



**XXXII. OTDK
2015**

*Fizika, Földtudományok és
Matematika Szekció*



**Radonexhaláció akkumulációs módszerrel
történő mérésének kidolgozása NORM
anyagokra, valamint a mérést zavaró hatások
azonosítása és kiküszöbölése**

Készítette:

Szántó János

Környezetmérnöki mesterszak, 2. évfolyam

Témavezető:

Dr. Sas Zoltán

Egyetemi tanársegéd

Radiokémiai és Radioökológiai Intézet

Mérnöki Kar

Pannon Egyetem

Veszprém

2014

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	1
I. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÁS.....	2
1. Természetes eredetű háttérsugárzások.....	2
1.1. Kozmikus sugárzás.....	2
1.2. Földkérgi (terresztiális) sugárzás	2
2. NORM, TENORM anyagok.....	4
3. A radon és a toron	5
3.1. Szekuláris egyensúly	6
3.2. Radon kijutása szilárd mátrixból	8
3.2.1. <i>Emanáció</i>	8
3.2.2. <i>Radontranszport a pórustérben</i>	10
3.2.3. <i>Exhaláció</i>	10
3.3. Egészségügyi hatások	11
3.4. Jogi szabályozás	12
4. A radon és toron meghatározási lehetőségei	12
4.1. Közvetlen módszer	13
4.2. Közvetett módszer	13
4.3. Pillanatnyi, folyamatos mintavétel és integrális mérések.....	13
4.4. Akkumulációs módszer	14
4.4.1. <i>Az akkumulációs módszer zavaró hatásai</i>	14
4.4.2. <i>Visszadiffúzió</i>	15
4.4.3. <i>Toron</i>	16
II. KÍSÉRLETI RÉSZ	17
5. Radonexhaláció mérés akkumulációs módszerrel	17
5.1. A vizsgálatok során használt mérőrendszer bemutatása	17
5.1.1. <i>AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitor</i>	18
5.1.2. <i>Akkumulációs kamrák</i>	19
5.2. Mintaelőkészítés	21
5.3. Az akkumulációs mérést zavaró tényezők	21
5.3.1. <i>Radon áteresztés és „visszadiffúzió”</i>	21
5.3.2. <i>A toron mérészavaró hatása</i>	23

5.4.	A kidolgozott mérési eljárások ismertetése	24
5.4.1.	<i>Folyamatos mérés</i>	24
5.4.2.	<i>Szakaszos mérés</i>	24
5.5.	A számolás menete	25
III.	EREDMÉNYEK.....	28
6.	A mérést befolyásoló tényezők	28
6.1.	Visszadiffúzió.....	28
6.2.	Radon áteresztés.....	28
6.2.1.	<i>Mintavételi csövek radon áteresztési képességének vizsgálata</i>	28
6.2.2.	<i>Akkumulációs kamra radon áteresztési képességének vizsgálata</i>	29
6.3.	A toron zavaró hatásának kiküszöbölése	31
7.	Az ajánlott mérési eljárás.....	35
8.	Radonexhalációs mérési eredmények értékelése	36
IV.	ÖSSZEFOGLALÁS	39
III.	IRODALOMJEGYZÉK.....	41
IV.	MELLÉKLETEK	44
V.	FÜGGELÉKEK	50

Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb figyelem fordul az emberi egészségre jelentős hatást gyakorló folyamatok tanulmányozására, hatásmechanizmusaik minél pontosabb megismerésére. Az építőanyagokból eredő sugárterhelés általában nem jelentős, azonban az építőanyagok gyártása során előfordulnak olyan természetes, vagy valamilyen gyártási folyamat melléktermékeként keletkező alap és adalékanyagok, melyek megnövekedett koncentrációban tartalmazzák a természetes földkérgi radionuklidokat és bomlástermékeiket.

A rádium (Ra-226) bomlása során keletkező radont (Rn-222) és leányelemeit a tüdőrákot kiváltó okok között, a dohányzást követően második legfontosabb kockázati tényezőként tartják nyilván. A sugárterhelés több mint fele főként a radonnak tulajdonítható. Ebből kifolyólag az építőanyagok rádiumtartalom szerinti minősítése mellett szükséges a gyártási folyamat radonexhalációt csökkentő lehetőségeinek vizsgálata, valamint a késztermékek radonexhaláció (radon kiáramlás) szerinti korlátozása.

A radonexhaláció mérése módszertől és mérőműszertől függően hosszú időt is igénybe vehet, ezért egy viszonylag gyors, olcsó, egyszerű, a mérési körülményektől és az alkalmazott detektortípustól független mérési módszer kidolgozása vált indokolttá.

Az akkumulációs módszert egyes laboratóriumokban már alkalmazzák, mert megfelelő kialakítást követően nincs szükség a rádium és radon közötti szekuláris egyensúly beállításának megvárására, valamint a mérés során lehetőség van folyamatos radon monitor alkalmazására, mellyel a mérési idő tovább rövidíthető. A sok előnyös tulajdonság mellett azonban előfordulhatnak olyan zavaró tényezők, melyek jelentős befolyással lehetnek a mérési eredményekre. Ezen paraméterek pontos meghatározásával az azokból eredő mérési hiba elkerülhető. Egyes radon monitorok nem képesek a radon mellett gyakran előforduló torontól (Rn-220) eredő jelek megkülönböztetésére.

Fő célom volt egy olyan eljárás kidolgozása, mely megoldást kínál a fent említett tényezőkből eredő hibák kiküszöbölésére. Ezen belül a lehetséges mérési módszerek, valamint a mérést zavaró tényezők pontos meghatározása, azok lehetséges kiküszöbölési módjainak vizsgálata, majd a megfelelő mérési eljárás kiválasztása.

I. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÁS

1. Természetes eredetű háttérsugárzások

Az élővilágot már a kezdetektől fogva éri radioaktív sugárzás, mely természetes radionuklidokból ered. Bár a Földön lévő radioaktív, természetes eredetű izotópok mennyisége folyamatosan csökken, jelenkorunkban is számolni kell a természetes forrásokból eredő sugárzással - melyet háttérsugárzásnak nevezünk -, mert legtöbb esetben ennek tulajdonítható a lakossági sugárterhelés legnagyobb hányada. Ez egyrészt kozmikus eredetű, másrészt a földkéreg radionuklidjaiból eredő terasztiális sugárzásból tevődik össze.

1.1. Kozmikus sugárzás

Elsődleges kozmikus sugárzások az űrből a légkörbe érkező nagyenergiájú részecskesugárzások. Ezen belül megkülönböztethetők galaktikus, ill. szoláris eredetű kozmikus részecskék. A galaktikus eredetűek elsősorban nagy energiájú protonokból, másodsorban nehezebb ionokból állnak, melyek feltehetőleg szupernóva robbanásból származnak. A szoláris eredetű - naptevékenységből eredő - részecskék kisebb energiájúak, a Föld felszínét kevésbé érik el így a sugárzásuk az emberre nézve jelentéktelen. Az elsődleges részecskék a kölcsönhatásba lépnek a levegő részecskéivel, atomjaival. Magreakcióval vagy ionizációval adják le energiájukat, annak nagyságától függően. A reakció eredményeként neutronok, protonok, pionok, müonok, kaonok és ún. kozmogén radioizotópok keletkeznek, melyek a másodlagos kozmogén sugárzás alkotói. Az atmoszféra legalsó rétegeiben a kozmikus sugárzás fő összetevői a müonok. A kozmikus sugárzásból eredő sugárterhelést nagymértékben befolyásolja a tengerszint feletti magasság, a földrajzi szélesség és az árnyékolás. A kozmikus sugárzástól eredő éves effektív dózis világátlaga 380 μSv . [1]

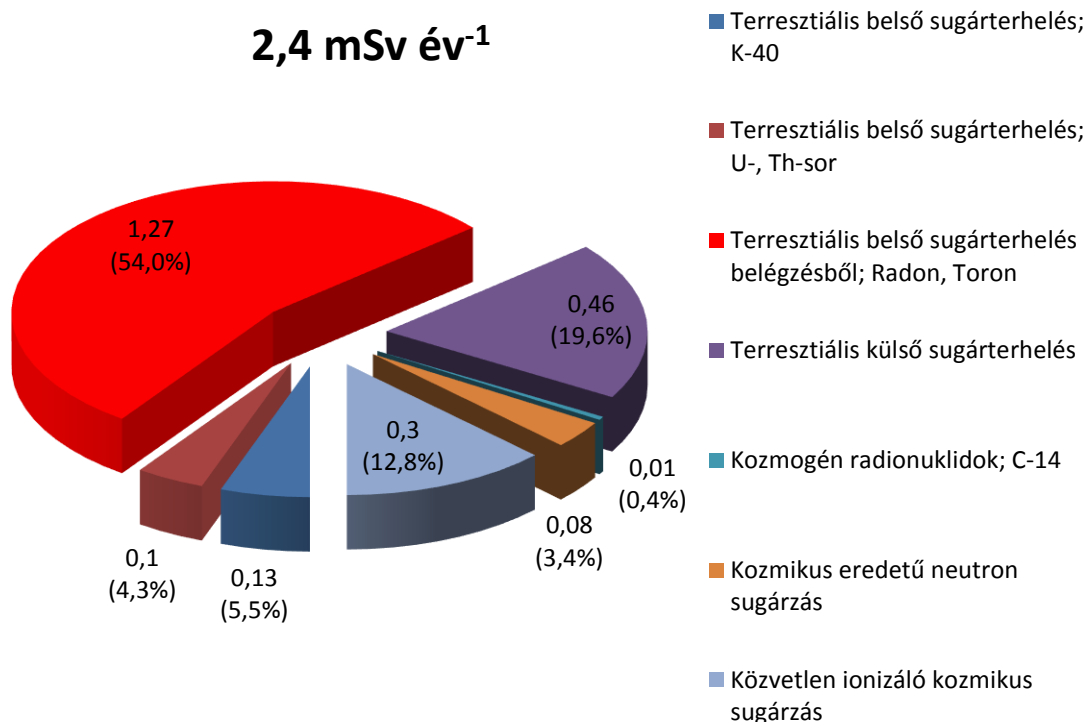
1.2. Földkérgi (terasztiális) sugárzás

Ez a természetes sugárzásfajta a földkéregben előforduló azon radioizotópoktól ered, melyek felezési ideje összemérhető a Föld korával. A legjelentősebbek az U-238 ($T_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9$ év), az U-235 ($T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$ év), a Th-232 ($T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$ év) (lásd II.-IV. Melléklet) és a K-40 ($T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9$ év). Az említett izotópok bomlási sorában számos radionuklid keletkezik. Az U-238, az U-235 és a Th-232 bomlási sorok mindegyikének végén egy-egy stabil ólom izotóp található, melyek rendre az Pb-206, az Pb-207 és az Pb-208. A K-40 bomlása során kb. 90%-os gyakorisággal Ca-40, 10 %-os gyakorisággal Ar-40 keletkezik. A talaj mellett a levegőben,

vízben, szerves anyagokban és az élő szervezetben is előfordulnak, ezért külső és belső sugárterheléssel egyaránt számolni kell.

A terasztiális sugárzásból eredő külső sugárterhelés (gamma dózisteljesítmény) átlagértéke szabadban, 1 m magasságban $24\text{--}160 \text{ nGy h}^{-1}$, a népességgel súlyozott világátlag 59 nGy h^{-1} , épületekben ez az érték magasabb, átlagosan $20\text{--}190 \text{ nGy h}^{-1}$, míg a népességgel súlyozott világátlag 84 nGy h^{-1} . A levegőben mért gamma dózisonál az emberre vonatkozó effektív dózis alacsonyabb a test árnyékoló hatása miatt, melynek figyelembe vételére módosító tényezők állnak rendelkezésre. Az előzőekben leírtakat, valamint az épületben való benttartózkodást is figyelembe véve (az UNSCEAR szerint 0,8-as faktorról) a terasztiális gamma dózis szabadban (59 nGy h^{-1}) és épületekben (84 nGy h^{-1}) kapott átlagértékeiből a népességgel súlyozott éves átlagos effektív dózisterhelés világátlaga felnőttekre $0,46 \text{ mSv}$. Ez az érték gyerekek és csecsemők esetén rendre 10, illetve 30 %-kal magasabb.

Terasztiális sugárzásból származó belső sugárterhelés számítása esetén figyelembe kell venni többek között a víz- és az élelmiszerfogyasztást, valamint a légzésteljesítményt. Becslések szerint az átlagos lekötött effektív dózis $0,23 \text{ mSv év}^{-1}$, melynek nagyjából 55%-a K-40-től, a többi az U-238 és Th-232 bomlási sorainak radionuklidjaitól (főként a Po-210 és Pb-210 radionuklidoktól) ered. A számításban még nem szerepel a természetes sugárzásból származó sugárterhelés legnagyobb részét kitevő Rn-222. [1]



1.2.-1. ábra: A természetes eredetű sugárterhelés megoszlása [1]

2. NORM, TENORM anyagok

A NORM (Naturally-Occurring Radioactive Materials) szakkifejezést a radionuklidokat a természetes világtárlagnál magasabb koncentrációban tartalmazó, természetes előfordulású anyagokra használja a szakirodalom. Ezen anyagok tartalmazhatják a természetes bomlási sorok radionuklidjait (U-238, Th-232, U-235 és bomlástermékeik), valamint egyéb izotópokat, mint a K-40, Rb-87 és In-115, növelve a természetes háttérsugárzást. NORM anyagok lehetnek pl. kőzetek, érces és ásványok (bauxit, szén, foszfát, kőolaj, földgáz), valamint kereskedelmi forgalomban is megtalálható árucikkek és termékek (üvegek, kerámiák, építőanyagok), ezen kívül lehetnek ipari eredetű melléktermékek és maradékanyagok (hamu, kohósalak, foszfogipsz, vörösiszap), vagy akár használati eszközök (hegesztőpálcák) is. Számos eljárás esetén, a felhasznált alapanyagok feldolgozása során koncentrálnak egyes radionuklidok a végtermékekben, melléktermékekben, maradék- és hulladék anyagokban. Az így keletkező anyagok emelkedett radiológiai kockázatot jelenthetnek a dolgozók és a lakosság számára. [2]

A technológiailag megnövelt aktivitáskoncentrációjú NORM anyagokra vonatkozóan találkozhatunk a TENORM (Technologically-Enhanced NORM) kifejezéssel is, bár ez a

kategória egyre inkább kiszorul a szakmai berkekből. A legújabb konvenció szerint az előbbiekre is a NORM kifejezést használják. [3]

A főbb ipari tevékenységek, melyek számos esetben megnövelhetik az alap- és segédanyagok természetes radionuklid tartalmát, ill. melléktermékeikben felhalmozhatják azokat, az alábbi felsorolásban találhatóak meg:

- bauxitbányászat és feldolgozás,
- uránérc-bányászat és feldolgozás,
- szénbányászat, feldolgozás és égetés,
- műtrágyagyártás (foszfát),
- cirkonhomok felhasználás,
- ritkaföldfém bányászat és feldolgozás,
- kőolaj- és földgázkitermelés. [4]

3. A radon és a toron

A radon színtelen, szagtalan, kémiaiilag inert nemesgáz. A három, már említett természetes bomlási sor mindegyikében előfordul egy-egy radon izotóp. A 27 ismert radon izotóp közül a legjelentősebb az U-238 bomlási sorában a Ra-226 izotópból alfa-bomlással keletkező Rn-222 (a továbbiakban radon), mely szintén alfa-bomló radioaktív izotóp, 3,82 napos felezési idővel. Jelentős mennyiségben keletkezik környezetünkben, illetve relatíve hosszú felezési idejének köszönhetően képes kijutni a közöetekből, vagy akár az építőanyagokból.



A Th-232 bomlási sorában a Ra-224-ből alfa-bomlással keletkező Rn-220 (a továbbiakban toron) szintén alfa-bomló izotóp, felezési ideje 55,6 másodperc.



Az U-235 bomlási sorában a Ra-223-ből alfa-bomlással Rn-219 (a továbbiakban aktinon) keletkezik. Rövid felezési ideje (3,9 s), valamint az U-235 alacsony aktivitáskoncentrációja miatt nem okoz számottevő egészségügyi problémát így a továbbiakban főként a radont és mellette a toront tárgyaljuk.



[5]

Bomlási sor	U-238	Th-232	U-235
Anyaelem és felezési idő	Ra-226; 1602 év	Ra-224; 3,64 nap	Ra-223; 11,4 nap
Leányelem és felezési idő	Rn-222; 3,82 nap	Rn-220; 55,6 s	Rn-219; 3,9 s
Stabil végmag	Pb-206	Pb-208	Pb-207

3.-1. táblázat: A három radon izotóp legfontosabb tulajdonságai [6]

A radon és a toron természetes előfordulású radioaktív gázok. Bomlástermékeikkel együtt különböző koncentrációkban előfordulnak a környezetben és az épületekben. Már az 1960-as években felismerték, hogy a radon és leányelemeinek magas koncentrációja jelentősen növeli a tüdőrák kialakulásának kockázatát a bányászoknál. Az 1980-as években rájöttek, hogy a radon felelős a belső sugárterhelés legnagyobb részéért. Krónikus kitettségtől, geológiai tulajdonságoktól, épület struktúrától és szellőztetési szokásoktól függően hatással van az emberi egészségre.

