) számát (P#), a minta számát (S#), a mérés időtartamát (TIME), az egyes csatornában mért beütésszámot (CPMA, CPMB, CPMC; Counts Per Minute), a B csatornában mért beütésszám szórását (2S%B), a bekapcsolástól eltelt időt (ELTIME), a gépen belüli külső sztenderddel mért kioltást (tSIE), valamint a spektrumot jellemző spektrális indexet (SIS) tartalmazza. A radon-mérés protokollja esetén a csatorna-beállítások:

**A csatorna:** 25 keV—900 keV; CPMA transzformált érték;

**B csatorna:** 25 keV—900 keV; *CPMB* a beütésszám [beütés/perc] a B csatornában,

**C csatorna:** 0 keV—25 keV ; *CPMC* a C csatornába jutó beütések száma.

A mérés időtartama függ a minta aktivitásától és a megkövetelt pontosságtól. Az általam végzett mérések esetén az 5—6 *2S%B*-jűnél nem rosszabbakat fogadtam el.

## III.2. Talajminták mérése

### III.2.1. A Gamma-spektroszkópia alapjai

#### *A gamma-fotonok és az anyag kölcsönhatása*

A radioaktív bomlások után a keletkező új atommagok általában gerjesztett állapotban jönnek létre. Ebből az alapállapotba jutás egyik lehetséges módja a gamma-fotonok kibocsátása. A kibocsátott gamma-fotonok energiája jellemző az azt kibocsátó atommagra.

A gamma-fotonok a detektáláskor az anyagban lévő elektronokkal lépnek kölcsönhatásba. (Éppen ezért a gamma-sugárzást a nagy rendszámú, nagy sűrűségű anyagok (ólom, réz, vas) gyengítik a legjobban.) Az anyagba párhuzamosan belépő sugárnyaláb intenzitása az árnyékoló anyag vastagságának exponenciális függvénye:

$$I = I_0 \cdot e^{-kx},$$

ahol  $I_0$  az anyagba belépő sugárzás intenzitása,  $I$  az  $x$  vastagságú rétegen áthaladt (az anyagból kilépő) intenzitás,  $k$  pedig a sugárgyengítési (abszorpciós) együttható. A gamma-sugarak gyengítésének jellemzésére

használatos a *felezési rétegvastagság* fogalma: az a távolság, amely után egy párhuzamosan haladó gamma-sugár-nyaláb intenzitása a felére csökken. Az anyagban haladó gamma-sugárzás intenzitása a felezési rétegvastagsággal kifejezve:

$$I = I_0 \cdot 2^{-\frac{x}{R}},$$

ahol  $R$  a felezési rétegvastagság,  $I_0$  és  $x$  mint fent.

A következő táblázat néhány anyag felezési rétegvastagságát tartalmazza a 2,5 MeV energiájú gamma-sugarakra vonatkozóan:

ANYAG	R(CM)
hó	50
fa	25
víz	23
<b>talaj</b>	<b>14</b>
beton	10
ólom	1,8

*III.1. táblázat. Néhány anyagfajta felezési rétegvastagsága a 2,5 MeV energiájú gamma-sugarakra*

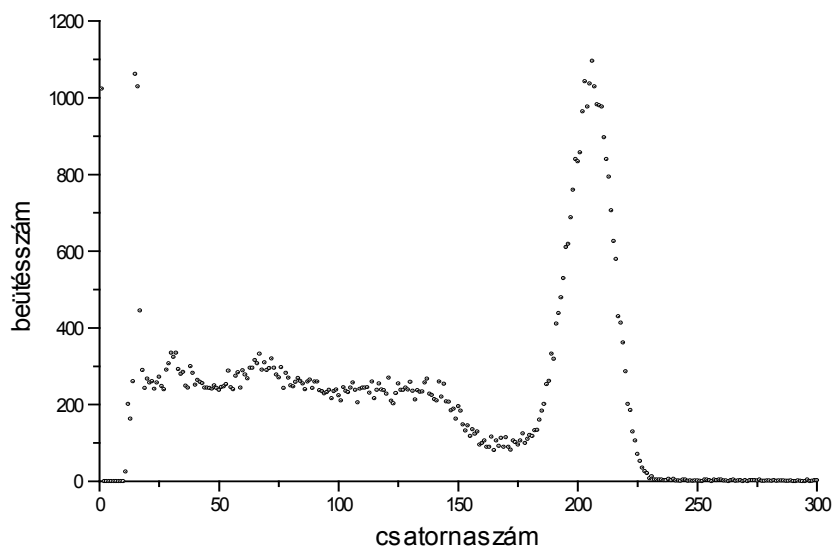
A gamma-fotonok és az anyag (így a detektor anyaga) kölcsönhatásának három módja lehetséges: a fotoeffektus, a Compton-effektus és a párkeltés.

A fotoeffektus során keltett elektron kinetikus energiája a kötési energiával kisebb, mint az elsődleges gamma-kvantumé. Nagyméretű detektor esetén az elektron kilökését követő karakterisztikus röntgen-

sugárzás nagy valószínűséggel még a detektoron belül újabb fotoeffektussal átadja energiáját egy másik elektronnak, amely az első elektronnal egyidejűleg szintén felvillanást kelt; a fotoeffektushoz tartozó detektorjel egyértelmű kapcsolatban áll a beérkezett gamma-foton energiájával.

A nagyobb energiájú gamma-fotonokra a fotoeffektus hatáskeresztmetszete kicsi, ám ha többszörös Compton-szórás szenvednek, csökkenő energiájukkal együtt nő a fotoeffektus valószínűsége; végül fotoeffektussal leadhatják energiájukat. Természetesen jó néhány foton elhagyja a detektor érzékeny térfogatát, mielőtt fotoeffektust idézhetne elő.

Egy monoenergiás  $\gamma$ -forrás spektrumán elkülöníthetjük a különböző folyamatok járulékait. A következő ábra egy  $^{137}\text{Cs}$  gamma-sugárforrás szcintillációs detektorral felvett spektrumát mutatja, jól kivehető rajta a teljes energiájú csúcs a 200-as csatornaszám közelében (energiája 662 KeV), valamint tőle balra a  $180^\circ$ -os Compton-szóráshoz tartozó Compton-él, amelynél a szórt elektron a lehetséges legnagyobb energiát veszi át az őt meglökő gamma-fotontól. A spektrum a Magfizikai Laboratóriumban negyedéves hallgatóként végzett mérésemből való.



*III.1. ábra.  $^{137}\text{Cs}$ -izotóp  $\text{NaI}(\text{Tl})$   
szcintillációs kristály-detektorral felvett gamma-spektruma*

A párkeltés hatáskeresztmetszete 1,5 MeV fölött kezd jelentőssé válni, az e fölötti spektrumvonalak esetében a teljes energiájú csúcs alatt 511 keV-al, illetve 1,02 MeV-al megtalálhatjuk az egyszeres-, illetve kétszeres szökési csúcsokat. Méréseink eredményeinek kiértékelése során mi is megtaláltuk a Tl—208-izotóp 2614,6 keV-os spektrumvonalához szökési csúcsokat.

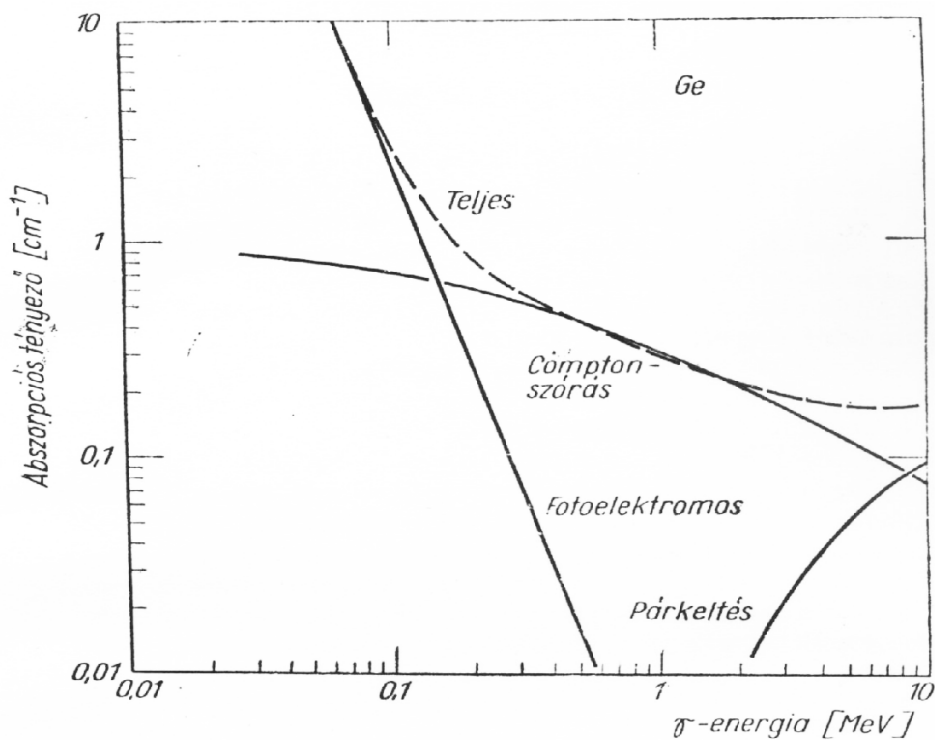
### **III.2.2. Félvezető-detektorok alkalmazása magsugárzások mérésére**

A félvezető detektorok olyan ionizációs detektorok, amelyekben az ionizáció szilárd, félvezető anyagban jön létre. Előnye ezeknek a detektoroknak az, hogy a félvezető anyagokban (szilícium, germánium) egy töltéshordozó-pár keltéséhez 8—10-szer kisebb energia kell, mint a szcintillációs kristályokban. Ez azt eredményezi, hogy azonos energiaátadás mellett a félvezetőkben sokkal több töltéshordozó keletkezik, mint a szcintillációs detektorokban, minek révén a töltéshordozók viszonylagos számának ingadozása kisebb lesz, s ez a detektorok *jobb energiafelbontását* teszi lehetővé. Ugyanis a töltéshordozók keltése egymástól független elemi folyamatokból tevődik össze, az egyes aktusokban átadott energia különböző lehet.

Ennek alapján adott energiájú részecskék nem feltétlenül azonos számú töltéshordozót keltenek. Ha az egyes részecskék által átlagosan keltett töltéshordozók száma nagy, szám szerinti eloszlásukat Gauss-görbével jellemezhetjük. Az intenzitás felénél vett eloszlásigörbe-szélesség, és az intenzitásmaximum hányadosa a spektrumvonalak kiszélesedését jellemző *félértékszélesség*, amely a keltett töltéshordozók számának négyzetgyökével fordítottan arányos.

