

Felszín alatti vizek  
radioaktivitásának vizsgálata a  
Nyugat-Dunántúlon

Burján Anita

fizika-kémia szakos hallgató

témavezető: Horváth Ákos  
ELTE Atomfizikai Tanszék

2003

# Tartalomjegyzék

## 1. Bevezetés

- 1.1. A radon tulajdonságai, fontossága
- 1.2. A mérés motivációja, a radonpotenciál, geológiai kapcsolatok

## 2. A radonmérések áttekintése

### 2.1. A lakásokban mért radonkoncentráció mérési módszereinek és eredményeinek áttekintése

- 2.2. A felszín alatti vizek korábban mért adatainak áttekintése
- 2.3. A radon és a kőzetek kapcsolata

## 3. A mérési módszerek

- 3.1. A mérési terület geológiai elemzése
- 3.2. A levegő radonkoncentrációja mérésének módszerei
- 3.3. A folyadékszcintillációs technika
  - 3.3.1. A tricarb működése, és a szcintillációs kódtól
  - 3.3.2. Kalibráció, energiaeloszlás
  - 3.3.3. Az öneltelődés vizsgálatának fontossága
  - 3.3.4. Mintavételi eljárás, kiértékelési módszer
- 3.4. A talajminták mérési módszere
  - 3.4.1. Mintavétel, mintaelőkészítés
  - 3.4.2. A gamma-spektroszkópia, HPGe detektor leírása
  - 3.4.3. A mérés menete, kalibráció, kiértékelési eljárás

## 4. A mérési eredmények

## 5. A természetes radioaktivitás tanítása a középiskolákban

- 5.1. A természetes radioaktivitás
- 5.2. Óravázlat
- 5.3. Demonstrációs kísérleti eszközök leírása
- 5.4. Kérdőívek kiértékelése

## Függelékek

- F1. A mintavételi jegyzőkönyvek
- F2. Az urán és a tórium sor gamma-sugárzásainak listája

## 1. Bevezetés

### 1.1. A radon tulajdonságai és hatásai

A hatvanas évek atombomba kísérletei után egyre inkább előtérbe került a sugárzások egészségi hatásainak vizsgálata. Ma már tudjuk, hogy a lakosság évi sugárterhelésének nagy része (68%-a) nem mesterséges eredetű, (nukleáris létesítmények, egyéb légköri kihullás), hanem természetes sugárzásból ered. Ennek a természetes eredetű sugárterhelésnek a 60%-a a radontól ered.

A radon átlátszó nemesgáz. Fagypontja alá hűtve (-71 C), azonban szépen foszforeszkál. Először sárga, aztán narancsos színben. 1900-ban fedezték fel (Soddy és Ernest Rutherford), de még nem volt nagy jelentősége, míg ki nem derült róla, hogy radioaktív. A radon a rádium leányeleme. A bomlási sorok közül az  $^{238}\text{U}$  és  $^{232}\text{Th}$  sorozatban található meg a leghosszabb felezési idejű radon izotóp. Ezek közül a  $^{222}\text{Rn}$  (mely a  $^{226}\text{Ra}$ -ból ered) felezési ideje a leghosszabb (3,82 nap). Majd ezután következik az 55 másodperces felezési idejű  $^{220}\text{Rn}$  (toron), mely a  $^{224}\text{Ra}$  leányeleme. Az urán a talaj mélyebb rétegeiben található és ez mondható el a leányelemeiről is. Azonban a bomlási sorban található nagyon reaktív és mobilis rádium ki tud kerülni a mélyebb rétegből és bomlásával alfa sugárzó radon keletkezik. Ez a radon diffúzióval (felezési idejétől függően) több 10 cm-t is megtehet. Önmagában a radon inert nemesgáz, de bomlása révén jelentős (5-8 MeV) energiát ad le. Másrészt az egészségkárosító hatását belégzés által vagy oldott formában a szervezetbe kerülve fejti ki. Ugyanis a radon leányelemei a  $^{218}\text{Po}$  és  $^{214}\text{Po}$  ráradóznak a levegő porszemére, és ezek az aeroszolok a tüdőbe kerülve alfa-részecskékkel bombázzák a sejteket. Az alfa-sugárzás ilyen szempontból veszélyesebb, mint a béta vagy a gamma, mert rövid hatótávolságú, de nagy energiájú sugárzás. A radon bomlásának egészségi károsító hatását a schneebergi bányászoknál ismerték fel. Sokan közülük tüdőrákos megbetegedésben szenvedtek.

Vizsgálatok mutatják, hogy egy bizonyos koncentráció alatt és felett a tüdőrák kockázata nő (1).

Már évszázadok óta ismert a termálforrások jótékony hatása. A gyógyvizek forrásokból erednek. Azonban ezek a források a mélyből törnek felszínre, így van természetes radioaktivitásuk. Ha a víz radon tartalma nagyon magas, akkor a vízből a levegőbe került radonnak egészségkárosító hatása is lehet.

## **1.2. A mérés motivációja, a radonpotenciál geológiai kapcsolatok**

Méréseim során a Nyugat-Dunántúl egyes területein található vizek radon tartalmának feltérképezését céloztam meg. Elsősorban forrás- és kútvizeket vizsgáltam. A cél a vulkáni hegyek vizeinek radon koncentrációjának feltérképezése volt. Ugyanis a vulkáni eredetű kőzetekben sok az urán és a tórium, ami a mélyből eredő vizek nagyobb radioaktivitását eredményezi. Az idővel gyorsan változó körülmények ezen koncentrációra kis hatással vannak, ezért a vizek radon tartalma a geológiai környezetre utal és fontos járulék a terület radon potenciáljának számolásában. Egyes helyeken (csak) a terület puszta felmérése volt a cél.

. A következő oldalon a mérési terület térképét találjuk.

## **2. A radon mérésének áttekintése**

### **2.1. A lakásban mért radonkoncentráció eredményeinek és mérési módszereinek áttekintése**

A radon zárt helyiségekben, lakásokban feldúsulhat. A lakásban levő radon koncentráció függ a légkondicionálástól, az időjárási viszonyoktól, az épület anyagától, a ház talajától. A radon gáz áramlását a kinti s benti légnyomáskülönbség is befolyásolja. A belső fűtés felfelé áramlást kelt, amely kiszívja a levegőt az épület alsó részéből és felül kinyomja (kémény-hatás). Ez az áramlás kicseréli a levegőt a házban és radont szív be. A gáz áramlás modellezését is elvégezték. Az eredmény az lett, hogy a magas radon koncentrációt az okozza, hogy a ház alulról radont szív be.

Svédországban már az 1960-as években végeztek méréseket a lakótéri radonra vonatkozóan. A vizsgálatot Rolf Sievert kezdeményezte, munkatársa Bengt Hultqvist végezte el. Sievert az előbbi vizsgálat keretében többek között a gamma-sugárzásra vonatkozóan is végezett méréseket kb. 1000 lakóépületben, továbbá tóriumra vonatkozóan méréseket 61 lakóépületben. A radon koncentráció értékek Svédországban magasabbak, mint sok más országban. Ennek oka lehet, hogy a talaj uránium tartalma sok helyen magas, vagy az építőanyagoknak nagy az urántartalma.

1980-81-ben újabb felmérést végeztek. A házak 2%-ában mértek  $400 \text{ Bq/m}^3$ -nél magasabb értéket, 5%-ában  $200 \text{ Bq/m}^3$ -t. Ezek a házak már új építésű házak voltak. A problémák nagy része energiatakarékoságból ered. Ha összehasonlítjuk a korábbi eredményeket, azt találjuk, hogy a későbbi mérések átlaga négyszer nagyobb az előbbinél. Ennek oka a jobb szigetelés, aminek következtében a légcseré csökken, a timföld pala-könnnyübeton alkalmazása 50-es 60-as években a talajon át beszívott levegőben működő szellőztetőrendszer alkalmazása. Svédországban 1990 óta a lakóházak és munkahelyek

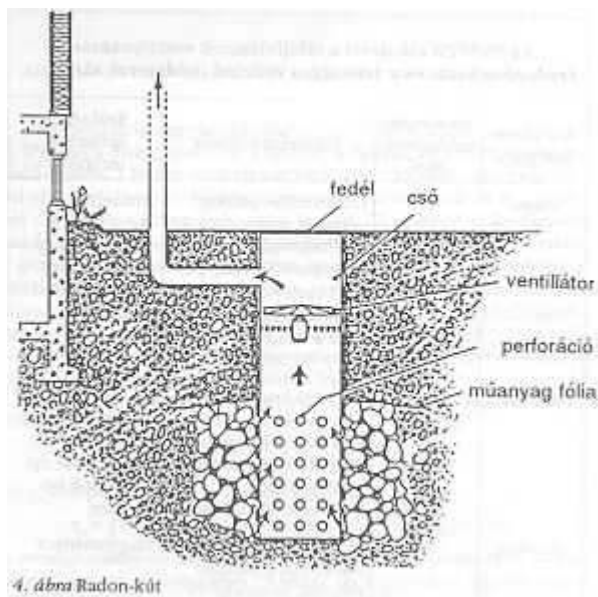
levegőjében a maximális megengedett érték  $200 \text{ Bq/m}^3 = \text{EER}$ . Az EER az egyensúlyi effektív radon koncentráció. Szellőztelen szobában a tényleges radon koncentráció megegyezik az EER egyensúlyi ekvivalens koncentrációval, mert egyensúly van a radon és leányelemei között. A svéd hatósági ajánlás szerint minden épületben, ahol  $\text{EER} = 70 \text{ Bq/m}^3$  -nél nagyobb, aktivitáscsökkentést kell megkísérelni.

Az 1980-as években Svédország 284 városában végzett a helyi önkormányzati szerv méréseket. Az 52 000 kimért lakás közül kb. 18 000-ben nagyobb volt a koncentráció, mint  $\text{ERR} = 200 \text{ Bq/m}^3$ , 38000-ben pedig meghaladta az  $\text{EER} = 70 \text{ Bq/m}^3$  -t. Svéd lakásban ez ideig mért és legjelentősebb radon származék aktivitáskoncentráció kb.  $40\,000 \text{ Bq/m}^3$  volt.

A svéd bányákban 1969 óta mérik a radon tartalmat. 1970-ben a svéd bányászok átlagos sugárterhelése  $350 \text{ Bq/m}^3$  volt. Az ok, hogy a friss levegőt a bányák felhagyott járatain keresztül szívták be, ill. a vizek magas radon tartalma volt.

A radon két forrásának a talajt és az építőanyagot tekinthetjük Svédországban. 1929 és 1975 között gyakori volt a timföld-pala alapú könnyűbeton, amelynek  $^{226}\text{Ra}$  tartalma elég nagy volt,  $2,6 \text{ Bq/kg}$  értéket is elérte. Sok helyen –a hol a talaj uránban gazdag - gránit és pegmatit a mélyfúrású kutakból kiszivattyúzott víz gázleadása révén jelentős mennyiségű radon kerülhet a lakások levegőjébe (1).

A radon koncentráció csökkentésére a radon eredetétől függően többféle eljárás ismert. Így például a talajból eredő radon esetén ún. cserépalagcső rendszert használnak, amelyben egy kis ventilátor segítségével csökkentik a gáz nyomását. Másik megoldás az intenzív szellőztetés. Harmadik megoldás a radon kút alkalmazása. Ilyen kutat mutat a következő ábra.



Több országot – köztük Magyarországot is foglalkoztatja a radon kérdés. Magyarországon több kutatóintézet is foglalkozik a lakótéri radon koncentrációjának meghatározásával. Így pl. az OSSKI (Országos Frédéric Joliot-Curie Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutatóintézet), az ATOMKI, a RAD Lauder Labor és a KFKI. Mintegy 120 lakásban az ország különböző területén végeztek mérést. Az éves átlag  $55 \text{ Bq/m}^3$ -nek adódott. Az épület típusától függően más-más eredményt kaptak. Így pl. a téглаépület esetén alacsonyabb értéket kaptak, mint a vályogépület esetén. Sőt a vályogházaknál a koncentrációértékek magasabbak voltak, mint az átlag  $55 \text{ Bq/m}^3$ .<sup>(2)</sup> Hasonló méréseket végeztek Edelényben ill. Sátoraljaújhelyen. A mérések során megfigyelték a lakásparmétereiktől való függést is. 5 hónapon keresztül mértek az átlagkoncentráció  $111 \text{ Bq/m}^3$ -nek adódott.<sup>(3)</sup>

A lakásparmétereiktől való függés vizsgálata következő eredményt adta. Az épületanyag típusa szerint a legmagasabb érték a vályogházban volt, majd a kő és téгла következik. A talajjal való közvetlen kapcsolat szempontjából: alápincézett esetben alacsonyabb értéket mértek, mint a nem alápincézett ház esetén. Az 1990-es évektől a RAD Lauder Labor méréssorozatát indított el Mátradereske térségében több tízezer diák és középiskolai tanár bevonásával. Ők elsősorban lakóházak radon koncentrációját vizsgálták. Az általuk mért koncentráció átlag értéke:  $517 \text{ Bq/m}^3$ -nek adódott<sup>(4)</sup>. A RAD Lauder Labor eredményei között találunk kiugró értéket is  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . Így pl. a radon éves

átlagos aktivitáskoncentrációja egyes gyermekek által lakott szobában okozott dózis meghaladja a nukleáris létesítményben dolgozók számára megengedett dózist. Az OSSK 1991, 1993 a Fővárosi Fürdőigazgatóság megbízásából mérést végzett a Gellért-hegy lábánál található és helyi termálforrásokból táplálkozó Rudas fürdőben. A fürdőben használt természetes források vizének radon tartalma magas (Juventus-forrás 126 Bq/l, Attila-forrás 211 Bq/l). A gyógyfürdőt a Juventus-forrás látja el vízzel, melyet a városi hálózati vízzel kevernek. A mért adatokat a táblázat tartalmazza.<sup>(5)</sup>

Mintavételi idő (óra)	05.30	08.00	11.00	14.00	17.00	20.00	Átlag
Nagymedence	7153	4398	3855	3854	3315	4138	4286
Masszázs	4737	1627	1360	1360	1139	2331	2061
Öltöző	189	448	293	293	178	533	306
Előcs.	522	279	109	109	70	2676	6195
Kádf.	522	408	653	653	515	379	522
Pedik.	327	613	274	274	79	363	292
Szájzuhany	225	225	647	567	665	358	448

A fürdő medencéit 20 órakor leeresztik, majd a csapokat egész éjszaka nyitva hagyják. A pedikűr, szájjuhany, kádfürdő helységeiben a csapok éjszaka zárva vannak. Nagy radon tartalmat mértek a nagymedence kupolacsarnokának levegőjében. Ennek oka a magas radon tartalmú vízen kívül a csapok folyamatos működtetése. A szájjuhany helységben szellőztetés hatására 800 Bq/m<sup>3</sup> –ről 400 Bq/m<sup>3</sup> értéke mértek. A nagymedence csarnokban napszakos ingadozást mutattak ki. Ennek oka, valószínűleg, hogy a melegvíz csapok éjszaka is üzemelnek, de az éjszakai zártság miatt a szellőzés gyengébb, így a radon koncentráció nőhet. A Rudas-fürdőben az 50 mSv évi effektív dózisegyenérték korlátot egy helység kivételével nem haladják meg a számított értékek. A nagymedence kupolacsarnokában a jelenleg érvényes dóziskorlátnál magasabb értéket kaptak. A személyzet azonban nem tartózkodik itt egész nap. A fürdőt látogató vendégeket és a szakorvos által beutalt betegeket illetően a

természetes forrásokból, így a radontól eredő sugárterhelésre nincs dóziskorlát. Heti 2-3 alkalmas beutalóval az 1 évre számolt sugárterhelés, amit a fürdőt látogató kaphat 4 mS/év. Ez kisebb, mint a pillanatnyilag érvényes lakossági effektív dózisegyenérték korlát <sup>(5)</sup>.