A legtöbb expozíciós felmérés és mérés a két izotóp közül a radonra irányul, relatíve nagyobb felezési ideje (3,82 nap) és általában nagyobb aktivitáskoncentrációja miatt. A legtöbb esetben a radon és a toron relatív koncentrációja nem ismert, emellett nehéz megbecsülni a toron lehetséges hozzájárulását az összes radon izotóptól elszenvedett dózishoz. Laboratóriumi mérések alátámasztják, hogy a radon és toron leányelemei hasonló sajátosságokkal bírnak, többek között az elektrosztatikus töltést, a részecskeméretet és a diffúziós koefficiens tekintve. [7]

3.1. Szekuláris egyensúly

Előfordulhat, hogy egy radioaktív mag nem egy, hanem több bomláson keresztül kerül stabil állapotba. Ez esetben a bomlások sorozatában több radioaktív izotóp keletkezik. A természetes bomlási sorokban, akár 10-nél is több radionuklid keletkezhetsz. Tekintsünk egy egyszerűbb esetet, melyben az első radioizotópból keletkezik egy újabb, majd abból a stabil végmag. Ekkor a következő egyenletet írhatjuk fel:

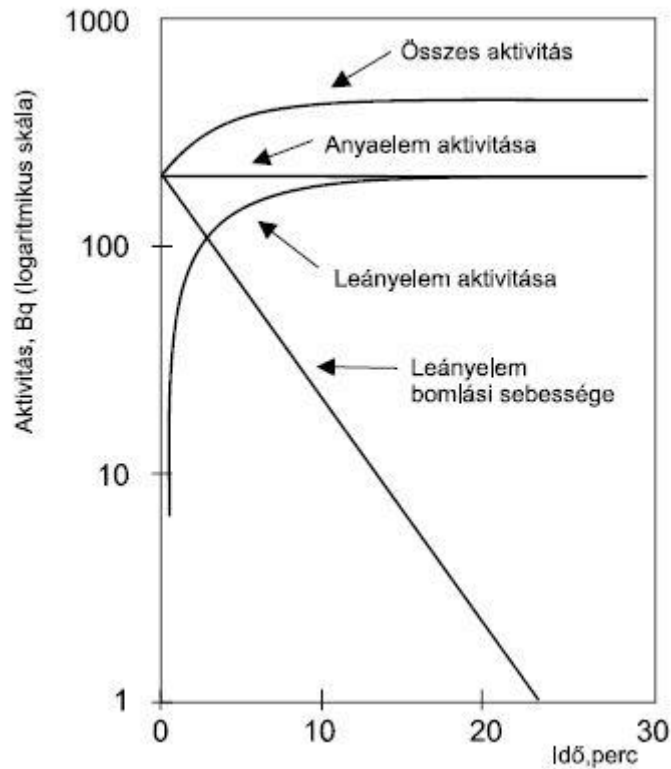
$$N_A \xrightarrow{\lambda_A} N_B \xrightarrow{\lambda_B} N_C \quad (3.1.-1)$$

Az egyenletet a következőképpen magyarázhatjuk. N_A mennyiségű anyaelem egy része λ_A -val jellemezhető sebességgel elbomlik N_B -vé, majd az λ_B valószínűséggel továbbbomlik N_C -vé. A B elemet a C elem anyaelemének, a C elemet a B elem leányelemének nevezzük. Hasonlóképpen az A elem a B elem anyaeleme, a B elem az A elem leányeleme. Zárt

rendszerben bizonyos, a bomlási állandótól függő idő után az anya és leányelemek aktivitása meg fog egyezni.

$$A_A = \lambda_A \cdot N_A = A_B = \lambda_B \cdot N_B \quad (3.1.-2)$$

Ebben az esetben a rendszer elemei szekuláris egyensúlyban vannak.



3.1.-1. ábra: A szekuláris egyensúly aktivitásviszonyai [3]

Ha a bomlási sor kettőnél több radioizotópot tartalmaz, akkor az egyenlet a következőképpen írható fel:

$$N_i = N_{A,0} \cdot \sum C_k \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t) \quad (3.1.-3)$$

ahol:

- N_i : a bomlási sor i-edik tagjának nuklidszáma,
- $N_{A,0}$: a bomlási sor első tagjának nuklidszáma 0 időpontban,
- C_k : A bomlási állandókból származtatható konstans,
- λ_i : a sor i-edik tagjának bomlási állandója (s^{-1}).
- t : eltelt idő (s) [3]

3.2. Radon kijutása szilárd mátrixból

A radon szilárd anyagokból történő kijutása három szakaszra bontható. Az első szakasz maga a radon keletkezése a kristályrácsban, mely a kőzetekben lévő Ra-226-os izotópból (lásd 3.-1 egyenlet) keletkezik.

A második szakasz a radon izotóp kijutása a szemcsék közötti térbe (emanáció, lásd 3.2.1. fejezet). A kijutó mennyiség általában az összes keletkezett mag 0-50%-a, mely a harmadik szakaszban további migrációval elhagyhatja a szilárd mátrixot pórusterét (radontranszport és exhaláció, lásd 3.2.2. és 3.2.3. fejezet).

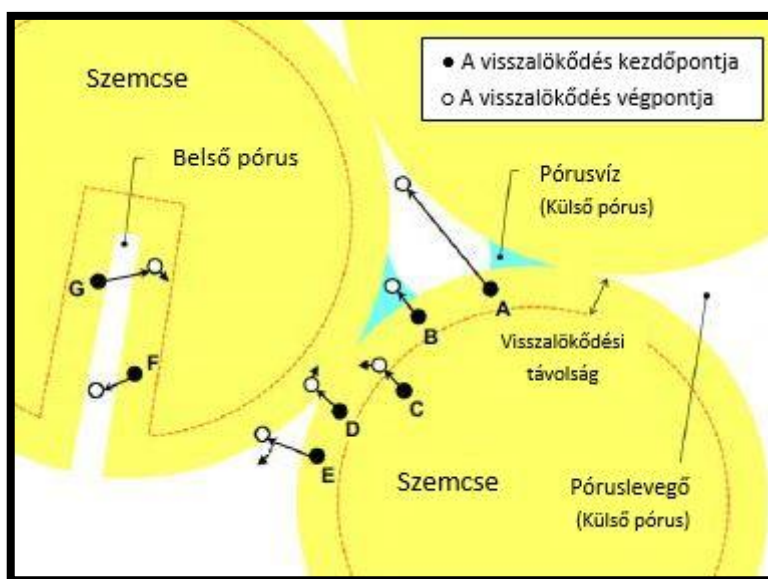
A toron és az aktinon viselkedése hasonló, viszont rövid felezési idejük miatt a harmadik szakaszban a migrációjuk erősen korlátozott, így a szilárd anyagot általában csak nagyon kis hányaduk hagyja el. [3]

Egyes esetekben (magas Th-232 koncentráció és porózus anyagok esetén) a toron is gondot okozhat. Sokáig úgy gondolták, hogy rövid felezési ideje miatt nem okoz számottevő egészségügyi problémát, de egyes mérések kimutatták, hogy magas tórium tartalmú területeken lévő épületekben a toron aktivitáskoncentrációja megközelítheti akár a radon aktivitáskoncentrációját is. [8]

3.2.1. Emanáció

A radon emanációja a Szilárd-Chalmers effektussal magyarázható, mely szerint a Ra-226 bomlása során felszabaduló energia nagyobb része (98-99%) az alfa-részecske, kisebb része (1-2%) pedig a keletkezett radon izotóp kinetikus energiájára fordítódik. Utóbbi 1-2% a kötési energia többszöröse lehet. Tehát az impulzus megmaradás tétele szerint a keletkező alfa-részecske visszalöki a magot, ami így kimozdul a keletkezési helyéről és megtesz egy bizonyos utat. [3] A megtett út hossza nagymértékben függ a közeg sűrűségétől és a szemcse szerkezetétől. A távolság kőzetekben és vízben nm-es, levegőben μm -es nagyságrendű (34 nm kvarcban, 77 nm vízben, 53 μm levegőben). Az előzőleg említettek mellett a radon kijutása a szemcsék közötti pórusterbe függ még a keletkezés helyétől, a visszalökődési irányától stb. is. Azok a radon atomok lesznek emanációra képesek, melyek anyaeleme a visszalökődési távolságnál kisebb távolságra van a szemcse felületétől.

A következő ábra a rádium bomlása során lehetséges eseteket szemlélteti.



3.2.1.-1. ábra: A radonemanáció jelensége [9]

Az A; B; E és F esetben a keletkezett radon mag a pórustérbe lökődik, még a C és D esetben a szemcsében marad. Az emanáció után a mag maradék energiájától függően a következő esetek lehetségesek: lelassul a pórustér levegőjében (A; F), lelassul a pórusvízbe hatolva (B) vagy becsapódik a szomszédos szemcsébe (E; D; G). Utóbbi esetben a radonnak lehetősége van visszamigrálni a pórustérbe a becsapódással létrehozott járaton keresztül (E), vagy a bomlás után a szemcsében mozogni molekuláris diffúzióval (D; G). Előbbi elősegíti, utóbbi gátolja az emanációt. A mag kiléphet a szemcse belső pórusterébe is (F), ahonnan ki kell diffundálnia a külső pórustérbe. A kidiffundálni nem képes, ill. a szemcse belső felületén adszorbeálódott magokat nem tekinthetjük emanálódottnak. [9]

Más megfogalmazásban a radonemanáció a radonnak a szemcséből a pórustérbe, közetek repedéseibe történő kijutását nevezzük. Ezt az emanációs tényezővel (ε) jellemezhetjük, mely a pórustérbe kijutott és a szemcsében keletkezett radon arányával írható le.

$$\varepsilon = \frac{\text{a pórustérbe kijutott } R_n}{\text{a szemcsében keletkezett } R_n} \quad (3.2.1.-1)$$

Mivel a keletkezett radon mennyisége a szemcse Ra-226 koncentrációjától függ, azzal arányos, így az egyenletet a következőképpen is kifejezhető:

$$\varepsilon = \frac{\text{a pórustérbe kijutott } R_n}{C_{Ra}} \quad (3.2.1.-2)$$

Az emanációt befolyásoló tényezők:

- Szemcseméret: nagyobb szemcseméret esetén a bomlás során képződő radon kisebb hányada emanálódik a nm-es nagyságrendű visszalökődési úthossz miatt;
- Sűrűség: a sűrűség növekedésével a visszalökődési úthossz csökken, amivel csökken az emanáció valószínűsége is;
- Porozitás: a porozitás növekedésével nő az anyag fajlagos felülete is, ami az emanáció valószínűségének növekedését eredményezi;
- Rádium-eloszlás: az emanációt befolyásolja a szemcsében lévő rádium homogenitása, inhomogenitás esetén az, hogy mennyire van a szemcse felületétől;
- Nedvességtartalom: vízben a visszalökődési úthossz kisebb, mint levegőben, így lassítja azokat a maradékmagokat, melyek kilökődnek a szemcséből, de levegőn keresztül átlökődnének a szomszédos szemcsébe, másrészt oldja a radon egy részét és gátolja a diffúziót. Tehát kis mennyiségben növeli az emanációt, nagyobb mennyiségben csökkentheti azt.

3.2.2. Radontranszport a pórusterben

A pórusterbe kijutott radon további mozgásában két folyamat meghatározó. Egyrészt a diffúzió, melynek hajtóereje a koncentrációkülönbség, másrészt az pórusokat kitöltő közeg (nedvesség, levegő) mozgása, mely szállíthatja a radont. Ezek alapján a radontranszport különböző modellekkel írható le. Diffúziós modell használható, ha a radon mozgásában a diffúzió, filtrációs modell, ha a pórusokat kitöltő közeg mozgása a meghatározó. Diffúziós-filtrációs modell esetén mindkét folyamat egyszerre leírható. [3]

3.2.3. Exhaláció

Radonexhaláció az a folyamat, amikor a szilárd mátrixok, pl. kőzetek, építőanyagok, vagy a talaj pórusterében lévő radon a levegőbe jut.

Sebessége a következő egyenlettel határozható meg egynemű, végtelen, sík felületet feltételezve.

$$J_0 = I \cdot C_{Rn} \cdot \lambda_{Rn} \quad (3.2.3.-1)$$

ahol:

- I : diffúziós távolság,
- C_{Rn} : a radon térfogati koncentrációja,
- λ_{Rn} : bomlási állandó. [3]

A talaj feletti légrétegekben kialakult radon-aktivitáskoncentrációt és eloszlást, illetve magát az exhaláció mértékét az időjárási körülmények nagymértékben befolyásolják. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a kialakult aktivitáskoncentráció száraz időszakban kisebb, mint a nedves időszakban. Ezzel szemben száraz időszakban - főleg agyagos talajok esetén - a nedvesség hiánya miatt megrepedezett talajokban a radon feláramlása intenzívebb. Téli, esős időszakban a feláramlás jóval gyengébbnek mondható. A hőmérséklet növekedése növeli a kiáramlást, még a légnyomás emelkedése, a jelentős mennyiségű csapadék és a nedves légkör csökkentik azt. [10]

A kiáramlott radon mennyisége évszakfüggő. Általában melegebb időszakban magasabb, hidegebb időszakban alacsonyabb a talajban és a levegőben létrejövő eltérő nyomásviszonyoknak köszönhetően. Fagyponthoz alatti hőmérsékleten már nem is beszélhetünk exhalációról, mert a talaj nedvességtartalma jég formájában radonzáró gátként viselkedik. A feláramlás maximális mennyisége az őszi, még minimuma a tavasz végi, nyár eleji időszakra tehető. Nem ilyen intenzív az évszakai ingadozás olyan a területeken, ahol a hőmérséklet egész évben fagyponthoz feletti. A jelenség feltehetőleg a talaj mélyebb rétegeinek állandó víztartalmával hozható összefüggésbe. [3, 11]

3.3. Egészségügyi hatások

A talajból, építőanyagokból exhalálódó radon eloszlása és felhígulása szabad levegőn gyorsnak mondható, problémát inkább zárt terekben jelent, ahol bedúsulhat. [1] Párhuzam vonható a radon és a tüdőrákos megbetegedések között, bár egy bizonyos küszöbdózis alatt – más jellegű expozícióhoz hasonlóan – nem jelenthető ki egyértelműen, hogy a radon önmagában tüdőrákot okoz. Mivel gáz halmazállapotú anyag, belélegezzük, majd kilélegezzük, mégis elősegítheti a betegség kialakulását. Zsírokban nagyon jól, de vérben is aránylag jól oldódik. A rendszeres felvétel és bomlás következtében mennyisége az emberi szervezetben idővel állandósul. Az így okozott dózistöbblet azonban a tüdőre gyakorolt hatása mellett elhanyagolható. A problémát leginkább rövid felezési idejű leányelemei jelentik. Bomlási sorában két további alfa-sugárzó izotóp, a Po-218 és az Po-214 található, melyek a levegő szilárd aeroszol részecskéihez

tapadhatnak, majd azokkal a tüdő legmélyebb részeibe is bekerülhetnek és megtapadhatnak. Egészségkárosító hatásukat a hámsejtek belülről történő besugárzásával fejtik ki. A bomlás során keletkező alfa-sugárzás biológiai hatékonysága azonos nagyságú abszorbeált energia esetén mintegy 20-szor nagyobb, mint a gamma-, béta- vagy röntgen-sugárzásé. Ennek oka, hogy az alfa-részecske nagyenergiájú (3-9 MeV), nehéz részecske, mely viszonylag rövid úton leadja teljes energiáját. Hatótávolsága az energiájától függően levegőben 3-9 cm, szilárd anyagban μm -es nagyságrendű. A dohányzás elősegíti a radon leányelemeinek tüdőbe jutását, illetve az alfa-sugárzás által keltett, rák előtti állapotban lévő mutáns sejtek rákos sejtekre osztódását, így növelve a rákos megbetegedések kockázatát. [3]

3.4. Jogi szabályozás

Az EU legújabb, orvosi, foglalkoztatási és lakossági sugárterhelésnek kitett személyek védelmét szolgáló irányelve 300 Bq m⁻³-es éves átlagban állapítja meg a beltéri radon-szintre vonatkozó cselekvési szintet. A radon cselekvési terv szerint a tagállamok egy nemzeti cselekvési tervet dolgoznak ki a munkahelyeken, a nyilvános középületekben és a lakóhelyeken a radon-expozícióból eredő sugárterhelés mérséklése érdekében, figyelembe véve a radon beáramlásának minden lehetséges forrását (talaj, építőanyag, földgáz, vezetékes víz). A tagállamok érvénybe léptetik azon törvényi, rendeleti és gazdasági rendelkezéseket, melyek ahhoz szükségesek, hogy az irányelvnek legkésőbb 2018. február 6-ig megfeleljenek. [12]

A cselekvési szint betartása érdekében célszerű az építőanyagok és kiindulási anyagainak radiológiai vizsgálata, a gyártási folyamat radonexhalációt csökkentő lehetőségeinek vizsgálata, valamint a késztermékek radonexhaláció szempontjából történő korlátozása.