A félvezetők viszonylagosan nagy fajlagos vezetőképessége miatt ugyanakkor meglehetősen nagy az alapáramuk, ami a detektor nagy alapzajához vezet. Ennek a hatásnak a csökkentésére a detektort a folyékony nitrogén hőmérsékletére kell hűteni a mérés idejére. A félvezető detektorok egy része olyan érzékeny, hogy tároláskor is hidegen kell tartani.

A félvezető detektorra a méréskor nagy az elektromos térerősséget kapcsolunk, ami a beérkező ionizáló sugárzás keltette töltéshordozókat az elektródákhoz vonzza. Ezáltal áramlökés keletkezik, amelyben az össztöltés a kristályban leadott energiával arányos. Az áram integrálja, vagyis a begyűjtött töltés tehát arányos a részecske energiájával. (A töltéshordozó-keltés elemi folyamatai idejének nagyságrendje  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  s, míg a begyűjtése  $10^{-6}$  s.)



III.2. ábra. A germánium teljes és részleges abszorpciós tényezője

### III.2.3. A mérési elrendezés

Méréseimben nagy tisztaságú germániumból készült detektorral (High Purity Germanium) vettem fel a minták  $\gamma$ -spektrumát, a detektor érzékeny térfogata kb.  $50 \text{ cm}^3$ , az alkalmazott gyűjtőfeszültség 4000 V volt.

A germániumdetektor szolgáltatta jeleket CAMAC-szabványú konverter közvetítette a mérést vezérlő számítógépnek.

Az érkező adatokat a *Camcopr* nevű, az Atomfizikai Tanszéken készült program fogadta, s tette láthatóvá. A programot *Deák Ferenc* írta, tanszéki használatra.

A méréseket az ELTE Neutronfizikai Laboratóriumában végeztem.

### III.2.4. A mintavétel és a mérés

#### *A mintavétel*

A Velencei-hegység természetes forrásainak közelében vett talajmintákat hengeres geometriájú, műanyagból készült mintatartókba töltöttem. Általában közvetlenül a talaj legfelső, néhány cm vastagságú rétege alól vettük a mintákat. Az 1999. március 26-i mintavétel alkalmával az Alkalmazott Földtani Tanszék kézi fúrójával néhány mintavételi helyen nagyobb mélységből is (0,5 m; 1 m) vételeztünk talajmintát.

#### *A mérés menete*

A mérés megkezdése előtt radioaktív tórium-izotóppal tíz—húsz perces kalibrációs mérést végeztünk. A *Camcopr*-programmal a tórium 2614,6 keV-os, és a — mindenütt jelen lévő, ezért a kalibrációs spektrumban is megjelenő —  $^{40}\text{K}$  1460,8 keV-os gamma-sugárzásának vonalát felhasználva meghatározhattuk az egyes csatornához tartozó energiaértékeket.

Méréskor a mintatartót a laboratórium ólomtornyában elhelyezett detektorra helyeztem. A mérések időtartama általában 15 óra volt, ami néha kényszerítő körülmények miatt valamelyest megrövidült.

A mérés során a számítógép rögzíti az egyes csatornában észlelt beütések számát; a mérés végeztével a spektrum ASCII-fájlba menthető, amelynek kiterjesztése .spm, utalva az adatfájl tartalmára. A kiértékeléskor ebből indulunk ki.

#### **IV. A mérések kiértékelése**

##### **IV. 1. A vízminták kiértékelése**

A folyadékszintillációs mérés eredményeképpen a következő adatokat kapjuk meg: percenkénti beütésszám a mérés idejére átlagolva (CPM), ennek a százalékos hibáját, a mintavétel és a mérés megkezdésének időpontját, a spektrum alakjára jellemző SIS értéket és a minta kioltására jellemző tSIE értéket.

Először a mérés megkezdésekor érvényes radon-koncentrációt számoljuk ki a CPM értékekből. Ehhez egy ismert aktivitású mintákból álló kalibrációs sorozat eredményeit használjuk fel. A kalibrációhoz ismert aktivitású  $^{226}\text{Ra}$  oldatot hígítottunk úgy, hogy 20 és 500 Bq/l közötti aktivitású sztenderdekot kaptunk. A radioaktív egyensúly beállta után a koktél-fázisban kialakult a rádiummal egyenlő aktivitású radon-aktivitás. A sztenderd-sorozat mérési eredményei megadják a kapcsolatot a percenkénti beütésszám és a Bq/l-ben mért fajlagos aktivitás között. Az eredmények azt mutatják, hogy a kalibrációs görbe nagyon jó közelítéssel egyenes. Nulla radontartalom mellett kb. 10,88 beütés/perc intenzitást tapasztaltunk, ezt a háttér-értéket több 12 órás mérés átlaga adta. Ezek

alapján állítottuk be a műszerben az A csatorna transzformált értékét. A fajlagos aktivitást a  $(\text{CPM} - 10,88)/1.98$  képlet alapján határoztuk meg.

A mintavételkori aktivitást úgy kapjuk meg, hogy a mintavétel és a mérés megkezdése között eltelt idővel korrigáljuk. A radon felezési ideje 3,82 nap, ebből meghatározható a bomlási állandója:  $\lambda=0,0075536$  1/óra. Ennek alapján a mérés megkezdéséig  $e^{-\lambda t}$ -ed részére csökkenő fajlagos aktivitást korrigálni tudjuk.

A mérések hibája általában 3—5 % közé esett, amit a mérési idő növelésével csökkenteni lehetett. A mérések hibája a statisztikai ingadozáson kívül a kalibráció 2%-os szisztematikus hibáját is tartalmazza.

Ezeket a műveleteket Excel - táblázatban automatikusan elvégzi az az eljárásorozat, amit *Horváth Ferenc* készített.

A következő táblázat a márciusi vízminták eredményeit tartalmazza.

1999. március 26.	sukorói	vízminták										
küvetta száma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
mintavétel helye	Barlang-kút, kifolyás	Barlang-kút, pangás	Alsó-Csepegő-f.	Felső-Csepegő-f.	Angelika-f.	vízér az Angelika -f. felett	Szűcs-kút	Szűcs-kút feletti kif.	Szűcs-kút, 2m	Szűcs-kút, 13m	Szűcs-kút, 26 m	Szűcs-kút, 33 m
mintavételi idő hónap	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
nap	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
óra	10	10	11	12	12	12	14	14	15	15	15	15
perc	42	46	47	13	54	57	47	49	33	27	29	31
mérés megkezdése hónap	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
nap	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
óra	10	10	10	10	10	14	10	15	14	15	15	15
perc	43	43	43	43	43	1	43	45	1	12	45	45
Delta t (óra)	72,03	72,24	71,50	71,34	70,93	73,78	69,90	72,94	70,83	71,76	72,80	73,29
protokoll	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
mérés időtartama T (perc)	15	15	15	15	15	20	15	30	20	25	30	30
cpm szórása	3,19	2,72	4,64	4,03	3,67	5,01	3,49	5,5	5,07	5,06	5,09	5,35
eltime	15,71	32,34	49,10	65,17	81,71	62,96	133,23	30,53	41,91	25,56	62,23	93,22
cpmB	262,73	361,6	123,87	164,13	198,4	79,65	218,73	44,07	77,75	62,4	51,43	46,5
SiS	745	626	696	747	802	618	734	526	625	598	584	594
tsie	358	294	341	357	378	344	340	329	348	325	355	352
c1	0,580	0,579	0,583	0,583	0,5852	0,5727	0,5898	0,5764	0,5856	0,5816	0,5770	0,5749
c2	0,0019	0,0019	0,0019	0,002	0,0019	0,0025	0,0019	0,0038	0,0025	0,0031	0,0038	0,0038
c3	1,00	1,00	1,00	0,999	0,9991	0,9987	0,9991	0,9981	0,9987	0,9984	0,9981	0,9981
számolt koncentráció cpmA	127,19	177,12	57,06	77,39	94,6970	34,72	104,9646	16,7525	33,7626	26,01	20,4697	17,9798
mért koncentráció (cpmA)	125,92	175,35	56,48	76,62	93,75	34,17	103,92	16,58	33,42	25,75	20,27	17,8
eredeti koncentráció	<b>217,17</b>	<b>302,90</b>	<b>97,02</b>	<b>131,45</b>	<b>160,35</b>	<b>59,74</b>	<b>176,37</b>	<b>28,82</b>	<b>57,14</b>	<b>44,35</b>	<b>35,2</b>	<b>31,02</b>
koncentráció szórása	11,27	14,30	6,44	7,93	9,09	4,19	9,68	2,16	4,04	3,13	2,5	2,28

## IV. 2. A talajminták gamma-spektrumainak kiértékelése

### *A gamma-spektrumok szerkezete*

Tudjuk, hogy az  $\alpha$ - és  $\beta$ -sugarak rendkívül gyorsan elnyelődnek az anyagban, ezért nem meglepő, hogy a talaj- és kőzetminták gyakorlati szempontból alkalmazható sugárzása a  $\gamma$ -sugárzás. A kőzetek aktivitásának vizsgálatakor csak a természetes gamma-sugárzó izotópokat vettük figyelembe.

Az urán- és tórium-sorokban az  $\alpha$ -,  $\beta$ - sugárzások mellett természetesen megtalálhatók a jellegzetes  $\gamma$ -sugárzások.

elem	spektrum- vonal (MeV)	elem	spektrum- vonal (MeV)
<sup>232</sup> Th	0,029		<b>1,120</b>
	0,063		1,155
	0,091		<b>1,238</b>
<sup>234</sup> Pa	0,043		1,281
	0,770		1,378
	<b>1,010</b>		1,410
<sup>232</sup> Th	0,068		1,509
<sup>226</sup> Ra	<b>0,188</b>		1,582
<sup>214</sup> Pb	0,242		<b>1,728</b>
	<b>0,295</b>		1,764
	<b>0,349</b>		<b>1,848</b>
<sup>214</sup> Bi	<b>0,609</b>		<b>2,117</b>
	0,652		<b>2,204</b>
	0,703		2,450
	<b>0,768</b>	<sup>210</sup> Pb	0,046
	<b>0,934</b>		

*IV.2. táblázat. Az urán-család gamma-sugárzásai*

elem	spektrum- vonal (MeV)	elem	spektrum- vonal (MeV)
$^{228}\text{Ra}$	0,010	$^{228}\text{Th}$	0,084
$^{228}\text{Ac}$	0,058	$^{212}\text{Pb}$	0,080
	0,129		<b>0,239</b>
	<b>0,209</b>		0,300
	<b>0,270</b>	$^{212}\text{Bi}$	0,287
	<b>0,328</b>		<b>0,727</b>
	<b>0,338</b>		0,785
	<b>0,460</b>		1,072
	<b>0,790</b>		1,620
	0,831	$^{208}\text{Tl}$	<b>0,277</b>
	<b>0,908</b>		<b>0,511</b>
	<b>0,960</b>		<b>0,583</b>
	1,471		0,860
	1,630		<b>2,614</b>

*IV.3. táblázat. A tórium-család gamma-sugárzásai*

Az egyes csatornaarányok természetesen befolyásolják azt, hogy valóban megtaláljuk-e a vonalat a vizsgált spektrumban. Az általunk végzett vizsgálatokban 150—160 keV-től 2700 keV-ig kerestük a spektrumvonalakat. A tartomány alsó részében az egymásra rakódó Compton-hátak eléggé nagy zavaró háttérrel okoztak. A táblázatban félkövérrel szedett spektrumvonalakat általában megtaláltuk a spektrumokban, a hiányzók vagy kis csatornaarányuk (valószínűségük) és/vagy a háttérbe süllyedésük miatt nem voltak megtalálhatók. Kis energián a germánium-detektor határfoka is rohamosan csökken (a detektor anyagában a fotoeffektus a döntő energialeadási forma ebben az energiatartományban.).