Hasonló mérést végeztek a KLTE Izotópalkalmazási Tanszék egy csoportja Ajkán. 1865-ben kezdtek Ajka mellett szén bányászni. Az ötvenes években Szalay Sándor méréseiből kiderült, hogy az ajkai szén urántartalma magas, kb. 20-szorosa a szén esetében megszokottnak. Ezért a 60-as évektől megtiltották a szén salakjának és pernyéjének építkezési célokra történő felhasználását. Korábban az előbbi anyagokat terepegyenlőtlenség feltöltésére, építkezésre használták. A tiltást követően is felhasználták az előbbi célokra jóval kisebb mértékben.

A 1993-94-es évek folyamán méréseket végeztek az ajkai házakban abból a célból, hogy megnézzék megemeli-e a helybeli bányászott szén meddőjéből készült építőanyag a lakások radon tartalmát. A lakókat és a dolgozókat előzőleg megkérték, hogy a mérés előtt az ajtót és az ablakot tartsák zárva. A házak anyagát tekintve a következő csoportra oszthatók:

- 1.) A ház alatt meddőkőzetből vagy salakból álló feltöltés található.
- 2.) A falak meddőkőzetből épültek.
- 3.) A födém salakból van kitöltve.
- 4.) A vakolathoz felhasznált oltott mész alapanyaga a meddőkőzetből származott.
- 5.) A „tiszta” házak, amelyek építőanyaga már nem tartalmazza a fentieket.

A „tiszta” házak (59 db) helyszíneire  $32 \text{ Bq/m}^3$  =EEK átlag adódott. A földszinti helységek átlaga  $111 \text{ Bq/m}^3$  =EEK volt, míg az emeletieké  $35 \text{ Bq/m}^3$  =EEK.

Az 1960 előtt épült családi házak esetén az átlag  $137 \text{ Bq/m}^3$  volt. 12 ilyen ház közül 7 bizonyult szennyezettnek. A szobalevegőben mért aktivitás koncentráció mérsékelt övi országaira jellemző átlagérték  $50\text{-}60 \text{ Bq/m}^3$  aktivitás-koncentráció. Ez  $20\text{-}24 \text{ Bq/m}^3$  EEK értéknek felel meg. Az ajkai értékek ennél magasabbak. Az eredmények azt mutatják, hogy az ajkai házak

jelentős részében a szén meddőjének felhasználása megemeli a radon koncentrációt. Ezekből az adatokból megpróbálták megbecsülni a lakosság radontól származó sugárterhelését. Szakirodalom szerint  $1 \text{ Bq/m}^3$  –nyi átlagos radontermék-koncentráció óránként okozott terhelése  $9 \text{ nSv}$ -nyi effektív dózis. Így az ajkai lakosságra számított érték  $2 \text{ mSv/év}$ . A „tisztá” lakásokra kb.  $1 \text{ mSv/év}$  adódott. Ennyi többletdózist kap a lakosság a szén közvetlen helyi felhasználásától. Ha csak az 1960 előtt épült családi házakat tekintjük, akkor kb.  $6 \text{ mSv/év}$  effektív dózist kapunk, amelyből a szénbányászat okozta többlet  $3\text{-}4 \text{ mSv/év}$ . Ebből látszik, hogy az ajkai átlaghoz képest a szűkebb csoport többlet-sugárterhelése nagyobb.<sup>(6)</sup>

A WHO (Egészségügyi Világszervezet) által ajánlott lakótéri radon éves átlagértékére vonatkozóan ajánlásokat tesz. Az ajánlott érték, aminél már intézkedéseket tesznek  $200\text{-}600 \text{ Bq/m}^3$ . Mivel a radon moláris tömege nagy, szeret a levegő alsóbb részeiben „megülni”. Az ajánlott érték (a radon aktivitás-koncentrációra vonatkozóan) párnamagasságra vonatkozik. Az egyes országokban az ajánlott intézkedési szint<sup>(7)</sup>:

<b>Ország</b>	<b>Radon aktivitás-koncentráció</b>
Svédország	$400 \text{ Bq/m}^3$
USA	$150 \text{ Bq/m}^3$
Anglia	$200 \text{ Bq/m}^3$
Oroszország	$200 \text{ Bq/m}^3$

Magyarországon még nem született, olyan rendelet (sem a lakótéri, sem az ivóvízi radon aktivitáskoncentrációra vonatkozóan), amely ilyen intézkedési szintet tartalmazna.

A lakótéri radon mérésére többféle módszer ismeretes. Ezek közül néhányat említék.

## I. Radonkoncentráció mérése nyomdetektorral

I/1. 3-4 cm<sup>2</sup> műanyag fóliát egy kis méretű dobozba helyeznek. Ezeket az ún. nyomdetektorokat néhány hónapra a vizsgálandó helyiségbe teszik. A dobozban pár óra múlva ugyanakkora lesz a radon sűrűség, mint a vizsgált helyiségben. A radioaktív bomlások által keletkező alfa részecskék a nyomdetektor vékony, polimerfóliáin mikroszkópikus roncsolást okoznak. Ezeket aztán maratással (90 °C-os NaOH-dal) teszik a mikroszkóp számára láthatóvá, majd egy program segítségével leszámolják.

I/2. Kb. 10 cm<sup>3</sup> térfogatú faszén mintával összegyűjtjük a <sup>222</sup>Rn atomokat, majd laboratóriumban mérik a gamma sugárzást.

## I/2. Leányelemek aktivitásának mérése

Ezek az eszközök hordozhatók, rövid ideig tartó mérések végezhetők velük. Meghatározható: a levegő átszívásával a szűrőn felfogott leánymag koncentráció. Ebből vissza lehet következtetni a levegő radon tartalmára. Ennek során fel kell tételeznünk, hogy a radioaktív egyensúly a <sup>222</sup>Rn és bomlástermékei között beállt. Ekkor a Rn és a bomlástermékek aktivitása megegyezik.

## III. ATMOS 10

A műszer lényeges elemei:

- szűrő
- víztelenítő
- mérőkamra (ionizációs kamra).

A levegőt egy membránszivattyú segítségével a víztelenítőn keresztül juttatják a 2 l-es mérőkamrába, melyből 0,6 l az érzékeny térfogat. A mérés egy impulzusszámláló ionizációs kamra segítségével történik. Ennek elektródája egy sok huzalból álló rendszer, ez határozza meg a hengeres kamrában az érzékeny térfogatot. A mérés lényege abban áll, hogy a <sup>222</sup>Rn ill. a kamrában keletkezett leányelemek (<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po) alfa bomlást szenvednek. Ennek révén a levegő molekulái ionizálódnak. Az ionok az elektródák felé mozognak és

elektromos impulzusokat keltenek. Ezek amplitúdója az alfa részecskék energiájával lesz arányos. A kamra impulzusait erősítés után egy AD konverter dolgozza fel, majd egy sokcsatornás analizátorral az energia eloszlás egy PC képernyőjén megjeleníthető.

#### IV. MARKUS 10

A berendezés lelke egy mérőkamra. A gép indításakor egy szivattyú levegőt szív a mérőkamrába egy lyukacsos vasrúdon keresztül. A műszerbe egy nyomásérzékelő van beépítve, ami a szivattyúzást be ill. kikapcsolja. A szivattyúzási idő 30 mp. A szivattyúzás után a mérés elindul. A mérőkamra a detektorral együtt bekapcsolódik a feszültség hatására. A detektor a leányelemek alfa sugárzását észleli. A felerősített, megszürt impulzusok számlálón keresztül megjelennek egy digitális kijelzőn. Kb. 20 perc után új mérés kezdhető. Ennyi idő kell ugyanis ahhoz, hogy az előző mérésből bennmaradó bomló részecskék aktivitása megfelelő értékre csökkenjen.

#### **2.2. A felszín alatti vizek korábban mért adatainak áttekintése**

A radon apoláris, mégis oldódik vízben. Ennek oka, hogy elektron felhője könnyen deformálható. Éppen ezért radon tartalma nemcsak a levegőnek, hanem a víznek is van. Különösen azokon a helyeken lehet magasabb a radon tartalom, ahol a talajnak nagy az urántartalma. De meghatározó a talaj szerkezete is. Azokon a helyeken, ahol lazább a talaj (pl. löszös), a radon sokkal könnyebben kidiffundál a szabad levegőre. Ahol tömörebb, ott inkább a rétegvizekbe kerül. A szervezetbe került magas radon tartalmú víz jelentős terhelést jelent a gyomor számára. Az Egyesült Államokban az ivó vízben megengedett radon koncentráció 11 Bq/l. Az Egyesült Királyságban ez a határ 100 Bq/l.

1998-ban Svédországban végeztek vizsgálatokat a vizek radon koncentrációjának felmérésére. Több helyen mértek. A Vízművek esetében az

átlag 20 Bq/l (ez viszonylag alacsony érték), valamint 100 Bq/l volt. Mély fűrt kutak vizében az átlag 210 Bq/l, a maximális érték 8860 Bq/l-nek adódott. A lakosságra számolt átlag 38 Bq/l. (1)

Hasonló méréseket végeztek Ausztriában és Arizonában, ahol a kutak 42%-ánál 100 Bq/l fölött volt a koncentráció. Volt olyan hely, ahol 500 Bq/l koncentrációt mértek. Ezek az értékek megközelítik az atomerőművek közelében élő emberek környezetében levő vizek koncentrációját. (8)

Az MTA Nukleáris Kutatóintézete 1978 óta vizsgálja Magyarország különböző karsztvidékein található barlangok vizét. Az adatokat az alábbi táblázat tartalmazza. <sup>(18)</sup>

<b>Hely</b>	<b>Víz típus</b>	<b>Radonkoncentráció (Bq/l) 6 éves átlag</b>
<b>I. Bükk-hegység föld alatti</b>		
I/1. Létrási vízesés	Patak	2,0
Létrási vízesés	Tó	1,0
I/2. Miskolctapolca	patak	5,0
I/3. Anna	Patak	2,5
Felszíni		3 hónapos átlag
Szinva	Patak	1,4-6,6
Jávor	Patak	13,6
Garadna	Patak	3,0
József	patak	5,1
<b>II. Aggtelek felszíni</b>		
Lófej	Patak	0,4
Kistohonya	Patak	1,0
Nagytohonya	Patak	0,8

A meder anyagát illetően az Anna patak dolomit és édesvízi mészkő.

A Szinva pataké mészkő és rétegzett mészkő, a többi esetben mészkő.

A koncentrációk periodikusan változnak, ami az évszakok változásával van összefüggésben. A Lófej forrásnál nyáron mérték a legnagyobb értéket, télen a legkisebbet.

Végül néhány budapesti és dél-dunántúli adat:

<b>Környék</b>	<b>Fajlagos aktivitás (Bq/l)</b>	<b>Megnevezés</b>
Margitsziget	7	Artézi kút
Király fürdő	13	
Juventus fürdő	126	
Attila forrás	200	
Véménd	82	Trefortpusztai tározó (fűrt kút) Vízmű-kút
Feked	248	
Véménd Pince-forrás	100	

A Véménd-Feked körzet közelében 100-120 m vastagságú gránit található, ezen csak termőtalaj van. Mivel a gránit kemény, ezért a radon gázt tárolja. A vémeédi vizek aktivitása kisebb, mint a fekedei kutaké. Ennek oka a források mélységében, a talajréteg vastagságának változásában keresendő.

### **2.3. A radon és a kőzetek kapcsolata**

A radon magja keletkezésekor 100 keV visszalökési energiát kap. Ez az energia elegendő ahhoz, hogy a kőzet szemcséiből kijusson, s a pórusokon átdiffundálva a szabadba jusson. Jelentős szerepe van a nedvességtartalomnak, a talajvíznek, a nyomáskülönbségnek. Ugyanis homokos, agyagos talajban csaknem zavartalan a mozgása, míg nedves anyag talajban erősen gátolt. A

radon transzportot a talaj permeabilitása és porozitása is befolyásolja. Kavics és homok esetén a porozitás 30-40%. Az agyagé 40-80%. Viszont az agyagos talaj permeabilitása alacsony a Rn-222-re nézve.

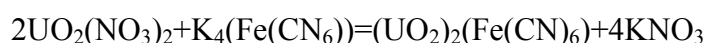
A porozitás és a permeabilitás együttesen gyakorol hatást a Rn transzportjára. Másrészt az időjárás is meghatározó szerepet tölt be a koncentráció változásában. Erős időszakban ugyanis a víz záró réteggé funkcionál, ezért a radon exhalációja (= a légkörbe jutása) leáll. A radon a rádium leányeleme. A rádium az urán és tórium bomlási sorában is megtalálható. Ezért a radon megjelenik az urán és tórium hordozó kőzetben. A természetben a legnagyobb mennyiségben előforduló 3 izotóp közül az U-238 fordul elő nagy százalékban. Ennek ellenére Svédországban (Stripánál) 3-11-szer nagyobb aktivitást mértek a felszín alatti vizek esetén U-234-ből, mint U-238-ból. Helsink környékén ez a faktor 1-4 körül mozgott.