A magyar jogrendszerben jelenleg nincs szabályozás az építőanyagok gamma-sugárzó radionuklidjainak aktivitáskoncentrációjára és beltéri radon-szintekre vonatkozóan. A hiányosságokat mielőbb pótolni kellene. [13]

4. A radon és toron meghatározási lehetőségei

A radon mérésére számos módszer áll rendelkezésre, melyek lehetnek közvetlen vagy közvetett módszerek, ill. pillanatnyi mintavételes, folyamatos és integrális módszerek.

4.1. Közvetlen módszer

A közvetlen módszerek alkalmazása esetén a radonból keletkező alfa-részecske kerül detektálásra. Nem energiaszelektív detektorok alkalmazása esetén figyelembe kell venni, hogy nem csak a radonból, hanem az alfa-bomló leányelemekből származó alfa-részecskék is detektálásra kerülnek. [14] Ezen felül a radon mellett esetlegesen előforduló toronból és leányelemeiből keletkező alfa-részecskék detektálási aránya is ismeretlen, ami a módszer jelentős hátrányát képezi. A radon, a toron és leányelemeiknek elválasztása nagyon nehéz feladat. [15] Az alfa-részecskék rövid hatótávolsága miatt biztosítani kell azok eljutását a detektoranyagra. Ha ez sikerül, akkor a nagy fajlagos ionizációs képességük miatt nagy valószínűséggel kölcsönhatásba lépnek a detektor anyagával.

4.2. Közvetett módszer

Közvetett módszerek esetén a radon leányelemeinek alfa-, béta-, gamma-sugárzásából következtetnek a radon mennyiségére. Általában valamilyen szűrővel felfogják, ill. elektrosztatikusan vagy aktív szénnel becsapdázzák a leányelemeket, majd a megfelelő mérési módszer alkalmazásával meghatározzák azok mennyiségét. A módszer előnye, hogy a toron leányelemei megkülönböztethetők a radon leányelemeitől, így a toronmentes radon mérés könnyen megvalósítható. Hátrány azonban, hogy a leányelemek összegyűjtése nehéz feladat. [14]

Félvezető detektorral szerelt radon monitorok képesek az alfa-részecske energiája alapján meghatározni, hogy az melyik radionuklidtól származik, így általában közvetlen és közvetett mérésre egyaránt alkalmasak. A RAD7 folyamatos radon monitor gyors mérési módban képes a radonból, ill. a toronból keletkező alfa-részecskék alapján meghatározni azok mennyiségét, még hosszabb mérések esetén az eredmények a leányelemek mennyisége alapján pontosíthatók. Az ilyen típusú műszerek igen költségesek, valamint a nedvességtartalomra igen érzékenyek. [16]

4.3. Pillanatnyi, folyamatos mintavétel és integrális mérések

Pillanatnyi mintavétel esetén egy adott időbeli állapotot mérhető. Erre a célra a legtöbb esetben szcintillációs cellákat (pl.: Lucas-cella) alkalmaznak. Az eredmények a mintavétel időpontjára vonatkoznak, a változások nehezen nyomon követhetők.

Ezzel szemben folyamatos mintavétellel jól nyomon követhetők a koncentrációk időbeni változásai. Erre a célra legtöbbször gáztöltésű, szcintillációs vagy félvezető detektorral

felszerelt folyamatos mintavevő rendszerek (pl.: AlphaGuard PQ2000PRO) használatosak, melyek általában igen költségesek.

Integrális módszerekkel a mérési időtartamra vonatkozó átlagos aktivitáskoncentráció mérhető. A módszer alkalmazása esetén integráló detektorokat helyeznek ki hosszabb expozíciós időre (akár hónapokra is). Ilyen detektorok pl. a szilárdtest nyomdetektorok (SSNTD: Solid State Nuclear Track Detector). A detektor egy diffúziós kamrában kerül elhelyezésre, mely távol tartja a nem kívánt alfa-sugárzó izotópokat a detektoranyagtól. A diffúziós kamrába bejutott radon, illetve az abból keletkező leányelemek bomlásakor kilépő alfa-részecskék a detektor anyagába csapódva nyomokat hagynak, melyeket megfelelő módszerekkel láthatóvá lehet tenni. Az expozíciós idő általában 30-90 nap. Az egységnyi felületre eső nyomok számát egy ugyanilyen típusú, kalibrált detektor nyomszámával összehasonlítva a mérési hely expozíciós idejére vonatkozó átlagos aktivitáskoncentráció számítható. [14]

4.4. Akkumulációs módszer

Az akkumulációs módszer esetén a mintavétel lehet pillanatnyi vagy folyamatos, de lehetőség van integrális mérésre is. A detektor típusától függően a mérési módszer lehet közvetlen, vagy akár közvetett. A módszer különböző minták radonexhalációjának mérésére alkalmas. A mérendő minta egy ún. akkumulációs kamrában kerül elhelyezésre, melyben az exhalálódott radon összegyűlik. A mért aktivitáskoncentrációból megfelelő korrekciókkal az exhaláció számítható. Lehetőség van az emanációs tényező gyors és egyszerű meghatározására is. A módszer előnye, hogy viszonylag gyors, mert nem kell megvárni a Ra-226 és a Rn-222 közötti szekuláris egyensúly beállását. A megfelelő detektor kiválasztása a mérési időt tovább csökkentheti. Az említett előnyök miatt az akkumulációs módszer széles körben használatos. [17; 18; 19; 20; 21]

4.4.1. Az akkumulációs módszer zavaró hatásai

A radon diffúzióval történő kijutását a mintából az ún. diffúziós úthosszal, vagy diffúziós rétegvastagsággal jellemezhetjük. A radon, relatíve hosszú felezési ideje miatt a minta anyagi minőségétől, belső szerkezetétől és geometriájától függően képes kijutni az akkumulációs térbe. A diffúziós úthossz meghatározza az exhalálódott radon mennyiségét, ezért célszerű kis rétegvastagság alkalmazása (a teljes diffúziós rétegvastagság 1-2%-a), így a mintában elbomló radon nem, vagy csak csekély mértékben befolyásolja az eredményeket.

Alacsony szemcseméretű minták esetén a felület növelése érdekében célszerű próbatestek készítése, annak érdekében, hogy a szabadexhaláció tényének fennállása meghatározható legyen. Ez esetben a minta nedvesítése után 0,5-1 cm átmérőjű golyókat készítünk, majd 105°C-on tömegállandóságig szárítjuk. A minta nedvességtartalma a radon emanációját jelentős mértékben növeli, de az exhalációt nagymértékben csökkentheti a diffúziós gátlás miatt. [13] Míg száraz, porított minták esetén a fajlagos exhaláció anyagtulajdonságtól függően akár 5-15 cm-ig független a rétegvastagságtól, addig nedves minták esetén néhány cm-es rétegvastagság felett a fajlagos exhaláció értéke csökken. Emellett a nedvességtartalom emanációra gyakorolt hatása is meghatározó. [15] Azonban száraz minták esetén sem célszerű túl nagy rétegvastagságot alkalmazni a mintába történő visszadiffúzió elkerülése érdekében. [22]

4.4.2. Visszadiffúzió

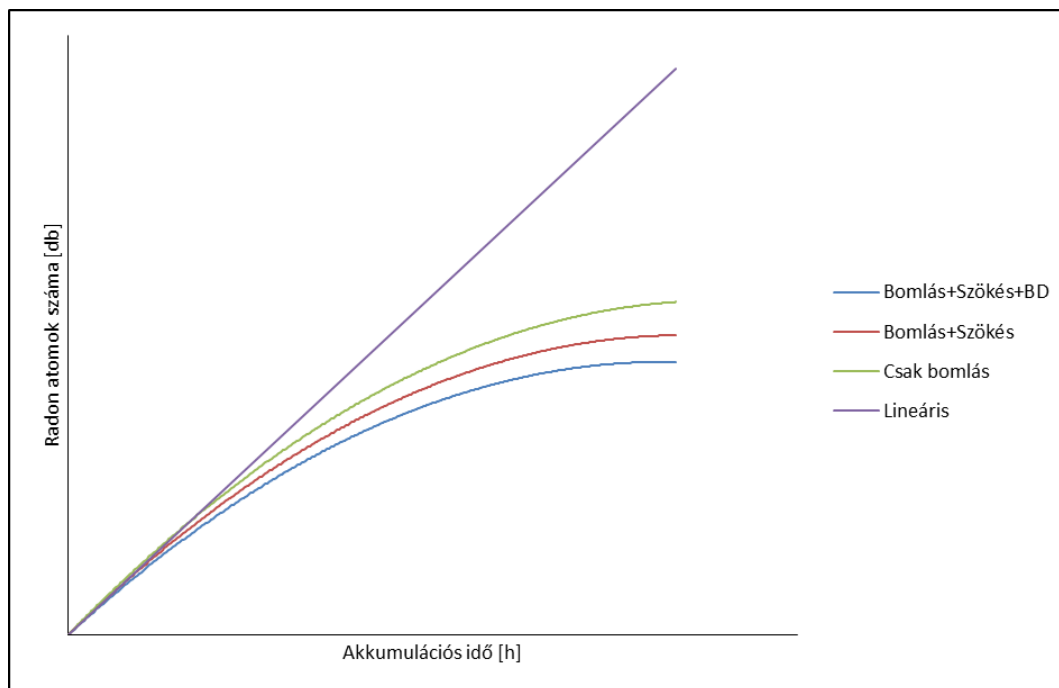
Az mérőrendszerben a radon atomok fogyását nem csak a bomlás, hanem rendszer egyes elemeinek radon áteresztéséből adódó ún. szökés (melyet részletesebben az 5.3.1. fejezetben tárgyalok) és az exhalálódott radonnak a változó koncentráció gradiens miatti, mintába történő visszadiffundálása, az ún. „visszadiffúziós” hatás (Back Diffusion Effect; BD) is okozhatja. Így a bomlási állandó helyett meghatározható egy ún. effektív bomlási állandó, mely figyelembe veszi a felsorolt módosító tényezőket.

$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_{BD} + \lambda_L \quad (4.4.2.-1)$$

ahol:

- λ_{eff} : effektív bomlási állandó [min^{-1}],
- λ : a radon bomlási állandója [min^{-1}],
- λ_{BD} : az effektív bomlási állandó visszadiffúzióból eredő tényezője [min^{-1}],
- λ_L : az effektív bomlási állandó szökésből eredő tényezője [min^{-1}].

A BD jelensége abból a tényből ered, hogy a diffúzió hajtóereje a koncentráció gradiens, ami zárt rendszerben az akkumulációs idő növekedésével csökken. Vagyis az akkumulációs térben lévő, már exhalálódott radon gátolja a további kiáramlást, ami az exhaláció csökkenését eredményezi. Emellett nagy fajlagos felületű szemcsék esetén a felületi adszorpció is egyre jobban nő, melynek következménye, hogy az akkumulációs térben mérhető radon mennyisége csökken. [15]



4.4.2.-1. ábra: A radon atomok számának változása az akkumulációs térben az akkumulációs idő függvényében [15; 22]

A visszadiffúziós hatást mérés technikai szempontból figyelmen kívül hagyhatjuk, ha az effektív kamra térfogat legalább 10-szer nagyobb a minta pórustérfogatánál [15; 22], ill. ha az akkumulációs időt megfelelően rövidre választjuk (24-48 óra), ugyanis ez alatt az időszak alatt kialakuló radon-koncentráció relatíve alacsony, azaz kellően nagy tud lenni a gradiens. Utóbbi megállapítást a 4.4.2.-1. ábra szemlélteti. Alacsony akkumulációs idő esetén az ideális görbétől való eltérés alacsony. [15]

4.4.3. Toron

Ahogy említettem, a detektorok egy része nem képes a toronból és leányelemeiből érkező alfa-részecskék megkülönböztetésére, így a relatíve magas Th-232 tartalmú minták esetén a radon mellett előforduló toron a mérésre zavaró hatással lehet.

II. KÍSÉRLETI RÉSZ

5. Radonexhaláció mérés akkumulációs módszerrel

A mérés elve, hogy a vizsgálandó mintából, annak anyagi minőségének és a környezeti tényezők függvényében emanálódó radon a kialakult koncentráció gradiensnek megfelelően folyamatosan exhalálódik. Az exhalálódott radon egy zárt kamrában kerül összegyűjtésre. Az exhaláció mértéke a radon-aktivitáskoncentráció, az akkumulációs idő és a bomlás alapján számítható.

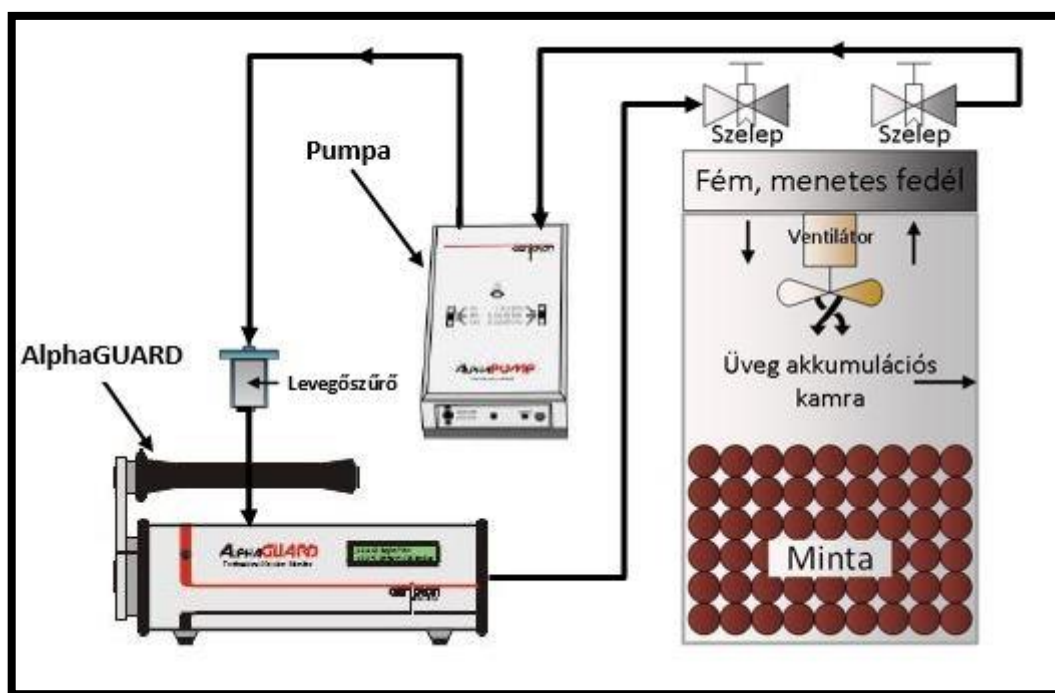
Állandó belső szerkezeti paraméterek és külső hatások esetén a radonexhaláció konstans, azaz állandó forráserősséggel rendelkezik. Porózus minta és kis mintavastagság (diffúziós távolság 1-2 %-a) esetén meghatározható az ún. szabadexhaláció, mely csak a minta mennyiségétől, Ra-226 tartalmától és emanációs tényezőjétől függ.

Az akkumulációs kamrában a radon bomlása miatt a radon-aktivitáskoncentráció az eltelt idővel nem lineárisan nő, hanem egy egyensúlyi értékhez tart, mely nem más, mint zárt térben a Ra-226 és Rn-222 között beálló szekuláris egyensúly (~ 27 nap). Az akkumulációs térben mért aktivitáskoncentráció és az összes keletkezett radon közötti arány az akkumulációs idő függvényében számítható, mellyel a mérést korrigálni kell.

A szabadexhalációs tényező segítségével lehetőség van a radon egyensúlyi koncentrációjának meghatározására, majd a minta Ra-226 tartalmának ismeretében az emanációs tényező számítására is, mely a mérési módszer egyik legnagyobb előnye. [13]

5.1. A vizsgálatok során használt mérőrendszer bemutatása

A mérőrendszer (5.1.-1. ábra) egy akkumulációs kamrából, egy detektorból és az azokat összekötő szilikon alapú csövekből áll. Munkám során az általam készített akkumulációs kamrákat és egy AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitort használtam. A mintavételt radonzáró AlphaPUMP radon pumpával végeztem.



5.1.-1. ábra: A radonexhaláció méréséhez használt mérőrendszer felépítése [13]

5.1.1. AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitor

Az AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitor a Saphymo GmbH (korábban Genitron Instruments) által gyártott hordozható radonmérő készülék. A radon-koncentráció folyamatos mérése egy beépített, 0,62 dm³ térfogatú ionizációs kamrával történik a radon bomlásakor keletkező alfa-részecskék alapján. Ezen felül a beépített szenzoroknak köszönhetően a radon-aktivitáskoncentráció mellett a hőmérsékletet, a relatív nedvességtartalmat és a légnyomást is regisztrálja a készülék. Magas detektálási hatásfokkal és széles mérési tartománnyal rendelkezik. Alkalmas rövid- és hosszú távú vizsgálatok elvégzésére.