A  $^{40}\text{K}$  radioaktív izotópját minden mintában megtaláltuk. Ennek az izotópnak a gyakorisága a természetben 0,0119%. A  $^{40}\text{K}$  izotóp 88%-a  $\beta$ -bomlással stabil  $^{40}\text{Ca}$ -né, 12%-a pedig K-befogással metastabil  $^{40}\text{Ar}$ -né,

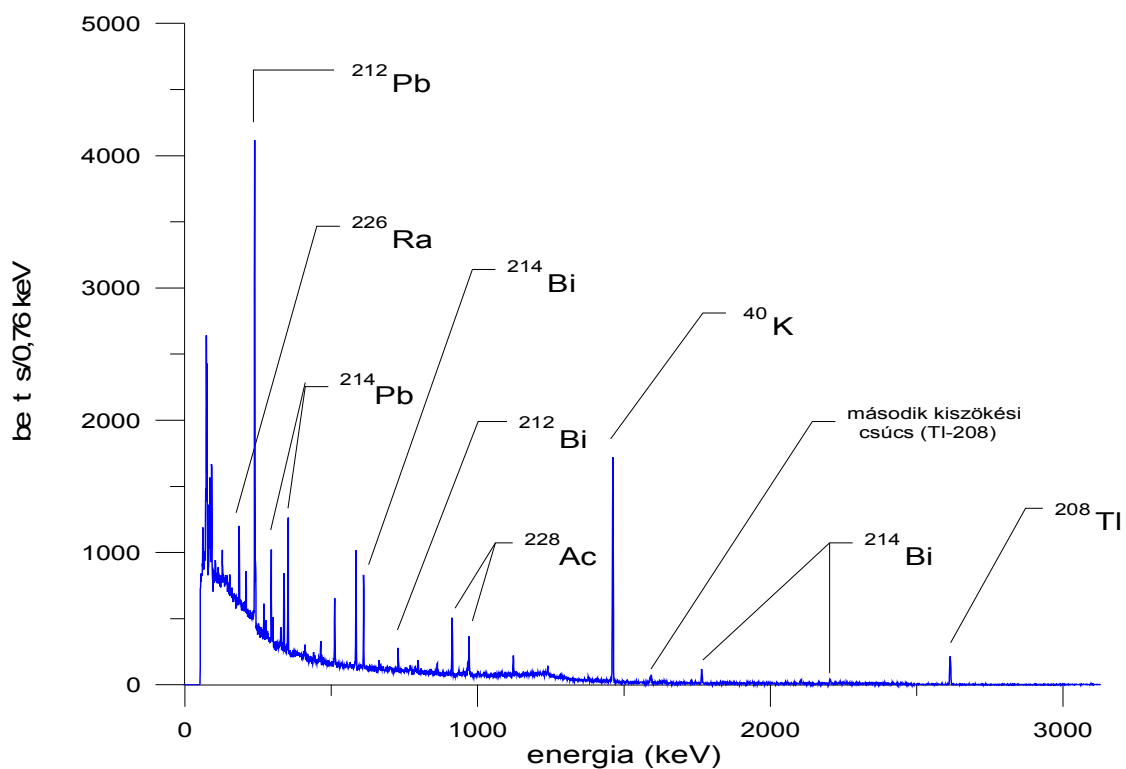
amely 1,46 MeV energiájú  $\gamma$ -kvantum kisugárzásával stabil  $^{40}\text{Ar}$ -né alakul.

A kőzetekben a K eloszlása egyenletesebb, mint az uráné és a tóriumé, s általában öt nagyságrenddel nagyobb (a teljes K-tartalom).

#### *A kiértékelés menete*

A kiértékelés menetét a márciusi E jelű minta példáján mutatom be. Ez a minta a Szűcs-kút közvetlen közeléből származik, egy méteres mélységből; ugyanabból a fúrásból, amiből a fél méter mélyről vett D jelű minta.

A mérés eredményeként a következő spektrumot kaptuk:

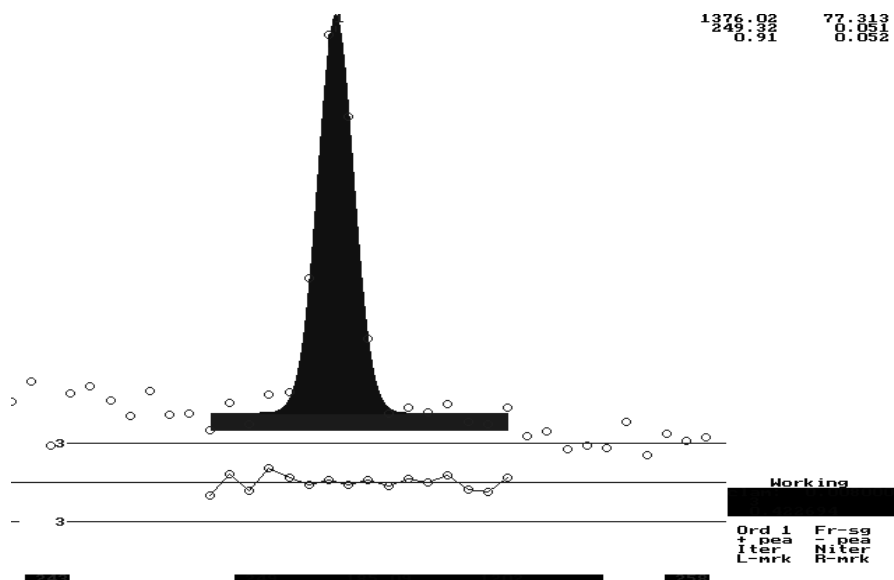


*IV.1. ábra. A márciusi E jelű minta gamma-spektruma*

A mérések végeztével a kalibrációt általában a  $^{40}\text{K}$  1460,8 keV-os és a  $^{208}\text{Tl}$  2614,6 keV-os csúcsának beállításával végeztük. A

nemlinearitási probléma miatt az alsóbb energiákon gyakran 4—5 keV-tal elcsúsztak a csúcsok, de ez általában nem okozott problémát a csúcsok azonosításában.

A továbbiakban a *Camcopr* program csúcskereső funkciójával megkerestük a spektrumban található csúcsokat, és egyúttal a csúcsokra Gauss-görbét illesztettünk a legkisebb négyzetek módszerével (*IV. 2. ábra*). A program elvégzi a más gamma-energiáktól származó háttér levonását is. Ezt a háttérrel a program első- és másodfokú polinommal is tudja közelíteni.



*IV.2. ábra. A Camcopr csúcs-illesztése a  $^{226}\text{Ra}$  186,2 keV-os vonalára*

Az ábrán látható a mérési pont és az illesztett pont különbségének 0 körüli fluktuációja.

A program alkalmas egymásba csúszó csúcsok szétválasztására is.

A csúcskeresés eredményeként olyan adatsort kapunk, amely tartalmazza az energiákat, az energiához tartozó beütésszámot (a csúcs területét), illetve annak bizonytalanságát ( $\sigma_{\text{TER}}$ ).

Minden méréscsoport tartalmazott egy háttérmérést is, hogy a mérés helyének, az ólomkamrának a szennyezettségét figyelembe vehessük. Ezért a programmal a háttérmérés spektrumában is megkerestük a csúcsokat, illetve megállapítottuk a hozzájuk tartozó beütésszámot. A márciusi háttérmérés 16 órás volt, ezért az időre korrigálni kellett, hogy össze tudjuk vetni a minta 15 órás mérésével (itt: korrigált háttér =  $15 \cdot \text{háttér} / 16$ ). Természetesen ugyanígy korrigáltuk a háttércsúcsok beütésszámainak bizonytalanságát is.

Az összes beütésszámot egy energiára vonatkozóan a minta beütésszámának és a korrigált háttér megfelelő energiájú beütésszámának különbségeként kaptuk. Ezt a minta mérésidejével elosztva az óránkénti beütések számát kaptuk ( $I$ ).

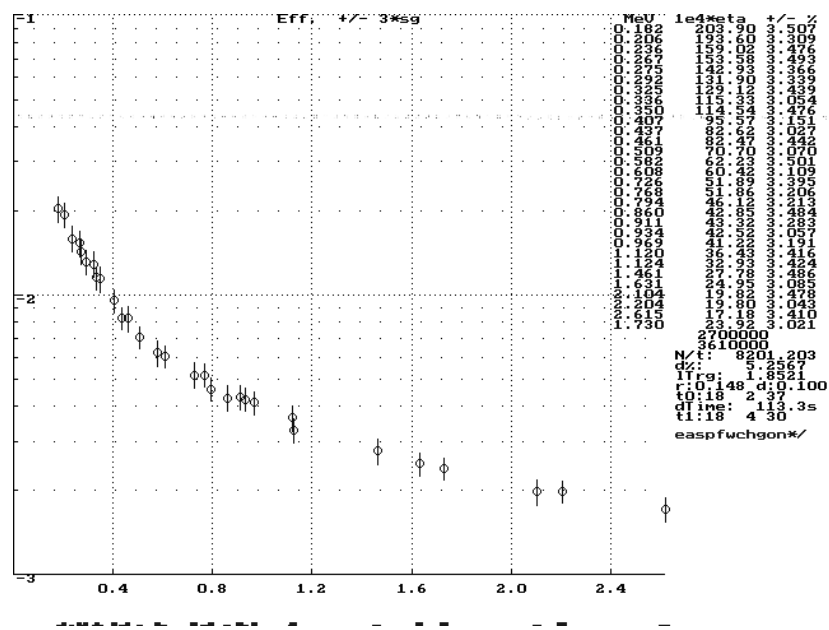
Ahhoz, hogy meg tudjuk mondani a mintában történt bomlások számát, szükségünk van még az adott bomlás csatornaarányára ( $\tau$ ) és a detektálás hatásfokára ( $\eta$ ). Előbbit izotóptáblázatokból vettük, utóbbit pedig a *hpge* programmal számítottuk ki. A programot *Deák Ferenc* írta tanszéki használatra, és ismert aktivitású földmintákkal hitelesítette.