#### Az urán kémiai tulajdonságai

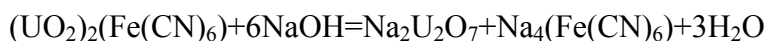
1789-ben M. H. Klaproth fedezte fel. Az aktinoidák körébe tartozik. 3,4,5,6 oxidációs állapotú formái ismertek. Kémiailag aktív, a legtöbb elemmel reagál, pirofóros. Közönséges körülmények között az uranil ( $\text{UO}_2$ )<sup>2+</sup> ion keletkezik, ami világossárga színeződésű savas oldatban. Az urán (VI) tartalmú anionok mind polimerizáltak, az urán oktaéderes környezetben van, így pl. az  $\text{UO}_4^{2-}$  -ben. Más formái közel sem ennyire egyszerű összetételűek, a megfelelő „sók” vízben oldhatatlanok. A következőkben az uránvegyületek olyan kémiai tulajdonságairól lesz szó, ami az analitikai kémiában ionkimutatásra használt módszer. Ha uranil(VI)-nitrát vizes oldatához NaOH-t öntünk, narancssárga színű csapadék formájában kiválik a nátrium-diuranát:



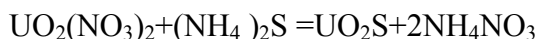
Ha az uranil(VI)-nitrát oldatát megsavanyítjuk kevés sósavval, majd kálium-hexaciano-ferrát oldatot adunk hozzá, barna színű csapadék válik le.



Ha a csapadékhoz NaOH-t adunk, narancssárga színű nátrium-diuranát képződik:



Az uranyl(VI)-nitrát vizes oldatához ammónium-szulfidot adva barna csapadékot kapunk:



Ez savakban és ammónium-karbonátban is oldódik, mert az U(VI) viszonylag stabil karbonát komplexet végez.

Hidrogén-peroxiddal semleges közegben sárga csapadék képződik, mely alkáli karbonátokban narancssárga színnel oldódik (bisz-peroxo-trikarbonáto-uranát) formájában:  $(\text{UO}_4(\text{CO}_3)_3)^{2-}$ .

### A tórium

A tórium az uránhoz hasonló tulajdonságú. Az urán azonban jobban oldódik alkáli oxidáló szerekben. A tórium stabil oxidációs állapota: 4 a 2,3 instabil, EDTA-val, bifoszfáttal komplexet képez. Általában a legjellemzőbb hordozó ásványai: a foszfátok, szilikátok, oxidok. Így pl. a toritban ( $\text{ThSiO}_4$ ) és toranitban ( $\text{ThO}_2$ ) fordul elő nagyobb mennyiségben. Ásványai vízben kevésbé oldódnak, ezért a tórium természetes vizekben ritkábban fordul elő, mint az urán.

### A rádium

Stabil oxidációs állapota +2. Hidrolizáló képessége kisebb, mint a tóriumnak. Bizonyos ásványok pl. a kvarc, kaolinit, agyag ásványok a Th-ot adszorbeálják. A természetes vizekben a  $^{226}\text{Ra}$  a leggyakoribb. Mivel a leányelem felezési ideje kisebb, mint az anyaelemé, hosszú idő múlva beállhat a radioaktív egyensúly a U-238 és Ra-226 között. De a két elem különböző kémiai viselkedésének köszönhetően idővel elkülönülnek egymástól.

A következő táblázatban a különböző ásványi anyagok U, Th, Ra tartalmát láthatjuk a súlyrésznek megfelelően (5):

Sugárzó anyag	U	Th	Ra	1 gramm sugárzása (alfa rész/s)	
	$10^{-6}$ g/tonna	$10^{-6}$ g/tonna	$10^{-12}$ g/tonna	U	Th
Savas kövek, gránit	9	30	3	1	1
Bázisos kövek, bazalt	3	5	1	0,3	0,2
Anyag	5	11	1,5	0,5	0,4
Homokkő	4	5	1,3	0,4	0,2
Mészkö	3	1	1	0,3	0,3

### 3. A mérési módszerek

#### 3.1. A mérési terület geológiai elemzése

##### 3.1.1. A Balaton-felvidék természeti képe

A Balaton-felvidéket Várpalota, Veszprém, a Tapolcai-medence keleti pereme és a Balaton határolja. Kisebb nagyobb törésvonalak, és az aránylag alacsony hegysorok több kisebb medencére osztják a területet. A Pécselyi-medence 100-120, a Káli-medence 50-70 m-re emelkedik a Balaton vízszintje fölé. A medencéket a Pannon-tenger üledékanyaga, az aránylag laza szerkezetű márgaréteg alkotja. A felszín formáló erők a márgát megbontották, s csak a dolomittal vagy bazalttal borított csúcsok maradtak meg eredeti magasságukban. Az Alsóörs és Dörgicse között levő látszólagos hegyvonulat a Veszprémi-fennsík lejtője. Ebbe a nagy esésű patakok vájtak völgyeket. Legismertebb ezek közül a Nosztori-völgy, a Koloska-völgy, a Kéki-völgy.

### **3.1.2. A terület földtana**

Egy táj geológiai felépítését akkor érthetjük meg, ha ismerjük a keletkezését. Ezt az alábbiakban foglaltam össze. A Balaton-felvidék legidősebb képződményei az ópaleozoikum során lerakódott tengeri üledékek, amelyek, a variszkuszi hegységképződés következtében később átalakultak. E korszak vége felé vulkáni tevékenység zajlott le, amely az megszakította a finomszemű törmelékek lerakódását. A földtörténeti ókor (i.e. 570-235 millió év) időszakában képződött az Alsóörs és Lovas környékére jellemző agyagpala formáció. A palás kőzetek jelenléte ősi tengerről vall. Ebből az időszakból való az Aszófő-Balatonfüzfő, Badacsonyörs-Zánka területen lerakott vörös homokkő. Ennek anyagát többségében folyóvizek rakták le. A folyóparti zátonyokban homokos, kavicsos, az ártéren iszapos üledékek halmozódtak fel. Ezekből az idők folyamán homokkő, kavicskő, ill. az iszapból aleurit képződött. Jellegzetes vöröses színét a hematit és goethit adják.

A földtörténeti középkor (i.e. 235-67 millió év) beköszöntével a Balaton-felvidék helyeinek földtani felépítése színessé vált. A terület kőzeteinek túlnyomó része a korszak elejéről, a triász korból valók. A kora triászban az ókor végére kialakult folyóvízi síkságot tenger öntötte el. Ekkor kezdődött meg a síkságon a finomszemcsés törmelékek és karbonátok lerakódása. A kora triász második felében a tengerszint emelkedés eredményeként a tengeri szervezetek maradványait tartalmazó márga rakódott le. A triász közepe táján tágulások szerkezeti mozgások hatására az addig egységes medence széttagolódott, s ezeken a medencéken tovább folyt az üledékképződés. A késő triász során a Balaton-felvidék területének túlnyomó része sekélytengeri karbonátplatformok közti tengermedence volt. Ez agyaggal, kőzettörmelékekkel töltődött fel. A korszakból valók a karbonátos kőzetek: a homokos dolomit, a dolomit. Megjelentek a márga és mészmárga és a szulfátásványok (gipsz). Az oxigénszegény környezetben a feldúsuló szerves anyagtól sötétszürke mészkő

keletkezett. Egy távoli tűzhányó kitörésének emlékét őrzik a tufitrétegek. Ennek legszebb formái Felsőörs környékén figyelhetők meg.

Csopak és Balatonfüred közigazgatási határán a Nádas-kút nevű forrás közelében a földtörténeti ókor vége és középkor eleje közti átmenet tanulmányozható. Az ókori rétegre világosszürke csillámos homokos dolomit rakódott, homokkő és palás agyag közbeékelésével. Ezen időszak után ezt a vidéket tenger borította. Üledékei a mészkő, gumós agyagos mészmárga. Nevezetes időszak köszöntött be a Tátikától a Tihanyig többszörös bazaltvulkáni tevékenység indult be. Eredménye a feketére kővült bazaltlávából és szürke tufából felépülő jellegzetes csonka kúp formájú tanúhegyek (pl. Gulács). Az utóvulkáni, forró vizes folyamatok során keletkeztek a Tihanyi-félszigeten a gejzirkürtök halmai.

A negyedkorban (jégkorszakban) a jégmentes területen lehulló porból, gyakori porviharok nyomán halmozódott fel a lösz. A hegyek peremén lévő lejtőtörmelékek és a lejtők alatti kavicsos, homokos törmelék-kúpok szintén ebben az időben keletkeztek.

A Bakony és a Balaton-felvidék földtani térképét a következő oldalon találjuk.

A Bakony és a Balaton-felvidék földtani adatai <sup>(10)</sup>:

időszak	Millió év	Kőzetek	Terület
holocén	0,01	Iszap, homok, agyag	É-Balaton part, Kisbalaton Szigliget- Tapolca
Pleisztocén	2	Lösz, kavics, homok	Bakony peremén
Újkor	2-5	Bazalt, B.tufa, édesvízi mészkő	Tapolcai-medence, Káli- medence
Újkor	5-25	Mészkő, kavics, lignit	Tapolcai tavasbarlang, Dudar
Újkor	25-37	Homok, kavics, homokkő	Városlőd, Jásd
Újkor	37-67	Agyag, kavics, mészkő	Jásd, Dudar

Újkor-középkor	67-137	Mészke, márga	Kislód, Sümeg, Ajka
Középkor	137-195	Vörös mészke	Bakonycsérnye
Középkor	195-235	Dachsteini mészke, Sándorhegyi m.kő, márga	Bakony, Balatonfüred, Csopak-Arács
Középkor-ókor	235-285	Dolomit, Agyagkő	Csopak, Badacsonyörs, Zánka
Ókor	285-350	Kvarcporfir	Kékkút
Ókor	350-405	Agyagpala, mészke	
Ókor	405-440	Agyagpala	Lovas
Ókor	440-500	Porfir	Alsóörs
Óskor	570-4500	Mészke	Balatonfőkajár

### 3.2. Folyadékszintillációs mérés-technika

#### 3.2.1. A szcintilláció, és a TRI CARB működése

A szcintillációs módszer lényege, hogy egyes anyagokban a radioaktív sugárzás hatására fényfelvillanás lép fel. Ezt a fényfelvillanást szcintillációnak nevezzük. A szcintillációs anyag és a sugárzás kölcsönhatásának mechanizmusa két részből áll:

- 1.) A belépő radioaktív sugárzás a szcintillátor molekuláit gerjeszti, miközben energiát ad át.
- 2.) A gerjesztett állapotban levő molekulák fotont bocsátanak ki, és visszatérnek az alapállapotba.

A módszer lágy béta-sugárzó izotópok (H-3, C-14 stb.) esetén is előnyös. Ugyanis a sugárzást kibocsátó anyag keveredik a szcintillátorral, ezért a kis energiájú béta-sugarak is keltenek fényfelvillanásokat.

A szcintillációs folyadék három komponensből áll: a szolvens, primer, szekunder szcintillációs anyagok. Az ionizáló részecske elsősorban a szolvens molekuláit gerjeszti. Majd ezek a molekulák a primer szcintilláló molekulákkal ütköznek és eladják energiájukat. Az így nyert energiától fénykibocsátás útján szabadul meg. Ezt a fényt a szekunder szcintilláló anyag molekulái elnyelik, ezáltal gerjesztődnek, majd a legerjesztődés során más hullámhosszú fényt bocsátanak ki. E komponens feladata tehát, hogy a primer szcintillátor által kibocsátott fény hullámhosszát eltolja a fotoelektronsokszorozó érzékenységi tartományába. Ezzel a detektálási határfok javítható.

A szolvens (az oldószer), abszorbeálja a radioaktív sugárzást, ennek energiáját továbbítja a szcintilláló anyagnak. Ezenkívül fontos, hogy alacsony olvadáspontú, jó oldószer és szennyezés mentes anyag legyen, továbbá ne nyelje el a szcintillátor által kibocsátott fényt. Elterjedt oldószer a toluol. A vizes minták azonban nem oldódnak benne. Ezek mérésére 1,4 dioxánt használnak. Ez azonban peroxid képzésre hajlamos, ezáltal a detektálási határfok csökken. A radon mérésére az Optifluor-o nevű anyagot használtuk. Ennek adatait a függelék tartalmazza. A víz és a koktél nem elegyednek, két fázist alkot. A víz radon tartalma a koktél fázisban fog felhalmozódni, mert a radon oldhatósága ezen esetben nagyobb, mint a vízben.

### A TRI CARB működése

A mérés során a vizsgálandó vizet küvetákba helyeztük el. Ezen küvetta tartalmazta az előzőleg belerakott szcintillációs folyadékot. A méréseket a PACARD TRI CARB nevű géppel végeztem. A berendezés lelke két egymással szemben álló fotomultiplier, amit a mintában történő fényfelvillanásokat érzékelik. Az érkező jeleket koincidencia áramkör szűri meg, majd egy analóg-digitál átalakító sokcsatornás analízátorra küldi. Az analízátor a jeleket nagyság szerint szétválogatja. A sokcsatornás analízátor tulajdonképp egy amplitudó-gyakoriság függvényt mér. A műszert bekapcsolása után ismert radioaktív izotóp segítségével bekalibráljuk. A kalibrációs mérést C-14 izotóppal végeztem. Ezzel tulajdonképpen az egyes

csatornához tartozó energiát állapítom meg. A spektrométer különböző mérési lehetőségeket enged meg. Így lehetőség van a radon koncentráció meghatározására is. Ehhez a megfelelő protokollt (mérési eljárást) kell beállítani. Esetünkben a gép a beütésszámot három csatornában gyűjti. A gépen beállítható a mérési idő is. Az eredményeket egy nyomtató segítségével rögzítettük. Ebben az adatsorban a protokoll száma, a minta száma, a mérési idő (TIME), az egyes csatornák beütésszáma (CPMA, CPMB, CPMC), az első méréstől a következő mérésig eltelt idő (ELTIME), a belső standarddal mért kioldás (tSIE), és a spektrumot jellemző spektrális index (SIS) található.

A radon mérés során a következő csatorna beállításokat alkalmaztuk:

A csatorna:	25 keV ee -900keVee
B csatorna:	25 keV ee -900keVee
C csatorna:	0 keVee- 25 keVee

A mérés időtartama attól függ, hogy milyen pontosságot követelünk meg, illetve a minta aktivitásától.