Több modell is elérhető, de a PRO verzió a legsokoldalúbb, mely két alternatív módon használható. A DIFF (diffúziós) üzemmódot inkább levegő-radon meghatározására alkalmazzák. Ez esetben 10, ill. 60 perces mérési ciklus választható. Ilyenkor a radon diffúzióval jut be az ionizációs kamrába egy beépített szűrőrétegen keresztül. Ezzel szemben az ún. FLOW (átáramoltatásos) üzemmódban (1, ill. 10 perces ciklus) a radon tartalmú levegő egy külső pumpa segítségével, meghatározott áramlási sebességgel kerül átáramoltatásra a belső kamrán keresztül. Ezt az üzemmódot inkább víz-radon, talaj-radon és építőanyagokból eredő radon mérésénél alkalmazzák. Az 1 perces mérési ciklus kimutatási határa 2-3 nagyságrenddel magasabb a DIFF üzemmódhoz képest, 1000 Bq m⁻³-től indul, így azt inkább

előzetes mérések és forró pontok megtalálása céljából érdemes alkalmazni. Az akkumulációs mérések során a jóval pontosabb 10 perces FLOW üzemmódot alkalmaztam, melynél a szállítást követő kimutatási határ 1 Bq m^{-3} . Ez az érték a detektor szennyezettségétől függően nőhet.

A felsoroltak mellett az AlphaGUARD különböző detektorok, nyomdetektorok kalibrálásánál is alkalmazható referenciaként. Az egyik legelterjedtebb radonmérő készülék.

RS-232 port segítségével számítógépre csatlakoztatható, majd a mérési adatok kiolvasása DataEXPERT szoftver segítségével elvégezhető. [23]

A detektor nem alkalmas a radontól és a torontól eredő alfa-részecskék megkülönböztetésére, de az újabb modellek esetén lehetőség van toronmérő móddal való bővítésre, így alkalmassá tehető a radon és a toron diszkriminációjára. [24]

Az AlphaGUARD PQ2000PRO fontosabb paramétereit a következő táblázat tartalmazza.

AlphaGUARD PQ2000PRO	
Detektor típus	Ionizációs kamra HV = 750 VDC
Teljes/aktív detektortérfogat	0,62/0,56 dm ³
Mérési tartomány	2 - 2 000 000 Bq m ⁻³
Detektortöltési mechanizmus	Passzív diffúziós mód (10/60 perces ciklus) / Flow mód (1/10 perces ciklus)
Eszköz kalibrációs hiba	3% (plusz a standard hibája)
Rendszer linearitási hiba	< 3% (a teljes mérési tartományon belül)
Detektor érzékenység	1 CPM 20 Bq m ⁻³ -nél
Működési intervallum	-10 - 50 °C / 700 - 1100 mbar / 0 - 99 % rH

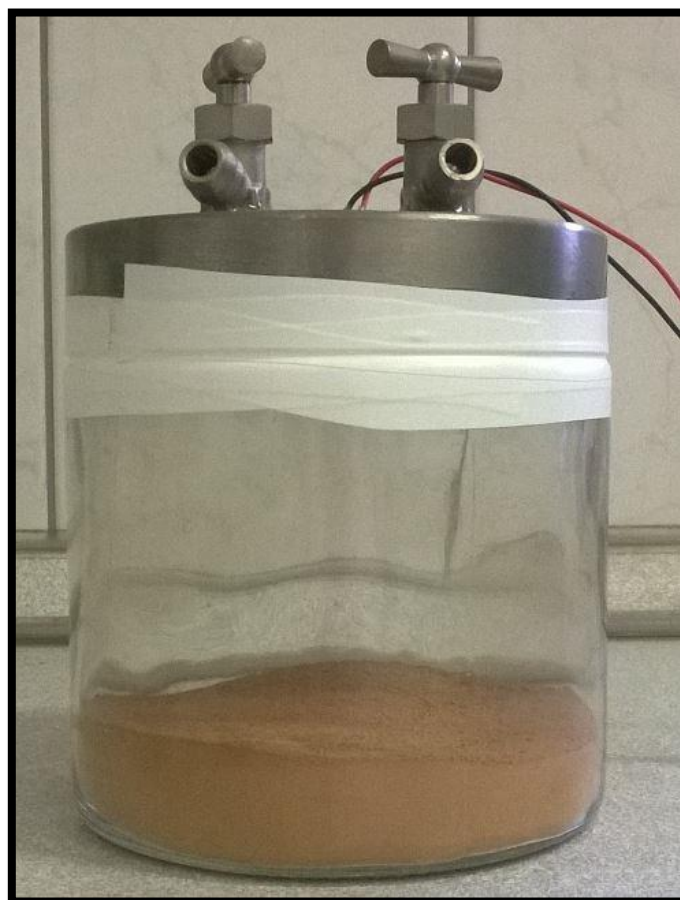
5.1.1.-1. táblázat: Az AlphaGUARD PQ2000PRO fontosabb paramétereit [23]

5.1.2. Akkumulációs kamrák

A kamrákat jól záró tároló üvegekből és rozsdamentes acél fedelekből készítettem, mely anyagokon a radon nem képes átdiffundálni. A mintavételezés érdekében a kamra tetejébe beépítettem két csapot, valamint a radon-koncentráció homogenitásának biztosítására egy 12 V-os ventilátort. Az esetleges nyílásokat epoxigyantával tömítettem a radon kiszökésének megakadályozása céljából. A minta kamrába helyezése, valamint a tető felhelyezése után a radon zárás növelése érdekében szigetelőszalagot is alkalmaztam az illesztések mentén.



5.1.2.-1. ábra: Rozsdamentes acél fedél mintavevő csapokkal és 12V-os ventilátorral



5.1.2.-2. ábra: Akkumulációs kamra mintával

5.2. Mintaelőkészítés

A mérendő NORM anyagokból 1-1- kg mintát veszünk, majd a nagyobb darabok megfelelő aprítása után a teljes mintát homogenizáljuk. A kívánt szemcseméret kb. 5 mm alatti. Nem célszerű a túl finom szemcseméretre aprítás, mert a belső szerkezeti paraméterek változásával az emanációs tényező és ennek következtében az exhaláció mértéke is változhat. Az elkészített, szárított mintát a kamrába helyezésig a levegő nedvességtartalmától óvni kell. [13]

5.3. Az akkumulációs mérést zavaró tényezők

5.3.1. Radon áteresztés és „visszadiffúzió”

Úgy választottuk meg a mérőrendszer paramétereit, hogy a visszadiffúzió mértéke a mérés során elhanyagolható legyen. Emiatt munkám során a visszadiffúzió mértékének meghatározásával nem kellett foglalkoznom.

A visszadiffúzióval szemben a radon szökése nem elhanyagolható, mert az az akkumulációs kamrák és a mérés során használt szilikon csövek radon áteresztésétől függ. Ebből kifolyólag ezen paraméterek (mind az akkumulációs kamrák, mind a szilikon csövek radon zárása) pontos meghatározása szükséges.

Mint említettem, az akkumulációs módszer során alkalmazhatunk folyamatos vagy pillanatnyi (a továbbiakban szakaszos) mintavételt. Előbbi esetén a csövek és egyes illesztések, utóbbi esetén inkább a kamra szerkezeti anyagainak radon áteresztése lehet a fő befolyásoló tényező.

Folyamatos mintavétel esetén a következőképpen határozhatjuk meg a rendszer áteresztő képességét. Egy tiszta, üres akkumulációs kamrába egy forrásból radont juttatunk, majd lezárjuk. Radon forrás hiányában az aktivitáskoncentráció csökkenni fog, melynek oka a radon természetes bomlása és szökése. Megvárjuk a radon mellett esetlegesen előforduló toron lebomlását (aktivitáskoncentrációtól függően kb. 10 perc elegendő), majd az 5.1.-1. ábrán látható módon összeállítjuk a mérőrendszert. Ahogy említettem, az AlphaGuard PQ2000PRO radon monitort 10min FLOW üzemmódra állítjuk. A ventilátor bekapcsolása, majd a csapok nyitása után elindítjuk a levegő áramoltatását az AlphaPUMP radon pumpával $0,5 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ térfogatárammal. A mérést 24-48 órán keresztül végezzük. Az eredményeket DataExpert program segítségével kiolvassuk, az aktivitáskoncentrációkat a mérőrendszer térfogatának ismeretében aktivitásra számoljuk, majd azokat az akkumulációs idő függvényében ábrázoljuk.

Az első óra alatt mért aktivitás értékeket átlagoljuk, a kapott értéket tekintjük a kezdeti aktivitásnak. A bomlási egyenlet segítségével kiszámoljuk az akkumulációs idő végére az elméleti aktivitást, melyet akkor kapnánk, ha a radon fogyása csak a bomlásból eredne.

$$A_{t_{akk}} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{akk}} \quad (5.3.1.-1)$$

ahol:

- $A_{t_{akk}}$: az elméleti aktivitás az akkumulációs idő végén [Bq],
- A_0 : a kezdeti aktivitás [Bq],
- λ : a radon bomlási állandója [min^{-1}],
- t_{akk} : az akkumulációs idő [min].

Mind az elméleti, mind a mért értékekre exponenciális görbét illesztünk, majd összehasonlítjuk azokat. A mért értékek exponenciális görbéjének egyenlete alapján az effektív bomlási állandó megállapítható, mely a már leírtak szerint a radon bomlási állandójának és a szökést figyelembe vevő tényezőnek az összege. Ebből következik, hogy az utóbbi tényező az effektív bomlási állandó visszadiffúzióból eredő tényezőjét figyelmen kívül hagyva a következőképpen számítható.

$$\lambda_L = \lambda_{eff} - \lambda \quad (5.3.1.-2)$$

Szakaszos mintavétel esetén az előzőekhez hasonlóan radont juttatunk az akkumulációs kamrába, majd lezárjuk a toron lebomlásáig. Összeszereljük a mérőrendszert, majd a ventilátor indítása és a csapok nyitása után $1 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ térfogatárammal 10 percig áramoltatjuk az akkumulációs tér levegőjét. Ezalatt a teljes rendszerben homogén radon teret kapunk. A térfogatáramot $0,5 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ -re állítjuk, majd további 30 percig mérjük az aktivitáskoncentrációt. A mérés időpontját feljegyezzük. A csövek leszedése előtt a csapokat és a ventilátort elzárjuk. Az így kapott három eredményt átlagolva kiszámítjuk a kamrában lévő radon kezdeti aktivitását. Néhány nap elteltével a mérést megismétljük. A számolásnál fontos, hogy mindig a kamrában lévő radon aktivitását határozzuk meg, vagyis a következő képleteket használjuk.

$$A_0 = C_{Rn} \cdot V_C \quad (5.3.1.-3)$$

ahol:

- A_0 : a kamrában lévő radon kezdeti aktivitása [Bq],
- C_{Rn} : a mért radon-aktivitáskoncentráció [Bq m^{-3}],
- V_C : az akkumulációs kamra térfogata [m^3].

$$A_t = C_{Rn} \cdot V_S \quad (5.3.1.-4)$$

ahol:

- A_t : a kamrában lévő radon aktivitása t akkumulációs idő után [Bq],
- V_S : a mérőrendszer teljes térfogata (akkumulációs kamra + detektor + csövek) [m^3].

Így figyelembe vesszük a hígulás mértékét is, ami abból adódik, hogy a detektor belső kamrájában, ill. a csövekben lévő levegő radonmentes, mely felhígítja a kamrában lévő radon aktivitáskoncentrációját.

Az eredmények ábrázolását és értékelését a folyamatos mintavételnél tárgyaltakkal analóg módon végezzük.

5.3.2. A toron mérészavaró hatása

A méréseim során alkalmazott AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitor nem képes a toron diszkriminációjára. A probléma megoldásának lehetősége a radon és a toron felezési idejének különbségéből adódik. Vagyis ha a Ra-226 mellett számottevően jelen levő Th-232 tartalmú mintát sikerül úgy leválasztani a mérőrendszerről, hogy a radon-aktivitáskoncentráció abban ne változzon, akkor a toron (rövid felezési ideje miatt) néhány perc alatt szinte teljesen lebomlik, és csak a radon-aktivitáskoncentráció kerül mérésre.

Toronmentes mérés a következőképpen végezhető. A megfelelő akkumulációs idő letelte után a mérőrendszert összeszereljük, majd a ventilátor elindítása után kinyitjuk a csapokat és bekapcsoljuk a pumpát. A mérőrendszerben a homogén radon tér elérése után a pumpát kikapcsoljuk, a csapokat elzárjuk, így sem az exhalálódó radon, sem pedig az exhalálódó toron nem képes bejutni a detektorba. Ekkor a detektor belső kamrájában a radon aktivitáskoncentráció azonos lesz a teljes rendszer aktivitáskoncentrációjával. A detektortérben lévő radon relatíve hosszú, 3,82 napos felezési idejének köszönhetően a mérés időtartamához viszonyítva csekély mértékben bomlik, míg a toron 55,6 másodperces felezési idejének köszönhetően ~ 5-6 perc alatt teljesen elbomlik, így ezt az időtartamot követően csak a radon aktivitáskoncentrációját mérhetjük. Megfelelő számú értéket (min. 3 mérési eredmény)

átlagolva az akkumulációs térben lévő radon aktivitása számítható. A méréshez nagyjából egy óra elegendő, amely alatt a radon bomlása elhanyagolható. A módszert a továbbiakban „elzárásos” módszerként tárgyalom.

Az eljárás elvégezhető úgy is, hogy a kamrán bejül egy mintatartóban helyezzük el a vizsgálandó mintát, melyet a mérés megkezdése előtt a kamra nyitása nélkül, mágnesek segítségével, egy tetővel lefedünk. Ekkor a mintatartóban keletkező toron akkumulációs térbe jutását megakadályozzuk. Az akkumulációs térben a toron lebomlik, így nem zavarja a radon-aktivitáskoncentráció mérését. A mérés során a pumpa folyamatosan működhet. A módszert a továbbiakban „lefedéses” módszerként tárgyalom.

5.4. A kidolgozott mérési eljárások ismertetése

Az előzőekben tárgyalt megfontolások alapján a mérést a következőekben leírt módon végezzük.

5.4.1. Folyamatos mérés

A megfelelően előkészített minta ismert tömegét akkumulációs kamrába mérjük, ügyelve arra, hogy annak pórustérfogata ne haladja meg az akkumulációs kamra teljes térfogatának 10%-át.

A mérések során az AlphaGUARD-ot 10min FLOW üzemmódban használjuk a pontosabb mérés érdekében, ill. minden mérés előtt és után radonmentes nitrogén gázzal átöblítjük azt, a detektor háttérének minimálisra csökkentése érdekében. Az átöblítés utáni aktivitáskoncentráció értéket (háttér) feljegyezzük, majd később a mért adatokat korrigáljuk azzal. Minden minta esetén három párhuzamos mérést végzünk a megfelelő pontosság elérése érdekében.

Folyamatos mérés esetén az 5.1.-1. ábrán vázolt rendszert a minta akkumulációs kamrába helyezését követően azonnal összerakjuk, majd a ventilátor bekapcsolása és a csapok nyitása után a pumpát $0,5 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ térfogatárammal indítjuk. A mérést néhány órán át (5-7 óra) végezzük, majd az adatokat szoftver segítségével kiolvassuk. A módszer magas Ra-226 tartalmú, magas emanációs tényezőjű és magas exhalációjú NORM anyagok esetén alkalmazható.

5.4.2. Szakaszos mérés

A szakaszos mérés során szakaszos mintavételt alkalmazunk, melynek esetén a megfelelően előkészített minta ismert mennyiségét akkumulációs kamrába zárjuk, a pontos időt feljegyezzük, majd megfelelő akkumulációs idő (néhány nap) letelte után a detektort a már

tárgyaltaknak megfelelően a kamrával összekötjük. A ventilátor bekapcsolása és a csapok nyitása után az pumpát elindítjuk $1 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ térfogatárammal. Az általam alkalmazott méreteken 10 perc után a teljes rendszerben homogén radon tér alakul ki. Ekkor a pumpát és a ventilátort kikapcsoljuk, a csapokat elzárjuk. A következő 10 perc elegendő a toron megfelelő mértékű lebomlásához. Az ezt követő 30 perc mérési eredményeit átlagolva megkapjuk a rendszerben lévő toronmentes radon-aktivitáskoncentrációt. A megfelelő kiértékelhetőség és a hibák elkerülése érdekében célszerű a mérést akkor indítani, amikor az AlphaGUARD kijelzőjén új érték jelenik meg, ami a műszer órája szerint minden egész 10 percben történik.

A megfelelő akkumulációs idő kiválasztása érdekében célszerű előzetes mérést végezni, esetleg gamma-spektrometriai mérési eredményekből következtetni arra. Érdemes először 2-3 napra eltenni a mintát. Olyan akkumulációs időt kell választani, amely alatt akkora aktivitáskoncentráció alakul ki az akkumulációs térben, amelyet a detektor már kellő pontossággal meg tud határozni (min. 500 Bq m^{-3} mért aktivitáskoncentráció érték elérése ajánlott).

A mért adatokat az előzőekkel analóg módon szoftver segítségével kiolvassuk. Mind a folyamatos, mind pedig a szakaszos módszer egyik előnye, hogy a minta roncsolás mentesen mérhető, így az akkumulációs kamra nitrogén gázzal történő átszellőztetése után újabb mérésre van lehetőség.