#### *A hatásfok számítása*

A program indításakor meg kell adnunk a minta(tartó) méreteit (a magasságát, hengeres geometria esetén az alapkör sugarát), a minta elhelyezkedését a detektoron, valamint a vizsgálni kívánt energiaértékeket. A program véletlenszerű bomlásokat generál a mintában a vizsgált energiaértékeken, a geometriai elrendezésnek megfelelő térszögtarto-mányban. Figyelembe veszi a detektor adott energián vett érzékelési valószínűségét, valamint a minta önnyelését. Utóbbihoz meg kell adnunk a minta átlagos „molekulasúlyát”, sűrűségét, és anyagi összetételét. Ezek alapján kiszámítja az adott energiájú foton átlagos szabad úthosszát, s ha az kisebb, mint a mintából kijutáshoz szükséges távolság (természetesen ez függ a bomlás helyétől), azt úgy tekinti,

mintha elnyelődött volna. A minták összetételét ismert elemzések átlagával közelítettük, minden minta esetén ugyanazt használtuk.

A program a kisebb hatásfokkal detektált energiákon több bomlást generál, hogy hasonló százalékos hibájú hatásfok-adatokat kapjunk.



IV.3. ábra. A hpge hatásfok-számító program működés közben

Az általunk vizsgált összetevők csak kis koncentrációban fordulnak elő mintáinkban, nem módosítják az átlagrendszámot. (Az eredmények szerint a legnagyobb a  $^{40}\text{K}$  koncentrációja, de ne feledjük, hogy ez a természetben az összes K-nak mindössze 0,0119%-a!)

A programmal az egyes energiákhoz tartozó hatásfokokat fájlba írhatjuk (.eff), amely tartalmazza a hatásfok bizonytalanságát is. A programot addig futtattuk, míg a hatásfok bizonytalansága 2% alá csökkent. Ez egy 120 MHz-es Pentium gépen 25—30 percet vett igénybe, mikor a maximálisan egyszerre számítható 30 energiaértékkel dolgozott.

*Az aktivitások kiszámítása*

Az egyes elemek adott állapotukban nem csak egy módon bomolhatnak el. A lehetséges bomlási módok mindegyikéhez tartozik valamekkora valószínűség; természetesen ezen valószínűségek összege 1-et ad. Azt, hogy egy radioaktív izotóp mekkora valószínűséggel bomlik egy bizonyos módon, csatornaaránynak nevezzük. Ezeket a számokat izotóptáblázatokban találhatjuk meg, mi a *DK* program és az *Environmental Radiation Measurements (1976. dec.)* című kiadvány adatait használtuk.

Ezek után táblázatba rendezhetjük az összegyűlt adatokat, és kiszámíthatjuk a mintában adott energián — így az adott izotóp esetén — végbement bomlások számát. Egy radioaktív izotóp mintabeli koncentrációjára következtethetünk abból, hogy bizonyos idő alatt hány bomlást produkál. Az időegységre eső bomlások számát pedig a következőképpen kapjuk:

$$A = \frac{I}{\eta \cdot \tau},$$

ahol  $A$  az időegység alatt ténylegesen elbomló magok száma,  $I$  a bomlások száma,  $\eta$  a detektálás hatásfoka,  $\tau$  pedig a bomlási mód (egy adott energiájú gamma-bomlás csatornaaránya).

A bomlások bizonytalanságát az óránkénti beütések és a hatásfok bizonytalanságát figyelembe véve a következő formula alapján végeztük:

$$\sigma_A = \sum_i \left( \frac{\partial A}{\partial y_i} \right)^2 \cdot \sigma_{y_i}^2.$$

Először az energia szerinti növekvő sorrendben kaptuk az eredményeket, majd az izotópok szerint csoportosítottuk őket. Egyes izotópok esetén több spektrumvonalból is kiszámíthattuk a bomlások számát. Ezeknél súlyozott átlagát vettük az egyes aktivitásértékeknek:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\sigma_{A_i}^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{A_i}^2}},$$

az átlagos szórás pedig:

$$\sigma_{\bar{A}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{A_i}^2}},$$

ahol az összegzés az adott izotóp spektrumvonalainak számára történik.

Az  $^{228}\text{Ac}$  esetében általában nyolc spektrumvonal eredményéből átlagoltunk, a  $^{214}\text{Bi}$  nyolc észlelt vonalából hatot vettünk számításba, mert a többi nagyon bizonytalan volt a háttér, vagy a kis csatornaarány miatt. Az  $^{214}\text{Pb}$  és a  $^{208}\text{Tl}$  esetében 2—3, utóbbinál néha 4 értékelhető vonalat kaptunk. A K-40, a Bi-212 és a Ra-226 esetén egyetlen spektrumvonalat találtunk.

Az így kapott eredményt a minta tömegével elosztva a tömegegységben időegység alatt bekövetkező bomlások számát kapjuk.

Ezek után az izotóp felezési idejének ismeretében kiszámíthatjuk a tömegegységben jelen lévő izotópatomok számát ( $N$ ).

$$N = \frac{A \cdot T_{1/2}}{\ln 2}$$

Meghatározhatjuk a  $^{40}\text{K}$  koncentrációját a mintákban, valamint a radioaktív egyensúly állapotát feltételezve az  $^{228}\text{Ac}$  mennyiségéből a mintában jelen lévő  $^{232}\text{Th}$ , a  $^{226}\text{Ra}$  mennyiségéből a  $^{238}\text{U}$  adhatunk becslést. Csak becslést, ugyanis a bomlási sorokban — különösen az  $^{238}\text{U}$  bomlási sorában — a kiindulási és a vizsgált leányelemek között található szempontunkból hosszú felezési idejű (pl.  $^{228}\text{Ra}$  — 5,75 év;  $^{234}\text{U}$  —  $2,48 \cdot 10^5$  év,  $^{226}\text{Ra}$  — 1602 év) izotóp is, amelyeknek van idejük nagyobb távolságra eljutni a keletkezés helyétől.

### *A kiértékelés problémái*

A spektrumvonalak azonosítása némi nehézséget okozott az alsó energiatartományban fellépő 3—4, esetleg 5 keV-os csúszások miatt (általában az irodalmi adatoknál kisebbeket kaptunk). Ám a kalibráló csúcsoktól visszafelé követve meg lehetett találni a spektrumvonalak- hoz tartozó izotópokat.

A legtöbb probléma a háttérmérések figyelembe vételéből adódott, gyakran a minta kevesebb beütést szolgáltatott, mint amennyit a háttér a korrigálás után: ilyenkor negatív aktivitásértékeket kaptunk. Ezeket a további számításokban nem vettük figyelembe. Gyakran egy-egy izotóp néhány vonalára szembeszökően kiemelkedő értéket kaptunk: ezeket általában a bomlás nagyon kis valószínűsége — kis csatornaaránya — okozta. A több vonalra való átlagolásakor a túlfelül kicsi vagy túlfelül nagy értékeket kihagytuk. Tovább növeli a végeredmények pontosságát a hatásfok-számító program eredményeinek eredendő, kb. 10%-os bizonytalansága.

A következő táblázatokban a kiértékelés egyes lépéseit követhetjük nyomon.

## A csúcskeresés és Gauss-görbe-illesztés eredményei a márciusi E jelű talajminta gamma-spektruma esetén

energia (keV)	terület	s (ter)	% ter	háttér	s (ht)	korrigált háttér	s (kht.)	%kht .	net. ter./idő	beü./óra	s(beü./óra)	%beü./ óra	hatásfok	%h.f.	csatorna- arány	boml/óra	s(boml./ óra)	+-%a	elem
182.44	1333	139	0,10	488	91	457,50	85,31	0,19	0,0162	58,37	12,47	0,21	0,0371	1,370	0,0328	48024	10281	0,214	Ra-226
206.01	622	135	0,22						0,0115	41,47	9,00	0,22	0,0331	1,430	0,04	31310	6810	0,218	Ac-228
235.59	7717	179	0,02	322	89	3f01,88	83,44	0,28	0,1373	494,34	137,12	0,28	0,0295	1,408	0,449	37342	10371	0,278	Pb-212
267.25	531	89	0,17						0,0098	35,40	5,93	0,17	0,0256	1,367	0,04	34547	5810	0,168	Ac-228
274.60	301	60	0,20						0,0056	20,07	4,00	0,20	0,0253	1,444	0,024	33079	6611	0,200	Tl-208
292.47	1432	108	0,08						0,0265	95,47	7,20	0,08	0,0235	1,385	0,179	22664	1738	0,077	Pb-214
325.38	475	104	0,22						0,0088	31,67	6,93	0,22	0,0209	1,388	0,03	50539	11088	0,219	Ac-228
335.85	1525	106	0,07						0,0282	101,67	7,07	0,07	0,0203	1,394	0,11	45431	3221	0,071	Ac-228
349.55	2506	111	0,04	203	62	190,31	58,13	0,31	0,0429	154,38	47,64	0,31	0,0193	1,407	0,35	22866	7064	0,309	Pb-214
407.43	217	83	0,38						0,0040	14,47	5,53	0,38	0,0158	1,373	0,02	45636	17467	0,383	Ac-228
461.28	431	76	0,18						0,0080	28,73	5,07	0,18	0,0138	1,390	0,04	51898	9180	0,177	Ac-228
509.27	1616	93	0,06	1144	75	1072,50	70,31	0,07	0,0101	36,23	3,16	0,09	0,0122	1,385				0,088	annihiláció
581.84	2262	94	0,04	198	54	185,63	50,63	0,27	0,0385	138,43	38,19	0,28	0,0108	1,396	0,305	42044	11614	0,276	Tl-208
608.04	1909	89	0,05	267	56	250,31	52,50	0,21	0,0307	110,58	23,76	0,21	0,0105	1,391	0,43	24498	5275	0,215	Bi-214
726.34	476	66	0,14						0,0088	31,73	4,40	0,14	0,0087	1,384	0,071	51120	7123	0,139	Bi-212
767.59	201	67	0,33						0,0037	13,40	4,47	0,33	0,0082	1,431	0,049	33287	11106	0,334	Bi-214
794.23	288	60	0,21						0,0053	19,20	4,00	0,21	0,0082	1,378	0,04	58855	12288	0,209	Ac-228
860.07	288	61	0,21						0,0053	19,20	4,07	0,21	0,0075	1,404	0,046	55391	11758	0,212	Tl-208
910.72	1540	82	0,05	219	44	205,31	41,25	0,20	0,0247	88,98	18,49	0,21	0,0070	1,442	0,29	43960	9159	0,208	Ac-228
933.72	84	50	0,60						0,0016	5,60	3,33	0,60	0,0070	1,368	0,031	25741	15326	0,595	Bi-214
968.53	720	67	0,09						0,0133	48,00	4,47	0,09	0,0066	1,415	0,17	42556	4006	0,094	Ac-228
1120.21	570	61	0,11	288	57	270,00	53,44	0,20	0,0056	20,00	4,50	0,22	0,0057	1,389	0,142	24913	5616	0,225	Bi-214
1237.96	226	58	0,26	117	42	109,69	39,38	0,36	0,0022	7,75	3,42	0,44	0,0051	1,378	0,059	25616	11309	0,441	Bi-214
1461.06	7119	123	0,02	2167	88	2031,56	82,50	0,04	0,0942	339,16	14,97	0,04	0,0045	1,447	0,107	712300	33081	0,046	K-40
1591.02	369	44	0,12	175	31	164,06	29,06	0,18	0,0038	13,66	2,92	0,21	0,0041	1,395				0,214	második kiszökési csúcs
1630.94	85	31	0,36						0,0016	5,67	2,07	0,36	0,0041	1,447	0,019	72978	26636	0,365	Ac-228
1730.16	112	26	0,23	75	22	70,31	20,63	0,29	0,0008	2,78	1,04	0,37	0,0038	1,434	0,03	24419	9141	0,374	Bi-214
1764.89	452	37	0,08	260	29	243,75	27,19	0,11	0,0039	13,88	1,92	0,14	0,0039	1,451	0,156	23086	3212	0,139	Bi-214
1847.92	98	26	0,27						0,0018	6,53	1,73	0,27	0,0037	1,448	0,022	79741	21187	0,266	Bi-214
2103.98	194	31	0,16						0,0036	12,93	2,07	0,16	0,0033	1,090				0,160	első kiszökési csúcs (2614,6 keV)
2119.02	132	29	0,22						0,0024	8,80	1,93	0,22	0,0033	1,122	0,012	224603	49409	0,220	Bi-214
2204.03	174	27	0,16	161	26	150,94	24,38	0,16	0,0004	1,54	0,34	0,22	0,0031	1,040	0,05	9827	2203	0,224	Bi-214
2614.94	1245	51	0,04	563	35	527,81	32,81	0,06	0,0133	47,81	3,56	0,07	0,0027	1,091	0,359	49389	3716	0,075	Tl-208