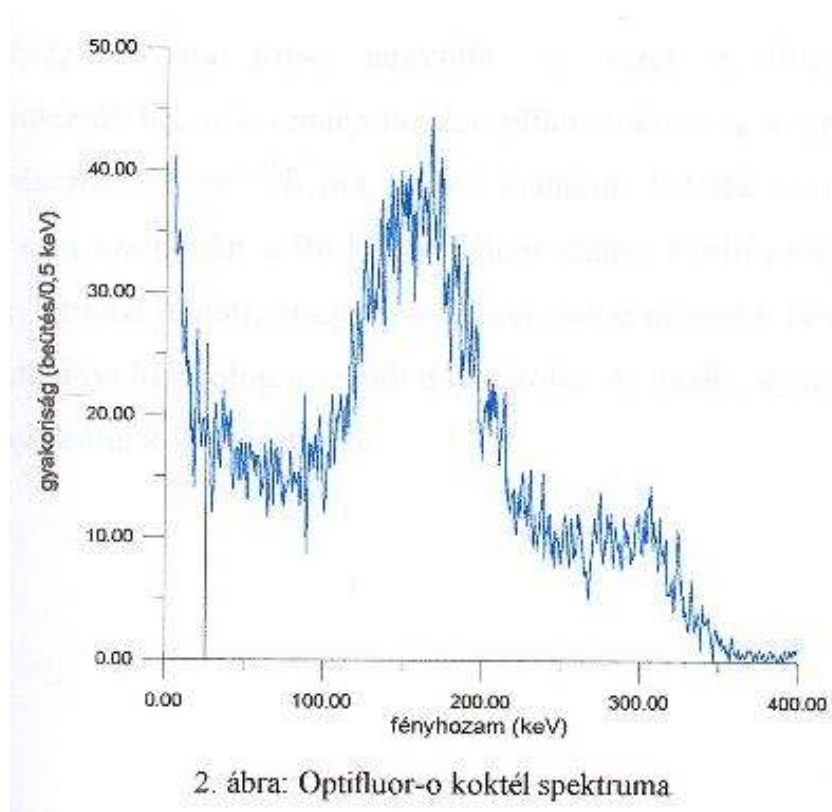
### **3.2.2. Amplitudóspektrum**

A szcintillátor által kibocsátott fény színe a koktélban levő szcintilláló anyag minőségétől függ. A fotoelektronsokszorozó elektromos impulzusának amplitúdója attól függ, hogy a sugárzásból jött részecske végeredményben hány molekulát gerjeszt, s a kibocsátott fotonokat milyen valószínűséggel detektálta az elektronsokszorozó. Ez a következőktől függ:

- az alfa részecske összenergiájától (minél nagyobb, annál több szolvens molekulát gerjeszthet)
- annak valószínűségétől, hogy egy primer molekula által kibocsátott fény egy szekunderelektront vált ki,
- annak valószínűségétől, hogy a gerjesztett oldószer molekula az energiáját a primer molekulának adja át,

- valamint attól, hogy a szekunder molekula által kibocsátott fényt a fotoelektronsokszorozó milyen valószínűséggel érzékeli (Fényhozam). Az elektronok kb. 10%-os fényhozamot produkálnak, de a Rn-222 esetében az 5 MeV-es alfa részecskék kb. csak 150 keV-es elektronnak megfelelő energiát emittálnak.

A következő ábrán a Rn 222-es spektrum látható az Optifluor-o nevű szcintillációs koktélaban. Az ábrából látható, hogy a spektrum a 25-900 keV-es tartományba esik. Az ábrán két maximum látható, az egyik 150 keV-es, a másik 300 keV-es fényhozamnál. A görbe jellegzetes alakja a radon és leányelemei alfa sugárzására utal. Valójában 3 csúcs van (5,5 MeV-nél Rn-222 6,6MeV-nél Po-218 7,7MeV-nélPo-214),de ezek közül kettő összemosódott. Ha ezen ábra alapján választjuk a csatorna kiosztásokat, akkor a csúcsok kieltolódásánál is ebbe a tartományba esik a spektrum jelentős része.



### **3.2.3. Az önelnyelődés (kioltás) vizsgálatának fontossága**

A folyadékszintillációs módszer alkalmazásakor olyan komponensek is az oldatba kerülnek, amelyeknek nincs szcintillációs hatásuk és koncentrációjuktól függően a mérés hatásfokát csökkentik. Ennek hatására a kibocsátott fény intenzitása és spektruma is megváltozhat. A fenti jelenséget kioltásnak nevezzük. A kioltásnak több fajtája ismeretes.

- 1.) Kémiai kioltásról beszélünk akkor, ha a gerjesztési energiát nem a primer és szekunder szcintilláló anyagok veszik át az oldószer molekuláitól, hanem a kioltó anyag molekulái. Ilyen kioltó anyag: az aceton, a széntetraklorid, az oxigén.
- 2.) Színkioltás: az emittált fény egy részét valamilyen színes anyag pl. festék elnyeli, mielőtt az elektronsokszorozó katódjára jutna.
- 3.) Optikai kioltás: a nem teljesen átlátszó zavaros oldatok esetén jelentős.

### **3.2.4. Mintavételi eljárás, kalibráció, kiértékelés**

#### Mintavételi eljárás

A mintavétel során a vizet speciális küvettákba tettük. Mivel a radon gáz gyorsan eltávozik a vizekből (ha felszíne szabad levegővel érintkezik), ezért a mintavétel nagy gondosságot igényel. Ezért a következőképpen jártam el.

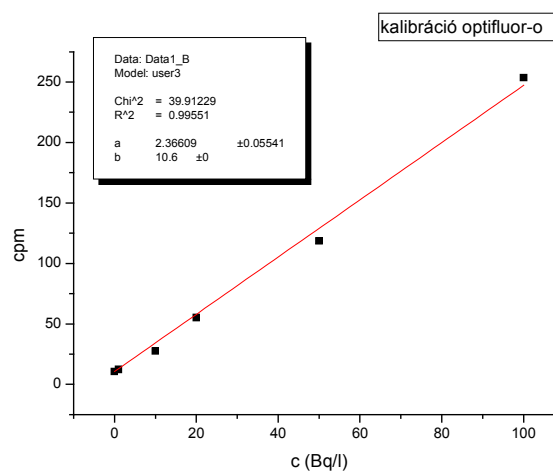
- 1.) Kútvizek esetén (nyomós kút) a csapot pár percig kifolyattam, majd egy 10 ml-es orvosi fecskendőt a csap csövébe helyeztem. Ezáltal a radon levegőbe való diffúziójának esélyét csökkentettem le.
- 2.) Forrás vizek esetén az előbbi eszköz segítségével kb. 15 cm mélyről vettem mintát. Mindkét esetben közvetlen a víz fecskendőbe juttatása után a mintát egy küvettába tettem, amelybe előzőleg 10 ml Optifluor-O nevű szcintillációs anyagot tettem. Ebben a koktélnak a radon jobban oldódik, mint a vízben. A 10 ml vízmintát a koktél alá fecskendeztem. A küvette tetejét visszacsavarva, arra

parafilmet helyeztem. 5-6 óra múlva kétféle egyensúly alakul ki. Az egyik során a koktél és a víz között áll be a Rn koncentráció az egyensúlyi értékre. Ez azt jelenti, hogy ugyanannyi radon mosódik a vízbe mint, amennyi kipárolog. A másik egyensúly a Rn és a leányelemei között jön létre. A mintavétel során az adatokat (mintavételi idő, hely, terület jellemzése, a minta kódja, a minta neve) egy füzetbe jegyeztem fel. Ezen adatokat a függelék tartalmazza. Néhány helyről földmintát is vettem és ezeket gamma spektroszkópiás módszerrel kielemeztem. Erről bővebb információt a következő fejezetben kapunk. A mérést, a mintavétel utáni 3 napon belül elvégeztem, mert, a Rn-222 felezési ideje 3,82 nap.

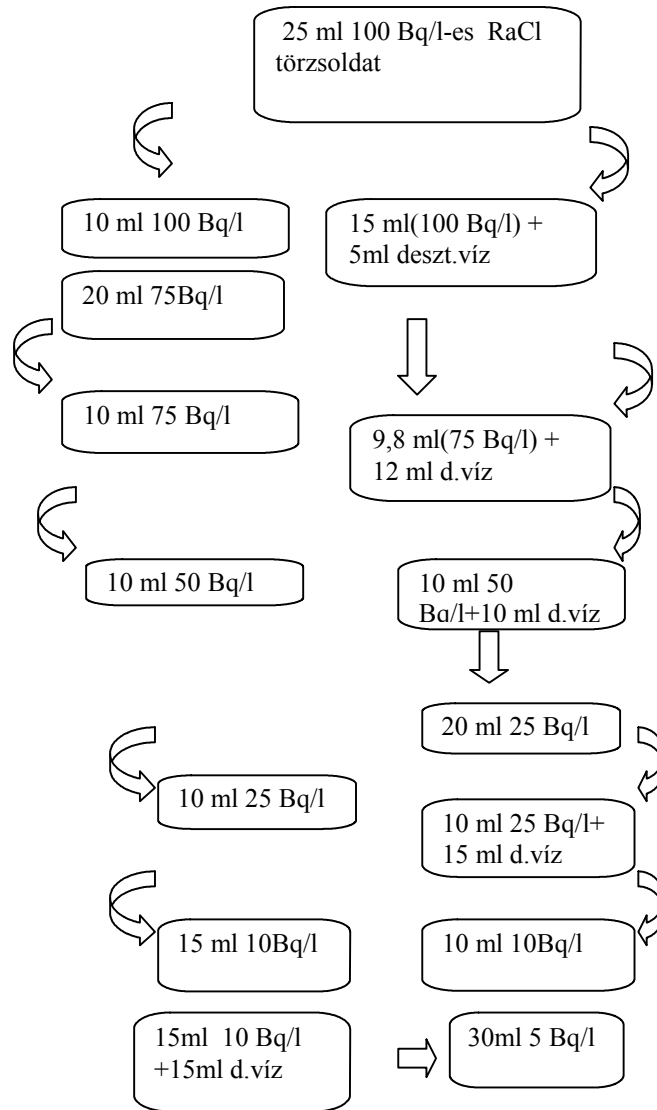
### Kalibráció

Méréseim során új koktélt használtam, ezért ezzel a koktéllal kalibrációs mérést kellett végezni. A kalibrációs mérésorozat elkészítéséhez ismert aktivitású Ra-226 oldatot hígítottam úgy, hogy 5 és 500 Bq/l közötti aktivitású stenderdekot kapjak. A hígításokat az ELTE Magkémia Tanszékén végeztem. A standard sorozat eredményei megadják a kapcsolatot a percenkénti beütésszám és a fajlagos aktivitás között. Az eredmények azt mutatják, hogy a kalibrációs görbe jó közelítéssel egyenes.

A kalibrációs görbét a következő ábra mutatja



A hígítás egyes lépéseit a következő ábra mutatja:



## A mérési eredmények kiértékelése

A mérési eredményeket egy Excel-ben megírt program segítségével értékeltem ki. Minden esetben egy táblázatot készítettem, ami a következő adatokat tartalmazza.

- A  $c_{pma}$ -t, ami a percenkénti beütésszám az A csatornában. Ennek energiaintervallumát 25-900 keV-re állítottam be.
- Az A csatornában mért beütés/perc szórását (A2)
- A mérés és a mintavétel idejét (hó, nap, óra, perc).
- A  $c_{sis}$ -t, ami az adott spektrumra jellemző spektrális index (A3).
- A  $c_{sie}$ -t, ami a kioltásra utal. Ha maximális a kioltás akkor 1, ha nincs akkor 1000.
- A mintavétel és a mérés megkezdése között eltelt időt, amit a következőképpen határozhatunk meg:

$$dt = (a_1 - a_2) * 24 + (a_3 - a_4) + (a_5 - a_6) / 60 + (a_7 - 2 * a_8) / 60$$

ahol

- $a_1$  a mérés megkezdésének napja
- $a_2$  a mintavételi nap
- $a_3$  az első minta mérésének órája
- $a_4$  a mintavétel órája
- $a_5$  az első minta mérésének befejezésének perce
- $a_6$  a mintavétel perce
- $a_7$  az eltime, ami az első mérés megkezdése és a következő minta mérésének befejezése között eltelt idő.
- $a_8$  a mérési idő

A képletben azért vonunk ki  $2 * a_8$ -at, mert a printer az első minta mérésének végén írja ki  $a_3$  és  $a_5$ -at. Ezért  $a_5$  már tartalmazza a mérési időt. A táblázatban a fentiekén kívül következőket találjuk:

- 1.) A  $c_1$ -et, ami  $e^{-0,0075536/dt}$  konstanssal egyenlő. A 0,0075536 a Rn-222 bomlási állandója órában kifejezve.
- 2.) A  $c_2$ -t, ami az  $a_8 * 0,0075536 / 60$  konstanssal egyenlő.
- 3.) A  $c_3$ -t, amelynek értéke  $(1 - e^{-c_2}) / c_2$

A cm koncentrációt Bq/l-ben megadva a következőképp kapjuk:

$$(cpma-10,9)/1,98.$$

Itt a 10,9 és az 1,98 a régi koktél kalibrációjából kapott érték. Az eredeti koncentrációt a  $cm/c1 \cdot c3$  képlettel kapjuk. A koncentráció hibáját az  $(A2+2)/100 \cdot A3$  adja.

A vizek rádiumtartalmát a minták későbbi (kb.3 hét) újraméréséből kapjuk. A rádiumtartalom meghatározás alapja, hogy a rádium sokkal hosszabb felezési idejű, mint a Rn-222. Így egy idő után beáll a radioaktív egyensúly. Abban az esetben, ha az aktivitás változik, azt jelenti, hogy nem állt be az egyensúly. Az egyensúly beálltával lehetőségünk van arra, hogy a vizek újraméréséből meghatározzuk azok rádiumtartalmát. A kiértékelés során felhasznált képletek:

$-c1=e^{-0,0000000494 \cdot dt}$ , ahol dt a mérés ideje, a 0,0000000494 a Ra-226 bomlási állandója órában.

-  $konc=cm/c1$

### 3.3 A talajminták mérési módszere

#### 3.3.1 Mintavétel, minta előkészítés

A Balaton-felvidék forrásai közelében, néhány esetben talajmintát is vettem. A mintavétel során a felszíntől kb.10 cm mélyre ástam le. A talajmintát zacskóban szállítottam a laboratóriumba, ahol azt megfelelően előkészítettem. Az előkészítés úgy történt, hogy a mintát a gyorsabb száradás érdekében tálcán szétterítettem. Majd pár nap múlva szárítószekrénybe tettem, amelynek hőmérsékletét 70 fok körüli értékre állítottam be. Amikor a minta kiszáradt egy porcelánmozsár segítségével felaprítottam a földet, majd egy szitán átszitálva igen finom eloszlású mintát kaptam. Ezt a mintát egy fémhengerbe töltöttem majd a detektorra helyeztem. Egy számítógép segítségével rögzítettem a minta gamma spektrumát.