5.5. A számolás menete

Folyamatos mérés esetén a rendszerben exhalálódó radon, a minta egységnyi tömegére vonatkoztatott aktivitásának bomlással korrigált növekedését az akkumulációs idő függvényében ábrázoljuk.

$$A_{ft} = \frac{\Delta A_t}{K \cdot m} \quad (5.5.-1)$$

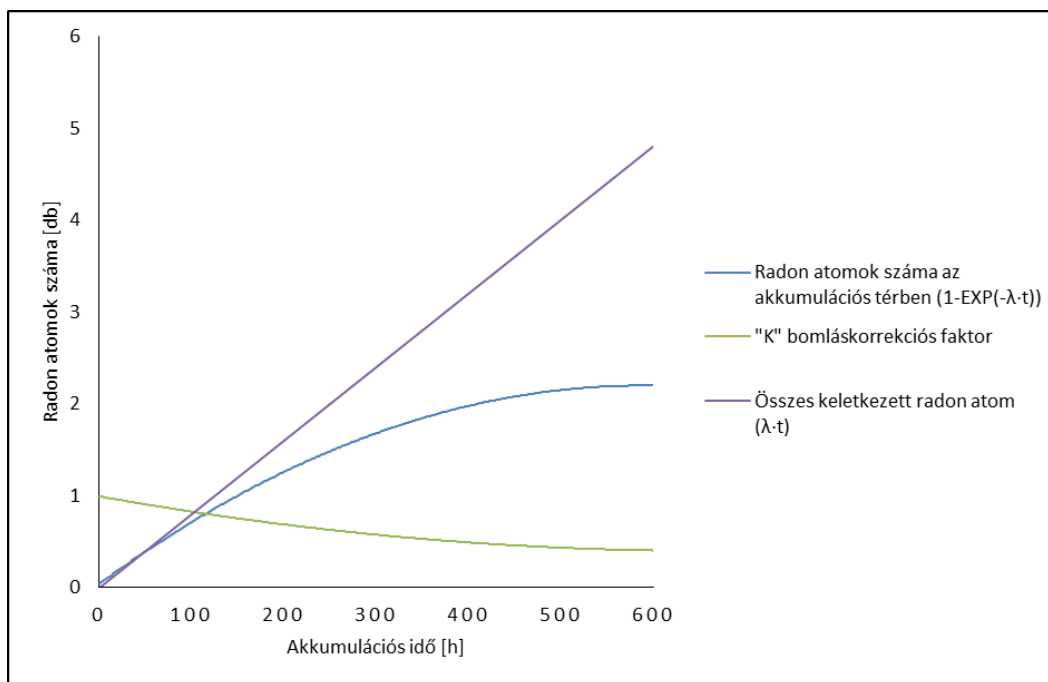
ahol:

- A_{ft} : az összes keletkezett radon fajlagos aktivitása a mérőtérfogatban, t időpontban [mBq kg^{-1}],
- ΔA : a radon aktivitása a teljes mérőtérfogatban t időpontban [mBq],
- K: a bomláskorrekciós faktor [-],
- m: a minta tömege [kg].

$$K = \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_{akk}}}{\lambda \cdot t_{akk}} \quad (5.5.-2)$$

Az (5.5.-2) képlet csak azt az esetet veszi figyelembe, amikor a radon fogyása csak a bomlásból származik. A szökésből származó fogyás (K_{eff}) figyelembe vételére a képlet a következőképpen módosul.

$$K_{eff} = \frac{1 - e^{-\lambda_{eff} \cdot t_{akk}}}{\lambda_{eff} \cdot t_{akk}} \quad (5.5.-3)$$



5.5.-1. ábra: A mérhető és az összes keletkezett radon atomok számának kapcsolata [13]

A kezdeti radonnövekményre egyenest illesztve, annak egyenletéből a szabadexhaláció számítható.

Szakaszos mintavétel esetén az exhaláció a rendszer aktivitáskoncentrációjának, térfogatának, az akkumulációs időnek, valamint a minta tömegének ismeretében a bomlással korrigálva a következőképpen számítható.

$$E = \frac{\Delta A}{K \cdot m \cdot t_{akk}} \quad (5.5.-4)$$

ahol:

- E: a fajlagos exhaláció [$\text{mBq kg}^{-1}\text{h}^{-1}$]

A minta Ra-226 aktivitáskoncentrációjának (gamma-spektroszkópiával meghatározható) ismeretében az emanációs tényező a következőképpen számítható.

$$\varepsilon = \frac{A_{Rn-222}}{A_{Ra-226}} = \frac{\frac{E \cdot K_{eq} \cdot t_{eq}}{1000}}{A_{Ra-226}} \quad (5.5.-5)$$

ahol:

- A_{Rn-222} : a radon egyensúlyi aktivitáskoncentrációja [$Bq \text{ kg}^{-1}$]
- A_{Ra-226} : a minta Ra-226 aktivitáskoncentrációja [$Bq \text{ kg}^{-1}$]
- t_{eq} : az egyensúlyi helyzet beállításához szükséges 27 nap (648 óra) [h],
- K_{eq} : az egyensúlyi állapothoz tartozó bomláskorrekciós faktor [-]. [13]

III. EREDMÉNYEK

6. A mérést befolyásoló tényezők

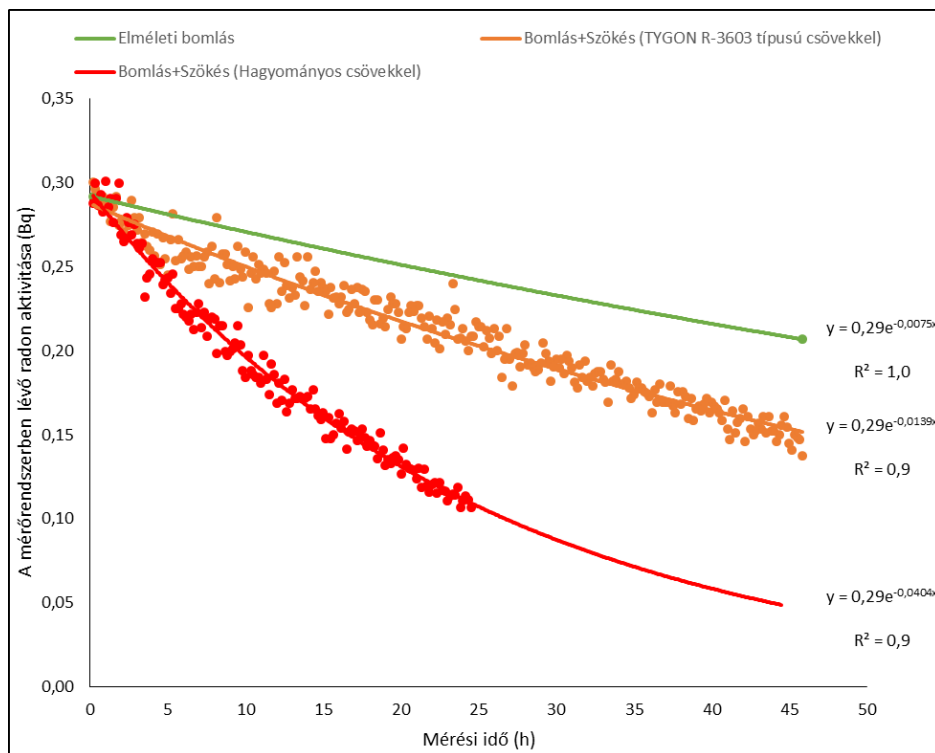
6.1. Visszadiffúzió

A visszadiffúzió meghatározásához folyamatos mintavételre lenne szükség, de a már említett elvi megfontolások (4.4.2-es fejezet) miatt egyszerűen csak biztosítjuk azokat a körülményeket (a minta pórústerfogata az akkumulációs kamra térfogatának maximum 10%-a, vagy megfelelően rövid akkumulációs idő), amelyek esetén a visszadiffúzió mérés technikai szempontból elhanyagolható.

6.2. Radon áteresztés

6.2.1. Mintavételi csövek radon áteresztési képességének vizsgálata

Az eredmények (6.2.-1. ábra) alapján látható, hogy folyamatos mintavétel esetén, a csöveken kiszökő radon mennyisége már néhány óra után is jelentős, mely a mérés hibáját nagymértékben növelheti. A radon szökését hagyományos szilikon csövek mellett speciális, laboratóriumi használatra ajánlott TYGON R-3603 típusú csövekkel [25] is meghatároztam, melyek esetén a szökés mértéke a hagyományos csövekével összevetve jelentősen alacsonyabbnak bizonyult. Azonban a kapott érték 24 óra elteltével szintén nem volt elhanyagolható, 14 %-os veszteséget jelentett.



6.2.1.-1. ábra: Radon szökés folyamatos mintavétel esetén

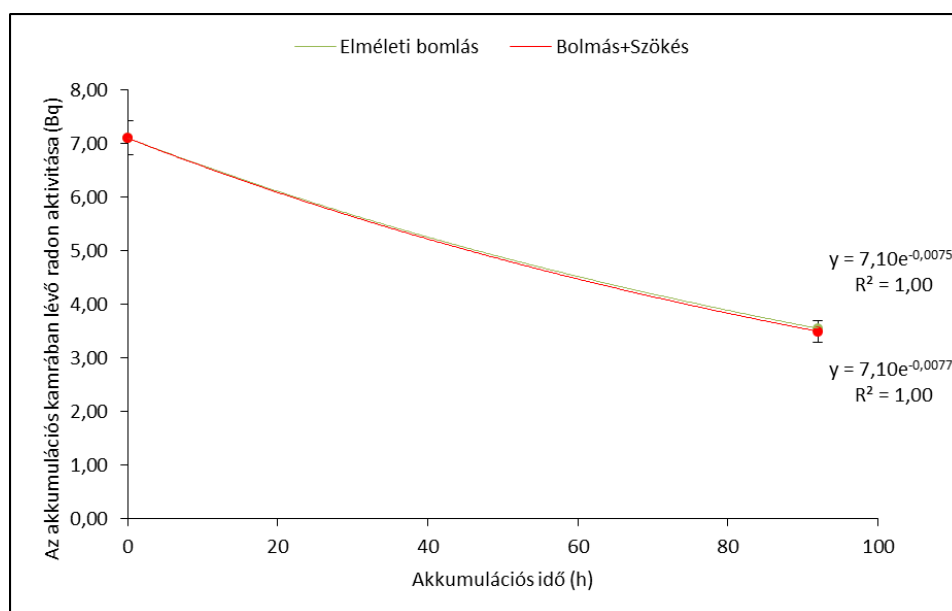
Megállapítások:

- A radon mintavétel közbeni kiszökésének minimálisra csökkentése érdekében a már említett TYGON R-3603 típusú csövek használata ajánlott.
- Habár a TYGON típusú csöveknek is mérhető áteresztése volt, a szakaszos mintavételi módszer ajánlott mérési időtartama alatt (kb. 1 óra, melyből a pumpa csak 10 percig működik) a csövek és illesztések radon áteresztése még nem számottevő, így nem szükséges a mérési eredmények korrigálása.
- A szökési vizsgálatok során kapott eredmények alapján folyamatos mintavétel alkalmazása nem célszerű, főleg a csöveken való jelentős szökés miatt.

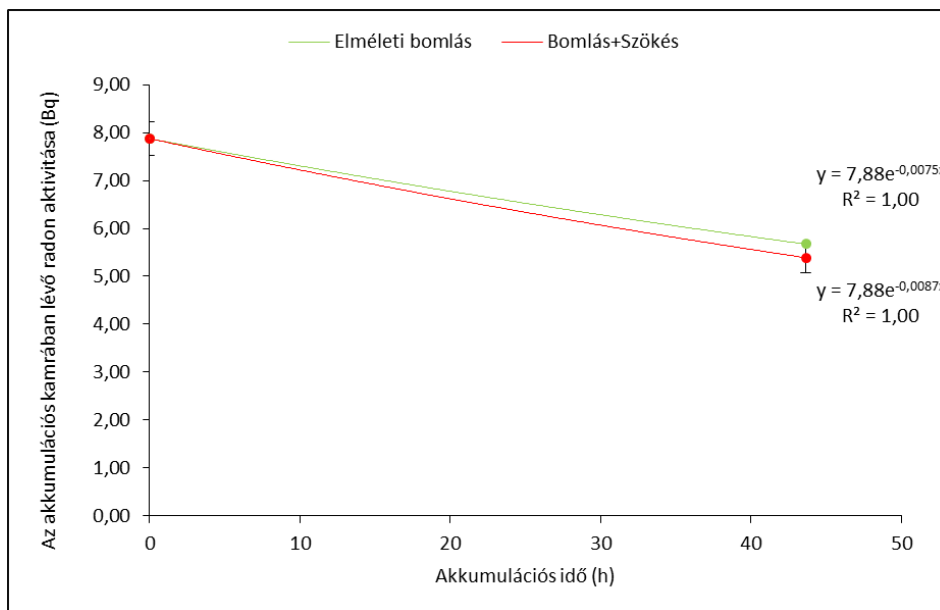
6.2.2. Akkumulációs kamra radon áteresztési képességének vizsgálata

Az akkumulációs mérések esetén, az előbbieken tárgyalt eredmények alapján már csak a szakaszos mintavétellel történő vizsgálati módszert alkalmaztam. A szökés vizsgálatát minden kialakított akkumulációs kamra esetén elvégeztem, hogy információt szerezzek a kialakítási mód megfelelőségéről.

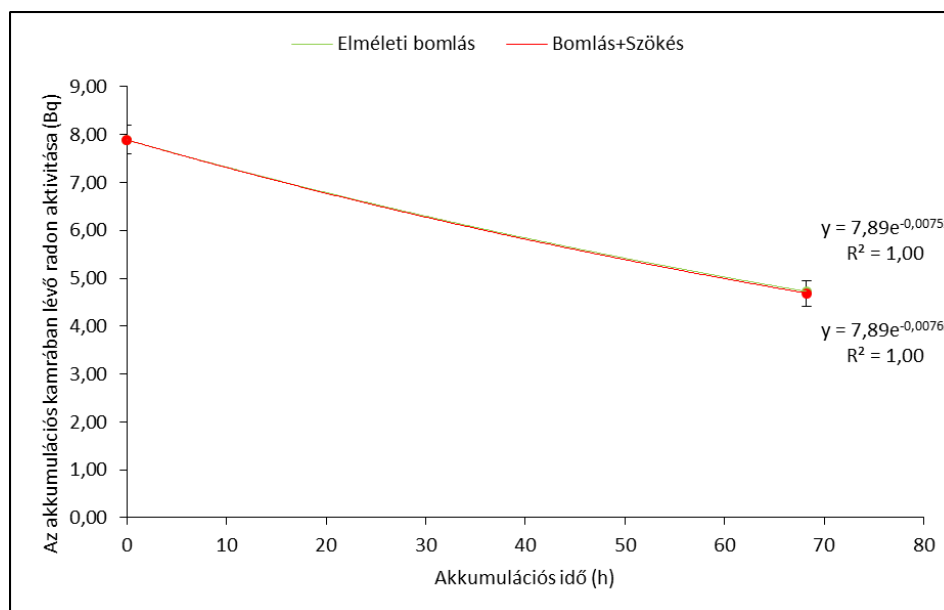
A vizsgálatok során kapott eredményeket átlagolva határoztam meg az egyes kamrák effektív bomlási állandóit, melyek azok „radonzáróságát” jellemzik. A következő három ábra a radon szökését szemlélteti egy akkumulációs kamra esetén.



6.2.2.-1. ábra: Az akkumulációs kamra radon áteresztése ($\lambda_{\text{eff}} = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$)



6.2.2.-2. ábra: Az akkumulációs kamra radon áteresztése ($\lambda_{\text{eff}} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$)



6.2.2.-3. ábra: Az akkumulációs kamra radon áteresztése ($\lambda_{\text{eff}} = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$)

A többi kamra esetén is hasonló eredményeket kaptam, az akkumulációs idő után számított elméleti aktivitás szinte minden esetben a mért aktivitás mérési bizonytalanságán belülre esett. Így akkor sem követnénk el nagy hibát, ha a szökést figyelmen kívül hagynánk, és csak a radon bomlási állandójával számolnánk. A többi kamra esetén mért effektív bomlási állandók ($7,7 \cdot 10^{-3} - 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$) eltérése a fent leírt kamra esetén mért effektív bomlási állandótól max. 4%, így a továbbiakban minden kamra esetén a fent említett kamra értékével számolhatunk.

A kiválasztott kamra esetén a mérőrendszer radon áteresztésének értékeit, az effektív bomlási állandókat és azok radon szökésre vonatkozó tényezőit folyamatos és szakaszos mintavételes módszer esetén a következő táblázat tartalmazza.

Mintavétel	Szökés helye	λ [h ⁻¹]	λ_{eff} [h ⁻¹]	λ_L [h ⁻¹]	Szökés [%]		
					Akkumulációs idő		
					8 h	24 h	48 h
Folyamatos	Hagyományos csövek+ Akkumulációs kamra	7,50·10 ⁻³	4,04·10 ⁻²	3,29·10 ⁻²	23,1	54,6	79,4
	TYGON R-3603 csövek + Akkumulációs kamra		1,39·10 ⁻²	6,40·10 ⁻³	5,0	14,2	26,3
Szakaszos	Akkumulációs kamra		8,00·10⁻³	5,00·10⁻⁴	0,4	1,1	2,1

6.2.2.-1. táblázat: A rendszer radon áteresztése

A szökés mértékét az elméleti bomlás során, adott idő után kapott aktivitásához viszonyítottam.