## Az egyes izotópok spektrumvonalai eredményeinek átlagolása

energia(keV)	terület	beütés/óra	$\sigma$ (beütés/óra)	hatásfok	csatornaarány	boml/óra	$\sigma$ (boml./óra)	elem
182,4	1333	58,37	12,47	0,0371	0,0328	48 024	10 281	Ra-226
						<b>48 024</b>	<b>10 281</b>	<b>Ra-226</b>
292.47	1432	95,47	7,2	0,0235	0,179	22 664	1738	Pb-214
349.55	2506	154,38	47,64	0,0193	0,35	22 866	7064	Pb-214
						<b>22 682</b>	<b>1688</b>	<b>Pb-214</b>
1764.89	452	13,88	1,92	0,0039	0,156	23 086	3212	Bi-214
608.04	1909	110,58	23,76	0,0105	0,43	24 498	5275	Bi-214
1120.21	570	20	4,5	0,0057	0,142	24 913	5616	Bi-214
1730.16	112	2,78	1,04	0,0038	0,03	24 419	9141	Bi-214
767.59	201	13,4	4,47	0,0082	0,049	33 287	11106	Bi-214
1237.96	226	7,75	3,42	0,0051	0,059	25 616	11309	Bi-214
933.72	84	5,6	3,33	0,007	0,031	25 741	15326	Bi-214
1847.92	98	6,53	1,73	0,0037	0,022	79 741	21187	Bi-214
2119.02	132	8,8	1,93	0,0033	0,012	224 603	49409	Bi-214
						<b>29 726</b>	<b>2494</b>	<b>Bi-214</b>
335.85	1525	101,67	7,07	0,0203	0,11	45 431	3221	Ac-228
968.53	720	48	4,47	0,0066	0,17	42 556	4006	Ac-228
267.25	531	35,4	5,93	0,0256	0,04	34 547	5810	Ac-228
206.01	622	41,47	9	0,0331	0,04	31 310	6810	Ac-228
910.72	1540	88,98	18,49	0,007	0,29	43 960	9159	Ac-228
461.28	431	28,73	5,07	0,0138	0,04	51 898	9180	Ac-228
325.38	475	31,67	6,93	0,0209	0,03	50 539	11088	Ac-228
794.23	288	19,2	4	0,0082	0,04	58 855	12288	Ac-228
407.43	217	14,47	5,53	0,0158	0,02	45 636	17467	Ac-228
1630.94	85	5,67	2,07	0,0041	0,019	72 978	26636	Ac-228
						<b>43 172</b>	<b>1988</b>	<b>Ac-228</b>
235.59	7717	494,34	137,12	0,0295	0,449	37 342	10371	Pb-212
						<b>37 342</b>	<b>10371</b>	<b>Pb-212</b>
726.34	476	31,73	4,4	0,0087	0,071	51 120	7123	Bi-212
						<b>51 120</b>	<b>7123</b>	<b>Bi-212</b>
2614.94	1245	47,81	3,56	0,0027	0,359	49 389	3716	Tl-208
274.60	301	20,07	4	0,0253	0,024	33 079	6611	Tl-208
581.84	2262	138,43	38,19	0,0108	0,305	42 044	11614	Tl-208
860.07	288	19,2	4,07	0,0075	0,046	55 391	11758	Tl-208
						<b>45 872</b>	<b>3015</b>	<b>Tl-208</b>
1461.06	7119	339,16	14,97	0,0045	0,107	712 300	33081	K-40
						<b>712 300</b>	<b>33081</b>	<b>K-40</b>

A kiértékelt izotópok aktivitás-koncentrációi  
a Szűcs-kút környékén vett 4 talajmintában

hely	elem	idő	tömeg (g)	aktivitás (bomlás/óra)	+-	Bq/kg	+-
<b>Szűcs-kút</b>	Ac-228	okt.	191,12	51 087	2 588	<b>74,25</b>	<b>3,76</b>
		febr.	225,96	63 799	2 447	<b>78,43</b>	<b>3,01</b>
		márc. 0,5 m	174,68	46 665	2 712	<b>74,21</b>	<b>4,31</b>
		márc. 1 m	160,16	43 172	1 988	<b>74,88</b>	<b>3,45</b>
<b>4k</b>	Bi-212	okt.	191,12	57 498	7 011	<b>83,57</b>	<b>10,19</b>
		febr.	225,96	88 685	11 990	<b>109,02</b>	<b>14,74</b>
		márc. 0,5 m	174,68	58 330	8 513	<b>92,76</b>	<b>13,54</b>
		márc. 1 m	160,16	51 120	7 123	<b>88,66</b>	<b>12,35</b>
<b>4k</b>	Pb-212	okt.	191,12	35 922	2 119	<b>52,21</b>	<b>3,08</b>
		febr.	225,96	53 777	12 892	<b>66,11</b>	<b>15,85</b>
		márc. 0,5 m	174,68	38 793	10 781	<b>61,69</b>	<b>17,14</b>
		márc. 1 m	160,16	37 342	10 371	<b>64,77</b>	<b>17,99</b>
<b>4k</b>	Tl-208	okt.	191,12	52 454	2 869	<b>76,24</b>	<b>4,17</b>
		febr.	225,96	68 110	2 617	<b>83,73</b>	<b>3,22</b>
		márc. 0,5 m	174,68	43 309	2 905	<b>68,87</b>	<b>4,62</b>
		márc. 1 m	160,16	45 872	3 015	<b>79,56</b>	<b>5,23</b>
<b>4k+2</b>	Ra-226	okt.	191,12	64 165	9 893	<b>93,26</b>	<b>14,38</b>
		febr.	225,96	72 761	16 956	<b>89,45</b>	<b>20,84</b>
		márc. 0,5 m	174,68	38 144	8 555	<b>60,66</b>	<b>13,60</b>
		márc. 1 m	130,16	48 024	10 281	<b>102,49</b>	<b>21,94</b>
<b>4k+2</b>	Pb-214	okt.	191,12	26 159	926	<b>38,02</b>	<b>1,35</b>
		febr.	225,96	39 112	2 835	<b>48,08</b>	<b>3,49</b>
		márc. 0,5 m	174,68	24 428	2 136	<b>38,85</b>	<b>3,40</b>
		márc. 1 m	160,16	22 682	1 688	<b>39,34</b>	<b>2,93</b>
<b>4k+2</b>	Bi-214	okt.	191,12	30 983	3 002	<b>45,03</b>	<b>4,36</b>
		febr.	225,96	33 333	3 002	<b>40,98</b>	<b>3,69</b>
		márc. 0,5 m	174,68	20 074	2 137	<b>31,92</b>	<b>3,40</b>
		márc. 1 m	160,16	29 726	2 494	<b>51,56</b>	<b>4,33</b>
<b>kálium</b>	K-40	okt.	191,12	919 914	41 571	<b>1337,02</b>	<b>60,42</b>
		febr.	225,96	952 856	41 622	<b>1171,37</b>	<b>51,17</b>
		márc. 0,5 m	174,68	864 016	38 691	<b>1373,97</b>	<b>61,53</b>
		márc. 1 m	160,16	712 300	33 081	<b>1235,40</b>	<b>57,37</b>

A tömegegységre vonatkozó aktivitásértékek (a fajlagos aktivitás) meghatározása után a bomlási sorok kezdőeleméhez legközelebbi leányelemek aktivitásából — feltételezve az egyensúly fennálltát — becslést adhatunk a bomlási sor kezdőelemének koncentrációjára.

$$N_{\text{anyaelem}} = N_{\text{leányelem}} \cdot \frac{T_{\frac{1}{2}}^{\text{anyaelem}}}{\ln 2}$$

Azonban nem szabad elfelejtenünk, hogy az általunk vizsgált területek nem zárt rendszerek, így eredményeink erősen közelítőek.