### **3.3.2. A gamma spektroszkópia**

#### **3.3.2.1. A gamma sugárzás jellege**

A gamma-sugárzás elektromágneses sugárzás. A gamma sugárzás részecske tulajdonságokat is megjelenít a hullámtulajdonság mellett. Ebben az esetben a sugárzást úgy tekintjük, mint egyedi energiacsomagokat (kvantumokat), amiket gamma fotonoknak nevezünk. A gamma sugárzás keletkezhet az atommagban levő nukleonok egymás közti kölcsönhatása eredményeként, vagy annihiláció során.

Az atommagok gamma sugárzásának keletkezése a nukleonok egymás közti elektromágneses kölcsönhatásának eredménye. A magok különböző állapotokban létezhetnek. A mag állapotainak energiái energiaszinteket alkotnak. Ezek az energiaszintek a mag kisebb belső energiáinál viszonylag távol vannak egymástól, majd nagyobb értékeknél egyre közelebb kerülnek. A legkisebb energiájú szint a mag alapállapota. A többi gerjesztett. Gyakran előfordul, hogy a radioaktív bomlás eredményeként létrejött mag nem alap hanem gerjesztett állapotban keletkezik. Abban az esetben, ha a mag gerjesztett állapotból egy alacsonyabb szintre kerül, gamma sugárzást bocsát ki. A sugárzásos átmenet lehet kaszkád jellegű, amikor a mag több energiaszinten keresztül kerül alapállapotba. Az annihilációs sugárzás során lassú elektron és lassú pozitron hat kölcsön egymással. Az annihilációs sugárzás energiája mindig 511 keV. Ebben az esetben az annihilációs sugárzás (a mag gamma sugárzásával ellentétben) nem azonosítja a sugárforrást.

#### **3.3.2.2. A gamma foton és az anyag kölcsönhatása**

A kölcsönhatások alapján az energia nagyságát figyelembe véve a gammasugárzást három nagy csoportra oszthatjuk.

a.) Kis energiájú gammasugárzás ( $E < 0,2$  MeV). A kölcsönhatás meghatározóan fotoeffektus.

- b.) Közepes energiájú gamma sugárzás ( $0,2 < E < 2$  MeV). A kölcsönhatás meghatározóan Compton és fotoeffektus.
- c.) A 2 MeV-nél nagyobb energiájú gamma sugárzás. A kölcsönhatás párképzés és Compton effektus.

A fotoeffektus: a foton teljes energiáját átadja az atom elektron rendszerének. A foton elnyelődik, a gerjesztett atom egy kötött elektronja pedig a kötési ill. ionizációs energiát meghaladó gerjesztési részt, mint kinetikus részt viszi magával. A fotoeffektus következménye a sugárzás intenzitásának csökkenése mellett az ún. fotoelektronok és a gerjesztett állapotú atomok létrejötte. A fotoeffektus eredményeként a foton megszűnik és az elnyelt foton energiájától függő energiájú elektron létrehozása mellett visszamarad a gerjesztett atom. A legbelső elektronhéjon keletkezett betöltetlen hely az elektronrendszer átrendeződése útján betöltődik. Ezen folyamatok eredménye a karakterisztikus röntgensugárzás ill. Auger-sugárzás.

Compton szórás: a gamma foton és az elektron rugalmas ütközése. A legnagyobb energiaátadás  $180^\circ$  foknál van. A Compton szórás egy fontos tulajdonsága, hogy a szórt foton energiája és ezzel együtt az energiaátadás a foton kezdeti energiájának függvénye.

Pároképződés: a gamma foton és a magerótér kölcsönhatása.  $1,02$  MeV a fotonenergia felett a foton átalakulhat elektronná és pozitronná. Amikor a pozitron lelassul, annihilálódik egy az anyagban lévő elektronnal, s ennek során  $511$  keV energiájú foton keletkezik. Ezért a párképzés során a gamma spektrumban mindig megjelenik az  $511$  keV-es csúcs.

A kisenergiájú gamma kölcsönhatás tulajdonságait az adott abszorbensnél kizárólag a fotoeffektus jellegzetességei szabják meg. A fotoelektron leadja energiáját az anyagban. Amennyiben a karakterisztikus X-foton is elnyelődik a gamma foton teljes energiája átadódik az abszorbensnek. A közepes energiájú gamma sugárzás Compton és foto kölcsönhatás során adja át energiáját. A csökkent energiájú gamma foton sorsa az anyagban:

- 1.) Eltávozik az anyagból.
- 2.) Újabb Compton effektussal további energiát ad le az anyagnak.
- 3.) Fotoeffektussal a teljes maradék energiáját leadja.

A fotoeffektus végbemenetelének annál nagyobb a valószínűsége, minél nagyobb volt a megelőző Compton kölcsönhatásban az energiacsökkenés. A Compton és az azt követő fotoeffektus gyakorlatilag azonos időpontban megy végbe. A nagyenergiájú (2-20 MeV) gamma fotonok első lépésben párképzéssel adják le energiájukat. A primer fotoeffektus valószínűsége gyakorlatilag nulla.

### **3.3.2.3. A gamma spektroszkópia alapjai, a detektorok, a HPGe működése**

Detektorokat azzal a céllal készítünk, hogy bennük a gamma sugárzás és az anyag között lejátszódó kölcsönhatások következtében létrejött összetett folyamatok által keltett mérhető mennyiségeket detektáljuk. Gamma spektroszkópiai célra kétféle detektortípust használunk. Az egyik a félvezető a másik a szcintillációs detektor.

#### Szcintillációs detektorok

Szcintilláló anyagok és a gamma sugárzás kölcsönhatásakor fényfelvillanás keletkezik a szcintillátorban. A fényfelvillanás foto elektron sokszorozóval átalakítható fotoelektronok áramává, majd erősíthető. A szcintillátorok által a kibocsátott fény intenzitása a gamma sugárzás energiájának függvényében változik. A szcintillátornak két eltérő elven működő típusa ismert.

- 1.) Szervetlen anyagok szcintillációs tulajdonságai a kristályok szerkezetére vezethető vissza. A fénykibocsátás a szilárd anyagok sáv szerkezetében történő átmenetekkel magyarázható. Legismertebbek: NaI(Tl), ZnS(Ag). Nagy effektív rendszámuk miatt igen nagy belső hatásfokkal rendelkeznek. Ugyanakkor kicsi az energia felbontásuk.

3.) A szerves anyagok szcintillációs tulajdonságai a molekulaszervezetre vezethetők vissza, ezért halmazállapottól független használhatók. Legismertebbek az antracén ( $C_{14}H_{10}$ ), a naftén. Kis effektív rendszámuk miatt ezek gamma sugárzás mérésére kevésbé alkalmasak.

#### Félvezető detektorok, a HPGe működése

Félvezető detektorokat félvezető anyagok egykristályaiból készítenek. Működésük a szilárd anyagok sávszerkezetével és a p-n átmenettel kapcsolatos. Ha egy félvezető kristályban mindkét típus (p, n) jelen van és megfelelően érintkezik, akkor megindul a két típusban eltérő koncentrációban jelenlévő szabad lyukak és elektronok diffúziója. Ennek következtében egy kiürített réteg keletkezik, amelyben szabad töltéshordozók nincsenek. Végeredményben felborul a töltésegyensúly és elektromos feszültség jön létre. Ha a kiürített rétegben szabad töltéshordozók keletkeznek, akkor azokat az elektromos tér szétválasztja és összegyűjti, így áramimpulzus jön létre, A kiürített rétegben keletkezett elektromos feszültség és a réteg vastagsága kicsi, ezért önmagában nem elégséges az eszköz detektálás céljára. A kiürített réteg viszonylag nagy kapacitással rendelkezik, ami növel a keletkező jel zaját. Ha azonban a p-n átmenetre külső záró irányú feszültséget kapcsolunk, a kiürített réteg vastagsága és ezzel a detektor érzékeny térfogata nő.

Elsősorban a germánium és a szilícium detektorok terjedtek el. Ezek tulajdonságait a következő táblázat tartalmazza.

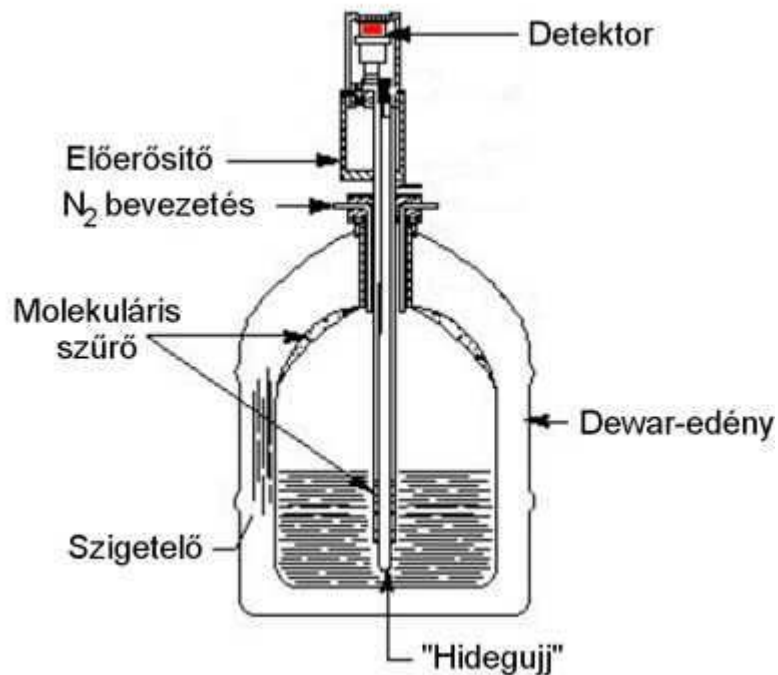
Elem	Ge	Si
Rendszám	32	14
Sűrűség g/ cm <sup>3</sup> 300 K-en	5,33	2,33
Belső ellenállás ohm/cm	45	2,3*10 <sup>-5</sup>
Elektron lyuk pár keltés energiája (MeV)		
300 K-en	-	3,62
700 K-en	2,96	3,76

Az adatok következményei:

- A rendszám és a sűrűség miatt a Ge detektorok hatásfoka nagyobb a Si detektorokénál, mert a gamma sugárzás kölcsönhatása az anyaggal ezekkel nő.
- A töltéshordozók termikus gerjesztésének csökkentése érdekében a Ge detektor csak alacsony hőmérsékleten használható. A Ge detektorokat cseppfolyós nitrogénnel hűtik ---200 fokra. A detektor felületét ugyanakkor meg kell védeni a kondenzációtól, ezért a detektort vákuumba helyezik.
- Egy elektron lyuk pár létrehozásához szükséges energia Ge-ban viszonylag kicsi (~3 eV). Ez az érték 100-szor kisebb, mint a NaI(Tl)-ban. Azonos energiaátadás esetén 2 nagyságrenddel több töltéshordozó keletkezik a Ge-ban, mint a NaI(Tl)-ban. Ez a detektor jobb energiafelbontását teszi lehetővé.

Méréseim során HPGe (High Purity Ge) detektort használtam. Egy tipikus detektorban néhányszor 10 mm távolságot tesznek meg a töltéshordozók, ami néhányszor 100 ns-ot vesz igénybe. Azaz viszonylag gyors válasz keletkezik. A 60-as évek folyamán még nem tudtak elegendően tiszta Ge alapanyagot előállítani, így a kristály vezetését a szennyezők tulajdonságai határozták meg. A 70-es évek végétől már rendelkezésre állt a megfelelő technológia, amivel nagy tisztaságú Ge-t tudtak előállítani. Nagyon tiszta (<10<sup>10</sup> szennyező atom / cm<sup>3</sup>) és hűtött kristály vezetőképessége már elegendően kicsi ahhoz, hogy a gamma sugárzás hatására keletkező jel jól mérhető legyen. Ellenállása pedig

elegendően nagy ahhoz, hogy megfelelő teret lehessen alkalmazni. Az aktív térfogat növelése érdekében különböző detektor konfigurációkat készítenek. Viszonylag nagy aktív térfogatuk miatt a koaxiális detektorok elterjedtek. Egy HPGe detektor vázlatos rajzát mutatja következő ábra.

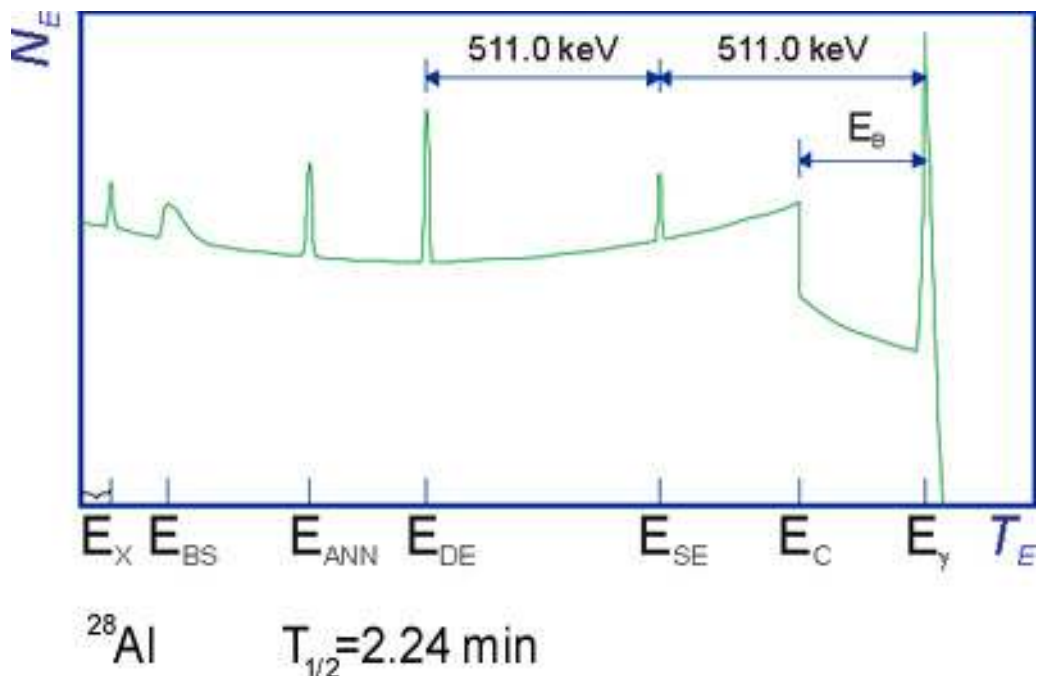


#### 3.3.2.4. A gamma spektrum

A fotoeffektus során keltett kinetikus energiája a kötési energiával kisebb, mint az elsődleges gamma kvantumé. Nagyméretű detektor esetén az elektron kilökődését röntgen sugárzás nagy valószínűséggel még a detektoron belül újabb fotoeffektussal átadja energiáját egy másik elektronnak. A fotoeffektushoz tartozó detektorjel kapcsolatban áll a bejött gamma kvantum energiájával.