Megállapítások:

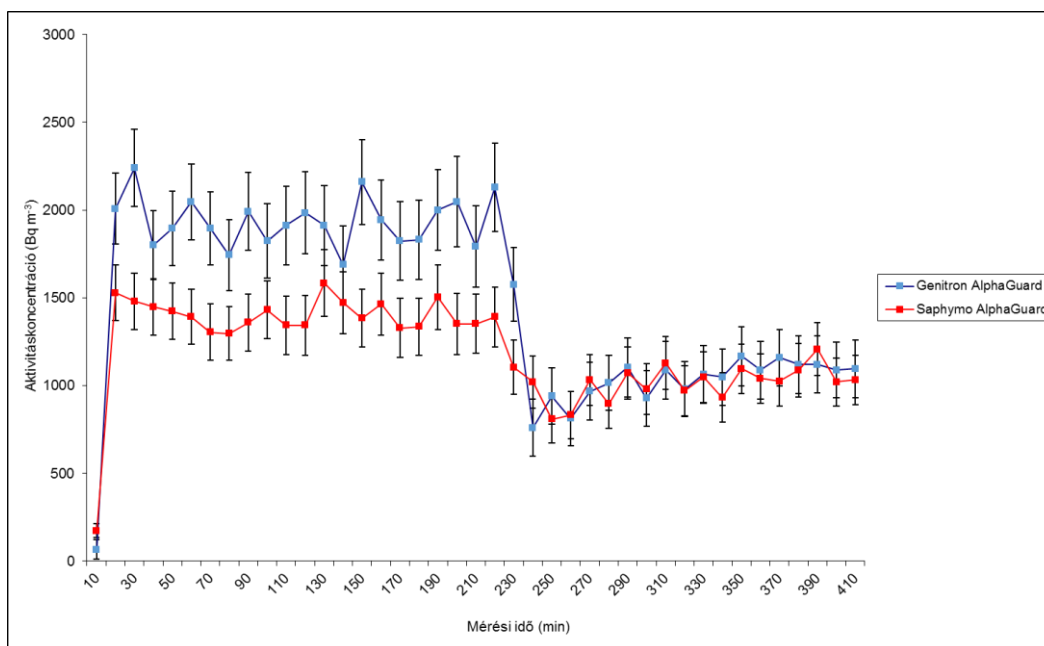
- Az eredmények tükrözik, hogy az általam kidolgozott módszer nem csak elméletben, de a gyakorlatban is működik, és alkalmas a radon szökésének meghatározására.
- Emellett alátámasztják azt a tényt, hogy a kamra kialakítása megfelelő.
- A bemutatott, a radon szökésének meghatározására szolgáló relatív mérés jelentős előnye, hogy nem igényel sztenderdet és másik műszert, illetve egyéb külső erőforrást.

Jövőbeli célunk új akkumulációs kamrák kifejlesztése, melyek szökését ezzel a módszerrel kívánjuk meghatározni.

6.3. A toron zavaró hatásának kiküszöbölése

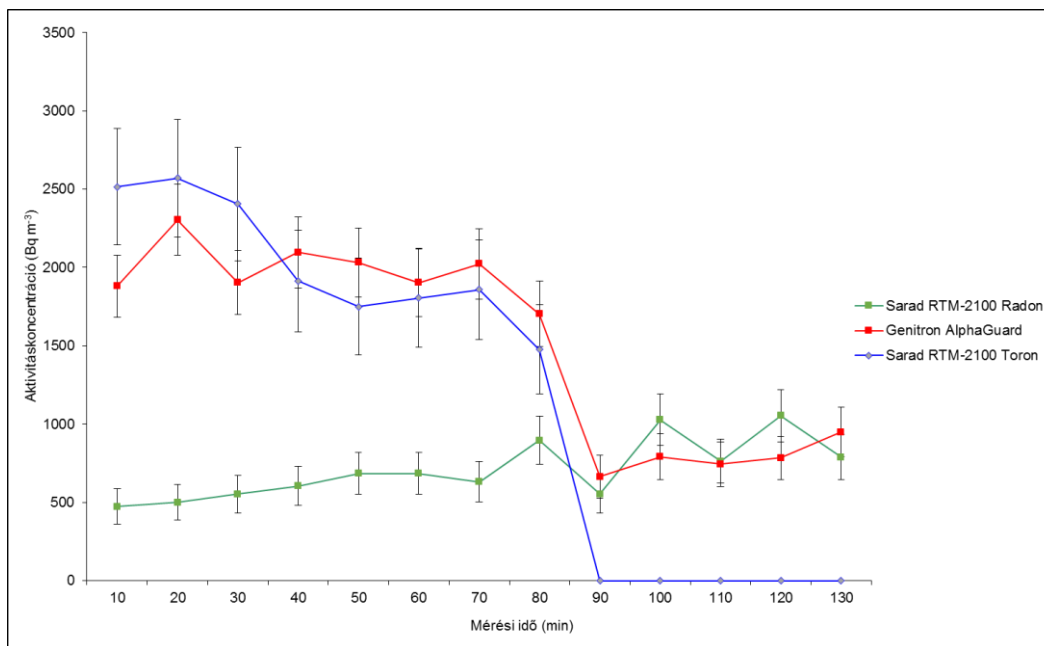
Az 6.3.-1. ábra eredményei kettő, sorba kapcsolt AlphaGUARD PQ2000PRO eredményét szemlélteti. Az eredmények azt mutatják, hogy a kamra után kapcsolt első detektor aktivitáskoncentráció értékei a pumpa működése közben magasabbak a második detektor által mért értékeknél. Ennek magyarázata az, hogy a mintából exhalálódó toron a második detektor eléréséig jelentős mértékben bomlik, annak rövid felezési ideje miatt. A pumpa és a csapok elzárása után mindkét detektor egyforma értéket mutat. Ezzel egyértelműen igazolható, hogy a

mérőrendszerben a radon tér homogén, mely feltétele a radonexhaláció pontos meghatározásának.



6.3.-1. ábra: A toron zavaró hatásának kiküszöbölése

Az 6.3.-2. ábrán látható, hogy a cirkuláció megszüntetése (pumpa és a csapok elzárása) után a mért aktivitáskoncentráció hirtelen jelentősen csökken, majd beáll egy adott értékre. Ez azzal a ténnyel magyarázható, miszerint a toron az elzárás utáni 10 percen szinte teljesen lebomlik (rövid felezési ideje miatt) a detektor térfogatban, majd az ezt követően mért aktivitáskoncentráció már csak a radontól származik. Ellenőrzés céljából a mérés során egy Sarad RTM-2100 típusú félvezető detektoros radon monitort is bekötöttem a rendszerbe. Ez a detektortípus radon és toron leányelemeinek alfa-energiája alapján képes megkülönböztetni a radont és a torontól. Az előző bekezdésben tárgyalt jelenség - bár kevésbé szembetűnő - itt is fennáll. Az AlphaGUARD által mért kezdeti (radon és toron) aktivitáskoncentrációnak akkorának kellene lennie, mint ami a Sarad RTM-2100 által külön-külön mért radon és toron aktivitáskoncentrációk szuperponálásából adódna. Ez esetben az AlphaGUARD eléréséhez a toronnak nagyobb utat kellett megtenni, amely alatt egy része elbomlott.



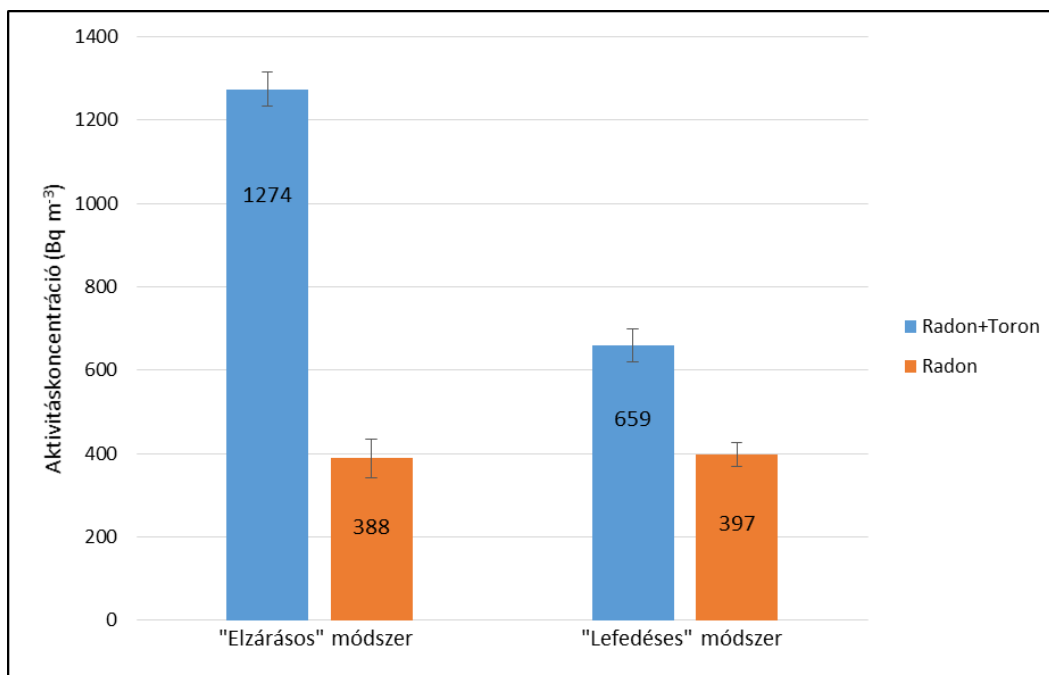
6.3.-2. ábra: A toron zavaró hatásának kiküszöbölése

Az 6.3.-4. ábra az 5.3.2-es fejezetben bemutatott „elzárásos” és a „lefedéses” toronmentes vizsgálati módszer eredményeit hasonlítja össze. Mintának vörösiszapot alkalmaztam, annak relatíve magas tórium és rádium tartalma miatt.



6.3.-3. ábra: A minta elrakási módja „elzárásos”, ill. „lefedéses” módszer esetén

Az eredményekből egyértelműen látszik, hogy a toronmentesen mért radon-aktivitáskoncentráció ugyanakkora mennyiségű, ugyanazon minta és azonos akkumulációs idő esetén közelítőleg egyforma mindkét módszernél. A lefedéses módszer esetén mért alacsonyabb „radon+toron” aktivitáskoncentráció azzal magyarázható, hogy a mintatartóban elhelyezett, ugyanakkora mennyiségű minta rétegvastagsága jóval nagyobb, mintha anélkül helyeznénk a kamrába. Ebből kifolyólag a keletkező toron nagy része még a mintatartóban lebomlik, kevesebb része jut ki az akkumulációs térbe.



6.3.-4. ábra: Az „elzárásos” és „lefedéses” módszer mérési eredményei

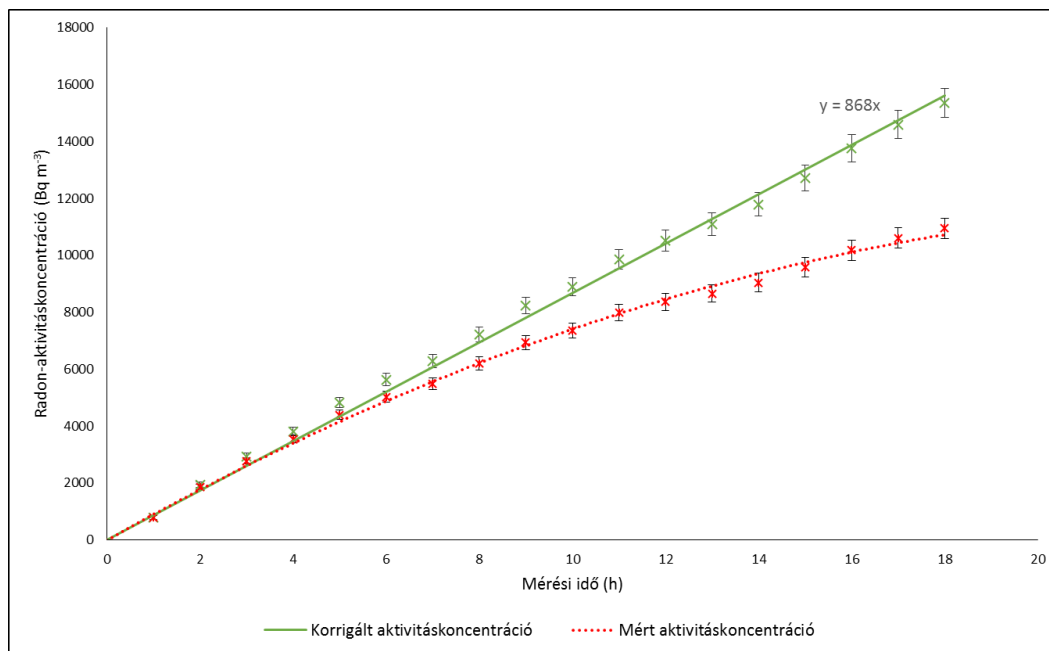
Radonexhaláció mérés szempontjából mindkét módszer használható, azonban a lefedéses módszernek lehetnek hátrányai az elzárásos módszerrel szemben. Egyrészt a mintatartó fedelének pontos illeszkedése nehezen kivitelezhető, így az abban keletkező toron egy része kijuthat az akkumulációs térbe, onnan pedig a detektorba. Másrészt a mérés befejezése után, új mérés elkezdése előtt az akkumulációs kamrát nitrogén gázzal alaposan át kell öblíteni, ami a tartóban elhelyezett minta viszonylag nagy rétegvastagsága miatt nehézkes. Ezen felül a mágneseknek is elég erősnek kell lenniük ahhoz, hogy a mintatartó fedelét az akkumulációs kamrán kívülről mozgathassuk. Az említett hibák egyszerűen kiküszöbölhetők, de a megfelelő kialakítási módszer kifejlesztése további kísérleteket igényel, melyek jelenleg is folyamatban vannak.

Levonható a következtetés, miszerint egyszerűbb kialakítása miatt célszerűbb az elzárásos módszer alkalmazása.

7. Az ajánlott mérési eljárás

A folyamatos mintavétel esetén a csövek radon áteresztését (λ_L) is figyelembe vevő K_{eff} bomláskorrekciós faktor (5.5.-3 egyenlet) meghatározható és alkalmazható (7.-1. ábra), viszont többek között a csövek alacsony radonzáró-képessége miatt kevésbé ajánlott.

Az 7.-1. ábrán látható, hogy a folyamatos mintavételes módszerrel vizsgált minta esetén a mérőrendszerben a bomláskorrekciós faktorral korrigált óránkénti radon-aktivitáskoncentráció növekmény 868 Bq m^{-3} . A mérést hagyományos csövekkel végeztem.



7.-1. ábra: Óránkénti átlagos radonnövekmény folyamatos mintavétel esetén

A 10 percenként kapott értékeket óránként átlagoltam a könnyebben áttekinthető szemléltetés érdekében. A bomláskorrekciós faktor számolásánál (5.5.-3. egyenlet) a hagyományos csövek radon áteresztését (6.2.2.-1. táblázat) is figyelembe vettem.

A mérés során kapott értékek tartalmazzák a minta Th-232 tartalmából eredő toron aktivitáskoncentrációját is, azonban az nincs jelentős befolyással a mérési eredményre. A toron egyensúlyi aktivitáskoncentrációja kb. 6-7 perc alatt ($t \sim 7T_{1/2}$) [26] beáll, így nem befolyásolja a görbe meredekségét.

Alacsony rádiumtartalmú és radonexhalációjú minták esetén a megfelelő aktivitáskoncentráció elérése érdekében hosszú mérési időt kell alkalmazni, mely során a szökés mértéke igen jelentős lehet, növelve ezzel a mérési pontatlanságot.

Emellett nedves minták esetén egy páramentesítő (CaCl_2 -dal töltött szűrő) alkalmazására is szükség van, mely a viszonylag hosszú mérési idő alatt eltömődhet, mely a

pumpa folyamatos működéséből adódó magasabb nyomás miatt a radon illesztési pontokon történő szökését eredményezheti.

A folyamatos mintavétel során a detektor hosszú idejű igénybevettsége miatt, annak leányelemekkel történő elszennyeződése jelentős lehet, mely hosszú távon a detektor érzékenységét csökkenti.

Az említett érveken felül folyamatos mérési módszer esetén egy minta mérése akár néhány napig is eltarthat, még a szakaszos mintavételes mérés során néhány napos akkumulációs idő után, viszonylag rövid mérési idő alatt akár több minta vizsgálata is kivitelezhető, így növelhető a mérési kapacitás. A mérést zavaró tényezők figyelembe vételével az 5.4.2. pontban tárgyalt szakaszos mintavételes módszer jól alkalmazható olyan detektorok esetén is, amelyek nem képesek a toron diszkriminációjára. A kidolgozott eljárás gyakorlati szempontból igen jelentősnek mondható, ugyanis nem szükséges a legújabb mérőműszerek beszerzése, mellyel költségkímélő fejlesztést tehetünk lehetővé az anyaintézet és más kutatóintézetek számára. A módszerhez szerkesztettem egy olyan mérési táblázatot, melyben az összes, méréshez és számoláshoz szükséges paraméter rögzítésre kerül, ezáltal biztosítva az eljárás rutinszerű használatát. Az említett táblázatot az I. Melléklet tartalmazza.