## V. Eredmények

### V. 1. Vízminták

Az 1998. október 27-i vízminták eredményei:

a mintavétel helye	radon-koncentráció (Bq/l)	+ -
Felső-Csepegő-forrás	127	6
Felső-Csepegő-forrás	119	6
Alsó-Csepegő-forrás	122	6
Alsó-Csepegő-forrás	135	7
Szűcs-kút	274	11
kerti csap vize	0,09	0,01
Angelika-forrás	190	8
Angelika-forrás	194	9
falubeli ivóvíz-kút	3,34	0,38
falubeli ivóvíz-kút	3,43	0,39

*V.1. táblázat. Az októberi vízminták eredményei*

A Szűcs-kút a korábbi tapasztalatoknak megfelelően valóban kiugróan magas koncentrációt mutat. Az Angelika-forrás radon-aktivitása is nagy. A Csepegő-források radon-koncentrációja is meglehetősen nagy, 100 Bq/l feletti. A kerti csap vize gyakorlatilag radonmentes, valószínűleg esővíztárolóból jön. A falubeli ivóvízkutak radon-tartalma alacsony, ami annak tudható be, hogy nem helyi fakadású vizekből, hanem a kápolnásnyéki víztárolóból adják a vizet.

Az 1999. február 12-i vízminták:

a mintavétel helye	radon-koncentráció (Bq/l)	+ -
Szűcs-kút	279	12
ásott kút, mély	52	4
ásott kút, felszínközeli	52	4

*V.2. táblázat. A februári vízminták eredményei*

A Szűcs-kút aktivitása hibán belül megegyezik az ősszel mért értékkel. Az ásott kút különböző mélységben vett mintái szerint a radon-koncentráció gradiense nulla a kút vizében. Ennek oka az lehet, hogy a kút be volt fedve, a rendszerből kicsi a radon-eltávozás.

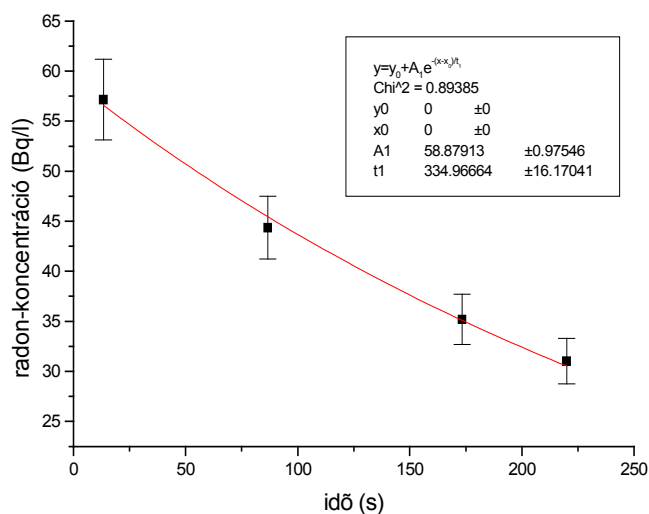
Az 1999. március 26-i vízminták:

a mintavétel helye	radon-koncentráció (Bq/l)	+/-
Barlang-kút, kifolyás	217	11
Barlang-kút, belső pangás	303	14
Alsó-Csepegő-forrás	97	6
Felső-Csepegő-forrás	131	8
Angelika-forrás	160	9
vízér az Angelika-forrás felett	60	4
Szücs-kút	176	10
időszakos forrás a Szücs-kút felett	29	2
a patak vize a Szücs-kúttól 2 m-re	57	4
13 m-re	44	3
26 m-re	35	3
33 m-re	31	2

*V.3. táblázat. A márciusi vízminták eredményei*

Ebben a mérési sorozatban figyeltünk fel először arra a jelenségre, hogy a forrásvíz kifolyásánál felgyülemelő pangó víz radon-koncentrációja nagyobb a kifolyó forrásvizénél. A Barlang-kútnál vett minták azt mutatták, hogy a pangó víz radon-aktivitása kb. negyven százalékkal nagyobb, mint az eredőé. Az Angelika-, az Alsó-Csepegő- és a Szücs-kút esetében visszaesést tapasztaltunk; legjelentősebb a Szücs-kút esetében, amelynél 100 Bq/l aktivitás-csökkenést találtunk az őszi eredményekhez képest. A téli nagy mennyiségű hó olvadása és a csapadékos tavaszi időjárás hatására a Szücs-kút felett 10—15 méterre egy újabb kifolyás (a továbbiakban *Szücs-forrás*) fakadt, ennek aktivitása jóval elmarad a

kútétól; valószínűleg az itt kifolyó víz nem járta át az alsóbb talajrétegeket, illetve nem volt módja (és ideje) igazán összekeveredni/érintkezni a nagyobb aktivitású talajvízzel. Mindenesetre így is észlelhető benne a környéken jellemző radon-tartalom. Az Angelika-forrás feletti vízért követve a közeli fennsíkon megtaláltuk az időszakos vízfolyás eredetét: egy kis tavacskát (a mellékelt térképeken szaggatott vonallal jelölve). Ennek radon-aktivitása nagyobb volt, mint a Szücs-forrás vizéé; minden bizonnyal több ideje volt a medencéjét képező gránitból—gránitmurvából magába fogadni radont. A Szücs-kútból eredő patak vizébe a Szücs-forrás vize belefolyik, így annak radon-koncentrációját hígítja. Csatlakozása már megtörtént a 2 m-es mérőpont előtt. Az egyre távolabb vett minták egyre kisebb aktivitást mutattak, ami a radon kipárolgásával magyarázható. A patak vize kb. 15 cm/s volt, aminek segítségével készítettünk egy idő—radon-koncentráció grafikont, amire exponenciális függvényt illesztettünk( ábra). Az paraméterek illesztésénél feltételeztük, hogy a kezdeti Ra-koncentráció 0 ( $y_0=0$ ), a 0 távolságra extrapolált érték 58,8 Bq/l, amiben mind a kicsobogásból, mind a keveredésből adódó csökkenés benne van. A koncentráció csökkenésének felezési ideje kb. 8 percnek adódott ( $t_1/\ln 2 = 483,25 \text{ s} \approx 8 \text{ perc}$ ), folyása közben a víz csörgedezett és kanyargott.



*V.1. ábra.*

*A radon-koncentráció csökkenése a patak vizében,  
az eltelt idő függvényében*

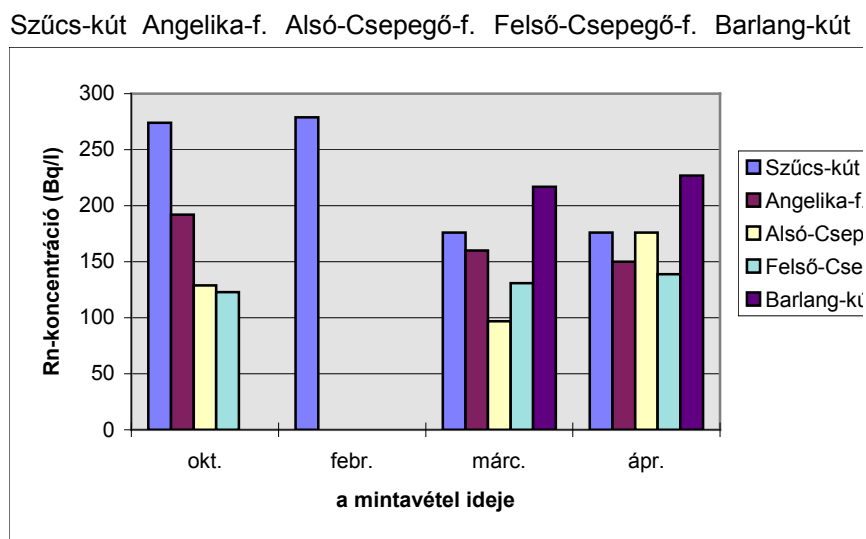
Az 1999. április 25-i vízminták:

<b>a mintavétel helye</b>	<b>Ra-koncentráció (Bq/l)</b>	<b>radon-koncentráció (Bq/l)</b>	<b>+/-</b>
Barlang-kút, kifolyás	2,3	227	11
Barlang-kút, belső pangás	2,2	261	12
Barlang-kút, külső pangás	2,94	315*	13
a Hurka-patak vize	0,12	4	1
Angelika-forrás, kifolyás	1,13	150	8
Angelika-forrás, pangás	1,06	162	8
Alsó-Csepegő-forrás	1,6	168	9
Felső-Csepegő-forrás	0,05	139	8
Szücs-kút		176	9

*V.4. táblázat. Az áprilisi vízminták eredményei*

A \*-gal jelölt korrigált érték, ugyanis a mintavételkor véletlenül 2 cm<sup>3</sup>-el több víz került a küvettába. Most is a múlt havihoz hasonlóan nagyobb aktivitás-koncentrációt találtunk a pangó vízben, sőt a második víztálca további aktivitás-növekedést mutatott. A jelenség („tálca-effektus”) egyik lehetséges magyarázata a víz esetleges Ra-tartalmának ülepedése, ami a Rn dúsulását okozhatja. Ezért megmértük a minták Ra-koncentrációját is. Ugyanez a jelenség az Angelika-forrás mintáinál nem jelentkezik meggyőzően. A Szücs-kút aktivitása megegyezik a márciusi értékkel, azaz a tavaszi vízbő időszak valóban jelentősen csökkenti Rn-koncentrációját. Az Alsó-Csepegő-forrás Rn-koncentrációja az őszi

értéknél is magasabbnak adódott. A következő ábrán áttekinthetjük az egyes forrásvizek radon-koncentrációjának alakulását:



V.2. ábra. A forrásvizek Rn-koncentrációjának időbeni változása

## V. 2. Talajminták

A talajminták eredményeit összegezve külön listáztuk az urán- és tórium-családot a keletkezés sorrendjében. A családokon belül az egymást követő elemek aktivitásainak viszonyából következtethetünk az egyes izotópok geokémiai migrációjának mértékére.

1998. október 27., A talajminta, a Felső-Csepegő-forrás mellől:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	65 942	10 357	99,25	15,59
Pb-214	32 582	1215	49,04	1,83
Bi-214	28 584	2076	43,02	3,12
Ac -228	47 262	1 526	71,14	2,30
Pb-212	45 878	7334	69,05	11,04
Bi-212	54 870	6330	82,59	9,53
Tl-208	49 868	3069	75,06	4,62
K-40	928 321	34823	1397,27	52,41

*V.5.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása az októberi A jelű talajmintában*

Az urán-család esetén nagy elem-elvándorlásra utal a Ra és az Pb közti nagy aktivitás-különbség. Ebben valószínűleg a Rn eltávozása a döntő mozzanat. A Th-családnál már kisebb a különbség, a migráció nem jelentős (a viszonylag rövid felezési idejű toron —  $T_{1/2} \approx 1$  perc — nem juthat messzire).