Abban az esetben, ha a beérkező gamma foton Compton szórást szenved, utána vagy kimegy a detektorból, vagy kölcsönhat vele. Ha kiszökik, akkor csak a meglökött elektron hozhat létre felvillanást. Mivel a meglökött elektron

energiája nyilván kisebb, a beérkező gamma fotonénál kisebb impulzust produkál a detektor kimenetén. Ha viszont a foton teljes energiája benn marad a detektorban pl. szóródás után fotoeffektussal, akkor ugyanakkora felvillanást észlelünk, mint fotoeffektusos esetben. Általánosan igaz, hogyha a gamma foton energiája teljes egészében bennmarad a detektorban, a fotoeffektusnak megfelelő impulzust kapunk. Ha annak egy része kiszökik, ezek energiája nem lesz benn a spektrumban. Energiát vihetnek ki a detektorból kiszökő elektronok illetve gamma fotonok. A detektor méretének növelésével a kiszökés esélyét lehet csökkenteni. A kiszökés valószínűsége a felület nagyságával, a bennmaradásé a térfogat nagyságával arányos. A gamma spektrum a gamma sugárzás és a detektor kölcsönhatásának következtében keletkező időben véletlenszerű elektromos impulzusok gyakoriságának amplitúdó szerinti eloszlása. A spektrum valójában a kölcsönhatások folyamán keletkező elsődleges töltött részecskék energiaspektruma, ezért folytonos jellegű és alakja az elsődleges kölcsönhatások elméleti energia eloszlására vezethető vissza. Az alábbi ábra egy ilyen spektrumot szimbolizál.



A spektrum részei:

- Az első legnagyobb csúcs a fotoeffektus következtében létrejött fotoenergia csúcs.
- A második csúcs a Compton szórásból származó Compton él. Ez a 180 fokos Compton szóráshoz tartozó maximális kinetikus energiájú elektronok által keltett jelek helyét mutatja. Az ezekhez tartozó gammakvantum újabb kölcsönhatás nélkül elhagyta a detektor térfogatát.
- A következő rész a Compton hát.
- Majd újabb két csúcs következik. Ezek az egyszeres illetve a kétszeres szökési csúcsok, amik párképzés következtében keletkeztek.
- A következő csúcs a visszaszórás csúcs. Ezt a csúcsot a szórt gammakvantumok keltik fotoeffektussal, amelyek előzőleg kölcsönhatás nélkül keresztülhaladtak a szcintillátoron, majd a detektor anyagában Compton szóródtak, így jutottak vissza a detektorba.
- A következő csúcsok az annihilációs csúcs, és a röntgensúcs.

Az egyes összetevők aránya a detektor jellemzőitől (anyag, méret), a gamma sugárzástól (energia), a sugárforrástól (alak, távolság), a detektor árnyékoltságától, háttérétől stb. függ. A spektrum összetevői együttesen alkotják a teljes elméleti gamma spektrumot, ami Monte Carlo szimulációval kiszámítható. A valódi méréseknél a spektrum összetevői kissé kiszélesednek és elmosódnak. Az alkotórészek közül a legfontosabb a teljesenergia csúcs, mert ennek energiája megegyezik a gamma sugárzás energiájával, továbbá alakja első közelítésben gauss görbe szerű. S teljesenergia csúcsok energiája alapozza meg a gamma sugárforrás azonosítását, míg a fotocsúcsok területe mennyiségi meghatározását tesz lehetővé.

### **3.3.2.5 A spektrumok kiértékelése, a hatások számítás**

A spektrum kiértékelése számítógépes program segítségével történik. A kiértékelés az alábbi lépésekből áll:

- A fotocsúcsok megkeresése (peak search) adott energiánál.
- A talált teljes energia csúcsok illesztését megfelelő függvényel.
- A teljesenergia csúcsok területének számítását.

Az illesztő függvény alapvetően Gauss görbe illetve háttér esetén első vagy másodfokú polinom. Az illesztés egyszerre számolja az összes illesztési paramétert, így a csúcsamplitúdót (ami ebben az esetben ekvivalens a területtel), a terület hibáját, az energiát, és annak hibáját.

A csúcsok megkeresése és azonosítása céljából a spektrumon energiakalibrálást kellett végezni. A kalibráció két jellegzetes csúcs a K-40 (1460 keV-es) és a Tl-208 (2614,53 keV-es) csúcsának beállításával történt. Ezután a Camcpr nevű program segítségével megkerestük (most már energia szerint) a csúcsokat, és a legkisebb négyzetek módszerével Gauss görbét illesztettünk. A program automatikusan elvégzi a más gamma energiáktól származó háttér levonását. A mérés megkezdése előtt háttérrel is mértem. Az így kapott spektrumot szintén kalibráltam energia szerint, majd megkerestem a csúcsokat. Ezen háttér csúcsainak területét a kiértékelés további lépéseiben vettem figyelembe. Hiszen ezzel kapjuk a korrigált háttérrel. Ahhoz, hogy megtudjuk mondani a mintában lévő bomlások számát, szükségünk van az adott bomlás csatornaarányára ( $\epsilon$ ) és a detektálás hatásfokára ( $\nu$ ). Az előbbi a Nuclides 2000 program segítségével összeállított táblázat tartalmazza. Ezen adatok a függelékben találhatóak. A hatásfok számolására a HPGe nevű programot használtam. A program indításakor meg kell adni a mintatartó méreteit (sugarát, magasságát), a minta és a detektor távolságát, valamint az energiaértékeket, a moláris tömeget, az elemek rendszámát, darabszámát. A program véletlenszerű bomlásokat generál a mintában a vizsgált energiaértékeken. Figyelembe veszi adott energián az érzékelés valószínűségét, az önnyelődést. A program a fentiek segítségével kiszámítja az adott energiájú foton átlagos szabad úthosszát. Ha ez kisebb, mint a bomlás kijutásához szükséges távolság, azt úgy tekinti mintha elnyelődött volna. A programmal kiszámolt adatokat xx.eff file-be mentettem. Egy-egy hatásfokmérés addig történt, amíg a hatásfok mérés hibája 2 % alá csökkent.

## A talajminták kiértékeléséhez felhasznált képletek

A kiértékelés során az adatokat egy táblázatban rögzítettem. A táblázat adatai a következők:

-  $T_i$ : adott energiánál mért fotocsúcs területe.

$T_h$ : adott energiánál a háttércsúcs területe.

$C$ : a háttérmérés és a minta mérési idejének hányadosa.

$T_i - T_h * C = T_n$ : a nettó terület.

$T/t$ : az intenzitás  $I$ .

$I/e * v = A$ : az aktivitás, ahol  $e$  a csatorna arány,  $v$  a határfok.

$A/\lambda = N$ : az illető elem darabszáma a mintában.

$N/N_A/M = m$ : a mintában lévő adott elem tömege, ahol  $M$  a moláris tömeg.

$T_{mév}$ : az U-238 és a Th- felezési ideje milliárd évben kifejezve.

U, Th ekv.: azt fejezi ki hogy a mintában mennyi az urán illetve a tórium, ha feltételezzük az egyensúly beálltát. Ezen mennyiségeket az urán esetében a Ra-226, tórium esetében az Ac-228 aktivitásából határozhatjuk meg.

Ezt a következő képletből kapjuk:  $I/(e * v) / (\ln 2 / T_{mév} / 3,1/6 * 10^6) / M$

-  $m$  (g/tonna): azt mutatja meg mennyi g U, Th van 1 tonna mintában. Ezt a következőképpen számolhatjuk ki:  $U, Th \text{ ekv.} / m_{\text{minta}} / 10^6$ .

## **4. Eredmények, diszkusszió**

Ebben a fejezetben az általam mért adatok összesítése és magyarázata található. Szakdolgozatom célkitűzése az volt, hogy áttekintést nyújtsak a Nyugat-Magyarországi források radon tartalmáról. Több helyről földmintát is gyűjtöttem. Ezeket gamma spektroszkópiás módszerrel elemeztem ki. A talajmintagyűjtés azzal a céllal történt, hogy tájékozódást nyerjek a az adott hely urán illetve tórium tartalmáról. Magas urán illetve tórium koncentráció elsődleges oka lehet a terület nagy radon aktivitás koncentrációjának. Az eredmények értelmezésekor figyelembe vettem az ELTE Geofizikai Kutató Intézetétől szerzett 1965-ben légifelvétellel készített radioaktivitás térképet. Az

eredményeket az alábbi táblázatok tartalmazzák.

A Balaton-felvidék 2002.10.23.-i vizeinek adatai :

Minta kód	Minta név/hely	Rn (Bq/)	Ra (Bq/l)
GL1	Sár kút/Gulács	6,87	1,04
GL2	Sár kút/Gulács	4,53	0,9
CS1	Vár kút/Csobánc	4,37	1,02
CS2	Vár kút/Csobánc	3,72	0,96
BH1	Csurgó kút/Balatonhenye	17,2	2,05
KL1	Győrfi emlékhely belső/Köveskál	25,78	1,92
KL2	Győrfi emlékhely külső/Köveskál	21,69	1,64
KLA	Közkút/Köveskál	18,52	2,04
KK1	Kis kút/Nemesleányfalu	42,61	1,71
KF1	Kinizsi forrás/Táldi kolostor	17,16	1
FF1	Fejfájós kút /Vigántpetend	18,65	1,41
KP1	Kapolcs/közkút	9,25	0,46
KP2	Kapolcs / Birómalom	1,85	0,6
MA1	Szent kút/Monostorapáti	25,56	1,17
MA2	Szent kút/Monostorapáti	22,09	0,42
MA3	Nádas tó / Monostorapáti	42,29	2,55
MA4	Nádas tó / Monostorapáti	21,34	0,66
JO1	Csopak	32,92	0,83

A talajminták urán illetve tórium tartalma táblázatosan összefoglalva:

	Csobánc	Fejfájós kút	Kis kút	Szent kút	Csurgó kút	Gulács	Kinizsi forrás
U(g/t)	4,97	2,51	4,46	4,11	7,49	3,58	4,37
Th(g/t)	7,65	1,4	2,95	6,1	5,15	7,64	6,65

A talajok részletes elemzése a fejezet végén található.

A táblázat adataiból látható, hogy a gulácsi és a csobánci minták aktivitása alacsony. Idézzük fel a terület földtani múltját. A Gulács a pliocén-pleisztocén korban lezajlott bazaltvulkáni tevékenység eredménye, hasonlóan a Csobánchoz.. A vulkáni eredetű helyeken nagyobb aktivitást várunk, mivel az

ilyen eredetű kőzeteknek nagy az urán és a tórium tartalma. Mivel a radon rádium leányeleme érdemes ezeket az adatokat is szemügyre venni. Összehasonlítva a többi adattal azt látjuk, hogy az 1 Bq/l Ra tartalmú mintáknak Rn aktivitása nagyobb. A mért alacsony érték oka valószínűleg az, hogy a gulácsi mintavétel alkalmával egy alacsony vízszintű kútból vettem a vizet. A talajból a vízbe kerülő rádium a kút alján összegyűlt, míg a radon a levegővel érintkezve, kidiffundált. Hasonló a helyzet a csobánci minták esetén is. Ebben az esetben a vizet egy kb 3 l vizet tartalmazó kútból vettem. Mindkettő esetben tapasztaljuk a sajátos radonanomáliát. Nevezetesen azt, hogy a kút magasabb rétegéből származó illetve a gulácsi esetben a kúttól távolabbi mintáknál a radon tartalom alacsonyabb. A BH1 nevű mintánál Ra tartalom közel kétszerese az előzőeknek. A terület anyaga mészkő. A légifelvétel alapján készült térképet tanulmányozva a terület a szürke folt szélére esik. Mind a talaj anyaga, keletkezése, mind a mintavételi körülmények okai lehetnek a magasabb aktivitás koncentrációnak. Megnézve a Balaton-felvidék geomorfológiai térképét, láthatjuk, hogy a terület a Litéri-törésvonal közelébe esik. Ez is meghatározó lehet a mért érték szempontjából. Ezekre a repedéseken keresztül a mobilis Ra könnyebben kerül a talaj felsőbb rétegeibe, s ezáltal a vizekbe. Hasonló a helyzet a KF1 és FF1 minták esetén is, ugyanis ezen területek is a Litéri -törésvonal közelében helyezkednek el. A köveskáli minták esetén közel azonos értéket tapasztalunk. A KK1, és a KK2 minták a Győrfi emlékhelyről valók, míg a KLA egy nyomós kútból. Az emlékhely úgy nézett ki, hogy volt egy kút amit beton fal vett körül. Innen származik a KK1 minta. A KK2 a kút külső részén levő tározóból való. A minták Ra tartalma 1,5-2,1 Bq/l közötti. A terület geológiáját keletkezéséről gyűrt töréses hegység mészkővel és dolomittal borítva. Talán a terület keletkezése során létrejött törések lehetnek magyarázatai a mért Ra értékeknek. A kapolcsi minták aktivitása 1-10 Bq/l. Az ok az alacsony vízszintben keresendő. A monostorapáti Ma1 illetve Ma2 Szent kúti minták aktivitásai 25-22 Bq/l, és egymáshoz közeli értékek. De jelentősen eltér a rádiumtartalmuk. A magyarázat az lehet, hogy az Ma1 minta arról a helyről való, ahol a forrás egy medence szerű építménybe torkollott. Míg az Ma2 a medencétől kicsit távolabbról, a kútból kifolyó vízből való. Ezeknél a mintáknál kimutatható a „tálcaeffektus”, ami azt jelenti, hogy a mederben lévő vízben mélyebbre ül le a rádium, míg a kúttól távolabb ennek mennyisége csökken.