8. Radonexhalációs mérési eredmények értékelése

A kidolgozott mérési eljárást alkalmaztam különböző vörösiszap, agyaggal kevert vörösiszap, salak, valamint beton minták radonexhalációjának mérésére. Egy vörösiszap minta mérési eredményeit a következő táblázatban tüntettem fel.

Mért adatok									
Minta jele RMs	Ra-226 [Bq kg ⁻¹]	±Hiba [Bq kg ⁻¹]	Minta tömege [kg]	Kamra jele	Mérőtérfogat [dm ³]	Elzárás időpontja	Mintavétel időpontja	ΔC _{Rn} [Bq m ⁻³]	±Hiba [Bq m ⁻³]
Háttér	-	-	-	-	-	-	-	8	3
1	361,7	54,7	0,3	C1-I	1,443	2014.10.01 8:50	2014.10.03 8:10	1787	195
2	361,7	54,7	0,3	C1-II	1,443	2014.10.01 8:50	2014.10.03 11:00	1818	211
3	361,7	54,7	0,3	C1-III	1,443	2014.10.01 8:50	2014.10.03 13:20	1888	228
Számított adatok									
Minta jele	Akk. idő [h]	Akkumulációs bomlás korrekciós faktor „K”	ΔA _{Rn} [Bq]	±Hiba [Bq]	E _{Rn} [mBq kg ⁻¹ h ⁻¹]	±Hiba [mBq kg ⁻¹ h ⁻¹]	Emanációs tényező [%]	±Hiba [%]	
Háttér	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	47,33	0,8328	3,08	0,33	217	23	7,88	1,19	
2	50,17	0,8241	3,17	0,36	211	24	7,64	1,16	
3	52,50	0,8170	3,32	0,40	211	25	7,65	1,16	

8.-1. táblázat: Vörösiszap minta mérési eredményei

A párhuzamos mérési eredmények kismértékű eltérése egyértelműen bizonyítja, hogy a mérés reprodukálható, melyet szinte kivétel nélkül minden minta esetén tapasztaltam. Ebből kifolyólag a mérési módszer validáltnak mondható. A kidolgozott módszert számos NORM minta vizsgálatára alkalmaztuk, melyeket a teljesség igénye nélkül a 8.-2. táblázatban soroltam fel.

Minta típus	Minta jel	Hőkezelés [°C]	E_{Rn} [mBq kg ⁻¹ h ⁻¹]	C_{Ra-226} [Bq kg ⁻¹]	ε [%]
Vörösiszap	RM _s	105	210,7 ± 14,0	361,7 ± 54,7	7,6 ± 1,1
	VSI-01	105	74,6 ± 7,4	-	-
	VSI-02	200	102,7 ± 9,5	-	-
	VSI-04	400	83,9 ± 8,0	-	-
	VSI-06	600	57,9 ± 7,2	-	-
	VSI-08	800	34,7 ± 5,4	-	-
	VSI-10	1000	16,4 ± 3,2	-	-
	VSI-12	1200	6,9 ± 3,1	-	-
Agyag-vörösiszap keverék	A-VSI-01	105	40,5 ± 3,7	-	-
	A-VSI-02	200	28,6 ± 3,3	-	-
	A-VSI-04	400	32,0 ± 3,4	-	-
	A-VSI-06	600	28,7 ± 3,3	-	-
	A-VSI-08	800	15,6 ± 2,4	-	-
	A-VSI-10	1000	3,2 ± 1,4	-	-
Beton	C-1	105	30,0 ± 3,8	17,9 ± 1,7	22,0 ± 2,1
	C-2	105	31,1 ± 5,2	21,5 ± 1,9	19,3 ± 1,7
	C-4	105	31,5 ± 4,8	26,8 ± 2,4	15,5 ± 1,4
	C-6	105	28,6 ± 4,6	19,5 ± 12,7	19,2 ± 12,5
	C-7	105	33,2 ± 5,3	21,9 ± 13,5	19,9 ± 12,3
	C-8	105	37,6 ± 5,4	27,6 ± 15,0	17,9 ± 9,7
	C-9	105	36,9 ± 5,7	33,2 ± 16,3	14,6 ± 7,2
	C-10	105	29,3 ± 5,0	31,8 ± 16,1	12,1 ± 6,1
	C-11	105	29,3 ± 4,9	24,1 ± 2,0	15,9 ± 1,3
	C-12	105	27,9 ± 4,8	28,3 ± 2,6	12,9 ± 1,2
Salak	GrS	105	1,7 ± 0,7	30,2 ± 16,5	0,7 ± 0,4
	BrS	105	7,9 ± 4,4	24,5 ± 11,2	4,2 ± 1,9
	BIS	105	0,8 ± 0,4	26,2 ± 15,1	0,4 ± 0,2
	VESA _s	105	4498,9 ± 283,4	5655,4 ± 389,0	10,4 ± 0,7

8.-2. táblázat: A lemért minták eredményei

A számolást a (5.5.-3); (5.5.-4); (5.5.-5) egyenletek alapján, a hibaszámolást az V. Melléklet alapján végeztem.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS

A tapasztalatok alapján a munkámban kidolgozott, NORM anyagok radonexhalációjának mérésére alkalmas akkumulációs módszer fő zavaró tényezői a visszadiffúzió, a radon mérőrendszerből történő szökése és a toron mérészavaró hatása.

A visszadiffúziós tényező folyamatos mintavétellel ugyan meghatározható lenne, azonban elvi megfontolásból célszerű inkább olyan körülményeket biztosítani (alacsony akkumulációs idő, kis mintavastagság), melyek esetén a visszadiffúzió méréstechnikai szempontból elhanyagolható.

Az akkumulációs kamrák és a mérés során felhasznált csövek radonzárásának vizsgálatára kidolgozott módszer nem csak elméletben, de gyakorlatban is nagyon jól működött. A mérési eredmények nagymértékben meghatározták a folyamatos, ill. a szakaszos mintavételes módszer közötti választást.

Ugyan a bomláskorrektíós faktor folyamatos mintavétel esetén is jól alkalmazható a megfelelő tényezők figyelembevételével, azonban a rendszer csöveinek nagymértékű radon áteresztése, valamint a detektor és a pumpa hosszú idejű igénybevettsége (mely azok kontaminációjához vezet) miatt alkalmazása nem célszerű. Ezzel szemben az általam készített akkumulációs kamrák áteresztése jóval alacsonyabb a vizsgált csövek áteresztésénél, így szakaszos mintavétel során a radon szökése nem okoz számottevő problémát, a számolás során alkalmazott effektív bomlási állandóhoz csak csekély mértékben járul hozzá. Emellett a megfelelően pontos eredményhez egy minta esetén legalább három párhuzamos mérés szükséges. Ahhoz, hogy a radon elegendően pontosan mérhető aktivitáskoncentrációban legyen jelen, egyes minták esetén akár néhány napos akkumulációs időre is szükség lehet. Szakaszos mintavétel esetén egyszerre akár több minta is elrakható hosszabb akkumulációs időre, majd ezek vizsgálata viszonylag rövid mérési idő alatt elvégezhető, így a mérési kapacitás növelhető. Emellett a rövid idejű cirkuláltatással jelentősen csökkenthető a radon főleg csöveken keresztül, illetve csekélyebb mértékben az illesztéseken történő elszökése.

Az eredmények rámutattak arra is, hogy a mérőrendszer felépítése során a lehetőségeknek megfelelően ügyelni kell a jó radonzáró-képességű csövek alkalmazására mind folyamatos, mind szakaszos mintavétel esetén. A vizsgált TYGON-3603 típusú speciális csövek radon áteresztése a hagyományos csövekéhez képest jóval alacsonyabb. Emiatt ennek a csőtípusnak a használata javasolt a továbbiakban.

A toron mérészavaró hatásának megszüntetésére az elzárásos módszer egyértelműen alkalmasnak bizonyult, melynek gyakorlati szempontból igen nagy jelentőség tulajdonítható.

Ezáltal a mérési eljárás olyan detektorokkal is alkalmazható, melyek nem képesek a toron diszkriminációjára. Nem szükséges a legújabb műszerek megvásárlása, így költségkímélő fejlesztést tehetünk lehetővé az anyaintézet és más kutatóintézetek számára egyaránt.

Az eredmények alapján a felvázolt mérőrendszer nagy mintamennyiség esetén alkalmas NORM anyagok radonexhalációjának meghatározására a viszonylag rövid mérési idő miatti nagy mérési kapacitásnak köszönhetően. Ebből kifolyólag a módszer lehetőséget nyújt nagyobb, akár nemzetközi felmérések elvégzésére is.

A kidolgozott mérési eljárással vizsgált párhuzamos minták fajlagos exhalációinak csekély eltérése által a mérés reprodukálhatósága bizonyított, így az validáltnak mondható. Néhány napos akkumulációs idő után egy minta mérése nagyjából egy óra alatt elvégezhető. A kidolgozott módszerrel számos NORM mintát vizsgáltunk.

Összességében elmondható, hogy a módszer nagyon jól használható, praktikus, azonban nagyon komplex, sokparaméteres mérési eljárás.

III. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Kanyár B., Somlai J., Szabó D.L.: Környezeti sugárzások, radioökológia, Veszprémi Egyetem, Veszprém, (1996)
- [2] Austalian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM), Radiation Protection Series Publication, No. 15, (2008)
- [3] Jobbágy V., NORM anyagok radionuklid koncentrációját és emanációját befolyásoló paraméterek vizsgálata építőipari felhasználhatóság szempontjából, Doktori (PhD) értekezés, Pannon Egyetem, Veszprém, (2007)
- [4] 47/2003. (VIII. 8.) ESzCsM rendelet a radioaktív hulladékok átmeneti tárolásának és végleges elhelyezésének egyes kérdéseiről, valamint az ipari tevékenységek során bedúsuló, a természetben előforduló radioaktív anyagok sugár-egészségügyi kérdéseiről
- [5] C. Richard, Cothorn, James E., Smith, Jr., Environmental Radon, Environmental Science Research, Vol. 35, Plenum Press, (1987)
- [6] Fábíán F., Építőanyagok radiológiai minősítése, Hallgatói gyakorlat mérési útmutatója, Pannon Egyetem, Veszprém, (2012)
- [7] Y. S. Cheng, T. R. Chen, H. C. Yeh, J. Bigu, R. Holub, K. Tu, E.O Knutson, R. Falk, Intercomparison of activity size distribution of thoron progeny and a mixture of radon and thoron progeny, Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 51, 59-78, (2000)
- [8] Hámori K., Nukleáris mérés technika radioaktív gázok vizsgálatára, Doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem, Debrecen, (2006)
- [9] A. Sakoda, Y. Ishimori, K. Yamaoka, A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 69, 1422-1435, (2011)
- [10] R. Shafi ur, Matiullah, R. Shakeel ur, S. Rahman, Studying Rn-222 exhalation rate from soil and sand samples using CR-39 detector, Radiation Measurements, Vol. 41, 708-713, (2006), DOI:10.1016/j.radmeas.2006.03.005 ISBN: 1350-4487 pp.708-713

- [11] Federics T., Radontól származó sugárterhelés felmérése Bakonycsernyében, Diplomadolgozat, Pannon Egyetem, (2009)
- [12] Official Journal of the European Union, L13, Vol. 57, (2014), ISSN: 1977-0677
- [13] dr. Sas Z., Építőanyagok (és egyéb porózus anyagok) radonemanációjának és radonexhalációjának szimultán meghatározása, Oktatási segédanyag, Pannon Egyetem, Veszprém, (2013/2014), ISBN: 978-963-396-015-8
- [14] Szeiler G., A radon és leánytermékei okozta sugárterhelés vizsgálata barlangban, épületekben, Doktori (PhD) értekezés, Pannon Egyetem, (2012)
- [15] Sas Z., Építőanyagok radonemanációját és exhalációját befolyásoló paraméterek vizsgálata, Doktori (PhD) értekezés, Pannon Egyetem, (2012)
- [16] User Manual: Durridge Radon Instrumentation, RAD7 Radon Detector
- [17] P. Ujić, I. Čeliković, A. Kandić, Z. Žunić, Standardization and difficulties of the thoron exhalation rate measurements using an accumulation chamber, Radiation Measurements, Vol. 43, 1396-1401, (2008)
- [18] Y. Tan, D. Xiao, X. Liu, Q. Tang, Measuring radon exhalation rate by tracing the radon concentration of ventilation-type accumulation chamber, Radiation Measurements, Vol. 58, 33-36, (2013)
- [19] I. Csige, Zs. Szabó, Cs. Szabó, Experimental technique to measure thoron generation rate of building material samples using RAD7 detector, Radiation Measurements, Vol. 59, 201-204, (2013), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.07.003>
- [20] Y. Tan, D. Xiao, A simple model for automatically measuring radon exhalation rate from medium surface, Radiation Measurements, Vol. 64, 44-47, (2014)
- [21] C. Cosma, F. Dancea, T. Jurcut, D. Ristoiu, Determination of ^{222}Rn emanation fraction and diffusion coefficient in concrete using accumulation chambers and the influence of humidity and radium distribution, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 54, 467-473, (2001)
- [22] N. M. Hassan, M. Hosoda, K. Iwaoka, A. Sorimachi, M. Janik, C. Kranrod, S. K. Sahoo, T. Ishikawa, H. Yonehara, M. Fukushima, S. Tokonami, Simultaneous Measurement of

Radon and Thoron Released from Building Materials Used in Japan, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 1, 404-407, (2011)

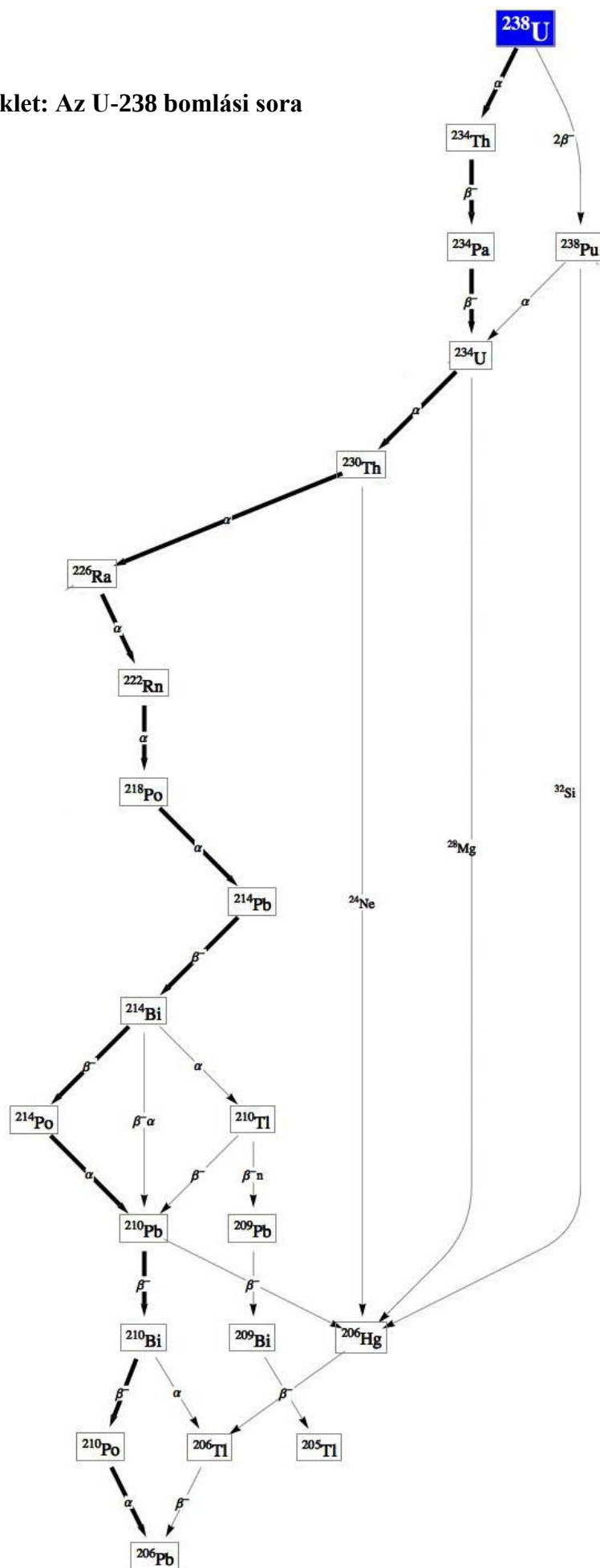
- [23] Saphymo GmbH, AlphaGUARD Radon Monitor DataSHEET
- [24] Saphymo GmbH hivatalos weboldala, www.saphymo.com
- [25] Saint-Gobain Performance Plastics, TYGON R-3603 Laboratory and Vacuum Tubing DataSHEET
- [26] M. I. Al-Jarallah, F. Abu-Jarad, F.-ur-Rehman, Determination of radon exhalation rates from tiles using active and passive techniques, Radiation Measurements, Vol. 34, 491-495, (2001)