	Koncentráció (g/tonna)	+ -
$^{238}\text{U}$	8,05	1,26
$^{232}\text{Th}$	17,60	0,57
$^{40}\text{K}$	5,43	0,20

*V.5.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk az októberi A jelű talajmintában*

Ezek az értékek nagyon jól illenek a szakirodalom gránitra vonatkozó adataihoz (U: 2—7 g/tonna, Th: 8—40 g/tonna,  $^{40}\text{K}$ : 2,3—4, a MÁFI-ban kapott információim szerint a Velencei-hegységben a  $^{40}\text{K}$  jelenléte általában 4,5 g/tonna).

1998. október 27., B talajminta, a Szűcs-kút mellől:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	64 165	9 893	93,26	14,38
Pb-214	26 159	926	38,02	1,35
Bi-214	30 983	3 002	45,03	4,36
Ac-228	51 087	2 588	74,25	3,76
Pb-212	35 922	2 119	52,21	3,08
Bi-212	57 498	7 011	83,57	10,19
Tl-208	52 454	2 869	76,24	4,17

K-40	919 914	41 571	1337,02	60,42
------	---------	--------	---------	-------

V.6.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása

az októberi B jelű talajmintában

Az előző mintához hasonló mértékű aktivitás-csökkenést láthatunk az urán-sornál, a tórium-sor itt is nagyjából egyensúlyt mutat.

	koncentráció (g/tonna)	+ -
<sup>238</sup> U	7,56	1,17
<sup>232</sup> Th	18,39	0,93
<sup>40</sup> K	5,19	0,23

V.6.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk

az októberi B jelű talajmintában

1999.február 12., a Szücs-kút mellől:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	72 761	16 956	89,45	20,84
Pb-214	39 112	2 835	48,08	3,49
Bi-214	33 333	3 002	40,98	3,69
Ac-228	63 799	2 447	78,43	3,01
Pb-212	53 777	12 892	66,11	15,85
Bi-212	88 685	11 990	109,02	14,74
Tl-208	68 110	2 617	83,73	3,22
K-40	952 856	41 622	1171,37	51,17

V.7.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása

a februári A jelű talajmintában

	koncentráció (g/tonna)	+ -
<sup>238</sup> U	7,25	1,69

$^{232}\text{Th}$	19,4	0,75
$^{40}\text{K}$	4,55	0,20

V.7.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk a februári A jelű talajmintában

Az eredmények nagyon pontosan megegyeznek az ősszel a Szűcskútnál vett mintáéival.

1999. március 26., A talajminta, a Barlang-kút közeléből, fél méter mélységből:

elem	bomlás/óra	+-	aktivitás(Bq/kg)	+-
Ra-226	7959	2011	30,10	7,61
Pb-214	9 213	1 381	34,84	5,22
Bi-214	9 803	1 129	37,07	4,27
Ac-228	15 356	1 605	58,07	6,07
Pb-212	10 013	2 835	37,87	10,72
Bi-212	20 475	8 078	77,43	30,55
Tl-208	16 181	1 297	61,19	4,91
K-40	126 240	5 906	477,42	22,34

V.8.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása a márciusi A jelű talajmintában

Érdekes, hogy az eddigiektől eltérően az urán-sor egyre távolabbi tagjainak koncentrációja növekszik, ami esetleg összefüggésben lehet a Barlang-kút magas aktivitásával és tálca-effektusával. A mintavétel helye, a Hurka-patak völgye nagyon nedves volt, szinte mocsaras.

	koncentráció (g/tonna)	+-
--	------------------------	----

$^{238}\text{U}$	2,44	0,62
$^{232}\text{Th}$	14,38	1,50
$^{40}\text{K}$	1,86	0,09

V.8.—*b* táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk  
a márciusi A jelű talajmintában

Az urán és a kálium koncentrációja nagyon alacsony, a tóriumé nem mutat anomáliát.

1999. március, B minta, a Felső-Csöpögő-forrás mellől, 0,5 m mélységből:

elem	bojlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/óra)	+ -
Ra-226	13 742	3 723	46,93	12,72
Pb-214	12 660	1 935	43,24	6,61
Bi-214	10 621	1 210	36,28	4,13
Ac-228	13 498	2 118	46,10	7,23
Pb-212	13 367	3 783	45,65	12,92
Bi-212	< k. h.		< k. h.	
Tl-208	13 519	1 165	46,17	3,98
K-40	369 846	18 445	1263,19	63,00

V.9.—*a* táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása  
a márciusi B jelű talajmintában

A két bojlási sor mindegyike közel egyensúlyt mutat.

	koncentráció (g/tonna)	+ -
$^{238}\text{U}$	3,81	0,60
$^{232}\text{Th}$	11,41	1,79
$^{40}\text{K}$	4,91	0,25

V.9.—*b* táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk

*a márciusi B jelű talajmintában*

Az U és a Th eredményei jóval kisebbek, mint az őszi mintavétel alkalmával.

1999. március 26., C talajminta, az Angelika-forrás mellől:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	34 823	7 629	83,39	18,27
Pb-214	11 478	1 680	27,49	4,02
Bi-214	9267	1154	22,19	2,76
Ac-228	22 530	1 935	53,95	4,63
Pb-212	18802	5265	45,02	12,61
Bi-212	31814	6356	76,18	15,22
Tl-208	17607	1355	42,16	3,24
K-40	544 813	24 211	1 304,63	57,98

*V.10.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása a márciusi C jelű talajmintában*

Az U-sornál nagyfokú migrációra következtethetünk a Ra és az Pb közötti elemeknél.

	koncentráció (g/tonna)	+ -
<sup>238</sup> U	6,76	1,48
<sup>232</sup> Th	13,36	1,15
<sup>40</sup> K	5,07	0,23

*V.10.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk a márciusi C jelű talajmintában*

1999. márc. 26., D minta, a Szücs-kút közeléből, 0,5 m mélységből:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	38 144	8 555	60,66	13,60
Pb-214	24 428	2 136	38,85	3,40
Bi-214	20 074	2 137	31,92	3,40
Ac-228	46 665	2 712	74,21	4,31

Pb-212	38 793	10 781	61,69	17,14
Bi-212	58 330	8 513	92,76	13,54
Tl-208	43 309	2 905	68,87	4,62
K-40	864 016	38 691	1373,97	61,53

*V.11.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása a márciusi D jelű talajmintában*

Jelentősen változik itt is az uránsor aktivitása a Ra és az Pb között.

	koncentráció (g/tonna)	+ -
<sup>238</sup> U	4,92	1,10
<sup>232</sup> Th	18,38	1,07
<sup>40</sup> K	5,34	0,24

*V.11.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk a márciusi D jelű talajmintában*

1999. március 26., E talajminta, a Szücs-kút mellől, 1 m mélységből:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	48 024	10 281	102,49	21,94
Pb-214	22 682	1 688	39,34	2,93
Bi-214	29 726	2 494	51,56	4,33
Ac-228	43 172	1 988	74,88	3,45
Pb-212	37 342	10 371	64,77	17,99
Bi-212	51 120	7 123	88,66	12,35
Tl-208	45 872	3 015	79,56	5,23
K-40	712 300	33 081	1235,40	57,37

*V.12.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása a márciusi E jelű talajmintában*

Jelentősen magasabb a Ra aktivitása, mint fél méter mélyen. Innen minden bizonnyal igen sok Rn távozik. Az aktivitások változása itt sem jelentős a tórium-sorban.

	koncentráció (g/tonna)	+ -
$^{238}\text{U}$	6,75	1,45
$^{232}\text{Th}$	18,54	0,85
$^{40}\text{K}$	4,80	0,22

*V.12.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk a márciusi E jelű talajmintában*

1999. április 25., A talajminta, a Barlang-kút mellől:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	40 807	7 674	66,48	12,50
Pb-214	23 506	2 013	38,30	3,28
Bi-214	31 272	2 917	50,95	4,75
Ac-228	34 843	1 973	56,77	3,21
Pb-212	20 705	5 091	33,73	8,29
Bi-212	12 944	4 760	21,09	7,75
Tl-208	28 804	1 537	46,93	2,50
K-40	438 215	20 691	713,94	33,71

*V.13.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása az áprilisi A jelű talajmintában*

	koncentráció (g/tonna)	+ -
--	------------------------	-----

$^{238}\text{U}$	5,39	1,01
$^{232}\text{Th}$	14,06	0,80
$^{40}\text{K}$	2,77	0,13

V.13.—*b* táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk az áprilisi A jelű talajmintában

A kálium mennyisége a múlt havi Barlag-kúthoz közeli mintához hasonlóan alacsony az átlagshoz viszonyítva.

1999. április 25., B talajminta, a Barlang-kúttól D-re 200 méterre:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	25 231	4 804	51,50	9,80
Pb-214	15 021	1 656	30,66	3,38
Bi-214	14 913	1 499	30,44	3,06
Ac-228	24 570	1 557	50,15	3,18
Pb-212	17 447	4 292	35,61	8,76
Bi-212	< k. h.		< k. h.	
Tl-208	15 105	933	30,83	1,90
K-40	469 657	22 047	958,56	45,00

V.14.—*a* táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása az áprilisi B jelű talajmintában

	koncentráció (g/tonna)	+ -
$^{238}\text{U}$	4,18	0,80
$^{232}\text{Th}$	12,42	0,79
$^{40}\text{K}$	3,72	0,18

V.14.—*b* táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk

*az áprilisi B jelű talajmintában*

A Barlang-kút környékére jellemzően a kálium koncentrációja itt is alacsonyabb a többi területénél, bár már közelít hozzájuk.

1999. április 25., C minta, az Angelika-forrás mellől:

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	16 250	3 281	79,89	16,13
Pb-214	11 659	1 331	57,32	6,54
Bi-214	14 892	1 488	73,22	7,32
Ac-228	20 366	1 366	100,13	6,72
Pb-212	12 563	3 154	61,76	15,51
Bi-212	2 388	1 011	11,74	4,97
Tl-208	10 489	893	51,57	4,39
K-40	265 200	13 120	1 303,83	64,50

*V.15.—a táblázat. Az fajlagos aktivitása az áprilisi C jelű talajmintában*

	koncentráció (g/tonna)	+ -
<sup>238</sup> U	6,48	1,31
<sup>232</sup> Th	24,8	1,66
<sup>40</sup> K	5,07	0,25

*V.15.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk az áprilisi C jelű talajmintában*

A márciusban az Angelika-forrás közelében vett talajmintához hasonló értékeket kaptunk az U és a K esetében, de a tórium koncentrációja jóval nagyobbak adódott, ami esetleg annak tudható be, hogy ez a minta egy kicsit távolabbról, egy gránittömb közvetlen közeléből való, ahol láthatók volt a közelmúltban lemállott gránittörmelék.