#### A Balaton-fekvidék(2) 2002.11.26.-i minták elemzése

Minta kód	Minta név / hely	Rn (Bq/l)	Ra (Bq/l)
AK1	Ányos kút / Veszprémfajsza	1.58	0.26
BP1	Balócpusztá	43.52	0.62
SF1	Siske forrás / Balatonfüred	16.69	1.58

ERNŐ	Szekér Ernö emlékforrás / Balatonfüred	66.79	1.54
BE1	Bercsényi forrás / Balatonfüred	24.89	
PKF	Péter forrás / Balatonszőlős	32.15	1.83
BSZ	Balatonszőlős	8.49	0.5
FÚZ	Fűz kút / Pécsely	26.58	0.86
JÁBOD1	Jábod forrás / Pécsely	44.30	0.9
JÁBOD2	Jábod forrás / Pécsely	33.60	1.58
ZÁDOR	Zádor forrás / Pécsely	16.76	1.28
BÖRTÖN	Börtön forrás / Pécsely	26.59	
MEG	Meggyes forrás / Vászoly	17.75	2.42
DŐ1	Dörgicse	2.48	0.56
MOSÓ	Mosó kút / Óbudavár	5.36	0.72
KÖK	Kő kút / Kővágóörs	40.03	1.78
KSF	Theodóra forrás / Kékkút	33.37	

A Balaton-felvidék (2) talajának részletes adatai a fejezet végén található. A következő táblázat az urán illetve tórium tartalmat mutatja:

	Fűz forrás	Péter forrás	Kékkút
U(g/tonna)	8,97	5,62	6,42

Th(g/tonna)	9,9	7,65	3,2
-------------	-----	------	-----

Ezen területek közül néhány a légi térkép alapján a többihez képest nagyobb radioaktivitású. Ilyen például : Kővágóörs, Pécsely, Veszprémfajszi környéke. A táblázat adataiból láthat, hogy a BSZ, MOSÓ,DÖ1, ÁK minták aktivitása 10 Bq/l nél kisebb. A veszprémfajszi ÁK minta alacsony aktivitása 1,58 Bq/l a Ra tartalma pedig meglehetősen alacsony. Összevetve a BSZ és a MOSÓ kutak értékeivel azt tapasztaljuk, hogy ezek Ra, Rn tartalma az előzőnél magasabb. A táblázatból az is kitűnik, hogy a MOSÓ kút Rn aktivitás koncentrációja kisebb, mint a BSZ esetben, ugyanakkor a Ra tartalom ezzel fordítva változik. Az ok valószínűleg az lehet, hogy a Mosó kút esetén a vizet egy medenceszerű építményből vettük, így a Rn kidiffundálhatott, míg a Ra ott maradt. A BSZ esetben egy földből kijövő csapból vettem a mintát. Így itt azt a friss vizet vizsgáltam. Várakozásunknak megfelelően a Jábod1, ERNŐ, FŰZ, JÁBOD2, BP1, KSF minták aktivitása magasabb. A táblázat adataiból kitűnik, hogy JÁBOD1 esetben kb. 10 Bq/l-rel nagyobb a Rn koncentráció érték, mint a JÁBOD 2 esetén. A Ra tartalom viszont ezzel fordítottan korrelál. A magyarázat az lehet, hogy a JÁBOD1 minta közvetlen e forrás kifolyásából való. Így innen elmosódott a Ra, a Rn pedig nem tudott kidiffundálni. A többi mintához képest magas értéket kaptam a SZE mintánál. Ide a 3-ik mintavétel alkalmával is visszatértem, a Bercsényi forráshoz hasonlóan. A két adatsort ( a novemberit és a márciusit ) összevetve időszakos változás nem mutatható ki. Hasonló aktivitás értéket mértem FŰZ és a PKF minták esetén. Érdekes viszont, hogy a Ra tartalom a PKF minta esetén közel 2-szerese a FŰZ-nek. Az ok az lehet, hogy a PKF esetben egy gémeskút jellegű helyről van szó, míg a FŰZ kutat egy forrás táplálta, így a Ra kimosódhatott a mederből. Mintavételeim alkalmával voltam Kékkúton a palackozó üzem mellett. Itt 33 Bq/l-t mértem. Ennél alacsonyabb értéket kaptam a vászolyi Meggyes forrás, a balatonfüredi Siske forrás és a pécselyi Zádor forrás, Börtön forrás esetén. A Zádor forrás esetén 10 Bq/l-rel kisebb értéket mértem, mint a BÖRTÖN minta esetén. Az ok a ZÁDOR minta esetén a nagy sebességgel áramló víz miatti gyors diffúzió lehet.

## Balaton-felvidék (3) 2003.03.29-i minták adatai

Minta kód	Minta név / hely	Rn (Bq/l)	Ra (Bq/l)
REM3	Remete forrás / Balatonalmádi	47.80	0.63
FÖK3	Kerekes kút / Felsőörs	16.46	
FÖF1	Felsőörs	7	0.13
FÖF2	Felsőörs	6.69	0.26
CSIK3	Csiker forrás / Felsőörs	12.32	0.7
SAV3	Savanyú forrás / Lovas	50.96	
JO3	József forrás / Csopak	26.12	
BE3	Bercsényi forrás / Balatonfüred	24.18	
SZE3	Szekér Ernő emlékforrás / Balatonfüred	64.51	
CIP2	Ciprián forrás /Tihany	12.29	
CIP3	Ciprián forrás /Tihany	5.88	0.46
NOSZ	Nosztori völgy	7.99	
KOL1	Koloska forrás	15.72	0.16
KOL2	Koloska forrás	29.64	0.46
LOC3	Lóci barlang / Balatonszőlős	10.83	0.63

A táblázat adataiból látható, hogy a Felsőörsi CSIK3, FÖK1, FÖF2, FÖF1 minták Radon aktivitás koncentrációja 6 – 12 Bq/l. a terület keleti részét a

felső-perm és az alsó-triász képződmények alkotják, míg a nyugati rész az előzőeknél fiatalabb, középső és felső triász rétegekből épül fel. A két területet egy északi-déli csapású szerkezeti zóna választja el. A minták területileg a keleti részről valók, azaz a talajt illetően vörös homokkőről van szó. Ezek urántartalma alacsony. Hasonló értékeket kaptam a Nosztori-völgy KOL1, KOL2, CIP3, CIP2 esetében. A NOSZ, KOL1, KOL2 esetben a talaj anyaga Sándorhegyi mészkő, amely törmelékkel feltöltődött karni medencének legfiatalabb kifejlődése. Az alacsony aktivitás értékek magyarázata a kevés urán illetve tórium tartalomban keresendő. Magasabb értékeket mértem a Remete és a Lovas-i Savanyú forrás esetében. A harmadik mintavétel alkalmával visszatértem a csopaki József forráshoz illetve a balatonfüredi Bercsényi és Szekér Ernő emlékforráshoz. A József forrás novemberi és márciusi adatait összehasonlítva láthatjuk a radon anomáliáját, nevezetesen a radon évszakos változását. Ezt az effektust a Bercsényi és a Szekér Ernő emlékforrás esetén nem tapasztaltam.

## 5. A természetes radioaktivitás középiskolai feldolgozásának módszere

### 5.1. Módszertan

Ebben a fejezetben megpróbálok áttekintést adni a természetes radioaktivitás középiskolai tanításának módszeréről. A fejezet elején a sugárzás mibenlétének vizsgálata, a felezési idő, aktivitás fogalma, néhány detektálási eljárás, és néhány alkalmazási terület bemutatása következik. A fejezet végén egy tesztet illetve ennek kiértékelését találjuk. Ezt a tesztet a „Radioaktivitás a természetben” nevű kiállításon elsősorban középiskolai diákokkal töltöttem ki. A tesztből kiderül, hogy a középiskolások számára mely fogalmak a nehezen érthetők.

#### Vázlat a természetes radioaktivitás tanításához

Az óra elején felidézhetjük a korábbi kémiai tanulmányokat. Nevezetesen az atom felépítését, a rendszámot, a tömegszámot, az izotóp fogalmát. Felidézhetjük azt, hogy a mag protonokból illetve neutronokból áll. Felvetődhet a kérdés, hogy miért nem esik szét a mag, mikor azt pozitív töltésű protonok és semleges töltésű neutronok alkotják. A válasz a magerők. A magerők tulajdonságai: rövid hatótávolságúak, a hatótávolságon belül vonzóak, töltés függetlenek. Itt bevezethetjük a kötési energia fogalmát.

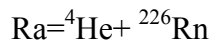
Ezek után rátérhetünk a radioaktív sugárzás tulajdonságaira, magyarázatára. Középiskolában a magmodelleket nem kell megtanítani, elég annyit megemlíteni, hogy a modellekből kiszámítható a kötési energia és rendszám viszonya. Állandó tömegszám esetén a kötési energiát a rendszám függvényében ábrázolva egy parabolát kapunk.

Most következhet a radioaktív sugárzás magyarázata, fajtáinak bemutatása.

Az atommagoknak két nagy csoportja van: stabil és radioaktív magok. Az utóbbiak nagy energiájú sugárzás kibocsátva átalakulnak más magokká. A sugárzás elektromos és mágneses térben való eltérülése alapján 3 fajta lehet: alfa, béta, gamma. A radioaktív magok jelenléte a nem megfelelő proton illetve

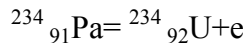
neutron aránnyal magyarázható. Itt is érvényes az energiaminimumra való törekvés.

Az alfa bomlásnál a magból nagy sebességű He mag lökődik ki. A He mag két protont és neutronot tartalmaz, ezért a rendszám kettővel a tömegszám négygyel csökken. Itt taníthatjuk meg a reakcióegyenletek olvasását is. Példaként bemutathatjuk a 88-as rendszámú Ra bomlását:



A béta bomlások során a mag rendszáma közelít az előbb említett görbén a  $Z(\text{min})$  értékhez.

A béta bomlásra példaként megmutathatjuk a következő példát:



Az új elem tömegszáma azonos a bomlás előtti elemével. A rendszám viszont eggyel nő. Ez lényeges különbség az alfa bomlással szemben. Meg kell néznünk, hogy lehet hogy a béta sugárzásnál elektron lép ki, valamint, hogy mit jelent a rendszám növekedése. Az utóbbi arra utal, hogy egy töltésgęssęggel nagyobb lett a mag pozitív töltése. A tömegszám változatlansága azt jelenti, hogy nukleon (proton vagy neutron nem lépett ki a magból. Ez csak úgy lehetsęges, hogy a magon belül egy neutron önmagától elektron kisugárzása közben protonná változott. Ez a negatív béta bomlás.

A béta bomlásnak van másik fajtája is a pozitív béta bomlás. Ennek során egy magbeli alakul át neutronná, egy pozitron és neutrínó kíséretében.

Van még az ún. elektronbefogás, amikor egy magbeli proton befog egy elektronehéjon lévő elektront.

Ezek után megnézhetjük a gamma bomlást. A gamma sugárzás természete szerint nagy áthatolóképessegű elektromágneses sugárzás. Mind az alfa, mind a béta bomlást kísérheti ilyen sugárzás. Itt utalhatunk arra, hogy ez a sugárzás a gerjesztett magból jön ellentétben a röntgensugarakkal.

Ezen a ponton bevezethetjük az aktivitás és a felezési idő fogalmát. Itt elővehetjük a diákok korábbi ismeretét a mértani sorra vonatkozóan, hiszen az aktivitás csökkenés mértani sorozat szerint történik: ha  $T$  idő után a kezdeti magok száma éppen a felére csökken, akkor újabb  $T$  idő elteltével a felének a felére, és így tovább:  $n(t)/n(0) = 2^{-t/T}$ . Ezt nevezzük exponenciális

bomlástörvénynek. Ezek után rátérhetünk a bomlási sorok és a radioaktív egyensúly bemutatására. Elmondhatjuk, hogy 4 féle bomlási sort különböztetünk meg, hogy a bomlási sorban levő elemek tömegszámát négygel osztva milyen maradékot kapunk. Ezek a következők:

- 4k család első eleme: Th-232
- 4k+1 család első eleme a Np-237
- 4k+2 család első eleme a U-238
- 4k+3 család első eleme: azU-235

A bomlási családokat egy szemléltető tábla segítségével tanulmányozhatjuk. Az egyensúly tárgyalásakor kiszámolhatjuk, hogy mennyi U-238 kell 1 g Ra-226 keletkezéséhez. Első lépésként kiszámítjuk, hogy ebben mennyi rádiummag van. Itt szintén utalhatunk a korábbi kémiai tanulmányokra. 1 g Ra-ban  $(1/226) \cdot 6 \cdot 10^{23}$  rádiummag van. Az uránmagok száma  $n = T_U/T_{Ra} \cdot n_{Ra} = 7,46 \cdot 10^{27}$ . Ezek után már nem jelenthet gondot az urán tömegének kiszámítása:  $m_U = n_U/6 \cdot 10^{23} = 2960$  kg.

Ezek után néhány szót ejthetünk a sugárzás biológiai hatásáról. Itt érdemes megemlíteni, hogy a sugárzások az anyaggal való kölcsönhatásuk során energiát adnak le, és ennek révén biokémiai folyamatokat zavarhatnak meg. Felhívhatjuk a tanulók figyelmét arra, hogy mi is ki vagyunk téve sugárzásnak (pl. kozmikus sugárzás), azonban ezt a sugárzást szervezetünk felmérhető károsodás nélkül viseli el. Bevezethetjük a dózis és a sievert, a gray fogalmát. Ezek után bemutathatjuk a sugárzás biológiai károsító hatását tekintve 2 nagy csoportját: a sztochasztikus és a determinisztikus.

A determinisztikus hatás: Az emberi szervezetet bizonyos dózisküszöbnél nagyobb sugárdózis esetén a károsodás jelei rövid időn belül jelentkeznek. Ez a küszöb 1 Gy érték körüli. Az egésztestet ért akut dózis emelésével a betegség súlyossága fokozódik. Itt további négy szakaszt különböztethetünk meg:

- 1.) kezdeti szakasz: néhány nap.
- 2.) Nyugalmi szakasz: megkezdődhet a gyógyulás, de 30 nap múlva követheti a kritikus szakasz. Itt emésztőszervi megbetegedések léphetnek fel

A negyedik szakasz a lábadozás időszaka.

A sztochasztikus hatás: itt nincs küszöbdózis. Jellemző a hosszú lappangási

idő. A különbség az előzőhöz képest annyi, hogy ebben az esetben előre nem mondható meg előre, hogy az azonos dózist kapott személyek közül kinél jelentkezik a sugárkárosodás. Itt válik szükségessé a kockázat fogalmának bevezetése. Kockázaton valamely káros esemény bekövetkezési valószínűségének és kárának szorzatát értjük. A kockázatvállalásnak a káron és annak P valószínűségén kívül van egy harmadik tényezője is, az előny. Hiszen kockázatot mindig valami előny érdekében vállalunk. A fentieket néhány példával világíthatjuk meg. Fogadjunk egy csokiba, hogy kockadobáskor hatos jön ki! Ha hatos jön ki te fizetsz, ha nem én. Előny: kapsz egy csokit, ennek valószínűsége 5/6. Kockázat: fizetsz egy csokit. Ennek valószínűsége 1/6. Az életben a foglalkozások is kockázattal járnak. Halálos üzemi balesetnél a K kár nagysága 1. Beszélhetünk vállalt, kényszerített kockázatról. Ha pl. valaki repülőre ül, az vállalt kockázatnak felel meg. Viszont a repülőgép nemcsak a gépen ülőket veszélyezteti, hanem pl. egy faluét. Az egyes foglalkozásokra megállapítható egy kockázati érték. Ha N fő dolgozik egy R(t) kockázatot jelentő vállalatban, akkor a társadalmilag vállalt kockázatot a következőképpen számolhatjuk ki. Az  $N(t) \cdot R(t)$  szorzatösszegét elosztjuk a az N(t) összeggel. Az USA-ban ezen statisztika alapján a társadalmilag elfogadható kényszerített kockázat kiszámolt értéke  $10^{-4}$ . Ha egy a társadalom számára hasznos tevékenység kockázata meghaladja ennek az értéknek e tizedrészét, akkor arra fel kell hívni a figyelmet. Ezért kell ráírni a cigarettás dobozra, hogy a dohányzás káros az egészségre. A nukleáris iparban a kockázatot a sugárzást kibocsátó anyagok jelentik. A sugárvédelem feladata, hogy kockázatot a társadalmilag elfogadható érték alá szorítsa.