IV. MELLÉKLETEK

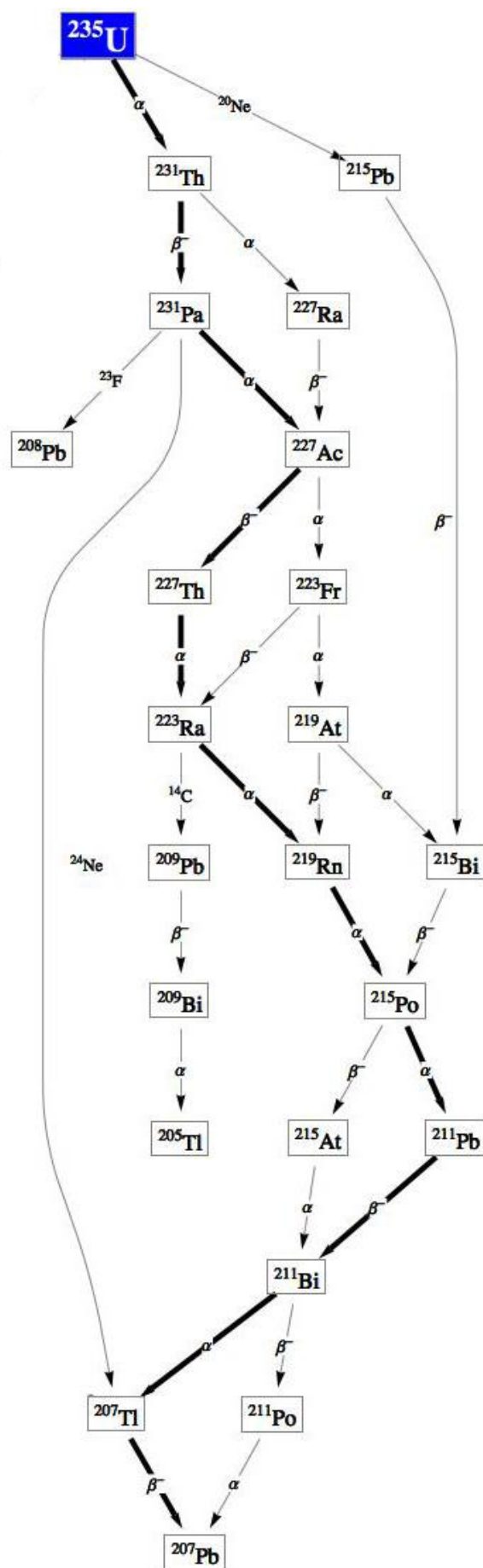
I. Melléklet: Radonexhalációs mérési táblázat

Mért adatok									
Minta jele	Ra-226 [Bq kg ⁻¹]	± Hiba [Bq kg ⁻¹]	Minta tömege [kg]	Kamra jele	Mérőtérfogat [dm ³]	Elzárás időpontja	Mintavétel időpontja	ΔC _{Rn} [Bq m ⁻³]	± Hiba [Bq m ⁻³]
Háttér									
1									
2									
3									
Számított adatok									
Minta jele	Akkumulációs idő [h]	Akkumulációs bomláskorrekciós faktor „K”		ΔA _{Rn} [Bq]	± Hiba [Bq]	E _{Rn} [mBq kg ⁻¹ h ⁻¹]	± Hiba [mBq kg ⁻¹ h ⁻¹]	Emanációs tényező [-]	± Hiba [-]
Háttér									
1									
2									
3									

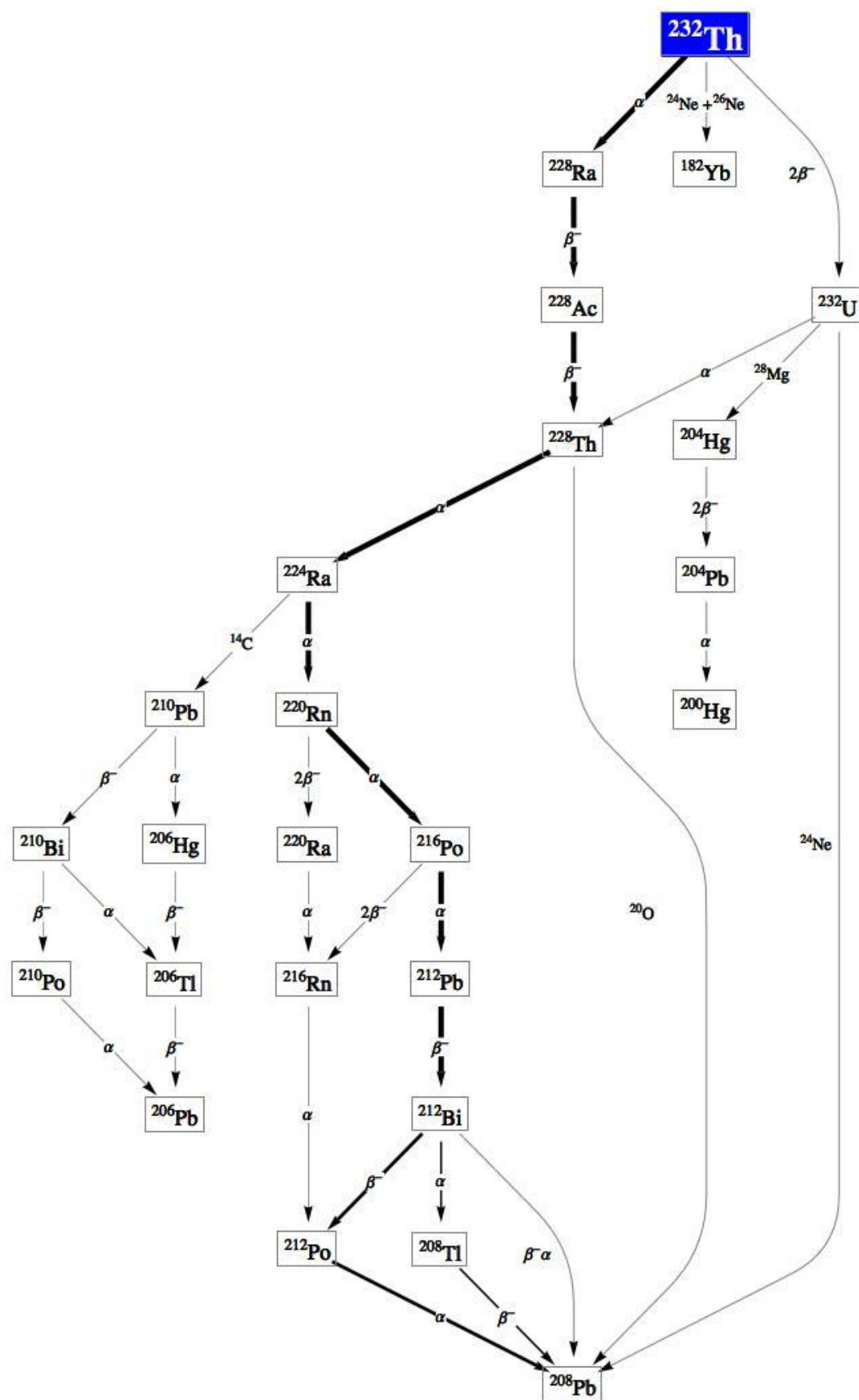
II. Melléklet: Az U-238 bomlási sora



III. Melléklet: Az U-235 bomlási sora



IV. Melléklet: A Th-232 bomlási sora



V. Melléklet: Hibaterjedés számítása

Legyen $F = F(X, Y, Z, \dots)$

$$S_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 \cdot S_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 \cdot S_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 \cdot S_z^2 + \dots}$$

Ahol S_i : szórás

Hibaterjedés számításához használatos műveletek:

$$\text{a.)} \quad F = x + y \quad \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right) = 1 \quad \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right) = 1$$

$$S_F = \sqrt{1 \cdot S_x^2 + 1 \cdot S_y^2} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

$$\text{b.)} \quad F = x - y \quad \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right) = 1 \quad \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right) = -1$$

$$S_F = \sqrt{1 \cdot S_x^2 + 1 \cdot S_y^2} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

$$\text{c.)} \quad F = x \cdot y \quad \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right) = y \quad \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right) = x$$

$$S_F = \sqrt{y^2 \cdot S_x^2 + x^2 \cdot S_y^2}$$

$$\text{d.)} \quad F = x / y \quad \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right) = \frac{1}{y} \quad \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right) = -\frac{x}{y^2}$$

$$S_F = \sqrt{\frac{S_x^2}{y^2} + \frac{x^2}{y^4} \cdot S_y^2} = \frac{1}{y^2} \sqrt{y^2 \cdot S_x^2 + x^2 \cdot S_y^2}$$

$$\text{e.)} \quad F = a \cdot x + y \quad \text{ahol } a: \text{ konstans érték}$$

$$S_F = \sqrt{a^2 \cdot S_x^2 + 1 \cdot S_y^2} = \sqrt{S_x^2 \cdot a^2 + S_y^2}$$

V. FÜGGELÉKEK

1. Függelék: Kutatási feladat

- A radonexhaláció mérésre alkalmas akkumulációs módszer elméleti alapjainak elsajátítása
Az akkumulációs módszer tanulmányozását követően, irodalmi adatok alapján megterveztem a mérőrendszer egyes elemeit, majd elkészítettem a mérőrendszert.
- A mérőrendszer alkalmazhatóságának ellenőrzése, az eredményeket befolyásoló tényezők azonosítása, majd a mérést zavaró hatások kiküszöbölése
Az azonosított mérést zavaró hatások: visszadiffúzió, a rendszer egyes elemeinek radon áteresztése, a radon mellett gyakran előforduló toron mérést zavaró hatása.

Visszadiffúzió

Irodalmi adatok alapján megoldást találtam a visszadiffúziós hatás kiküszöbölésére. Bizonyos mérési paraméterek biztosításával mérés technikai szempontból a visszadiffúziós hatás elhanyagolható, így annak zavaró hatása egyszerűen elkerülhető.

Radon áteresztés

Mérési eljárást dolgoztam ki a rendszer egyes elemeinek radon áteresztésének vizsgálatára, melynek lényege a radon elméleti bomlásának összehasonlítása a radon aktivitásának valós csökkenésével. A kapott effektív bomlási állandókkal a zavaró hatás kiküszöbölhető. Az eljárás lehetőséget nyújt egyéb rendszerek radonzáróságának vizsgálatára is.

Toron

Módszert dolgoztam ki a toron zavaró hatásának kiküszöbölésére, annak diszkriminációjára nem alkalmas mérőműszerek esetén. A kidolgozott eljárás a toron rövid felezési idejéből adódik, mely során a mintát egyszerűen el kell választani a detektortértől anélkül, hogy a radon aktivitáskoncentráció megváltozna. Az eljárás olyan detektorok esetén is lehetőséget nyújt toron mentes mérésre, melyek nem képesek annak radontól való megkülönböztetésére. A módszer gyakorlati szempontból igen jelentősnek mondható, ugyanis nem szükséges a legújabb mérőműszerek beszerzése, ezáltal költségkímélő fejlesztést tesz lehetővé.

- Radonexhalációs mérési protokoll kidolgozása
A mérési eredmények alapján egy, az említett tényezők zavaró hatásának figyelembe vételére alkalmas mérési és számítási protokollt dolgoztam ki, melyet számos NORM mintával kipróbáltam. Az eljárás rutinszerű használatának biztosítására egy mérési táblázatot készítettem, mely a mérés, valamint a számolás során szükséges összes adatot tartalmazza.

2. Függelék: Diplomadolgozat

Cím:

NORM anyagok radonexhalációjának akkumulációs módszerrel történő mérése kapcsán felmerülő problémák megoldása

Témavezető:

dr. Sas Zoltán

Részletes tématerv/tartalomjegyzék:

Tartalomjegyzék.....	5
Ábrajegyzék	8
Táblázatjegyzék	9
Jelölésjegyzék	10
Bevezetés	11
I. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÁS	13
1. Természetes eredetű háttérugárzások	13
1.1. Kozmikus sugárzás.....	13
1.2. Földkérgi (terresztiális) sugárzás.....	13
2. NORM, TENORM anyagok	15
3. A radon és a toron	16
3.1. Szekuláris egyensúly	18
3.2. Radon kijutása szilárd mátrixból	19
3.2.1. Emanáció	20
3.2.2. Radontranszport a pórustérben	22
3.2.3. Exhaláció	23
3.3. Egészségügyi hatások.....	24
3.4. Jogi szabályozás	24
4. A radon és toron meghatározási lehetőségei	25
4.1. Közvetlen módszer	25
4.2. Közvetett módszer	25
4.3. Pillanatnyi, folyamatos mintavétel és integrális mérések	26
4.4. Akkumulációs módszer	27
4.4.1. Az akkumulációs módszer zavaró hatásai	27
4.4.2. Visszadiffúzió.....	28
4.4.3. Toron	29
II. KÍSÉRLETI RÉSZ.....	30
5. Radonexhaláció mérés akkumulációs módszerrel.....	30
5.1. A vizsgálatok során használt mérőrendszer bemutatása	30
5.1.1. AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitor	31
5.1.2. Akkumulációs kamrák.....	33
5.2. Mintaelőkészítés.....	34
5.3. Az akkumulációs mérést zavaró tényezők.....	34
5.3.1. Radon áteresztés és „visszadiffúzió”	34
5.3.2. A toron mérészavaró hatása.....	37
5.4. A kidolgozott mérési eljárások ismertetése	38
5.4.1. Folyamatos mérés	38
5.4.2. Szakaszos mérés	38
5.5. A számolás menete	40
6. Toron mérés AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitorral	42
6.1. Toron forrás készítése	42
6.2. A korrekciós faktorok meghatározására alkalmazott mérőrendszer.....	45
6.3. A forrás alkalmazhatóságának ellenőrzése (aktivitás, radonmentesség, stabilitás)	46
6.4. Az AlphaGUARD PQ2000PRO összemérése a toron mérésére alkalmas RAD7 típusú radon-toron monitorral	47
6.5. Az akkumulációs kamra méretének és az áramlási sebességnek a mérésre gyakorolt hatásából eredő korrekciós faktorok meghatározása	48
6.5.1. A mérés menete	48

6.5.2.	A számolás menete	50
6.6.	Az alkalmazott mintavastagság hatása a mérési eredményekre	50
6.7.	A radonexhalációs mérési módszer kibővítése toron méréssel	52
III.	EREDMÉNYEK	54
7.	A mérést befolyásoló tényezők	54
7.1.	Visszadiffúzió	54
7.2.	Radon áteresztés	54
7.2.1.	Mintavételi csövek radon áteresztési képességének vizsgálata	54
7.2.2.	Akkumulációs kamra radon áteresztési képességének vizsgálata	55
7.3.	A toron zavaró hatásának kiküszöbölése	58
8.	Az ajánlott mérési eljárás	62
9.	Radonexhalációs mérési eredmények értékelése	63
10.	Toron mérés AlphaGUARD PQ2000PRO folyamatos radon monitorral	66
10.1.	A forrás alkalmazhatóságának ellenőrzése	66
10.1.1.	Radonmentesség	66
10.1.2.	Stabilitás	67
10.2.	A források aktivitásának mérési módszere	68
10.3.	AlphaGUARD PQ2000PRO és RAD7 folyamatos radon monitorok összemérése	69
10.4.	Az akkumulációs kamra méretének és az áramlási sebességnek a mérésre gyakorolt hatásából eredő korrekciós faktorok meghatározása AlphaGUARD radon monitor használata esetén	71
10.5.	A mintavastagság hatása a mérési eredményekre	74
11.	Toronexhalációs mérési eredmények értékelése	75
IV.	ÖSSZEFOGLALÁS	78
V.	IRODALOMJEGYZÉK	81
VI.	PUBLIKÁCIÓS LISTA	84
VII.	MELLÉKLETEK	86

Diplomadolgozatomban a TDK dolgozatban tárgyalt radonexhalációs mérési módszer továbbfejlesztését tűztem ki célul.

Két fő részből áll, az első részében a TDK dolgozatomban bemutatott, a radonexhaláció mérésére alkalmas akkumulációs mérési módszert, valamint a mérést zavaró tényezőket és azok kiküszöbölését tárgyalom. Az eredmények alapján bemutatom a kidolgozott mérési eljárást, valamint értékelem a mérési eredményeket. Ahhoz, hogy a dolgozat jól érthető és egész legyen, szükséges az említett témakör részletes tárgyalása.

Diplomadolgozatom második részében a kidolgozott radonexhalációs mérési módszert fejleszttem tovább. A radonexhalációs mérések során a toron zavaró tényezőként szerepel, azonban a toron exhalációja a mérőrendszerrel meghatározható. A toron mérése rövid felezési ideje miatt méréstechnikai szempontból igen bonyolult feladat. A mérési eredményeket befolyásoló tényezők azonosításával, majd a rájuk jellemző korrekciós faktorok kísérleti meghatározásával lehetőség van a toronexhaláció valós értékének közelítésére. A mérésekhez szükség van egy megfelelő toron forrás elkészítésére, valamint a radonexhalációs mérőrendszer megfelelő átalakítására. Az eredmények alapján a radonexhalációs mérési módszert kibővítettem toronexhaláció méréssel, lehetővé téve a két izotóp azonos mérőrendszerben és egy időben történő, egymás melletti meghatározását, megduplázva a mérési eredményeket.