1999. április 25., D minta, a sukorói Ördög-hegyről

elem	bomlás/óra	+ -	aktivitás(Bq/kg)	+ -
Ra-226	37 749	6 842	73,52	13,33
Pb-214	17 201	1 277	33,50	2,49
Bi-214	19 667	1 911	38,30	3,72
Ac-228	27 867	1 083	54,27	2,11
Pb-212	20 029	4 884	39,01	9,51
Bi-212	17 105	5 832	33,31	11,36
Tl-208	22 736	1 659	44,28	3,23
K-40	591 470	26 280	1151,91	51,18

*V.16.—a táblázat. Az egyes izotópok fajlagos aktivitása az áprilisi D jelű talajmintában*

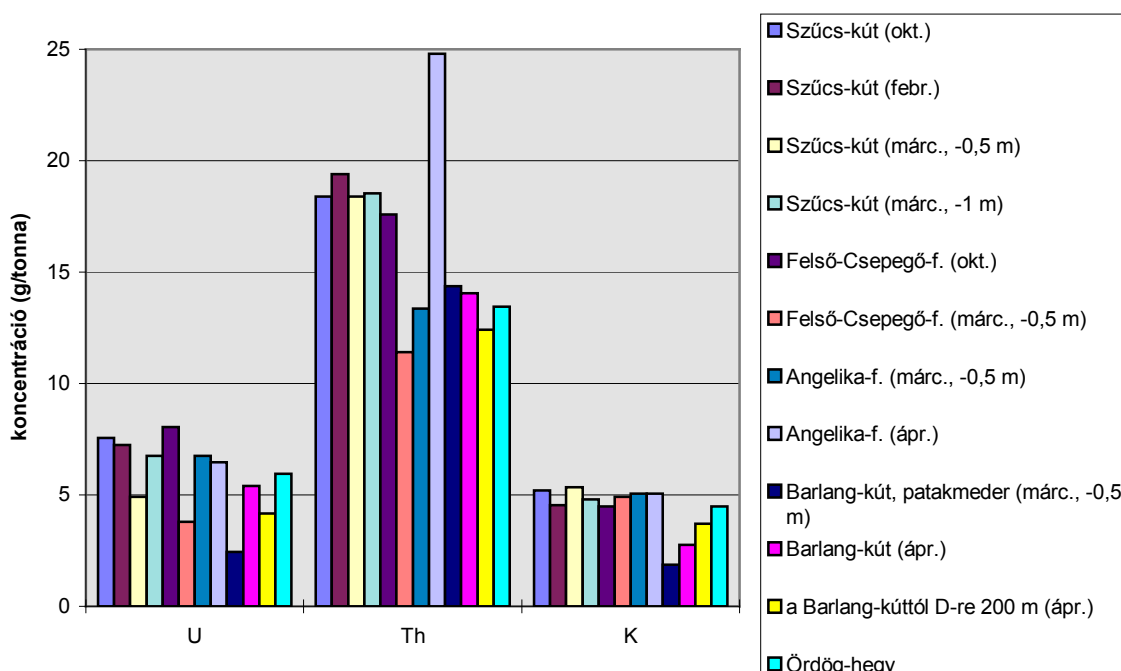
Az Ördög-hegyi minta is jól mutatja az általánosan tapasztalt mozgékonyágát a  $^{226}\text{Ra}$  és  $^{212}\text{Pb}$  közötti elemek mozgékonyágát az urán bomlási sorában.

	koncentráció (g/tonna)	+ -
$^{238}\text{U}$	5,96	1,08
$^{232}\text{Th}$	13,44	0,52
$^{40}\text{K}$	4,48	0,20

V.16.—b táblázat. Az (egyensúlyi) elemkoncentrációk az áprilisi D jelű talajmintában

Itt is az átlagosnak megfelelő koncentrációkat kaptuk.

A következő diagram az egyes mintákra kapott koncentrációkat foglalja össze.



V.3. ábra. A talajminták eredményeinek összesítése

A Szűcs-kútnál vett négy minta eredményei mind a három elemnél hasonlóak, csupán a márciusi fél méter mélyről származóénak kisebb jelentősen a Ra-koncentrációja (közvetve a számított U-koncentrációja).

A Felső-Csepegő-forrás mellől származó mintáknál már nagyobb különbség tapasztalható az U- és Th-gyakoriságban (de vegyük észre, hogy az U/Th arány közel állandó), míg a K előfordulása megegyező a két mintában.

Az Angelika-forrás áprilisi mintája mutatta a legnagyobb Th-koncentrációt, ami talán annak tudható be, hogy egy gránittömb közvetlen közeléből való. Itt az U- és K-eredmények igen jól egyeznek.

A Barlang-kút első mintájában feltűnően alacsony U-gyakoriságra következettünk a kis Ra-koncentrációból. Valószínűleg ennek az az oka, hogy a patakmederből, ahonnan a mintát vettük, az állandó vízfolyás folyamatosan elszállítja a rádiumot. Ez lehet a magyarázata az ugyancsak nagyon kis kálium-koncentrációnak. Erre mutat az is, hogy a Hurka-patak medrétől egyre távolabb vett mintákban egyre emelkedik a kálium gyakorisága. Az Ördög-hegy mintájának eredményei átlagosak.

## VI. Diszkusszió

Korábbi mérések alkalmával már kimutattak országos viszonylatban magas aktivitást a Velencei-hegység egyes forrásvizeiben (Angelika-forrás, Szűcs-kút).

Szakedolgozatomban teljesebb képet szerettem volna adni a hegység természetes vizeinek radon-koncentrációjáról, ezért több más, a területen található vízfolyás vizét megvizsgáltam. Így kerültek vizsgálat alá a Csöntör-hegyi források (Alsó- és Felső-Csepegő-forrás), valamint a hegység sukorói tömbjének legnyugatibb forrása, a Barlang-kút.

A falu ivóvízhálózatának vize nem mutatott számottavő aktivitást, ami annak tudható be, hogy a kápolnásnyéki víztárolóból érkezik, nem helyi víz táplálja. A falu egyik ásott kútjából (vizét nem isszák) vett vízminták kissé magas radon-koncentrációt mutattak.

A Szűcs-kút őszi és téli aktivitása most is igen magas értéket mutatott (270—280 Bq/l), de a tavaszra jelentősen visszaesett (176 Bq/l). Valószínűleg a csapadékos tél és tavasz vízmennyisége hígította fel ilyen mértékben. Érdekes, hogy ezt az évszakos ingadozást a Csöntör-hegyi források nem mutatták, és az Angelika-forrásnál is jóval enyhébben jelentkezett. Az Alsó-Csepegő-forrás viselkedése nagyon szeszélyes,

elképzelhető, hogy sajátos környezete okozza ezt: egy műút mellett található, jól körülépítve. A Barlang-kutat csak tavasszal vizsgáltuk, így ilyen szempontból nem ismerjük viselkedését.

Sajátos viselkedést tapasztaltunk azonban a Barlang-kút esetében a márciusi mintavétel alkalmával. A forrásvíz kifolyásánál vett víz aktivitás-koncentrációja kisebb volt, mint a forrás előtti természetes kőmedencében felgyülemelő, „pangó” vize. Az áprilisi mérési eredmények megerősítették ezt. Ugyanakkor az Angelika-forrásnál végzett hasonló vizsgálatok nem mutattak ki számottevő különbséget. A jelenséget okozhatja egyrészt a kőmedence gránitfalából a vízbe jutó radon, vagy a forrásvíz rádiumtartalmának ülepedése — koncentrálódása — a pangásban. Az áprilisi minták rádium-mérései valóban magas rádium-koncentrációt mutattak a Barlang-kút vizében, ami a második okot teszi valószínűbbé. Az Angelika-forrás rádiumtartalma a módszerünk kimutatási határa alatt van, ami magyarázhatja, hogy miért nem mutatható ki egyértelműen a koncentráció növekedése.

Megvizsgáltuk, hogy hogyan csökken a Szűcs-kút táplálta patak vizének radon-koncentrációja. A csökkenés jó közelítéssel exponenciális, a koncentráció „felezési idejére” 8 percet kaptunk.

A talajminták gamma-spektroszkópiás vizsgálatával meghatároztuk a talajmintákban az egyes radioizotópok aktivitás-koncentrációját, illetve a természetes radioaktív sorok anyaelemeinek koncentrációjára következtettünk. Az urán- és tórium-koncentrációkat — szekuláris egyensúlyt feltételezve — a  $^{226}\text{Ra}$  és a  $^{228}\text{Ac}$  fajlagos aktivitásából számítottuk ki.

Az urán- és tórium-tartalomra kapott eredményeink nagyon jól közelítik a geológiai szakirodalom hasonló talajokra vonatkozó adataival.

Az egyes sorokat vizsgálva azt állapítottuk meg, hogy az urán-sor elemeinek geokémiai migrációja jelentős, míg a tórium-sor meglehetősen stabil.

A kálium koncentrációjára kapott eredményeink ugyancsak nagy pontossággal megegyeznek az irodalmi adatokkal.

A Barlang-kút környékén vett mintáknál a kálium-koncentráció sajátos anomáliáját tapasztaltuk: a közeli Hurka-patak medrében nagyon alacsony  $^{40}\text{K}$ -előfordulást találtunk; a két, egyre távolabbi — és egyre magasabban fekvő — mintánál már növekedett a  $^{40}\text{K}$  aránya, de ezeknél is jelentősen kisebb volt, mint a hegység más területein vett mintáknál. Elképzelhető, hogy egy valaha jelentős, de mára már patakká szelídült vízfolyás oldotta ki a káliumot a környék talajából.

## IRODALOMJEGYZÉK

- DEME Sándor, *Félvezető detektorok magsugárzás mérésére*, Műszaki könyvkiadó, 1969.
- EGERER Frigyes — KERTÉSZ Pál, *Bevezetés a kőzetfizikába*, Akadémiai, 1993.
- FÜLÖP József, *Magyarország geológiája*, Magyar Állami Földtani Intézet, 1990.
- JUHÁSZ Árpád, *Évmilliók emlékei*, Gondolat, 1987.
- KÖTELES György, *Radon a környezetünkben*, Fizikai Szemle, 1994/6.
- Magfizikai laboratóriumi gyakorlatok*, szerk. SÜKÖSD Csaba, ELTE, 1992.
- MARX György, *Atommagközelben*, Szeged, Mozaik Oktatási Stúdió, 1996.
- NAGY Lajos György, *Radiokémia és izotóptechnika*, Tankönyvkiadó, 1970.
- Liquid Scintillation Analysis*, Ed.: Michael KESSLER, Packard Instrument Co., 1989.
- TÓTH Eszter, *Radon a magyar falvakban*, Fizikai Szemle, 1992/2.