A sugárzás természetének ismerete után rátérhetünk a sugárzások detektálására. Itt a következőket mondhatjuk el.

Az ionizáló sugárzások érzékszerveinkre közvetlen hatást gyakorolnak, ezért szükség van olyan eszközökre amelyekkel ezt mérni tudjuk. A sugárzásérzékelőket 2 nagy csoportra oszthatjuk:

## I. Részecskeszámlálók

- 1.) Ionizációs kamra: lényeges eleme egy fémrúd, amelyet egy fémhenger vesz körül. A két rész közti teret gáz tölti ki. A hengerekre feszültséget kapcsolunk a két elektród között nem folyik áram a rendszerben. Ha a berendezést ionizáló sugárzás éri, a gáz ionizálódik, és az áramkörbe kapcsolt árammérő áramot jelez. Ez a sugárzás erősségével lesz arányos.
- 2.) Geiger-Müller számlálócső: A fémrúd helyett néhány milliméter átmérőjű drótot veszünk és megfelelő gázkeveréket alkalmazva GM csőhöz jutunk. Feszültség hatására a gáztérben keltett töltéshordozók az elektródok felé gyorsulnak. Ezek semleges gázatomokba ütközve ionizálnak, azaz elektronokat szakítanak ki. Ezek az elektronok felgyorsulnak, így újabb elektronokat tépnek le a semleges atomból. Így egy töltéslavina jön létre. Arról, hogy milyen sugárzásról van szó a fenti két eszköz nem ad tájékoztatást.
- 3.) Szcintillációs számláló: ezzel a detektorral már a részecskék energiájáról is értesülünk. Bizonyos kristályokban az ionizáló részecskék hatására felvillanások keletkeznek. A fény erőssége a részecskék energiájával lesz arányos.
- 4.) Termolumineszcens dózismérő: a fénykibocsátáson alapuló eszköz. Lényege, hogy ha egy szennyezett kristályt, ionizáló sugárzás ér, a sugárzás hatására keletkező elektronok befogódnak a hibahelyekre. Ha a sugárzásnak kitett kristály felmelegítjük a hibahelyekről az elektronok kiszabadulnak. A fény mennyiség arányos az elnyelt dózissal.

## II. Részecskenyom jelző detektorok

- 1.) Ködkamra: túltelített gőzben ionizáló részecskék kondenzációs magokat hoznak létre, útjuk vékony fonal alakjában látható.
- 2.) Buborékkamra: Míg a buborékkamrában a folyadékcseppek válnak ki a gázból, addig a itt a folyadékból kiváló gázbuborék jelzi a részecske pályáját. A buborékkamra alkalmasabb gyors részecskék kimutatására, mint a ködkamra, mivel az alkalmazott folyadék nagyobb sűrűségű, mint a gáz, így több centrum képződik.
- 3.) Film, mint nyomdetektor: főleg a magas légköri sugármérés terén vált be. A film sugárzás hatására megfeketedik. A filmet mikroszkóppal

megvizsgálva, a nyomok hosszából következtethetünk a sugárzás eredetére. Ezek után bemutatathatjuk a radioaktivitás néhány alkalmazását:

## I. Biológiai alkalmazás

### 1.) Radionuklidok alkalmazása:

- Tájékozódást nyerhetünk, hogy a rovarok milyen messzire jutottak a tartózkodási helyüktől a táplálék megszerzésekor.

Leggyakoribb izotópok: P-32, I-131, Na-24.

- Biokémiai reakciók (anyagcsere folyamatok tanulmányozása)
- Radioaktív Cu-64 és Cu-67 izotóp segítségével kimutatták, hogy az egyes izomcsoportok összjátékának zavaraiiban a Cu hiány játszik jelentős szerepet.
- Jelzett baktériumok alkalmazása a bélrendszer mikroflórájának tanulmányozására.

## II. Ipari, fizikai alkalmazás

- Élelmiszerek tartósítása, egyes anyagok sterilizálása.
- Vastagságmérés: ehhez gamma sugárforrást használnak. Ha mérendő anyag egyik oldalára helyezik a forrást a másikra a detektort,
- Akkor a sugárzás erőssége a mérendő anyag vastagságával fordított arányban változik.
- Kopásvizsgálatok: a tárgyra radioaktív izotópot juttatnak, ennek nyomon követésével következtetnek a kopásra
- Füstérzékelők: általában alfa sugárforrást tartalmaznak. Az érzékelő belső terébe jutott füstszemcsék csökkentik az ionizációs áramot, és az működésbe hozza a vészjelzőt.

A fentebb említett eszközöket képekkel is szemléltethetjük. Az alábbiakban az általam C.E.R.N-ben készített fotók láthatók, melyek egy ionizációs illetve



buborékkamrát mutatnak.



## **5.2.A kérdőívek kiértékelése**

A felmérés során két fajta kérdőívet töltöttem ki. A helyes válaszokat vastag betűvel emeltem ki. A kérdések a következők voltak:

### **K1 kérdőív**

1. Honnan származik a geotermikus energia?
  - a.) A föld hőszugárzásából.
  - b.) A föld és más bolygók gravitációs vonzásából.
  - c.) A radioaktív bomlásból**
- 2.) Az anyagot alkotó mikrorészecskék felépítésére melyik igaz?

- a.) A kvarkok protonokból állnak
  - b.) **A kvarkok erős kölcsönhatásban vesznek részt.**
  - c.) A magok elektronokból és protonokból állnak.
- 3.) Melyik igaz?
- a.) A béta sugárzás során a kilépő elektron az atomhéjról lép ki.
  - b.) **Az alfa sugárzás során a rendszám 2-vel csökken.**
  - c.) A béta sugárzásnál a tömegszám is változik.
- 4.) Honnan származik az az energia, amit a Nap fénysugárzás formájában ad le?
- a.) A benne lévő gázok világítanak.
  - b.) **A magfúzióból**
  - c.) A nehéz magok égéséből.
- 5.) Melyik igaz?
- a.) **A gamma sugárzást tartósításra is használják.**
  - b.) A gamma sugárzással sterilizált rovarok radioaktívak lesznek.
  - c.) A daganatok gyógyításánál az egészséges sejtek nagy része elpusztul.
- 6.) A természetes sugárterhelésnek hány %-át kapjuk a radontól?
- a.) 1%   b.) 30%   c.) **50%**
- 7.) Melyik igaz?
- a.) A béta sugárzás elleni védekezésre kis rendszámú elemek jók.
  - b.) **Az alfa sugárforrás szervezetbe kerülve jobban roncsol, mint a béta.**
  - c.) A gamma sugárzás az elektronhéjról indul ki
- 8.) Milyen kőzetbe helyezik a radioaktív hulladékokat?
- a.) **gránit**
  - b.) homok
  - c.) lösz
- 9.) A Paksi Atomerőmű működése során a következők közül melyik igaz?
- a.) **A reaktor hasadó anyagát az uránt dúsítják.**
  - b.) A reaktorban bármilyen radioaktív anyag felhasználható hasadóanyagként.

- c.) A reaktor működéséhez hőenergiára van szükség.
- 10.) Hogyan határozhatjuk meg egy anyag elemösszetételét?
- a.) Egyszerű mikroszkóppal.
  - b.) Röntgen-fluoreszcencia analízissel**
  - c.) Digitális fényképezéssel.

K2 kérdőív:

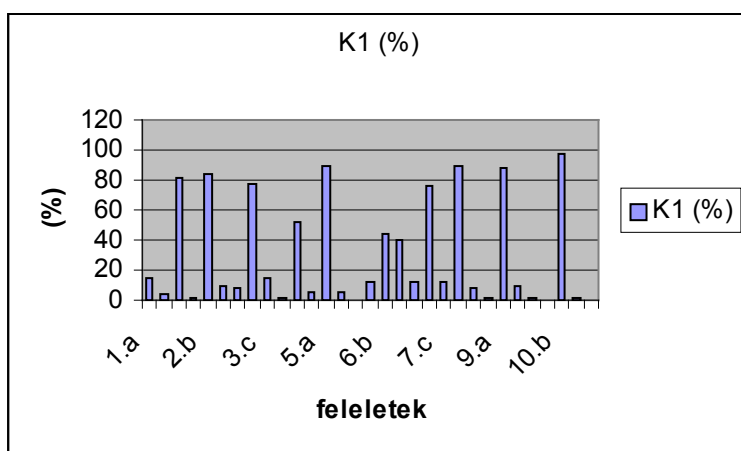
- 1.) Melyik radioaktív sugárzás az alábbiak közül?
- a.) A napsugárzás.
  - b.) A hősugárzás.
  - d.) Az alfa sugárzás.**
- 2.) Melyik igaz az alábbiak közül?
- a.) A kvarkok atomokból állnak.
  - b.) Az atomok elektronokból és kvarkokból állnak.**
  - c.) Az atommagok elektronokból állnak.
- 3.) Milyen magfolyamat megy végbe a csillagokban?
- a.) Hasadás
  - b.) Fúzió**
  - c.) Szupernóva robbanás
- 4.) Hol van természetes reaktor?
- a.) Dél-Mecsekben
  - b.) Olklóban**
  - c.) Az Atlanti-óceánban
- 5.) Milyen irányból érkezik a kozmikus sugárzás legnagyobb része?
- a.) Függetlenül felülről**
  - b.) Vízintés irányból
  - c.) A föld magja felől
- 6.) Milyen idős az arizonai meteorit kráter?
- a.) kb. 5000 éves
  - b.) kb. 50000 éves**
  - c.) kb. 5 millió éves

- 7.) Hogyan lehet elemi részecskék segítségével gyógyítani?
- Protontablettát kell bevenni enyhén citromos vízzel.
  - Felgyorsított részecskenyalábbal kell besugározni a daganatot.**
  - Elemi részecskékkel töltött alkoholgőzt kell inhalálni.
- 8.) Milyen nagyságú radioaktív dózis okoz közvetlen egészségkárosodást az emberben?
- A kozmikus sugárzás is káros.
  - 1 mSv évente.**
  - 200 mSv-nél nagyobb dózis évente.**
- 9.) Milyen folyamat megy végbe az atomreaktorban?
- Hidegfúzió
  - Maghasadás**
  - Urán égése
- 10.) Mire használják a röntgen-fluoreszcencia analízist?
- Gyógyítás
  - Anyagszerkezet vizsgálat
  - Elemösszetétel vizsgálat**

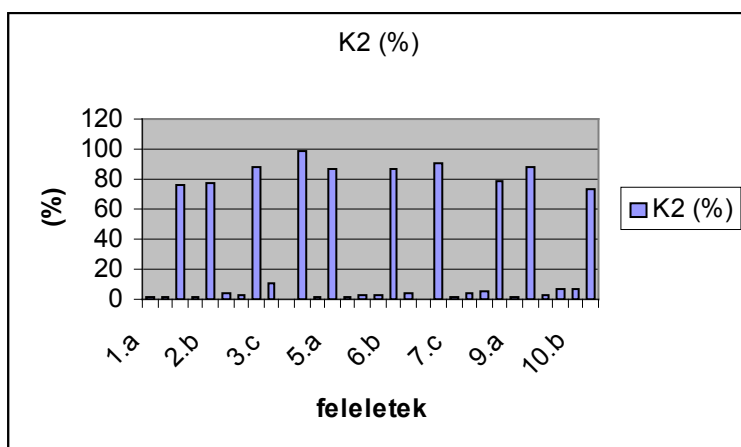
	K1 válaszok	K2 válaszok	K1 (%)	K2 (%)
1.a	7	1	14	0,724
1.b	2	1	4	0,72
1.c	41	105	<b>82</b>	<b>76</b>
2.a	1	2	2	1,44
2.b	42	106	<b>84</b>	<b>76</b>
2.c	5	5	10	3
3.a	4	3	8	2
3.b	39	121	<b>78</b>	<b>87</b>
3.c	7	14	14	10
4.a	1	1	2	0,72
4.b	26	137	<b>52</b>	<b>99</b>
4.c	30		6	0
5.a	45	120	<b>90</b>	<b>86</b>
5.b	3	1	6	0,72
5.c	0	4	0	2,89
6.a	6	3	12	2
6.b	22	120	<b>44</b>	<b>87</b>
6.c	20	6	40	4,34
7.a	6	0	12	0
7.b	38	125	<b>76</b>	<b>91</b>
7.c	6	2	12	1,5
8.a	45	5	<b>90</b>	3,6

8.b	4	7	8	5,1
8.c	1	108	2	<b>78</b>
9.a	44	1	<b>88</b>	0,72
9.b	5	122	10	<b>88</b>
9.c	1	4	2	2,89
10.a	0	10	0	7,24
10.b	49	10	<b>98</b>	7,24
10.c	1	102	2	<b>74</b>

A K1 kérdőív adatai diagrammon ábrázolva



A K2 kérdőív adatai diagrammon ábrázolva



Az adatokból látszik, hogy a K1 kérdőív 8, 10,5 kérdései esetében született a legtöbb helyes válasz. Ennél kevesebb (78-88%) érték adódott 9, 2, 1, 3, 7

kérdések esetén. A legkevesebb helyes válasz a 6, 4 kérdések esetén született. A fentiek közül az 1, 3, 4, 7, 9 kérdések a gimnáziumban tanultakra vonatkoznak, a többi a kiállításához kapcsolódott.

Hasonló a helyzet a K2 kérdőíveknél. Itt a legtöbb helyes választ (86-99%) a 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 –es kérdésekre kaptam. Ennél alacsonyabb (73-78%) érték adódott az 1, 2, 10-es kérdések esetén. Ezen kérdések közül az 1, 2, 3, 9 kérdések kapcsolódnak a középiskolai tanulmányokhoz. A két kérdőív adatait összevetve láthatjuk, hogy a K2 kérdései a középiskolások számára könnyebbek voltak.